

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

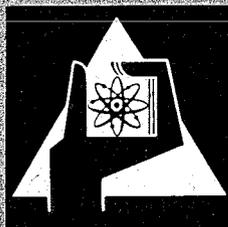
Mai 1972

KFK 1377

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und zerstörungsfreie Nachuntersuchung
des UO_2 - PuO_2 - Brennstab-Bündels DFR-350

D. Geithoff, K. Kummerer



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Mai 1972

KFK 1377

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und zerstörungsfreie Nachuntersuchung des
U₂-Pu₂-Brennstab-Bündels DFR-350

von

D. Geithoff, K. Kummerer

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

VORBEREITUNG

Der in diesem Bericht beschriebene Bestrahlungsversuch basiert auf der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum Karlsruhe und in der Nuklear-Industrie sowie auf den vertragsgemäß korrekten Dienstleistungen der U.K.A.E.A. 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 Diagramme und Abbildungen sowie Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes.

10. Mai 1972

D. Geithoff, K. Kummerer

KURZFASSUNG

Der im Rahmen der Brennstabentwicklung für schnelle Brutreaktoren durchgeführte Bestrahlungsversuch DFR-350 umfaßt die Bestrahlung eines 77-Stab-Bündels mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff und Edelstahlhüllmaterial unter NaK-Kühlung im schnellen Fluß des Dounreay Fast Reactors. Die Auslegung der Brennstäbe hinsichtlich der Materialzusammensetzung und der Geometrie sowie die betriebliche Beanspruchung im Bestrahlungseinsatz stellt eine sehr weitgehende Simulation der Verhältnisse in einem prototypischen schnellen Brutreaktor wie dem SNR-300 dar. Bei einem PuO_2 -Anteil von 20 Gew.-% betrug die Brennstoffschmierdichte 80 % der theoretischen Dichte. Die Stabhüllen aus hochwärmfestem austenitischem Edelstahl hatten eine Wandstärke von 0,38 mm. Der Durchmesser der Brennstäbe war genau 6,0 mm. Hinsichtlich der Stablänge konnte die Simulation echter Schnellbrüter-Brennstäbe nicht durchgeführt werden, wohl aber etwa im Verhältnis zwischen Brennstoffvolumen und Spaltgasraum. An eine Brennstofflänge von 29 cm schließt ein axialer UO_2 -Brutmantel sowie ein Gasplenum an.

Die betriebliche Beanspruchung während der Bestrahlung ist durch eine maximale Stableistung von 450 W/cm sowie durch eine maximale Hüllwandtemperatur von 630 °C gekennzeichnet. Der Zielabbrand in diesem Versuch betrug 50 000 MWd/t Metall.

Das Bündel wurde mit gleichartigen Brennstäben verschiedener Herkunft beschickt. 38 Stäbe stammten von dem CEA, Frankreich, 16 Stäbe von den belgischen Vertragspartnern des Debenelux-Brüter-Projektes und 23 Stäbe von deutscher Seite. Alle 77 Stäbe haben den Zielabbrand ohne betriebliche Störungen oder äußerlich erkennbare Schäden erreicht.

Der vorliegende Bericht stellt eine Dokumentation dieses Bestrahlungsversuches dar. Er bezieht sich in erster Linie auf die Stäbe des deutschen Beitrages. Die ersten Abschnitte bringen ausführlich die Konstruktion und Spezifikationen der Stäbe einschließlich der Auslegungsrechnungen und Sicherheitsbetrachtungen. Die Herstellung der 30 deutschen Stäbe, von denen 23 Stück zur Bestrahlung kamen, erfolgte durch die Firma Alkem. Die weiteren Kapitel des Berichtes umfassen den Ablauf der Bestrahlung im DFR, die Nachuntersuchung des ganzen Bündels und schließlich die zerstörungsfreie Nachuntersuchung der 23 bestrahlten deutschen Stäbe. Die wichtigsten der in den Schlußfolgerungen zusammengefaßten Ergebnisse bestehen darin, daß alle Stäbe das Abbrandziel erreicht haben und daß die Stäbe mit dem Hüllmaterial der Werkstoff-Nr. 1.4988 eine deutlich geringere Durchmesseraufweitung aufweisen als die Stäbe mit Hüllwerkstoff-Nr. 1.4961.

A B S T R A C T

Within the fuel pin development for fast breeder reactors the irradiation experiment DFR-350 comprises the irradiation of a 77-pin-bundle containing UO_2 - PuO_2 fuel and stainless steel cladding. The experiment was performed in the fast flux of the Dounreay Fast Reactor with NaK-cooling. The design of the fuel pins with respect of composition and geometry as well as of operational conditions was highly representative for a prototype fast reactor like the SNR-300. The fuel smear density was 80 % of the theoretical value, the PuO_2 -content being 20 w/o. The stainless steel cladding had a wall thickness of 0.38 mm, the pin outside diameter was exactly 6.0 mm. As far as the length of the pins is concerned, it was not possible to simulate real fast breeder conditions with exception of the ratio between fuel volume and fission gas plenum. The pin included a fuel length of 29 cm and an axial blanket region of UO_2 in conjunction with the gas plenum.

The operational conditions during irradiation are characterized by a maximum linear rod power of 450 watts/cm and a maximum cladding temperature of 630°C. The target burnup was 50,000 megawatt days per metric ton of heavy metal atoms.

The bundle was equipped with nearly identical pins of different origin. CEA, France, provided 38 pins, while 16 pins were provided by the Belgian partners of the Debenelux-Breeder-Project and 23 pins by the German side. All 77 pins have reached the target burnup without any functional disturbances or externally visible damage.

This report is a documentation of this irradiation experiment and refers mainly to the pins of the German contribution. The first sections of the report deal with the design and specifications of the pins including detailed design calculations and safety considerations. The fabrication of 30 pins - where 23 of them really were introduced into the bundle - was carried out by the Alkem company. The further parts of the report pertain to the actual irradiation in the DFR, the post irradiation examination of the whole bundle and, finally, to the nondestructive examination of the 23 German pins. The most important conclusions out of all the results are, that(1) all the pins have reached the scheduled target burnup and (2) the pins with cladding of 1.4988 stainless steel show a markedly smaller diameter increase than those pins with 1.4961-cladding.

Inhalt:

	<u>Seite</u>
1. Einführung	1
2. Aufgabenstellung und Versuchsziel	3
3. Auslegung der Bündelbestrahlung	5
4. Konstruktion der Brennstäbe und Spezifikationen	7
4.1 Der Aufbau der Brennstäbe	7
4.2 Brennstoffspezifikationen	7
4.3 Spezifikationen für den Brutstoff	11
4.4 Spezifikationen für die Hülle	12
4.5 Spezifikationen für den Brennstab	13
5. Auslegungsrechnungen	16
5.1 Lokale Wärmeentbindung	16
5.2 Wärmeleistung pro Stab	16
5.3 Zielabbrand	18
5.4 Kühlmittelfluß	19
5.5 Temperaturverteilung im Kühlmittel	19
5.6 Temperaturen in der Hüllwand	20
5.7 Temperatursprung Hülle-Brennstoff	22
5.8 Brennstoffzentraltemperatur	23
6. Sicherheitsbetrachtungen	23
6.1 Gasdruck im Brennstab	23
6.2 Spannungen in der Stabhülle	24
6.3 Kriechdehnung in der Hülle	25
6.4 Verträglichkeit der Hülle mit NaK	29
6.5 Maximal zulässiger Abbrand	29
7. Herstellung der Brennstäbe	30
7.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung	31
7.2 Herstellung der UO_2 - PuO_2 -Tabletten	34
7.3 Prüfungen an den Tabletten	36
7.4 Statistik für die UO_2 - PuO_2 -Tabletten	44
7.5 Herstellung und Prüfung der Brutstoff-Tabletten	49
7.6 Hüll- und Strukturmaterial	51
7.7 Tablettensäulen	54
7.8 Fertigung der Brennstäbe	57
7.9 Prüfungen an den fertigen Brennstäben	61

8. Bestrahlungseinrichtung	66
9. Ablauf der Bestrahlung	71
9.1 Bestrahlungszeit und Reaktorzyklen	71
9.2 Neutronenfluß und -fluenz	71
9.3 Spezifische Leistung und Stabileistung	78
9.4 Kühlmittel-Bedingungen	83
9.5 Abbrand	86
10. Nachuntersuchung des Bündels	89
10.1 Röntgendurchleuchtung	89
10.2 Dampf-Reinigung	94
10.3 Visuelle Inspektion und Außenvermessung des Mantelrohres, Radon-Analyse	94
10.4 Demontage	95
10.5 Visuelle Inspektion des offenen Stabbündels	96
10.6 Stabbündel-Innenvermessung	96
10.7 Einzelstabextraktion und Reinigung	104
10.8 Untersuchung der Abstandshalter	107
11. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der GFK-Stäbe	107
11.1 Visuelle Beobachtung	109
11.2 Röntgendurchleuchtung	109
11.3 Äußere Vermessung und Stabgewicht	119
11.4 Gamma-Profile	124
12. Schlußfolgerungen	134
Literatur	135
Liste der Tabellen	136
Liste der Abbildungen	137
Anhang 1: Konstruktionszeichnungen für den Brennstab	139
Anhang 2: Tablettenlisten	147
Anhang 3: Datenübersicht für die fertigen Brennstäbe	155
Anhang 4: Stabbegleitkarte für den Stab G 2	157
Anhang 5: Diagramme für die Stabdurchmesser	163

1. Einführung

Die Entwicklungsarbeiten für Brennelemente schneller Brutreaktoren haben Schwerpunkte in verschiedenen Klassen von Bestrahlungsexperimenten. Für ganze Brennstäbe kann man etwa folgende Stufen unterscheiden:

- Bestrahlung von Stabprüflingen im thermischen Reaktor
- Bestrahlung von Einzelstäben im schnellen Neutronenfluß
- Bestrahlung eines Stabbündels im schnellen Fluß

Diese logische Sequenz weist die Bündelbestrahlung als Abschluß einer anwendungsorientierten Brennstabforschung aus und gibt ihr gleichzeitig den Charakter eines Beweistests (performance test).

Ausgehend von Anregungen und Vorschlägen im Rahmen der mehrere Jahre bestehenden Euratom-Assoziation des Karlsruher Brüterprojektes wurde eine Bündelbestrahlung in einem schnellen Reaktor bereits 1965 erstmals ins Auge gefaßt. Die diesbezüglichen Verhandlungen mit der APDA⁺⁾ über einen Einsatz im Fermi-Reaktor in den USA wurden aber gegenstandslos, als im Herbst 1966 ein Betriebsstörfall den Reaktor für etwa 2 Jahre lahmlegte. Schon vorher waren Verhandlungen aufgenommen worden über eine Bestrahlung von Einzelstäben (Trefoil-Einsätze) im Dounreay Fast Reactor (DFR) in Schottland/Großbritannien. Sie gewannen nach dem Fermi-Unfall sofort größte Aktualität. Im Januar 1967 kam das Angebot der UKAEA⁺⁺⁾ , einen Bündelplatz im zentralen Hexagon des DFR ab etwa Sommer 1968 für Nicht-UKAEA-Interessenten bereitzustellen. Das Angebot war an die Adresse von Euratom gerichtet. Da aus dem Euratom-Bereich mehrere Interessenten auftraten, mußte ein Weg gefunden werden, die Vorschläge und Wünsche zu integrieren. Es wurde Euratom-intern die Einigung erzielt, daß diese erste Bündelbestrahlung im DFR mit einheitlichen "prototypisch" ausgelegten Stäben beschickt werden sollten, wobei die beiden Schnellbrütergruppen des CEA⁺⁺⁺⁾ Frankreich und der GFK⁺⁺⁺⁺⁾ / Deutschland zusammenwirken sollten. Diese Zusammenarbeit hatte ihren Schwerpunkt bei der Auslegung der Brennstäbe und hinsichtlich des Terminplanes. Es wurden nahezu identische Spezifikationen festgelegt und weiterhin beschlossen, die von UKAEA bereits in mehreren Versuchen erprobte 77-Stabbündel-Konfiguration zu verwenden. Das CEA sollte

+) Atomic Power Development Associates, Detroit, Mich., USA

++) United Kingdom Atomic Energy Authority, London

+++) Commissariat à l'Energie Atomique, Paris

++++) Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe

in diesem gemeinsamen Bündel 38 Brennstäbe, die deutsche Seite mit ihren Partnern aus Belgien und der Industrie zusammen 39 Stäbe bereitstellen.

Nach diesem Grundsatzbeschuß wurde auf unserer Seite intern die Zuständigkeit und das weitere Vorgehen wie folgt geregelt:

- GFK und Belgonucleaire stellen gemeinsame und identische Stabspezifikationen auf, unter genauer Berücksichtigung der auf den Bau des Prototypreaktors ausgerichteten Industriewünsche.
- GFK stellt 23 Stäbe bei, Belgonucleaire liefert die restlichen 16 Stäbe für unsere Bündelhälfte.
- Die Federführung hinsichtlich der Verhandlungen mit UKAEA über Termine und sachliche Entscheidungen liegt bei GFK.
- Die zerstörungsfreie Nachuntersuchung aller 39 Stäbe wird größtenteils in Dounreay gemeinsam durchgeführt.
- Zur zerstörenden Nachuntersuchung wurden die GFK-Stäbe nach Karlsruhe und die BN-Stäbe nach Mol transportiert.

Auf deutscher Seite ist noch die wesentliche sachliche Beteiligung der Firmen Siemens und Interatom an diesem Unternehmen zu betonen. Seit Abschluß des Debenelux-Abkommens über die Vorbereitungen zum Bau des SNR-300 und der entsprechenden Formierung der Industriegruppen im Jahre 1969 wurde diese Beteiligung von der Fa. Interatom allein wahrgenommen.

Dieser KFK-Bericht faßt alle Einzelheiten über die GFK-Stäbe zusammen. Er beginnt mit der Aufgabenstellung und der Versuchsauslegung, beschreibt Spezifikationen und Herstellung der Prüflinge sowie den tatsächlichen Bestrahlungsablauf und stellt schließlich die Nachuntersuchung des Bündels und die zerstörungsfreie Untersuchung der GFK-Stäbe - soweit sie in Dounreay unmittelbar ausgeführt wurde - 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 1967 bis 1971, wobei erste Überlegungen in das Jahr 1966 zurückreichen und die abschließende Zusammenfassung und Auswertung Ende 1971/Anfang 1972 erfolgte. In diesem Zeitraum von mehr als 5 Jahren haben sich viele Personen in den verschiedensten Arbeitsbe-

reichen damit befaßt. In der nachfolgenden Übersicht ist der Zeitablauf grob dargestellt, außerdem sind die für jeden Teilabschnitt hauptverantwortlichen Stellen bzw. Personen angegeben:

Zeitraum	Teilarbeit	Institution und Hauptbeteil.
1966/67	Vorüberlegungen, Verhandlungen mit UKAEA und Partnern	IAR, Kummerer, Karsten
Juni 1968	Vertrag mit UKAEA	GFK/Euratom
1967/68	Spezifikationen	IAR, Karsten, Borkowetz, Kummerer, Laue
1968	Herstellung der Stäbe	Fa. Alkem/Leopoldshafen
26.1.1969 bis 20.4.1970	Bestrahlung im DFR	DERE ⁺)
1969/70	Organisation und Betreuung der Bestrahlung	IAR, Karsten, Borkowetz IMF, Geithoff
1970/71	Organisation und Betreuung der Nachuntersuchung	IMF, Geithoff
1970/71	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	DERE
1971/ Anfang 1972	Auswertung, Zusammenfassung und Dokumentation	IMF, Geithoff, Kummerer

Der ganze Bestrahlungsversuch bekam von der UKAEA die Kurzbezeichnung DFR-350.

2. Aufgabenstellung und Versuchsziel

In der Bündelbestrahlung DFR-350 kamen Brennstäbe mit UO_2 - PuO_2 -Mischoxid zum Einsatz. Im Aufbau der Prüflinge selbst sowie in den Bestrahlungsbedingungen wurde eine weitgehende Simulation der Verhältnisse bei Brennstäben in schnellen Na-gekühlten Reaktoren angestrebt. Insbesondere sollte realisiert werden

⁺) Dounreay Experimental Reactor Establishment

- ein integraler Stabaufbau mit Brennstoffzone, wenigstens einer axialen Brutzone und Spaltgasplenum
- ein Brennstoffdurchmesser um 6 mm
- ein hochlegierter austenitischer Edelstahl als Hüllwerkstoff
- ein Brennstoffgemisch mit repräsentativer UO_2 - PuO_2 -Zusammensetzung
- eine maximale Stableistung von mindestens 450 Watt/cm
- eine maximale Hüllwandtemperatur von ca. $630^\circ C$
- Kühlung durch fließendes Natrium
- ein Abbrand über 50 000 MWd/tM
- eine schnelle Neutronenfluenz von wenigstens $2 \cdot 10^{22}$ n/cm².

Die wesentlichen Unterschiede im Vergleich zu echten Schnellbrüter-Brennstäben liegen in folgenden Beschränkungen:

- Die Stablänge ist geringer, in der Längenverteilung ist der Axialbrutmantel nur einfach vertreten.
- Wegen des deutlich kleineren schnellen Neutronenflusses im DFR muß die gewünschte Stableistung durch hohe U-235-Anreicherung erreicht werden. Daher findet kaum internes Brüten im Brennstoff statt.
- Die Neutronenschädigung der Metallhülle ist etwas anders. Einerseits ist der Neutronenfluß niedriger, andererseits das Spektrum härter. Dies muß durch Korrekturen bei der Versuchsauswertung berücksichtigt werden.
- Die Kühlung der Stäbe erfolgt mit NaK und zwar in der Strömungsrichtung von oben nach unten.

Die Untersuchungsziele während der Bestrahlung und bei der zerstörungsfreien Nachuntersuchung sind durch folgende Fragestellungen gegeben:

- Bleiben die Brennstäbe bis zum Zielabbrand intakt ?
- Wie ändert sich die äußere Geometrie, erfolgt insbesondere eine Hüllaufweitung ?

- Verändert sich die Länge der Brennstoffsäule ?

Der Bündelbestrahlungsversuch DFR-350 ist ein wichtiger Schritt im Rahmen der Projektierung und Entwicklung eines Schnellbrüterkraftwerkes. Der entsprechende Bewilligungsbescheid des Wissenschaftsministeriums vom 9.11.1966 macht der GFK zur Auflage, die

"Bestrahlung von mindestens 30 Prototypbrennstäben bis zu einem Abbrand von mindestens 50 000 Mwd/t mit schnellen Neutronen im Natrium"

zu bearbeiten.

3. Auslegung der Bündelbestrahlung

Die 39 "Debenelux"-Stäbe im Verband des 77-Stabbündels haben gleichen Aufbau und gleiche äußere Abmessungen. Bei der Auslegung der 23 GFK-Stäbe gibt es nur eine Variante, nämlich hinsichtlich des Hüllmaterials. Von den insgesamt 30 herzustellenden Brennstäben (23 für den Einsatz, 7 als Reserve) wurden jeweils zur Hälfte als Hüllmaterial vorgesehen die austenitischen Edelstähle

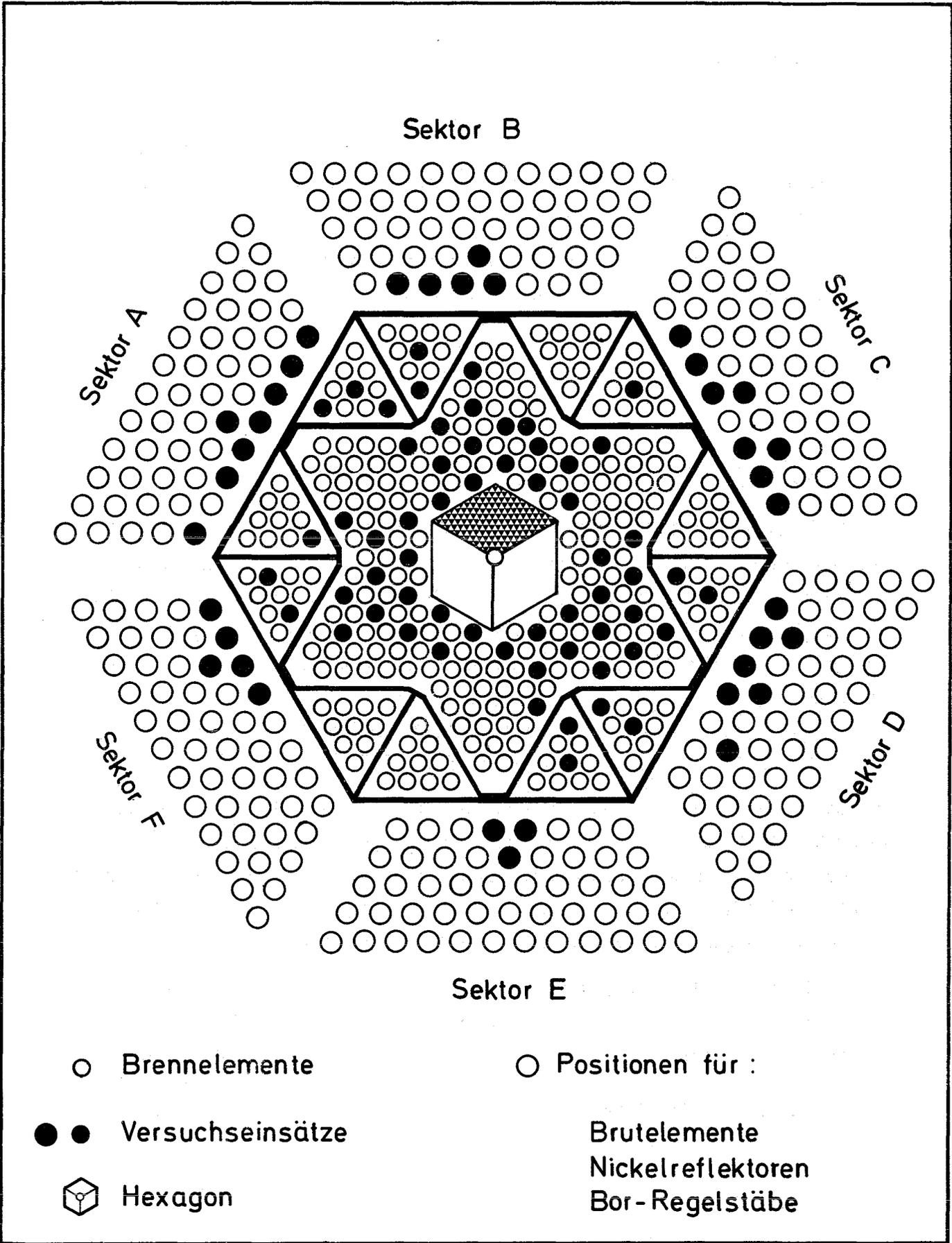
- X8 Cr Ni Mo V Nb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4988
- X8 Cr Ni Nb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4961.

Ausgehend von detaillierten Vorüberlegungen [1] ist die Auslegung des Versuches in internen Niederschriften zusammengestellt worden [2].

Die Bestrahlung fand im zentralen Hexagon des DFR statt. Das 77-Stabbündel besetzte dort einen der 3 Plätze mit rautenförmigem Querschnitt, Abb. 1.

Die Bestrahlungsbedingungen waren festgelegt worden wie folgt:

- Maximale Stableistung, nominal 450 W/cm
- Maximale Hüllwandtemperatur, nominal 630 °C
- Bestrahlungszeit 4 DFR-Perioden
zu je 55 Tagen bei 60 MWth
- Zielabbrand, Mittelwert 48 000 Mwd/t Oxid



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Querschnitt durch den
Dounreay Fast Reactor

Abb. 1

4. Konstruktion der Brennstäbe und Spezifikationen

Dieser Abschnitt bringt eine Zusammenfassung aller Festlegungen für die Konstruktion, die Spezifikationen einschließlich der der Bestrahlung vorausgehenden Prüfungen, wie sie ausführlich in [2] beschrieben sind.

4.1 Der Aufbau der Brennstäbe

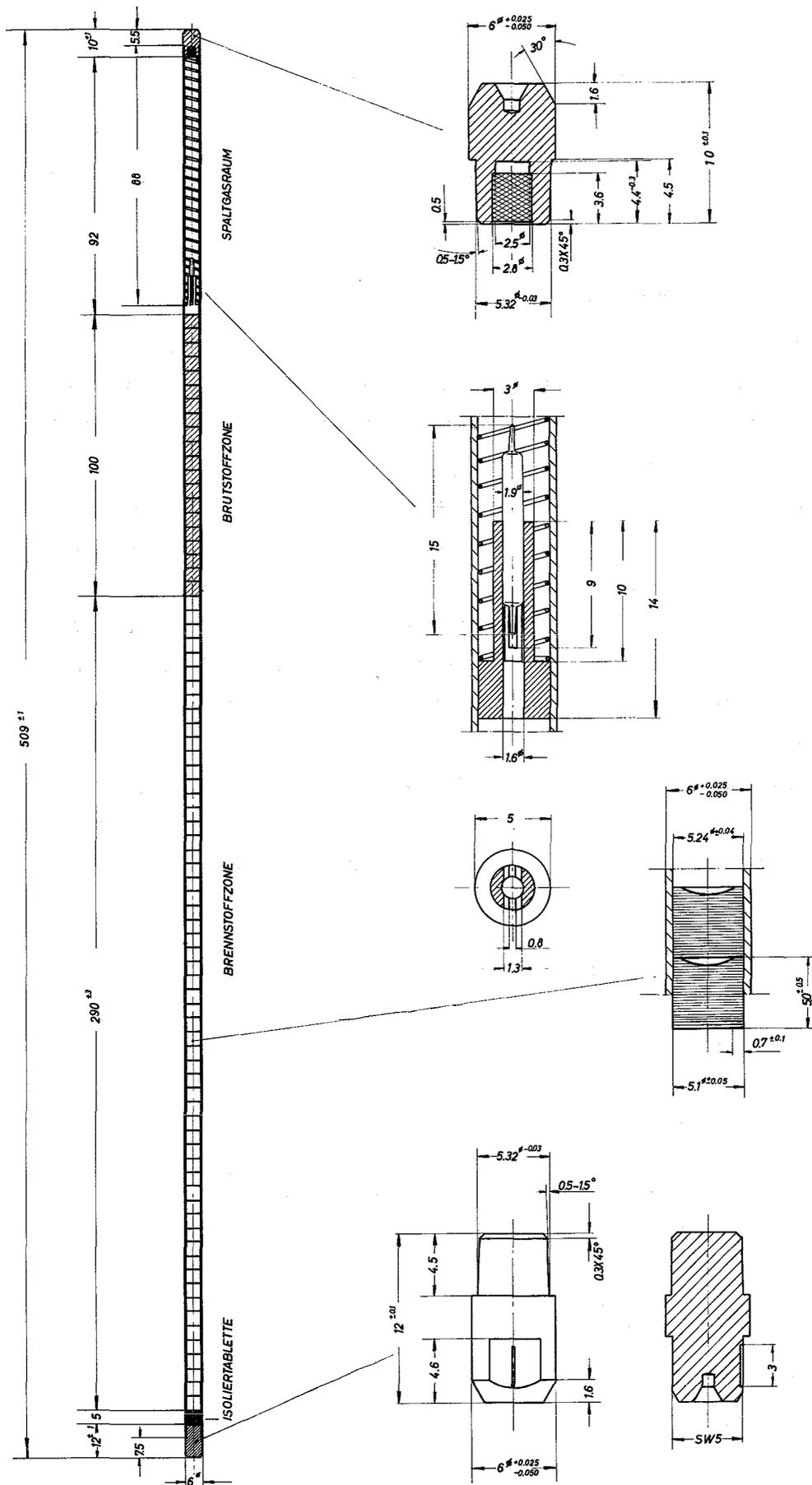
Der Aufbau eines Brennstabes geht aus Abb. 2 und den Konstruktionszeichnungen im Anhang 1 hervor. Die Brennstabumhüllung besteht aus austenitischem Edelstahl mit verschweißten Endstopfen. Sie enthält eine Brennstoffzone mit UO_2 - PuO_2 -Tabletten, eine Axialbrutzone mit UO_2 -Tabletten aus Natur-Uran und am oberen Ende einen Spaltgasraum. Eine Feder im Spaltgasraum verhindert eine Verschiebung der Oxidsäule während des Transportes. Die Gleitkappe für die Feder enthält einen Radon-Monitor, der von der UKAEA zum Zwecke einer laufenden Dichtheitskontrolle des Stabes beige stellt wurde. Kurz unterhalb des oberen Endstopfens ist ein Sintermetallfilter eingesetzt. Es soll den Austritt von Staubpartikeln verhindern, wenn zu Beginn der zerstörenden Nachuntersuchung die Spaltgasfreisetzung gemessen wird. Der untere Endstopfen des Stabes ist vom Brennstoff thermisch isoliert durch eine Natur- UO_2 -Tablette. Die Längenverteilung im Brennstab ist insgesamt folgende:

Oberer Endstopfen	10,0 mm
Gasplenum	92,0 mm
Brutzone	100,0 mm
Brennstoffzone	290,0 mm
Isoliertablette	5,0 mm
Unterer Endstopfen	12,0 mm
<hr/>	
Gesamtlänge	509,0 mm

4.2 Brennstoffspezifikationen

4.2.1 Chemische Zusammensetzung

- Der Mischoxidbrennstoff besteht aus 20 ± 1 Gew.-% PuO_2 und
80 Gew.-% UO_2 .
- Stöchiometrie des Mischoxids $O/M = 1,98 \begin{matrix} + 0,020 \\ - 0,015 \end{matrix}$



GfK Karlsruhe
IMF/LB

DFR-350
Aufbau eines Brennstabes

Abb. 2

- Der Gesamtgehalt an Verunreinigungen soll 2500 ppm nicht übersteigen mit folgenden Einzelbeschränkungen:

Verunreinigung	ppm maximal
C	100
Cl	25
F	50
N	30
H ₂ O	100

4.2.2 Isotopenzusammensetzung

- Die Pu-Zusammensetzung ist:

$$\text{Pu-239} = 90,90 \pm 0,20 \text{ Gew.-%}$$

$$\text{Pu-240} = 8,20 \pm 0,20 \text{ Gew.-%}$$

$$\text{Pu-241} = 0,85 \pm 0,05 \text{ Gew.-%}$$

$$\text{Pu-242} = 0,04 \pm 0,01 \text{ Gew.-%}$$

- Die U-Zusammensetzung ist:

$$\text{U-235} = 86,4 \pm 0,2 \text{ Gew.-%}$$

$$\text{U-238} = 13,6 \pm 0,2 \text{ Gew.-%}$$

Dabei ist im angegebenen U-238-Gehalt der unbekannte Anteil an U-234 mit enthalten.

4.2.3 Homogenität im Mischbrennstoff

- Die PuO₂-Partikelgröße (nachgewiesen durch keramografische oder autoradiografische Untersuchung) soll unterhalb 100 µm bleiben.
- Einzelne PuO₂-Agglomerate können bis zu einem Durchmesser von 300 µm gehen, wenn ihr Gesamtanteil nicht mehr als 10 % vom PuO₂ im Brennstoff ausmacht.

4.2.4 Brennstoff-Form

Es kommen zylindrische Tabletten mit einseitiger Stirnflächeneinsenkung (dishing) zum Einsatz.

4.2.5 Brennstoffdichte

Hierbei ist das Längengewicht, die "lineare Dichte", spezifiziert zu

$$g = 1,89 \text{ g/cm} \pm 3,5 \%$$

Diese Größe wird bestimmt als Quotient aus Gewicht und Höhe der Brennstofftablette. Die theoretische Dichte des Mischoxids ist zu $10,98 \text{ g/cm}^3$ angenommen.

4.2.6 Tablettengeometrie

- Tablettendurchmesser $d = 5,10 \pm 0,05 \text{ mm}$
- Tablettenhöhe $l = 5,0 \pm 0,5 \text{ mm}$
- Stirnflächeneinsenkung $3,0 \pm 0,3 \%$ des Tablettenvolumens
- Breite des Stirnflächenrandes $0,7 \pm 0,1 \text{ mm}$
- Abweichung der Stirnflächen von der Planparallelität (Schlagmessung) $\leq 30 \mu\text{m}$

4.2.7 Oberfläche der Tabletten

Auf den Oberflächen der Tabletten sind höchstens folgende Unregelmäßigkeiten zulässig:

- Ausbrüche in den Kanten bis zu $0,3 \text{ mm}$ Ausdehnung in radialer oder axialer Richtung.
- Haarrisse bis zu $0,1 \text{ mm}$ Breite und 2 mm Länge.
- Oberflächenschäden bis zu $1,0 \text{ mm}$ Durchmesser.

4.2.8 Prüfungen

Folgende Ausgangs-, Zwischen- und Endprüfungen am Brennstoff sind vorgeschrieben und müssen durch Protokolle belegt werden:

- BET-Oberfläche des Ausgangspulvers.
- Statistische Auswertung von 30% der Tablettenfabrikation hinsichtlich Durchmesser, Länge, Gewicht und Dichte.
- Korrelation zwischen Gründichte und Sinterdichte.
- Bestimmung der Materialdichte mittels Immersionsmethode.
- Rechtwinkeligkeit der Stirn- und Mantelflächen der Tabletten.
- Volumen der Stirnflächeneinsenkung.

- Chemische Zusammensetzung am Ausgangspulver und an gesinterten Tabletten.
- Chemische Verunreinigungen an gesinterten Tabletten.
- Isotopenzusammensetzung am Ausgangspulver und an gesinterten Tabletten.
- Stöchiometrie, Gas-Gehalt und Feuchtigkeit.
- Homogenität in den Tabletten.
- Sichtprüfung auf Oberflächenfehler.

4.3 Spezifikationen für den Brutstoff

4.3.1 Zusammensetzung

- Der UO_2 -Brutstoff enthält Natur-Uran.
- Die Stöchiometrie des Oxides ist $O/M = 2,00 \begin{matrix} +0,015 \\ -0,000 \end{matrix}$
- Die höchstzulässigen Verunreinigungen sind wie beim Brennstoff festgelegt, siehe 4.2.1.

4.3.2 Geometrie der Brutstofftabletten

- Die Brutstofftabletten haben Zylinderform ohne Stirnflächeneinsenkung.
- Tablettendurchmesser: $5,10 \pm 0,05$ mm
- Tablettenhöhe: $5,0 \pm 0,5$ mm
- Tablettendichte: 95 ± 3 % th.D.
- Oberfläche der Tabletten: Festlegungen wie beim Brennstoff, siehe 4.2.7.

4.3.3 Prüfungen

Der Hersteller muß bestätigen, daß der Brutstoff den Spezifikationen entspricht.

4.4 Spezifikationen für die Hülle

4.4.1 Werkstoffe

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

T y p Werkstoff-Nr.		X8 Cr Ni Mo V Nb 1613 1.4988	X8 Cr Ni Nb 1613 1.4961
Nominelle Zusammensetzung in Gew.-% Rest Fe	C	< 0,10	< 0,10
	Cr	15,5 - 17,5	15,0 - 17,0
	Ni	12,5 - 14,5	12,0 - 14,0
	Mo	1,1 - 1,5	-
	V	0,6 - 0,85	-
	Nb	> 10 x C, ≤ 1,2	> 10 x C, ≤ 1,2
	Si	0,3 - 0,6	0,3 - 0,6
	N	0,1	-
	Mn	1,0 - 1,5	1,0 - 1,5

4.4.2 Abmessungen der Hüllrohre

- Außendurchmesser: 6,00 $\begin{matrix} +0,025 \\ -0,050 \end{matrix}$ mm
- Innendurchmesser: 5,24 $\pm 0,04$ mm
- Wandstärke: $\cong 0,34$ mm
- Ovalität: innerhalb der Toleranzen des Innendurchmessers
- Rohrlänge: 600 ± 10 mm
- Durchbiegung: $\cong 50$ μ m pro 10 cm Länge

4.4.3 Materialbedingungen

- für Werkstoff-Nr. 1.4988: lösungsgeglüht bei 1100°C,
5 - 7 % kaltverformt, 1 Std. bei
800°C ausgelagert
- für Werkstoff-Nr. 1.4961: lösungsgeglüht bei 1100°C,
5 - 7 % kaltverformt

- Korngröße: Die maximale Korngröße darf die ASTM-Micro-Grain-Size No. 7 nicht überschreiten.

4.4.4 Hüllrohroberfläche und -schäden

- Aussehen: Die innere und äußere Oberfläche muß frei von Verfärbungen, Fett, Schmutz, Metallteilchen und sonstigen Fremdkörpern sein.
- Rauigkeit: $\leq 2 \mu\text{m}$
- Schäden und Einschlüsse: Keine Oberflächenrisse, sonstige Fehler unter $20 \mu\text{m}$, Einschlüsse und Streifen kleiner als $0,05 \text{ mm}$ oder 10^{-3} mm^2 , innere Defekte und Unregelmäßigkeiten unter 10% der Wandstärke.

4.4.5 Hüllrohrprüfungen

Folgende Prüfungen sind vorgeschrieben und müssen durch Protokolle und Zertifikate belegt werden:

- Chemische Analyse
- Geometrie: Außendurchmesser (mechanische Methode), Innendurchmesser (Staudruckverfahren), Wandstärke (Ultraschallmessung), Ovalität, Durchbiegung, Rohrlänge, Oberflächenrauigkeit (Perthometer).
- Materialzustand: Zertifikate für Wärmebehandlung und Verformung und für Korngröße; mechanische Prüfung an 3 Rohren jeder Charge; metallografischer Nachweis an 2 Rohren jeder Charge.
- Materialfehler: Ultraschall-Rißprüfung, optische Kontrolle.

4.5 Spezifikationen für den Brennstab

4.5.1 Brennstoff- und Brutstoffmenge im Stab

- Länge der Brennstoffsäule: $L = 290 \pm 3 \text{ mm}$
- Länge der Brutstoffsäule: $L_B = 100 \text{ mm}$
- Gesamtlänge der Tablettensäule: $L + L_B = 390 \pm 3 \text{ mm}$
- Brennstoffgewicht im Stab: $G = 54,88 \pm 1,64 \text{ g}$

4.5.2 Weitere Stabkomponenten

Die nachstehend genannten Zeichnungen finden sich in Anhang 1.

- Hüllrohr: spezifiziert in 4.4, Maße siehe Zeichnung TA2K-16-07-4-3053
- Oberer Endstopfen: Material identisch zum Hüllrohr, Maße siehe Zeichnung TA2K-16-07-4-3052
- Unterer Endstopfen: Material identisch zum Hüllrohr, Maße siehe Zeichnung TA2K-16-07-4-3056
- Durchbohrter Zwischenstopfen: Material identisch zum Hüllrohr, Maße siehe Zeichnung TA2K-16-07-4-3054
- Radon-Monitor: von UKAEA, eingesetzt in den Zwischenstopfen, Maße siehe Zeichnung TA2K-16-07-3-3051, Teil 5
- Sintermetallfilter: nach Zeichnung TA2K-16-07-3-3051, Teil 3
Materialzusammensetzung (Gew.-%):
 - 18,0 % Cr
 - 12,5 % Ni
 - 2,2 % Mo
 - 0,6 % Si
 - 66,7 % Fe

Die Durchlässigkeit des Stahlfilters ist 10 cm^3 pro sec bei 0°C und einer Druckdifferenz von 1 atm.

- Feder: nach Zeichnung TA2K-16-07-3-3051, Teil 4, aus Federstahl X12CrNi 177, Material-Nr. 1.4310
 - Länge, im losen Zustand 100 mm
 - Länge, voll zusammengepreßt 26 mm
 - Außendurchmesser der Feder $5,0 \begin{smallmatrix} + 0,0 \\ - 0,1 \end{smallmatrix}$ mm
 - Drahtdurchmesser 0,6 mm
 - Federkraft auf den Gleiteinsatz 0,35 - 0,8 kp
- Isoliertablette: nach Zeichnung TA2K-16-07-3-3051, Teil 9, aus UO_2 mit Natururan nach den gleichen Spezifikationen wie der Brutstoff.

4.5.3 Schweißnähte

Die Endkappen werden nach dem Argonarc- oder Heliarc-Verfahren aufgeschweißt. Die Schweißnähte dürfen im Durchmesser um maximal 0,1 mm überstehen. Eine maximale He-Leckrate von 10^{-8} Torr-liter/sec ist zulässig.

4.5.4 Gasfüllung der Stäbe

Die Stäbe werden mit Helium gefüllt, Gasdruck 1 atm. Der Reinheitsgrad soll 99,95 % He betragen.

4.5.5 Stabgeometrie

Länge des fertigen Stabes 509 ± 1 mm

Durchbiegung kleiner als $50 \mu\text{m}$ pro 10 cm

4.5.6 Kontamination

Die Oberflächenkontamination, gemittelt über die ganze Staboberfläche darf nicht mehr betragen als

22 α -Zerfälle pro Min. und cm^2

220 β -Zerfälle pro Min. und cm^2

Der Wischtest muß ohne Befund bleiben.

4.5.7 Kennzeichnung der Stäbe

- Die dem Stabhersteller übergebenen Hüllrohre tragen eine Markierung, die den Beginn der Messungen bei der Rohrprüfung identifizieren.
- Der untere Endstopfen des Stabes hat 2 ebene Flächen. Diese dienen für profilometrische Messungen und tragen die Fabrikationsnummer sowie den Hinweisbuchstaben G (Germany). Diese Nummer wird in die Herstellungsbegleitkarte aufgenommen.

4.5.8 Prüfungen an den fertigen Stäben

Folgende Prüfungen müssen durch Protokolle und Zertifikate belegt werden:

- Gesamtlänge
- Durchmesser (am Hüllrohr, an den Endstopfen, an den Schweißnähten)
- Ovalität, Durchbiegung
- Gewicht
- Dichtheit
- Röntgen-Aufnahmen von den Schweißnähten und vom gesamten Stab
- Probeschweißungen mit mikrografischer Untersuchung
- Kontamination der Oberfläche

5. Auslegungsrechnungen

Diese Auslegungsrechnungen wurden zusammen mit den Spezifikationen erstellt [2] und waren ein Teil der von der UKAEA zur Prüfung des Bestrahlungsvorhabens verlangten Unterlagen.

5.1 Lokale Wärmeentbindung

Der Nominalwert der maximalen lokalen Wärmeentbindung wird durch Multiplikation der Spaltstoffgehalte pro cm Stablänge mit den vom DFR-Betrieb vorgegebenen Spaltraten ermittelt. Ausgehend vom spezifizierten Längengewicht des Brennstoffes von 1,89 g/cm wird gemäß Tabelle I die maximale Wärmeentbindung in Core-Mitte des DFR berechnet. Wie eine Abschätzung des Einflusses der Spezifikationstoleranzen gemäß Tabelle II zeigt, wird die maximal zulässige Abweichung nicht erreicht.

5.2 Wärmeleistung pro Stab

- Für die Neutronenflußverteilung ϕ längs des Stabes gilt im DFR:

$$\phi = \phi_{\max} \cdot \cos(0,038 \cdot x)$$

wobei x (cm) der vertikale Abstand von der Ebene des höchsten Flusses ist. Analog erhält man für die Verteilung der Stableistung

$$\lambda = 450 \cdot \cos(0,038 \cdot x) \quad (\text{W/cm})$$

Die gesamte Wärmeleistung aus dem Brennstoff wird damit zu

$$W_B = 450 \int_{-20,4}^{8,6} \cos(0,038 x) dx = \underline{12,11 \text{ kW im Brennstoff}}$$

- In der Brutzone haben wir bei 95 % th.D. des UO_2 die Wärmeleistung nach einer sich nur im konstanten Faktor unterscheidenden Formel

$$W_{B1} = 38 \int_{8,6}^{18,6} \cos(0,038 x) dx = \underline{0,326 \text{ kW im Brutstoff}}$$

Tabelle I Wärmeentbindung pro cm Stablänge

Spaltrate im Core- Zentrum des DFR (W/g _{sp})	Isotop	Anteil UO ₂ bzw. PuO ₂	Verhältnisse		Spaltstoff (g _{sp} /cm)	Wärme- entbindung (W/cm)
			Metall Oxid	Isotop Element		
288,7	U-235	0,8	0,8802	0,864	1,1498	331,95
18,4	U-238	0,8		0,136	0,1809	3,33
360,6	Pu-239	0,2	0,8819	0,909	0,3029	109,23
135,5	Pu-240	0,2		0,082	0,0273	3,70
540,0	Pu-241	0,2		0,0085	0,0028	1,51
Maximale Wärmeentbindung des Mischoxids						449,72

Tabelle II Toleranzen der lokalen Wärmeentbindung

		Toleranz laut Spezifikation	Einfluß auf die Wärmeentbindung
Brennstoffgewicht 1,89 g/cm		± 3,5 %	± 3,50 %
PuO ₂ -Gehalt	20 Gew.-%	± 1 Gew.-%	± 0,34 %
U-235-Gehalt	86,4 Gew.-%	± 0,2 Gew.-%	± 0,17 %
Pu-239 + Pu-241	91,75 Gew.-%	± 0,2 Gew.-%	± 0,05 %
Toleranz der lokalen Wärmeentbindung			± 4,06 %
nach Angaben der UKAEA maximal zulässig			± 5,00 %

- Die Gamma-Heizung beträgt im 77-Stab-Bündel etwa 25 kW. Für einen Stab ergibt sich daraus im Mittel

$$\underline{W_{\gamma} = 0,325 \text{ kW für } \gamma\text{-Heizung}}$$

- Die Wärmeleistung im maximal belasteten Stab addiert sich somit zu

$$\underline{W = 12,76 \text{ kW insgesamt}}$$

- Die Abschätzung des Einflusses der Spezifikationstoleranzen auf die Gesamtleistung des Stabes ist in Tabelle III durchgeführt. Es zeigt sich, daß die maximal zulässige Abweichung nicht ganz erreicht wird.

Tabelle III Toleranzen in der Gesamtleistung eines Stabes

	Toleranz laut Spezifikation	Einfluß auf die Gesamtleistung des Stabes
Gesamtgewicht Brennstoff 55,3 g	± 1,65 g	± 2,83 %
PuO ₂ -Gehalt 20 Gew.-%	± 1 Gew.-%	± 0,32 %
U-235-Gehalt 86,4 Gew.-%	± 0,2 Gew.-%	± 0,16 %
Pu-239 + Pu-241 91,75 Gew.-%	± 0,2 Gew.-%	± 0,05 %
Gesamtabweichung		± 3,36 %
maximal zulässig		± 3,50 %

5.3 Zielabbrand

Unter der Annahme, daß keine Spaltstoffanreicherung während der Bestrahlung auftritt, ergeben sich für eine Bestrahlungszeit von 220 Tagen die Zielabbrände gemäß Tabelle IV.

Tabelle IV Zielabbrand bei Maximalfluß

	Abbrand, lokales Maximum		Abbrand, über die Länge gem.	
	MWd/t Oxid	MWd/t Metall	MWd/t Oxid	MWd/t Metall
Brennstoff	52 400	59 400	48 600	55 200
Brutstoff	3 700	4 200	3 400	3 900

5.4 Kühlmittelfluß

Vorgegeben ist für die Berechnung:

- Kühlmittelzusammensetzung NaK mit 70 % Na
oder NaK mit 58 % Na
- NaK-Eintrittstemperatur 230°C
- NaK-Austrittstemperatur 580°C
- Spezifische Wärme des NaK bei 405°C: $c_p = 1,13 \text{ Wsec/g}^\circ\text{C}$
- Dichte des NaK bei 405°C: $0,83 \text{ g/cm}^3$
- Stababstand im Bündel: 7,365 mm
- Kühlquerschnitt pro Stab: $18,16 \text{ mm}^2$
- Abzuführende Wärmemenge pro Stab: 12760 W

Mit diesen Daten errechnet sich die nötige Kühlmittelgeschwindigkeit zu

$$\underline{V_C = 214 \text{ cm/sec}}$$

und der Kühlmittelfluß für einen Stab zu

$$\underline{Q = 32,2 \text{ g/sec}}$$

5.5 Temperaturverteilung im Kühlmittel

Das NaK-Kühlmittel fließt von oben nach unten. Zwischen dem oberen Ende des Brennstoffes (+ 8,6 cm Abstand von der Ebene des maximalen Flusses) und einer gewissen Stelle x wird insgesamt folgende Wärmemenge frei und auf das Kühlmittel übertragen:

$$W_x = 1,03 \int_x^{8,6} 450 \cdot \cos(0,038 x) dx$$

Der Faktor 1,03 berücksichtigt dabei näherungsweise die γ -Aufheizung. Die Aufheizspanne des NaK bis zu dieser Stelle x beträgt:

$$\Delta T_{\text{NaK}}(x) = \frac{W_x}{Q \cdot c_p}$$

Wenn man die Zahlenwerte einsetzt und das Integral auswertet, ergibt sich

$$\Delta T_{\text{NaK}}(x) = 108 - 336 \cdot \sin 0,038 x \quad (^\circ\text{C})$$

Mit der NaK-Eintrittstemperatur 230°C wird schließlich der Temperaturverlauf im NaK entlang dem Brennstoff zu

$$T_{\text{NaK}}(x) = 338 - 336 \cdot \sin 0,038 x \quad (^\circ\text{C})$$

Die numerische Auswertung ist in Abb. 3 wiedergegeben.

5.6 Temperaturen in der Hüllwand

Für den Temperatursprung ΔT_{Ha} zwischen NaK und Hüllwandoberfläche benötigt man den Wärmeübergangskoeffizienten h . Er berechnet sich aus

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k_{\text{NaK}}}{D_e}$$

mit Nusselt-Zahl $\text{Nu} = 7$

NaK-Wärmeleitfähigkeit $k_{\text{NaK}} = 0,42 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$

Hydraulischer Durchmesser $D_e = 3 \text{ mm}$

zu

$$h \approx 10 \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Damit wird

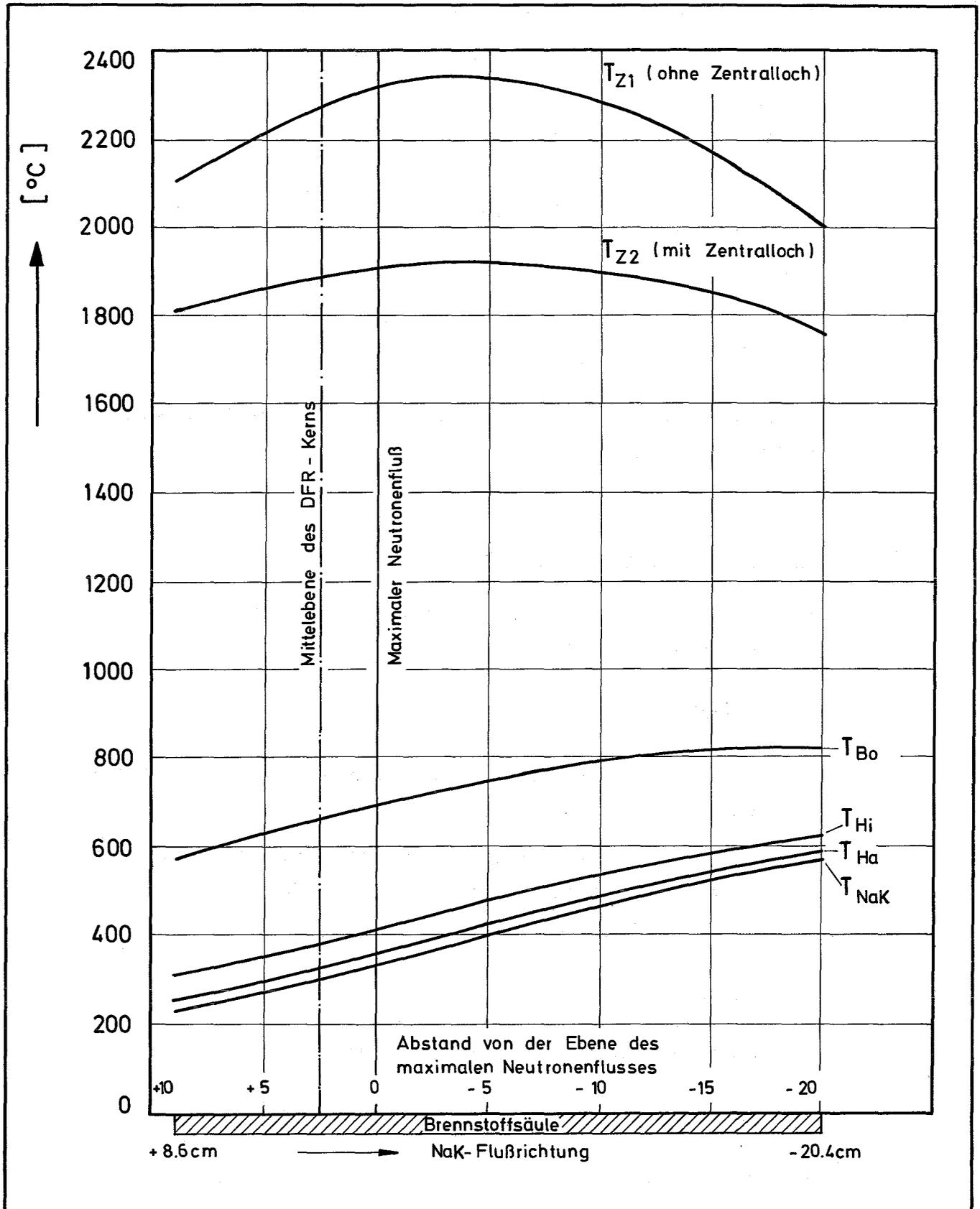
$$\Delta T_{\text{Ha}}(x) = \frac{450}{0,6 \cdot \pi \cdot h} \cos 0,038 x = 24 \cdot \cos 0,038 x.$$

Die Temperatur selbst an der Hülle außen ist dann gegeben durch die Beziehung

$$T_{\text{Ha}}(x) = 338 - 336 \cdot \sin 0,038 x + 24 \cdot \cos 0,038 x$$

Die Differenz zur Hüllwandinnentemperatur ist gegeben durch

$$\Delta T_{\text{Hi}}(x) = \ln \frac{H_a}{H_i} \cdot \frac{450}{2\pi k_H} \cdot \cos 0,038 x$$



GfK Karlsruhe IMF / LB	Die Temperaturverteilung längs des Brennstabes	Abb. 3
---------------------------	---	--------

Die temperaturabhängigen Werte $k_H(T)$ sind für die beiden Materialien Nr. 1.4988 und 1.4961 in der Tabelle V (Seite 26) mit aufgeführt. Die Temperatur auf der Hüllinnenseite wird in der numerischen Formel zu

$$T_{Hi}(x) = 338 - 336 \cdot \sin 0,038 x + \left(24 + \frac{9,9}{k_H}\right) \cos 0,038 x$$

Die Mittenwandtemperatur in der Hülle ist definiert als

$$T_{Hm} = T_{Ha} + \frac{1}{2} \Delta T_{Hi}$$

Alle diese Temperaturen sind in ihrem Verlauf längs des Stabes in der Abb. 3 eingetragen.

5.7 Temperatursprung Hülle-Brennstoff

Für den Wärmeübergang im Spalt zwischen Hülle und Brennstoff wird folgende Abhängigkeit angenommen [3]:

$$\alpha = \frac{31,6}{\delta} \quad (\text{W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Diese ist gültig für He-Bindung, die diametrale Spaltweite δ wird in μ eingesetzt.

Man kann zeigen, daß bei der gegebenen Auslegung der heiße Spalt (radial) etwa 15 μ beträgt. Damit bekommt man für den Wärmeübergang bei He-Bindung einen Wert von

$$\underline{\alpha \approx 1 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Der Temperatursprung im Spalt ΔT_s wird damit zu

$$\Delta T_s(x) = \frac{450}{0,52 \cdot \pi \cdot \alpha} \cdot \cos 0,038 x = 280 \cdot \cos 0,038 x$$

Die Temperatur auf der Brennstoffoberfläche T_{Bo} ist dann (siehe wieder Abb. 3)

$$T_{Bo}(x) = T_{Hi}(x) + \Delta T_s(x)$$

5.8 Brennstoffzentraltemperatur

Der einfachste Berechnungsfall ist hierbei die Annahme einer parabolischen Temperaturverteilung im Brennstoff. Hierbei wird die Brennstoffzentraltemperatur zu

$$T_Z(x) = T_{B0}(x) + \frac{450}{4 \pi k_M} \cdot \cos 0,038 x$$

Für die Auswertung in Abb. 3 (Kurve T_{Z1}) wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit des Brennstoffes $k_B = 0,022 \text{ W/cm sec } ^\circ\text{C}$ genommen entsprechend einer Brennstoff-Materialdichte von 87,5 % th.D.

Unter der weitergehenden Annahme, daß sich ein Zentralkanal ausbildet, wurde in einer mehr detaillierten Rechnung [2] mit zwei Brennstoffzonen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit gerechnet. Die Brennstoffzentraltemperatur ist nach diesem Modell deutlich niedriger, siehe Kurve T_{Z2} in Abb. 3.

6. Sicherheitsbetrachtungen

Diese Sicherheitsbetrachtungen dienten ebenfalls der Prüfung des Bestrahlungsvorhabens durch die UKAEA.

6.1 Gasdruck im Brennstab

Zum Aufbau des Gasdruckes im Brennstab tragen bei

- die Spaltgase
- die freigesetzten adsorbierten Gase
- die Helium-Füllung

Unter der Annahme, daß 0,27 Gasatome pro Spaltung entstehen und das Spaltgas vollständig freigesetzt wird, werden beim Abbrand 48000 MWd/t Oxid etwa

$$0,33 \cdot 10^{-2} \text{ Mole Spaltgas pro Stab}$$

vorhanden sein. Das freie Volumen innerhalb des Stabes wird grob abgeschätzt zu:

Spaltgasraum	1,9 cm ³	bei 250°C
Brutstoffzone	0,37 cm ³	bei 300°C
Brennstoffzone	1,17 cm ³	bei 1200°C

Dies summiert sich zu etwa 3,44 cm³ bei einer mittleren Temperatur von 580°C ≈ 850°K. Daraus ergibt sich am Ende der Bestrahlung ein

Spaltgasdruck von 69 atm

Für die freigesetzten Gase wird ein Druckbeitrag von 5 atm angenommen. Der Partialdruck des He beträgt bei der angenommenen mittleren Temperatur von 850°K etwa 3 atm. Damit ergibt sich am Ende der Bestrahlung der

Gesamtdruck p = 77 atm.

6.2 Spannungen in der Stabhülle

6.2.1 Spannungen durch den Gasdruck

Die Tangentialspannung in der Hülle berechnet sich aus der Kessel-formel zu

$$\sigma_p = p \cdot \frac{r_i}{s}$$

Mit den Zahlenwerten

$$\begin{aligned} p &= 0,77 \text{ kp/mm}^2 \\ r_i &= \frac{1}{2} \cdot 5,24 = 2,62 \text{ mm} \\ s &= 0,38 \text{ mm} \end{aligned}$$

ergibt sich

$$\underline{\sigma_p = 5,3 \text{ kp/mm}^2}$$

6.2.2 Thermische Spannungen

Die thermische Spannung infolge des radialen Temperaturgradienten ist gegeben durch

$$\sigma_t = \frac{E \cdot \beta \cdot \Delta T_{Hi}}{2 (1-\gamma)}$$

mit den Größen

E	Elastizitätsmodul
β	Koeffizient der thermischen Ausdehnung
ΔT_{Hi}	Temperaturdifferenz über die Hüllwand
γ	Poisson-Zahl

Diese Beziehung ist für mehrere Punkte längs eines Brennstabes in Tabelle V ausgewertet.

6.2.3 Spannungsgrenzen

- Für den maximal zulässigen Betrag der mechanischen Spannung wird vielfach die Beziehung benutzt [4]

$$\sigma_p < \frac{3}{4} \sigma_{0,2}$$

wobei $\sigma_{0,2}$ die 0,2 %-Fließgrenze des Hüllmaterials bedeutet.

- Die thermische Spannung soll, um Schäden bei thermischer Zyklierung zu vermeiden, folgende Bedingung erfüllen:

$$\sigma_t < 2 \sigma_{0,2}$$

- In Bezug auf Schäden durch irreversible Ausdehnungen (thermal ratcheting) wurde nach D.R. Miller [5] folgende Bedingung hergeleitet

$$\frac{1}{4} \sigma_t + \sigma_p < \sigma_{0,2}$$

Wie man aus der numerischen Auswertung in Tabelle V sieht, sind alle diese Bedingungen erfüllt.

6.3 Kriechdehnung in der Hülle

Für die Kriechdehnung in der Hülle wird angenommen, daß sie nur vom sich aufbauenden Gasdruck initiiert wird. Sonstige mechanische Kräfte wie Schwelldruck des Brennstoffes, irreversible Ausdehnungen bei Wechselbeanspruchungen und thermische Spannungen werden nicht berücksichtigt. Die Kriechdehnung des Stabumfanges wird nach einem Norton'schen

Tabelle V Temperaturen und Spannungen in der Brennstabhülle

(Materialdaten aus Werkstoffblättern der Firmen Mannesmann und Sandvik, teilweise extrapoliert)

Material	Längs- pos. x (cm)	Hüll- außentemp. T_{Ha} (°C)	Temp.diff. i.d.Hülle T_{Hi} (°C)	Wärmeleitf. d.Hüllmat. k_H (W/cm°C)	Therm. Ausdehn. ($10^{-6}/^{\circ}C$)	Elastizi- tätsmodul (kp/mm ²)	Poisson- Zahl	Fließgr. $\sigma_{0,2}$ (kp/mm ²)	σ_p (kp/mm ²)	σ_t (kp/mm ²)	$\frac{1}{4}\sigma_t + \sigma_p$ (kp/mm ²)
Werkstoff- Nr. 1.4988	+ 8,6	253	58	0,16	17,0	19500	0,32	18	5,3	14,2	8,85
	+ 5	299	54	0,18	17,1	19000		17		12,9	8,75
	0	364	52	0,19	17,3	18400		17		12,2	8,35
	- 5	429	51	0,19	17,4	17900		16,5		11,8	8,0
	- 10	490	46	0,20	17,5	17000		16		10,0	7,8
	- 15	546	40	0,21	17,6	16500		16		8,5	7,4
	- 20,4	594	32	0,22	17,8	16000		15		6,7	7,0
Werkstoff- Nr. 1.4961	+ 8,6	253	58	0,17	16,6	19500	0,32	14,5	5,3	13,8	8,8
	+ 5	299	54	0,18	17,0	19000		14,0		12,8	8,5
	0	364	52	0,19	17,2	18400		13,0		12,1	8,3
	- 5	429	51	0,20	17,5	17900		12,5		11,7	8,2
	- 10	490	46	0,21	17,9	17000		12,0		10,3	7,9
	- 15	546	40	0,21	18,2	16500		11,75		8,8	7,5
	- 20,4	594	32	0,22	18,5	16000		11,5		7,2	6,1

Ansatz berechnet, ausgehend von

$$\dot{\epsilon} = K \cdot \sigma^n$$

K und n sind hierbei Kriechkonstante und Kriechexponent. Bei 100 % Spaltgasfreisetzung und linearem Anstieg des Abbrandes ist die Tangentialspannung zeitabhängig wie folgt

$$\sigma = \dot{p} \cdot \frac{r_i}{s} \cdot t$$

worin bedeuten

$$\dot{p} = \text{Druckanstieg in } \text{kp/mm}^2 \text{ h}$$

$$t = \text{Zeit in h}$$

Durch Integration kommt man zur Gesamtdehnung

$$\epsilon = \int_0^t \dot{\epsilon} dt = \frac{K}{n+1} \left(\dot{p} \frac{r_i}{s} \right)^n t^{n+1}$$

Zur Auswertung dieser Formel werden als Zahlenwerte benützt:

- Hüllinnenradius $r_i = 2,62 \text{ mm}$
- Wandstärke $s = 0,29 \text{ mm}$ (Mindestmaß abzüglich 50μ für Korrosion)
- Bestrahlungszeit $t = 220 \text{ Tage} = 5,28 \cdot 10^3 \text{ h}$
- Druckanstieg $\dot{p} = 1,46 \cdot 10^{-4} \text{ kp/mm}^2 \cdot \text{h}$
- Kriechkonstante und Kriechexponent werden aus den Zeitdehngrenzen $\sigma_{1/10000}$ und $\sigma_{1/100000}$ ermittelt.

Tabelle VI bringt die benützten Materialwerte und alle Ergebnisse und zwar für

- Fall 1 mit Mittelwerten der Zeitdehngrenze,
- Fall 2 mit Minimalwerten der Zeitdehngrenze, die zu Maximalwerten in der Dehnung führen.

Man sieht, daß bis zu (den hier unter Berücksichtigung von Heißstellen aktuellen) Temperaturen von 650°C die Kriechdehnung der Hülle unter $0,2 \%$ bleibt.

Tabelle VI Umfangskriechdehnung der Hülle

Material	Temperatur (°C)	Fall 1: mit Mittelwerten der Zeitdehngrenze				Fall 2: mit Minimalwerten der Zeitdehngrenze			
		$\sigma_{1/10000^+}$ $\sigma_{1/100000}$ (kp/mm ²)	n	K (mm ²ⁿ /h·kp ⁿ)	ϵ (%)	$\sigma_{1/10000^+}$ $\sigma_{1/100000}$ (kp/mm ²)	n	K (mm ²ⁿ /h·kp ⁿ)	ϵ (%)
Werkstoff- Nr. 1.4961	620	9,7 7,0	7,06	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$				
	650	8,0 5,5	6,14	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	6,4 4,4	6,16	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$
	700	5,0 3,0	4,5	$7,1 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-1}$	4,0 2,4	4,5	$1,9 \cdot 10^{-9}$	1,1
Werkstoff- Nr. 1.4988	620	15,9 10,3	5,3	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$				
	650	12,0 7,5	4,9	$5,0 \cdot 10^{-12}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	9,6 6,0	4,9	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
	700	7,0 4,0	4,12	$3,3 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	5,6 3,2	4,1	$8,7 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$

+) Werte aus Stahl-Eisen-Lieferbedingungen, Werkstoffblatt Nr. 670 (1965)

6.4 Verträglichkeit der Hülle mit NaK

Es besteht kein Zweifel, daß die Verträglichkeit von autenitischen Edelstählen mit NaK dieselbe ist wie mit reinem Na. Bei der Auslegung dieses Versuches werden Korrosionswerte angenommen, wie sie für Edelstahl des Types AISI-Nr. 316 bekannt sind, nämlich

25 μ Reduktion der Wandstärke

für die hier zutreffenden Bedingungen:

Versuchszeit etwa 5000 h

NaK-Geschwindigkeit 2 m/sec

NaK-Temperatur 650°C

O₂-Gehalt im NaK 20 - 40 ppm.

6.5 Maximal zulässiger Abbrand

Der maximal zulässige Abbrand wird nach einer Formel von Karsten berechnet, die - ohne Berücksichtigung von Kräften auf die Hülle - auf einer Volumenbilanz basiert [6]. Dabei werden 2 Fälle unterschieden [2], nämlich

- Fall 1: Brennstoff in Position mit Maximalfluß, ohne Zentralloch, Temperaturkurve T_{z1} in Abb. 3.
- Fall 2: Brennstoff ebenfalls in Position mit Maximalfluß, aber mit Zentralloch, Temperaturkurve T_{z2} in Abb. 3.

Der maximal zulässige Abbrand b wird nach dieser Rechnung

- $b = 81000$ MWd/t Oxid in Fall 1
- $b = 78000$ MWd/t Oxid in Fall 2

Beide Ergebnisse sind weit oberhalb des Zielabbrandes gemäß 5.3.

7. Herstellung der Brennstäbe

Die Herstellung der Brennstäbe erfolgte durch die Fa. Alkem, Leopoldshafen, entsprechend den hier im Kapitel 4 zusammenfassend dargestellten Spezifikationen. Insgesamt waren 30 Stäbe zu fertigen, wovon 23 Stäbe in das 77-Stab-Bündel eingesetzt wurden, während 7 Stäbe als Reserve dienten. Je 15 Stäbe hatten als Hüllmaterial den Stahl Werkstoff-Nr. 1.4988 bzw. Werkstoff-Nr. 1.4961. Die Stabbezeichnung ist am unteren Endstopfen angebracht. Tabelle VII gibt eine Übersicht über die Stabbezeichnungen und den tatsächlichen Einsatz im DFR-Bündel. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Stabherstellung einschließlich der Zwischen- und Endprüfungen. Weitergehende Einzelheiten sind in einem ausführlichen Bericht der Fa. Alkem enthalten [7]. Dort sind auch die der eigentlichen Herstellung vorausgehenden Entwicklungsarbeiten beschrieben.

Tabelle VII Stabbezeichnungen und Einsatz im DFR

Stäbe mit Hülle 1.4988				Stäbe mit Hülle 1.4961		
Bezeichnung	im DFR	Reserve		Bezeichnung	im DFR	Reserve
G 2	x			G 36	x	
G 4	x			G 39	x	
G 6	x			G 40	x	
G 7	x			G 41	x	
G 8	x			G 43	x	
G 9	x			G 46		x
G 12	x			G 49	x	
G 14	x			G 50	x	
G 16	x			G 51		x
G 17	x			G 52		x
G 18		x		G 56	x	
G 19	x			G 57	x	
G 21	x			G 58		x
G 24	x			G 59		x
G 33		x		G 61	x	

7.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung

Das UO_2 - PuO_2 -Ausgangspulver für die Tablettenherstellung sollte nur begrenzt sinterfähig sein wegen der im Vergleich zu LWR-Brennstoff niedrigen Brennstoffdichte.

7.1.1 UO_2 -Pulver mit 86,4 % U-235

Ausgehend von 2 Anreicherungsgraden, nämlich 93 % U-235 und 0,71 % U-235 wurde durch Vermischen in wässriger Phase UO_2 -Pulver mit 86,4 % U-235 hergestellt. Als Methode wurde hierbei ein Ammonium-Uranyl-Karbonat-Verfahren angewandt, bei dem in der ersten Stufe U_3O_8 -Pulver mit geringer spezifischer Oberfläche entsteht, welches dann in einer zweiten Stufe in einem Durchstoß-Reaktionsofen zu UO_2 reduziert wird. Für dieses UO_2 -Ausgangspulver wurden Materialdaten gemäß Tabelle VIII bestimmt.

Tabelle VIII Materialdaten des UO_2 -Pulvers mit 86,4 % U-235

Prüfung	Meßwert
Isotopenanalyse U-234	$0,54 \pm 0,005$ Gew.-%
U-235	$86,35 \pm 0,3$
U-236	$0,30 \pm 0,003$
U-238	$12,81 \pm 0,03$
Chemische Verunreinigungen	
Ag	< 0,05 ppm
Al	29
B	0,18
C	57
Ca	< 20
Cd	< 0,07
Cl	< 3
Co	< 1
Cr	14
Cu	8
F	29
Fe	66
Gd	< 0,02
Mg	3
Mn	< 1
Mo	< 1
N ₂	< 3
Na	< 20
Ni	8

Fortsetzung Tabelle VIII

Chemische Verunreinigungen	Pb Si Sn Ti V Zn Zr H ₂ Nb Ta Sm EU	< 1 7 0,65 3 < 0,2 < 20 18 69 0,7 < 0,5 < 0,1 < 0,04
Uran-Gehalt		87,81 Gew.-%
BET-Oberfläche		1,20 m ² /g

7.1.2 PuO₂-Pulver

Das PuO₂-Pulver wurde aus Pu-Metall über Pu-Peroxid und Pu-Oxalat gewonnen. Dabei fand die Kalzination des Peroxids bei hoher Temperatur (4 h, 800°C) statt, um wieder eine niedrige spezifische Oberfläche des Oxidpulvers zu erhalten. Tabelle IX bringt die gemessenen Materialdaten des PuO₂-Pulvers.

Tabelle IX Materialdaten des PuO₂-Pulvers

P r ü f u n g	M e ß w e r t
Isotopenanalyse Pu-239	91,000 ± 0,10 Gew.-%
Pu-240	8,207 ± 0,10
Pu-241	0,754 ± 0,05
Pu-242	0,039 ± 0,05

Fortsetzung Tabelle IX

Chemische Verunreinigungen	Al	< 10 ppm
	B	1
	C	175
	Cd	< 1
	Cl	60
	Cr	10
	Cu	< 5
	Dy	< 1
	Eu	< 1
	F	500
	Fe	15
	Gd	< 1
	K	40
	Mg	15
	Mn	20
	Mo	< 10
	N	140
	Na	30
	Ni	20
	Sm	< 1
	Sn	< 1
	Si	10
	V	< 10
	Zn	30
Pu-Gehalt		87,73 Gew.-%
BET-Oberfläche		1,71 m ² /g

7.1.3 Pulvermischung

In einem handelsüblichen 5-Liter-Lödige-Mischer wurden die für die Mischung berechneten und entsprechend abgewogenen UO₂- und PuO₂-Pulvermengen homogenisiert. Zur Kontrolle der Einwaage und des Mischvorganges wurden aus der trockenen Pulvermischung Proben zur Analyse gezogen. Durch die Gegenüberstellung der theoretischen und der gefundenen Werte konnte die Richtigkeit der Einwaage bestätigt werden. Alle Eingabedaten und Ergebnisse sind im Mischprotokoll, Tabelle X, zusammengefaßt.

Tabelle X Mischprotokoll für den Brennstoff

Mischkomponenten		Me - Gehalt		
K_U	UO ₂ mit 86,4 % U-235	88,03 Gew.-%		
K_{Pu}	PuO ₂	87,73 Gew.-%		
Mischansatz	Oxid	U	Pu	
K_U (g)	1585,50	1395,72		
K_{Pu} (g)	397,66		348,87	
$K_U + K_{Pu}$ (g)	1983,16	1395,72	348,87	
Ergebnisse (Gew.-%)	U-Gehalt im Oxid	Pu-Gehalt im Oxid	$\frac{Pu}{U + Pu}$	
berechnet	70,38	17,59	19,98	
analytisch	70,20	17,41		

7.2 Herstellung der UO₂-PuO₂-Tabletten

7.2.1 Zugabe von Binde- und Gleitmitteln

Die hergestellte Pulvermischung konnte trocken, d.h. ohne Zugabe von Binde- und Gleitmitteln, nicht verpreßt werden. Es war eine Plastifizierung erforderlich. Als Plastifizierungsmittel wurden 1,0 Gew.-% Polyvinylalkohol und 1,5 Gew.-% Stearinsäure in Lösungsform der trockenen Pulvermischung zugesetzt. Diese Zugabe erfolgte direkt im Lödige-Mischer. Im Anschluß an den Plastifizierungsvorgang wurde im Vakuum-Trockenschrank bei einer Temperatur um 60°C und einem Druck von 10 Torr der größte Teil des zur Plastifizierung verwendeten Lösungsmittels wieder entfernt.

7.2.2 Herstellung der Preßlinge

Das preßfähige Pulvergemisch wurde in einer mechanischen Presse zu Tabletten verpreßt. Die Tabelle XI gibt einen Überblick über die Preßdichte der hergestellten Grünlinge und die Zuordnung zu den entsprechenden Werten der Endsinterdichte. Obwohl der angegebene Preßdichte-Bereich nur sehr eng gewählt wurde, ist die Tendenz einer ansteigenden Sinterdichte mit steigender Preßlingsdichte erkennbar.

Tabelle XI Preßdichte der Grünlinge und Endsinterdichte

Preßdichte (g/cm ³)	Sinterdichte (g/cm ³)
6,08	9,37
6,10	9,35
6,11	9,41
6,14	9,32
6,14	9,41
6,15	9,45
6,17	9,36
6,17	9,44
6,19	9,45
6,27	9,49

7.2.3 Sintern der Tabletten

Um die erforderliche Tablettenanzahl zu bekommen, waren zwei Sinterchargen nötig.

Vor der eigentlichen Sinterung mußten die bei der Plastifizierung zugegebenen organischen Zusätze wieder entfernt werden. Dazu wurden die Grünlinge bei einer Temperatur von 800°C mit einer Haltezeit von 4 Stunden unter strömendem CO₂ entwachst.

Die Sinterung der Tabletten erfolgte in einem "Batchtype"-Schacht-
ofen mit Molybdän-Heizleitern und Molybdän-Chassis-Gestell. Folgende
Sinterbedingungen wurden bei der Herstellung der Tabletten eingehalten:

- Sintertemperatur 1500 - 1550 °C
- Aufheizrate 350 - 400 °C/Stunde
- Haltezeit 120 Minuten
- Atmosphäre Formiergas mit 92 Vol.-% N₂
und 8 Vol.-% H₂

Zur Kontrolle und Überwachung der erwähnten Betriebsdaten ist der
Ofen mit den entsprechenden Temperaturmeß- und Regeleinheiten ausge-
stattet.

Insgesamt wurden etwa 2500 Tabletten in zwei Sinterchargen gefertigt.
Dabei war einmal die vorgegebene Dichtespezifikation zu erfüllen,
doch wurde auch besonderer Wert auf die Genauigkeit der Tabletten-
durchmesser gelegt. Es sollte die Durchmessertoleranz nicht durch
nachträgliches Schleifen, sondern durch Maßsintern eingehalten werden.

7.3 Prüfungen an den Tabletten

7.3.1 Chemische Prüfungen

Es wurden 5 Tabletten auf U, Pu und Sauerstoffgehalt in den Sinter-
körpern analysiert. Zur Bestimmung des Feuchtegehaltes wurden 10
Tabletten herangezogen. Dabei wurden die Proben in trockenem Inert-
gas auf 600°C bis zur vollständigen Abgabe des Wassers erhitzt. Für
den Restgasgehalt kann nur eine mit ziemlicher Unsicherheit behaftete
Angabe gemacht werden. Er wurde durch Ausheizen einer Probe bei
1700°C (10 Minuten, 10⁻³ Torr) in einem Tantal-Tiegel bestimmt. Alle
Ergebnisse sowie die weiterhin an Einzeltabletten gemessenen chemi-
schen Verunreinigungen sind in den Tabellen XII und XIII zusammenge-
faßt.

Tabelle XII Zusammensetzung der Tabletten

Messung Nr.	U-Gehalt (Gew.-%)	Pu-Gehalt (Gew.-%)	Pu/U-Verhältnis	O/Me-Verhältnis
1	70,03	17,77	0,2537	2,00
2	70,10	17,97	0,2563	2,00
3	70,29	17,89	0,2545	2,00
4	70,28	17,83	0,2537	2,00
5	69,40	18,11	0,2609	2,00
Mittelw.	70,02	17,91	0,2558	2,00

Tabelle XIII Verunreinigungen in den Brennstofftabletten

Al	30 ppm
Ag	< 1
B	0,3
Bi	< 10
C	314
Ca	25
Cd	< 1
Cl	< 5
Cr	25
Cu	< 1
F	33
Fe	100
Mg	5
Mn	< 10
Mo	10
N	46
Na	< 5
Ni	15
Pb	< 10
Si	20
Sn	< 5
V	< 5
Zn	< 10
Dy	< 1
Eu	< 1
Gd;	< 1
Sm	< 1
H ₂ O	21 ppm ⁺)
Restgas	62 µl/g

+) Mittelwert aus 10 Messungen

7.3.2 Isotopenzusammensetzung

Die Ergebnisse der Isotopenanalyse an einer Tablette sind in Tabelle XIV wiedergegeben.

Tabelle XIV Isotopenanalyse im Sinterkörper

Isotop	Anteil im U (Gew.-%)	Isotop	Anteil im Pu (Gew.-%)
U-234	0,552	Pu-239	91,09
U-235	85,72	Pu-240	8,15
U-236	0,285	Pu-241	0,718
U-238	13,44	Pu-242	0,040

7.3.3 Tablettendurchmesser und -höhe

Die geometrischen Abmessungen wurden mit einer Mauser-Präzisionsmeßuhr (Durchmesser- und Höhenbestimmung mit Schneidentaster) ermittelt. Diese Meßwerte (an insgesamt 951 Tabletten) liegen der statistischen Auswertung in 7.4 zugrunde. Aus Durchmesser und Höhe läßt sich das Zylindervolumen V_Z der Tablette errechnen. Maß- und Rechenwerte finden sich in den Tablettenlisten im Anhang 2.

Es zeigte sich bei Vorversuchen, daß das bei der Nukem hergestellte, angereicherte UO_2 -Pulver noch zu gutes Sintervermögen besaß, so daß es Schwierigkeiten bereitete, die geforderte Endsinterdichte und den entsprechenden Tablettendurchmesser einzuhalten. Die Sinterung der beiden Hauptchargen bestätigten diese Ergebnisse. Während die Sinterdichte den spezifizierten Werten entsprach, lag der Tablettendurchmesser an der unteren Toleranzgrenze. Bei einem Teil wurde eine Unterschreitung um 20 μm gemessen.

Eingehalten werden konnte bei den Maßsinterungen dagegen die ebenfalls spezifizierte Durchmesserschwankung um den erzielten Mittelwert (wobei der Mittelwert selbst nicht mit dem theoretisch gewünschten Wert übereinstimmte). Dieser Schwankungsbereich war auch im Hinblick auf spätere Fertigungen mit $\pm 50 \mu m$ spezifiziert. Nachdem 95 % aller

hergestellten Tabletten im Bereich von $\pm 35 \mu\text{m}$ lagen, dürfte es - nach einigen weiteren Arbeiten auf dem Sektor der Pulverentwicklung - möglich sein, Pulver herzustellen, bei denen auch für niedrigdichte Pellets der spezifizierte Mittelwert des Tabletten-durchmessers bei der Fertigung mit vernünftigem Aufwand erreicht werden kann.

7.3.4 Volumen der Stirnflächeneinsenkung (Dishing)

Zur Ermittlung des Einsenkvolumens V_D wurde mikroskopisch der Durchmesser der Kugelkalotte bestimmt. Die zur Berechnung notwendige Kalottenhöhe wurde mit einer Präzisionsmeßuhr (Spitzentaster) gemessen. Die Tabelle XV enthält die an je 10 Tabletten aus jeder Sinterung gemessenen und berechneten Werte für das Einsenkvolumen. Auch hier entsprachen alle Werte den geforderten Spezifikationen.

Tabelle XV Einsenk-Volumen der Sinterkörper

Tablette Nr.	Einsenk-Volumen in ‰	
	Sinterung 1	Sinterung 2
1	3,25	3,15
2	3,31	3,28
3	3,21	3,27
4	3,23	3,16
5	3,27	3,27
6	3,25	3,23
7	3,17	3,15
8	3,21	3,13
9	3,13	3,14
10	3,30	3,28
Mittelwert	3,23	3,21

7.3.5 Dichtebestimmungen

Das Materialvolumen der Tablette ist

$$V_P = V_Z - V_D$$

Für V_D wurde einheitlich der Wert

$$V_D = 0,03 \cdot V_Z$$

genommen, obwohl die genaue Bestimmung im Mittel einen etwas größeren Wert erbrachte. Die Materialdichte einer Tablette ist dann

$$\rho = \frac{G}{V_P} = \frac{G}{0,97 \cdot V_Z} = \frac{G}{0,762 \cdot d^2 \cdot \ell}$$

Dabei ist

- G das Gewicht (bestimmt mit einer Oberschaligen Sauter-Präzisionswaage)
- d der Tablettendurchmesser
- ℓ die Tablettenhöhe

Bei der Gewichtsbestimmung war der Maximalfehler $\pm 5 \text{ mg} \hat{=} \pm 0,5 \%$, bei den Längenmessungen $\pm 0,015 \text{ mm} \hat{=} \pm 0,3 \%$. Der relative Größtfehler in der Materialdichte beträgt damit $\pm 1,4 \%$.

Entsprechend den Spezifikationen sollte bei einigen Tabletten die Immersionsdichte nach der Auftriebsmethode bestimmt werden. Da die üblicherweise verwendeten organischen Flüssigkeiten aus Sicherheitsgründen zur Bestimmung im Handschuhkasten ausfäulen, wurden einige Vorversuche mit nicht brennbaren Substanzen durchgeführt, die aber nur unbefriedigende Ergebnisse brachten. Die Suche nach besser geeigneten Eintauchflüssigkeiten wurde dann auch aus Zeitmangel aufgegeben, so daß dieser Punkt der Spezifikation nicht erfüllt werden konnte.

Die lineare Dichte ist - entsprechend der Spezifikation - das Gewicht einer einzelnen Tablette dividiert durch ihre Länge. Hier ergibt die Fehlerrechnung (mit den bereits oben erwähnten Meßgenauigkeiten), daß die berechneten Werte der linearen Dichte mit einem Fehler von $\pm 0,8 \%$ behaftet sind.

Alle Tabletten lagen innerhalb der spezifizierten Dichtetoleranz von $\pm 3,5\%$. Da die Meßmethoden in den Handschuhkästen nicht mehr als eine dreistellige Zahlangebe für Maß und Gewichte zulassen, lagen die Werte der linearen Dichte bei einigen Tabletten an der oberen Toleranzgrenze von $1,96 \text{ g/cm}$. Auch die Dichtewerte wurden statistisch ausgewertet, siehe 7.4. Alle Meß- und Rechenwerte sind wieder in den Tablettenlisten im Anhang 2 aufgeführt.

7.3.6 Rechtwinkeligkeit zwischen Stirn- und Mantelfläche

Die entsprechende Messung wurde an der Stirnseite ohne Einsenkung durchgeführt. Dabei wurde die Stirnseite mit einem Meßtaster abgetastet, während sich die Tablette langsam drehte. Wie die Meßwerte in Tabelle XVI an 2 x 25 Tabletten zeigen, ist die Spezifikationsgrenze $30 \mu\text{m}$ durchwegs eingehalten.

7.3.7 Ausbrüche und Abplatzungen auf der Tablettenoberfläche

Zur Beurteilung der Abplatzungen wurden einige Tabletten ausgewählt, deren Oberflächenfehler charakteristisch sowohl für die Art als auch für das Ausmaß waren. Diese Tabletten wurden bei der visuellen Kontrolle als Vergleichsstandards benutzt. In der Abb. 4 sind Bilder dieser Tabletten in mehrfacher Vergrößerung zu sehen. Tabletten mit größeren Abplatzungen wurden aussortiert.

7.3.8 Plutonium-Verteilung

Die Pu-Verteilung wurde an Hand von Alpha-Autoradiografien nachgeprüft. Diese Prüfungsmethode erfolgte nach folgendem Schema:

Die Tabletten wurden auf der planen Stirnfläche metallografisch geschliffen und poliert. Die Schliff-Fläche wurde mit einer Mylar-Folie abgedeckt (zum Kontaminationsschutz) und darauf der fotografische Film gelegt. Die Aufnahmezeit beträgt 30 Minuten. Anschließend wurde der Film entwickelt, kopiert und vergrößert.

Die Abb. 5 zeigt die Positive dieser Autoradiogramme. Auf den Bildern stellen die weißen Punkte die PuO_2 -Teilchen dar. Aus den Autoradiogrammen ist ersichtlich, daß in den Tabletten kein PuO_2 -Teilchen größer als $100 \mu\text{m}$ vorhanden war.

Tabelle XVI Rechtwinkeligkeit der Tabletten
Abweichung in μm

Tablette Nr.	aus Sintercharge 1	aus Sintercharge 2
1	20	18
2	32	28
3	20	28
4	20	30
5	12	20
6	22	26
7	36	20
8	26	26
9	28	20
10	28	26
11	24	24
12	30	26
13	22	18
14	12	18
15	24	24
16	20	30
17	32	18
18	16	16
19	12	26
20	30	14
21	32	26
22	22	12
23	30	22
24	16	20
25	28	22
Mittelwert	24	22

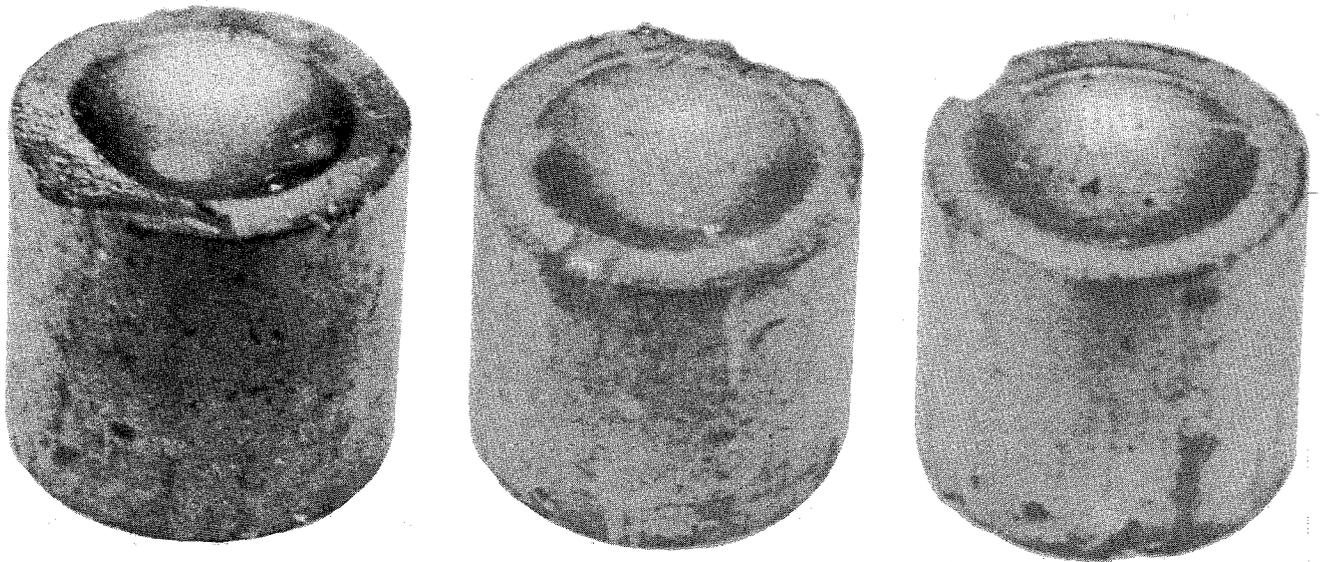
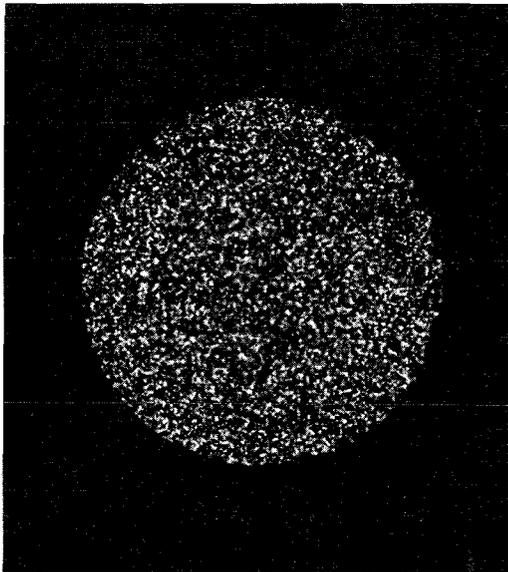
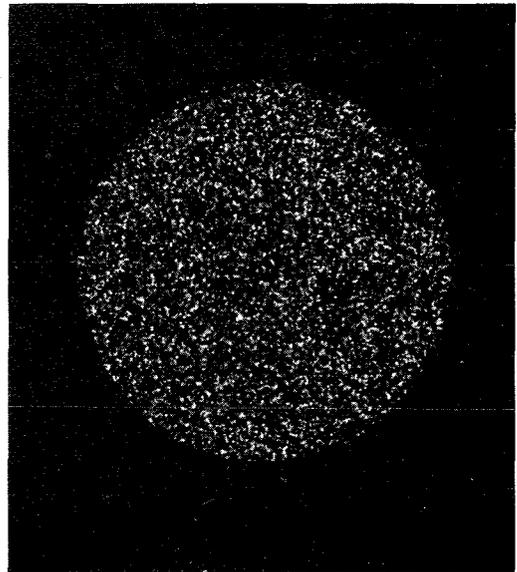


Abb. 4 Tabletten mit Abplatzungen als Vergleichsstandard



Tablette aus Charge 1



Tablette aus Charge 2

Abb. 5 Alpha-Autoradiografien von Brennstofftabletten
(Vergrößerung ca. 9-fach)

7.3.9 Keramografische Untersuchungen

Die keramografischen Untersuchungen sollten Aussagen über die Porenverteilung und die Mikrostruktur liefern. Dazu wurden die Proben in eine Kunstharzmasse eingebettet, geschliffen und poliert. Nach dieser Vorbehandlung wurden die hergestellten Schliffe mikroskopisch auf Porengröße und Porenverteilung untersucht. Es zeigte sich, daß der durchschnittliche Porendurchmesser bei 40 µm lag. Maximal wurden Poren mit einem Durchmesser von 70 µm gefunden. Die Poren waren gleichmäßig über den gesamten Tablettenquerschnitt verteilt. Im Anschluß an die Porenuntersuchung wurden die Proben mit konzentrierter HNO_3 und HF bei Zimmertemperatur geätzt, um Korngrenzen sichtbar zu machen. Dabei erwies sich, daß kein Unterschied in der Korngröße zwischen Tablettenmitte und Tablettenrand bestand. Die spezifizierten fotografischen Aufnahmen (in 15- und 250-facher Vergrößerung) konnten nicht hergestellt werden, da das verfügbare Metallmikroskop für Fotoarbeiten nicht geeignet war.

7.4 Statistik für die UO_2 - PuO_2 -Tabletten

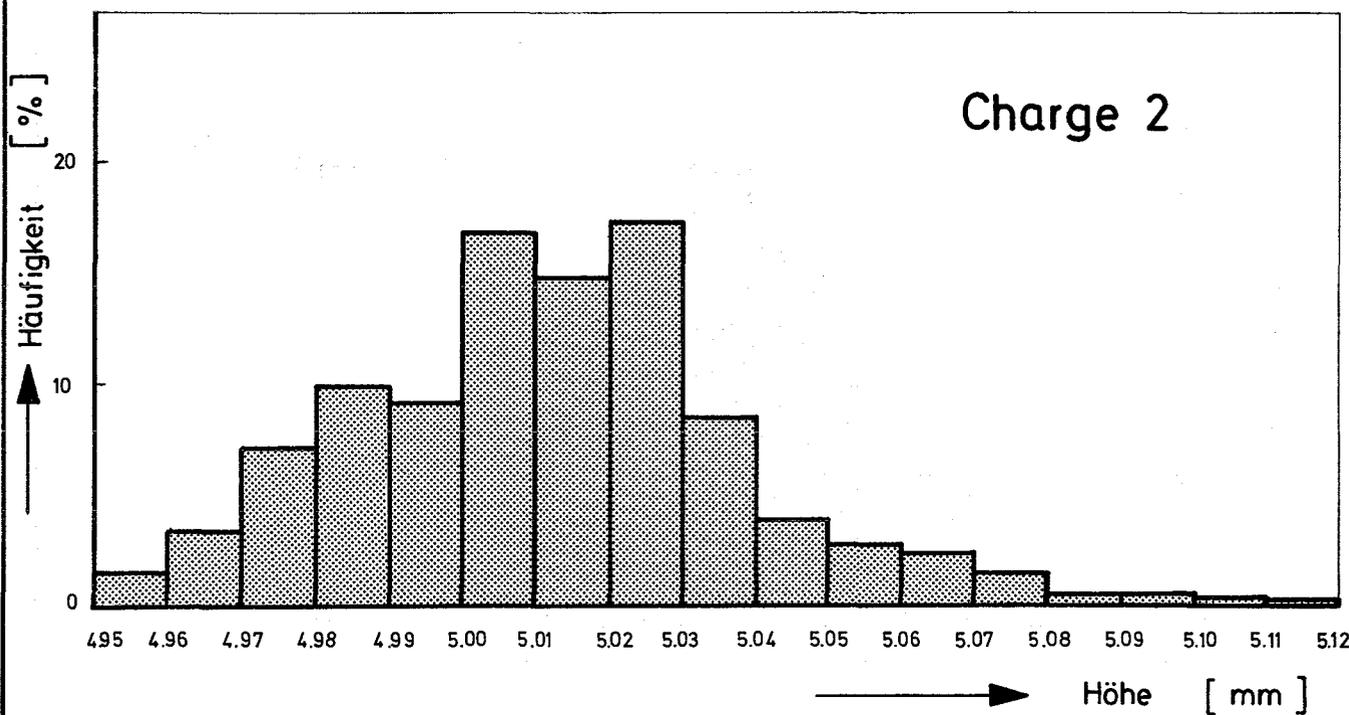
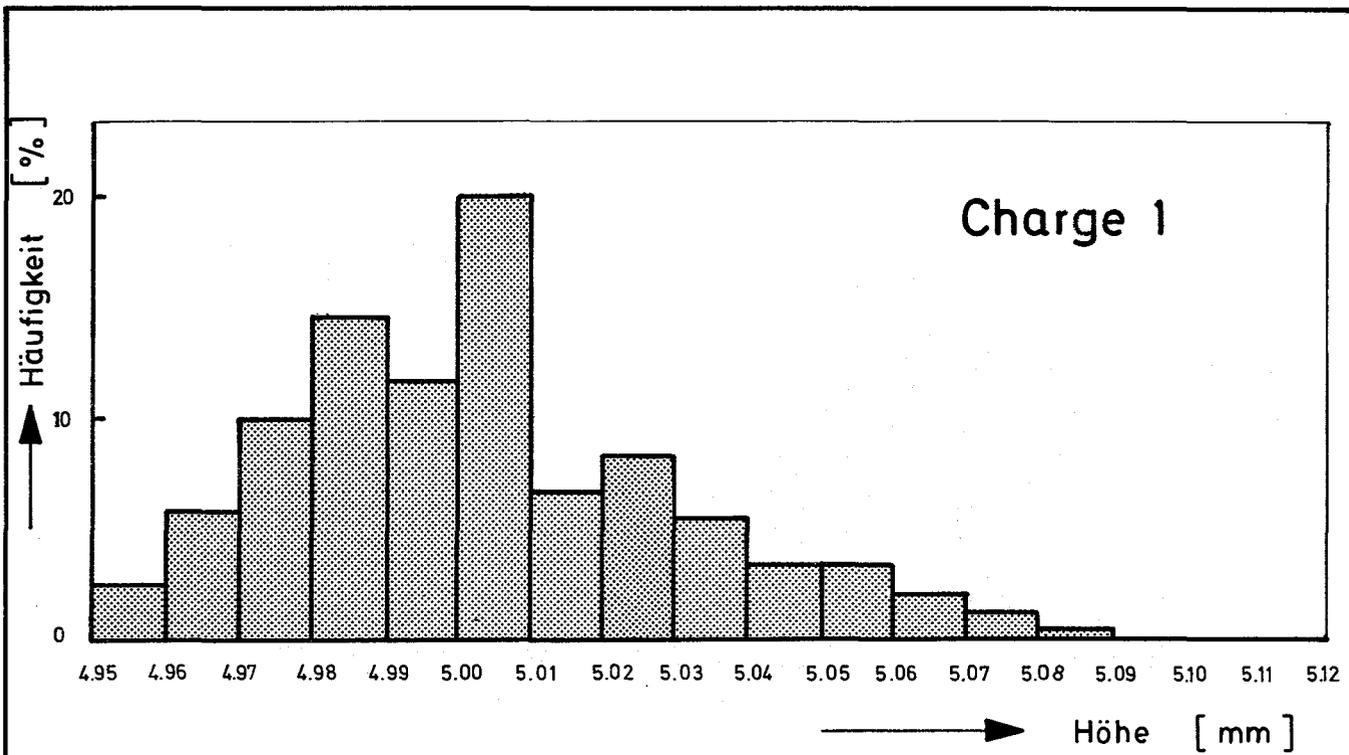
Aus den beiden Sinterchargen wurden 951 Einzeltabletten genau hinsichtlich Durchmesser, Länge und Gewicht vermessen und zwar

- aus Charge 1 479 Stück, Tabletten-Nr. 1 bis 479,
- aus Charge 2 472 Stück, Tabletten-Nr. 800 bis 1271.

Die Meßwerte von 809 Tabletten sowie die daraus berechneten Dichten finden sich in den Listen der Tabletensäulen im Anhang 2.

Alle Meßwerte wurden klassifiziert. Die Klassenhäufigkeit ist in Histogrammen über der Merkmalsteilung aufgetragen, Abb. 6 bis 9. Im einzelnen ist dargestellt für Sintercharge 1 bzw. 2 :

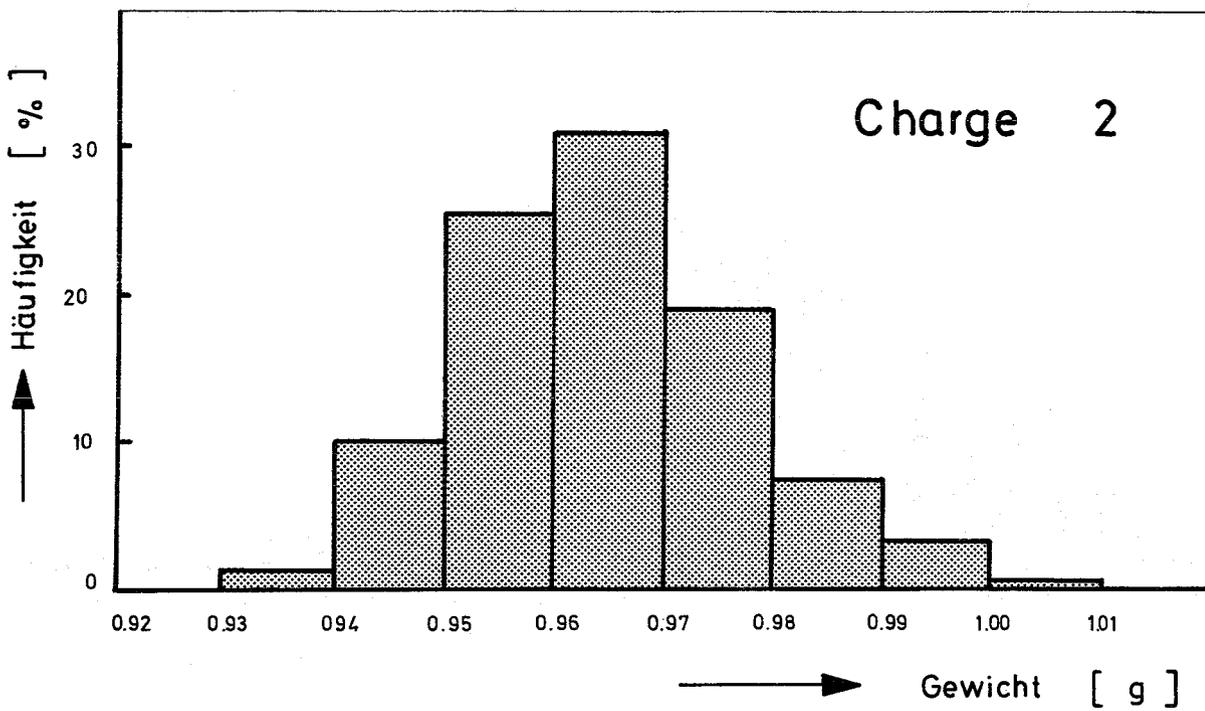
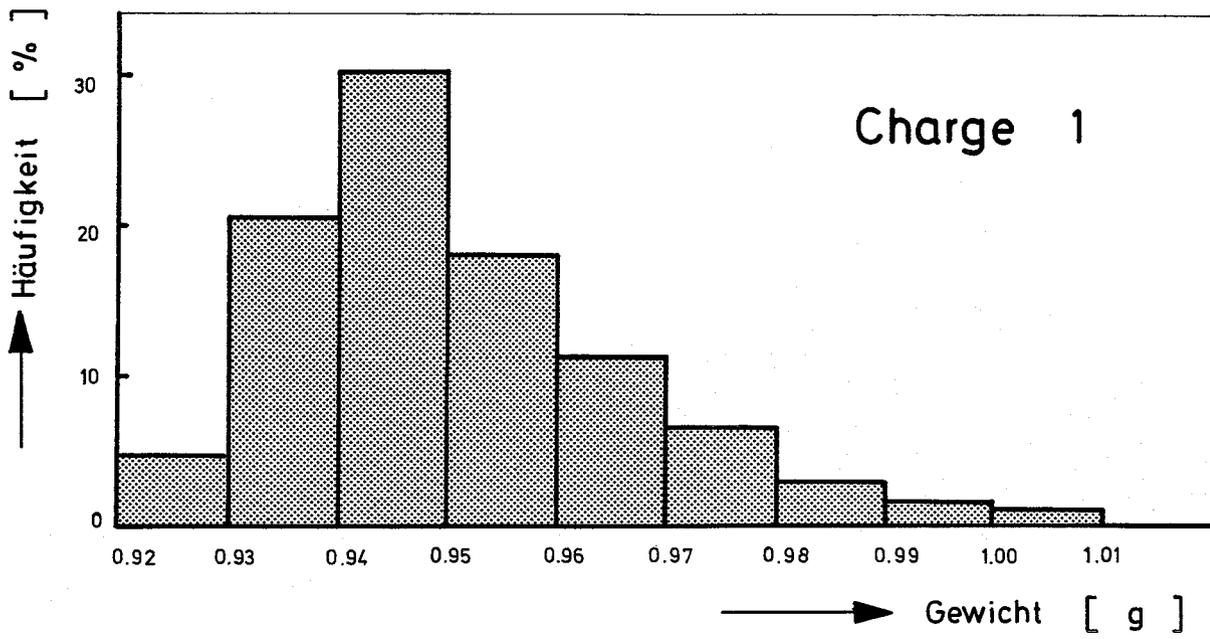
- die Verteilung der Tablettenhöhe in Abb. 6,
- die Verteilung des Tablettengewichtes in Abb. 7,
- die Verteilung der Materialdichte in Abb. 8,
- die Verteilung der linearen Dichte in Abb. 9.

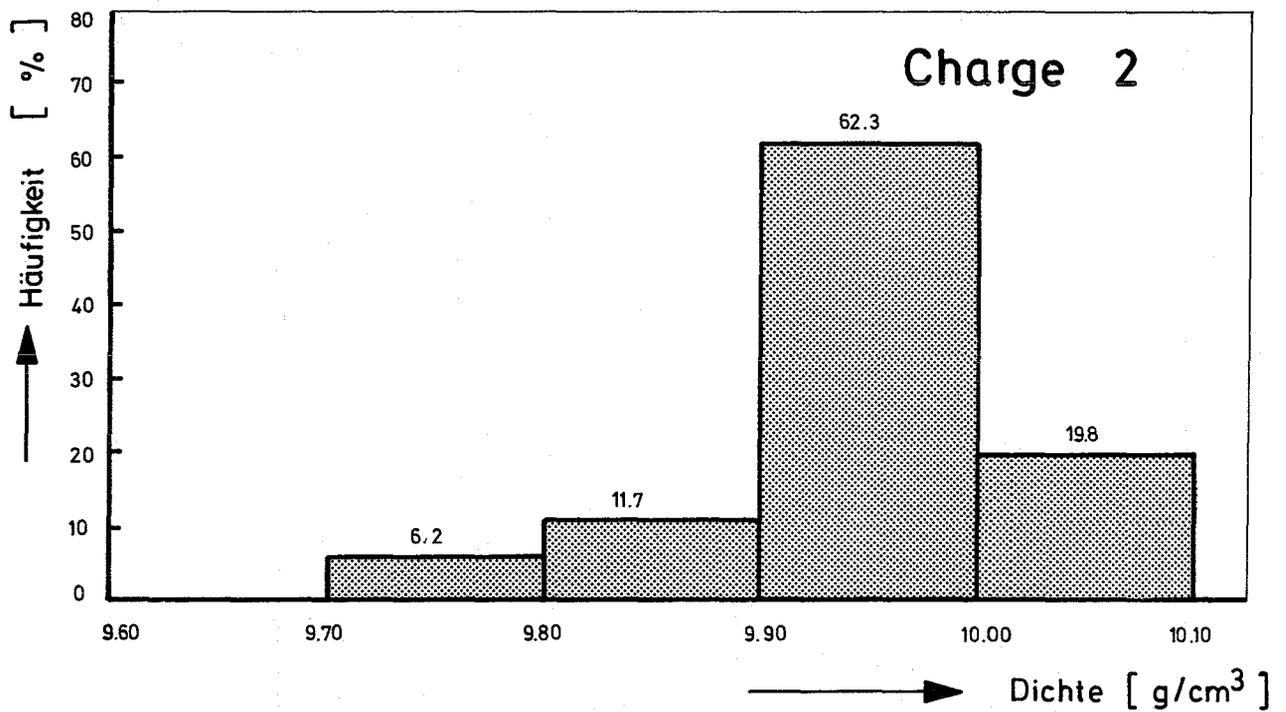
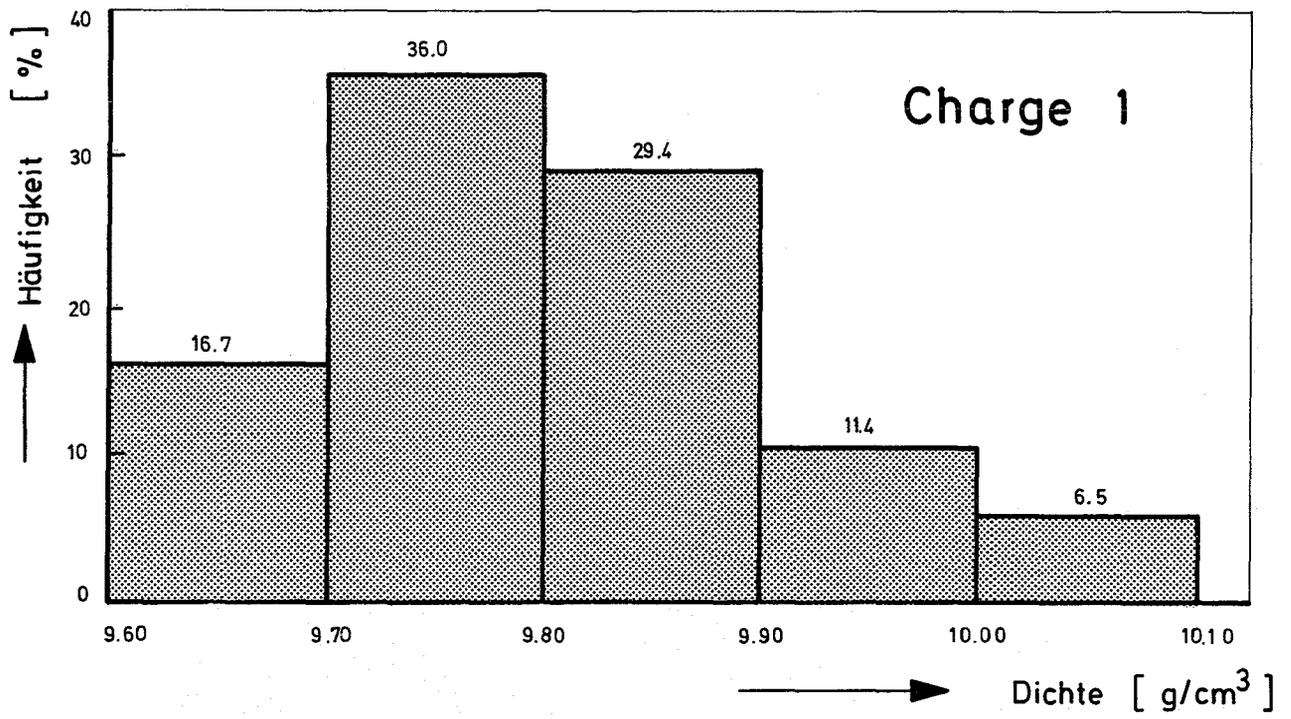


GfK Karlsruhe
IMF/LB

Häufigkeitsverteilung der
Tablettenhöhe

Abb. 6

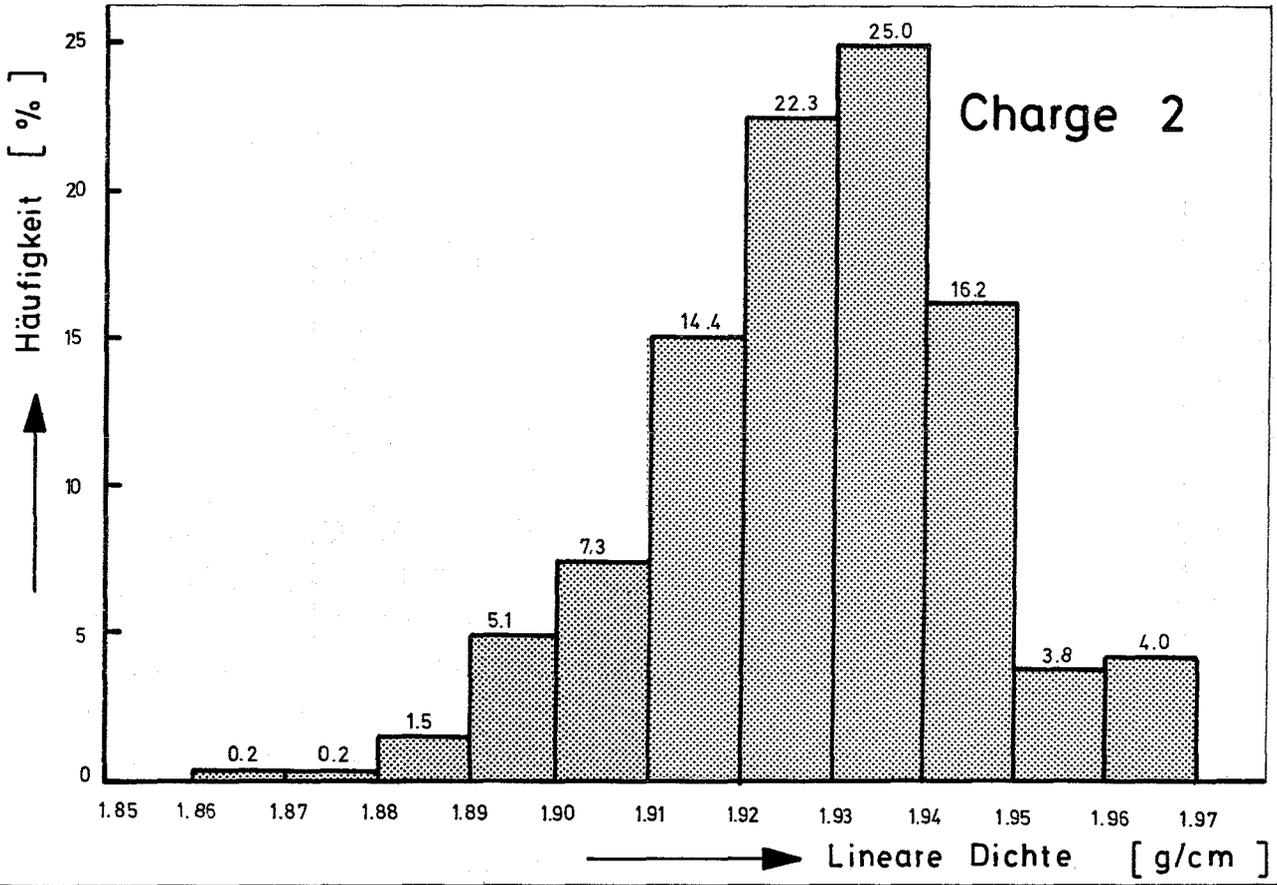
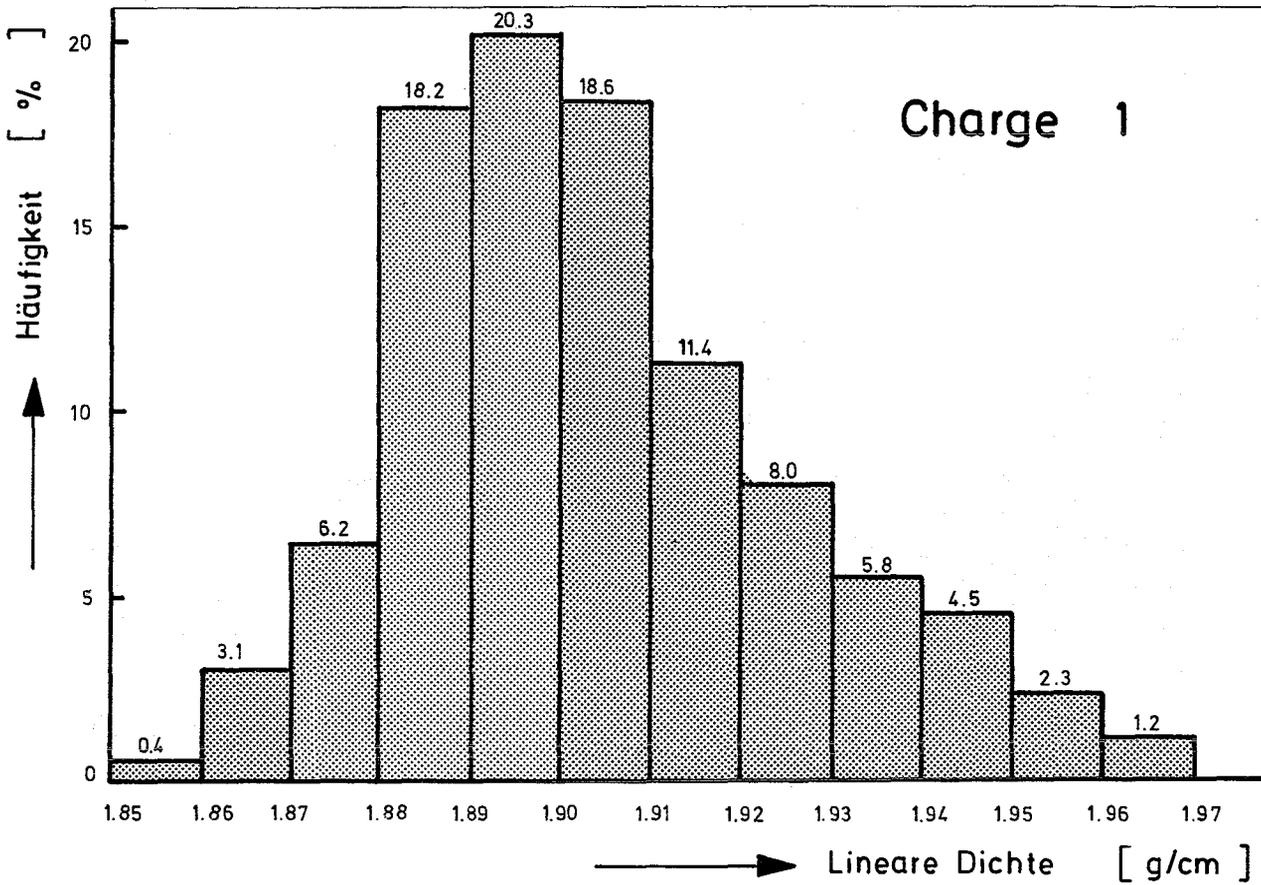




GfK Karlsruhe
IMF/LB

Häufigkeitsverteilung der
Materialdichte

Abb. 8



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Häufigkeitsverteilung der
linearen Dichte

Abb. 9

Die Verteilungskurven für die Tablettendurchmesser sind nicht aufgeführt, da die Tabletten nach Durchmessern aussortiert wurden und daher keine echte statistische Verteilung mehr gegeben war.

Zu den Verteilungskurven gehören Mittelwerte und Standardabweichungen, die aus den Einzelwerten X_i nach folgenden Formeln errechnet wurden:

$$\text{Mittelwert} \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\text{Standardabweichung} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle XVII aufgeführt.

Tabelle XVII Tablettenstatistik

		Charge 1	Charge 2
Tablettenhöhe l (mm)	Mittelwert	5,00	5,01
	Standardabweichung	$3,43 \cdot 10^{-2}$	$3,45 \cdot 10^{-2}$
Tablettengewicht G (g)	Mittelwert	0,950	0,964
	Standardabweichung	$16,5 \cdot 10^{-3}$	$12,9 \cdot 10^{-3}$
Geometrische Dichte ρ (g/cm ³)	Mittelwert	9,80	9,95
	Standardabweichung	$10,8 \cdot 10^{-2}$	$8,48 \cdot 10^{-2}$
Lineare Dichte ρ_L (g/cm)	Mittelwert	1,90	1,92
	Standardabweichung	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$

7.5 Herstellung und Prüfung der Brutstoff-Tabletten

Die UO_2 -Sinterkörper für die Brutzone der Stäbe enthalten Natururan. Sie wurden im Unterauftrag bei der Fa. Nukem gefertigt und geprüft. Da es sich bei diesen UO_2 -Tabletten um Sinterkörper mit "normaler" Sinterdichte (etwa 95 % der theoretischen Dichte) handelt, erfolgte die Herstellung nach dem bei der Nukem üblichen Standardverfahren.

Dazu wurde ADU-gefälltes UO_2 -Pulver ohne Zusatz von Bindemitteln verpreßt, die Grünlinge im Durchstoßsinterofen bei Temperaturen um $1700^\circ C$ in reinem H_2 gesintert und anschließend auf einer spitzenlosen Rundschleifmaschine auf den gewünschten Durchmesser geschliffen.

In Tabelle XVIII sind die Prüfergebnisse hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung erfaßt. Tabelle XIX bringt Meßwerte über Durchmesser, Höhe und Dichte der Tabletten sowie statistische Angaben. Das spezifikationsgerechte Aussehen der Tabletten wurde von der Herstellerfirma bestätigt.

Tabelle XVIII Zusammensetzung des UO_2 und Verunreinigungen

Uran-Gehalt	88,13 Gew.-%
O/U-Verhältnis	2,00
Ag	< 0,05 ppm
Al	< 8
B	< 0,08
C	15
Ca	< 20
Cd	< 0,07
Cl	4
Co	< 1
Cr	< 3
Cu	< 0,3
F	4
Fe	15
Mn	< 1
Mo	< 1
N	< 3
Ni	< 2
Pb	< 1
Si	< 5
Ti	< 0,2
W	< 0,2
H_2O	4 ppm
Restgas	< $5 \cdot 10^{-3}$ Ncm ³ /g

Tabelle XIX

Durchmesser, Höhe und Dichte der Brutstoff-Tabletten

	Spezifikation	Meßge- nauigkeit	Messungen		Statistik		
			Anzahl	Wert	n	\bar{X}	σ
Durchmesser (mm)	$5,10 \pm 0,05$	0,002	2x 9x 25x 23x 2x	5,088 5,090 5,092 5,094 5,096	61	5,092	0,0018
Höhe (mm)	$5,0 \pm 0,5$	$\pm 0,05$	4x 4x 4x	4,80 4,85 4,90	12	4,85	0,042
Dichte (g/cm ³)	$10,41 \pm 0,33$		1x 1x 1x 1x 1x 1x 1x 2x 1x 2x	10,24 10,33 10,37 10,39 10,45 10,46 10,47 10,48 10,51 10,56	12	10,44	0,10

7.6 Hüll- und Strukturmaterial

7.6.1 Hüllrohrmaterial

Es kamen 2 verschiedene Hüllmaterialien zur Verwendung, nämlich

- X8 Cr Ni Mo V Nb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4988
- X8 Cr Ni Nb 1613, Werkstoff-Nr. 1.4961

Die Hüllrohre stammen aus Lieferungen der Fa. Mannesmann vom Jahre 1968. Die Rohrlänge bei Anlieferung betrug ca. 650 mm. Der Außendurchmesser der Rohre betrug 6,0 mm und der Innendurchmesser 5,24 mm.

Die Rohre kamen im Anlieferungszustand zur Verwendung. Dieser entsprach dem sog. "Rohrzustand", nämlich

- Lösungsglühen 2 - 3 Stunden bei 1100 - 1150°C
- Richtzug bis 5 % Kaltverformung.

7.6.2 Hüllrohrprüfung

Die vom Hersteller unabhängige Hüllrohrprüfung wurde durch die Firma Siemens, Erlangen, durchgeführt. Es wurde bei jedem Rohr geprüft

- auf Rißfehler mit Ultraschall
- auf Wanddicke mit Ultraschall
- auf Innendurchmesser
- auf Außendurchmesser.

Ausgewählt wurden nur Rohre, die frei von Rißfehlern waren. Alle Einzelergebnisse sind in Form von Meßschriften vorhanden. Für Wanddicke, Innen- und Außendurchmesser sind die gemessenen Grenzwerte in die Datenübersicht für die fertigen Brennstäbe im Anhang 3 eingetragen.

7.6.3 Hüllrohre in den Brennstäben

Für die Stabfertigung herangezogen wurden insgesamt 63 Rohre aus den weit umfangreicheren Lieferungen. Die schließlich fertiggestellten 30 Brennstäbe enthalten davon 30 Hüllrohr nach der Zuordnung gemäß Tabelle XX.

Zur Herstellung der fertigen Hüllrohre wurden die Lieferlängen beidseitig durch je einen Abstich von etwa 60 bzw. 94 mm gekürzt, so daß die nötige Endlänge von 496,0 mm entstand.

7.6.4 Endstopfen und Zwischenstopfen

Das Material für die Stopfen entsprechend dem Hüllrohrwerkstoff wurde von der Fa. Siemens geliefert und von der Fa. Alkem spezifikationsgerecht verarbeitet.

Tabelle XX

Zuordnung von Hüllrohr und Brennstab

Hülle Werkstoff-Nr. 1.4988		Hülle Werkstoff-Nr. 1.4961	
Brennstab-Nr.	Hüllrohr-Nr.	Brennstab-Nr.	Hüllrohr-Nr.
G 2	26 A/d	G 36	406 B/a
G 4	243 B/a	G 39	589 B/a
G 6	261 B/a	G 40	621 B/a
G 7	276 B/a	G 41	406 B/b
G 8	278 B/a	G 43	459 B/b
G 9	292 B/a	G 46	721 B/b
G 12	224 B/b	G 49	769 B/b
G 14	276 B/b	G 50	460 B/c
G 16	297 B/b	G 51	570 B/c
G 17	301 B/b	G 52	589 B/c
G 18	171 B/c	G 56	721 B/c
G 19	228 B/c	G 57	420 B/d
G 21	258 B/c	G 58	444 B/d
G 24	301 B/c	G 59	459 B/d
G 33	285 B/d	G 61	621 B/d

7.6.5 Sonstige Einbauteile

- Die Druckfedern und Sinterstahlfilter wurden spezifikationsgerecht von GFK beige stellt.
- Die Radon-Monitore wurden von der UKAEA geliefert und gemäß Zeichnung TA-2K-16-07-3-3051 in den Zwischenstopfen eingesetzt.
- Die Isoliertablette aus UO_2 mit Natururan wurde aus der Produktion der Blanket-Tabletten entnommen.

7.7 Tablettensäulen

7.7.1 Tablettenzahl und Anordnung

Die Tablettensäule jedes Brennstabes setzt sich gemäß dem Schema in Abb. 10 aus einer Brutzone (oben) und der eigentlichen Brennstoffsäule zusammen und wird unten durch eine UO_2 -Isolierplatte abgeschlossen. Die 100 mm lange Brutzone besteht aus 21 UO_2 -Tabletten und die Brennstoffzone enthält 57 bis 59 UO_2 - PuO_2 -Tabletten. Die tatsächliche Anzahl der Brennstofftabletten ist in der Datenübersicht für die fertigen Brennstäbe, Anhang 3, mit angegeben.

7.7.2 Legen der Tablettensäulen

Die UO_2 - und UO_2 - PuO_2 -Tabletten wurden zu Säulen mit spezifizierten Längen gelegt. Dies geschah mittels einer Vorrichtung, die aus einer Auflage mit prismatischem Einschnitt und einem festen Anschlag besteht. Mittels eines geeichten Meßstabes wird die vorgegebene Säulenlänge eingestellt und die Einzeltabletten werden eingelegt. Die Vorrichtung ist auf eine Waage montiert, so daß gleichzeitig das Gewicht der Tablettensäule bestimmt werden kann.

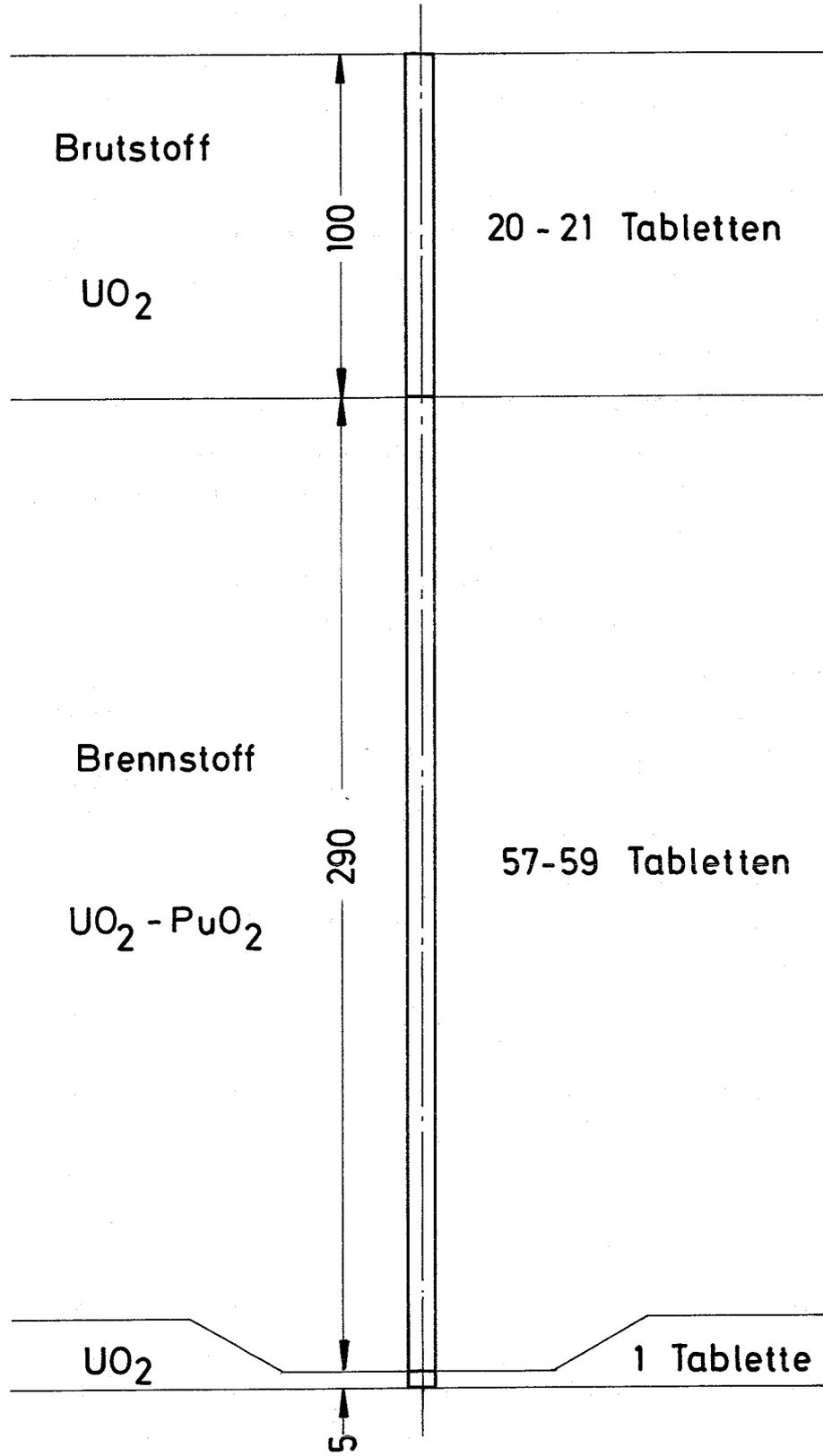
Die Meßwerte für Säulenlängen und -gewichte sind wieder in der Datenübersicht, Anhang 3, eingetragen.

7.7.3 Identifizierung der Brennstofftabletten

Von den 30 Tablettensäulen enthalten 14 Säulen Brennstofftabletten, die individuell ausgemessen und registriert wurden. Diese 14 Säulen umfassen insgesamt 809 UO_2 - PuO_2 -Tabletten. Diese Menge ist (bis auf einen Rest von 142 Tabletten) identisch mit der Tablettenmenge, die zur statistischen Auswertung in 7.4 herangezogen wurde.

Für jede der 14 Tablettensäulen wurden die individuellen Tabletten-daten in einer Liste zusammengestellt, siehe die Tabellen in Anhang 2. Dort ist auch die lokale Identifizierung sinngemäß (von oben nach unten) festgelegt. Am Schluß der Tabellen sind die Mittelwerte und Summen der Einzeldaten ausgerechnet. Außerdem sind zum Vergleich die Gesamtmessungen an den gelegten Säulen eingetragen.

Dieser Vergleich zwischen der Addition von Einzelmessungen an den Tabletten und der Gesamtmessung an der gelegten Brennstoffsäule ist für die 14 individuell behandelten Säulen in Tabelle XXI zusammen-



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Schema der Tablettensäule

Abb. 10

fassend dargestellt. Bei den Höhermessungen bringt die Gesamt-
messung meist einen deutlich größeren Wert. Eine Abweichung vom
Summenwert um ± 1 mm ist plausibel, wenn man die Ungenauigkeiten
in der Höhermessung und in der Rechtwinkeligkeit betrachtet. In
4 Fällen liegen die gemessenen Säulenhöhen außerhalb dieses Berei-
ches. Hierbei dürfte es sich um echte Meß- oder Einfüllfehler handeln.
Bei der Diskussion des Gewichtsvergleichs kann man (durch Summierung
der Wäugeunauigkeit bei den Einzeltabletten) eine Unsicherheit in
der Gewichtssumme um höchstens $\pm 0,3$ g annehmen. Die Gesamtmessung
ergibt in 8 Fällen Werte, die außerhalb dieses Bereiches liegen. Es
wird angenommen, daß die Gesamtmessungen in diesen Fällen fehlerhaft
sind. Das hängt teilweise auch damit zusammen, daß für die Wägung
der Tablettensäule eine zu grobe Waage benützt wurde. Bezüglich eines
weiteren Kommentars siehe 7.9.7.

Tabelle XXI Vergleich zwischen den Einzelwerten der Tabletten und den
Gesamtwerten der Tablettensäulen

Stab	Höhe der Brennstoffsäule (mm)			Gewicht der Brennstoffsäule (g)		
	Addition der Einzelhöhen A	Gesamt-messung B	Abweichung B - A	Addition d. Einzelgew. A	Gesamt-wägung B	Abweichung B - A
G 2	284,36	287,07	+ 2,71	54,453	55,90	+ 1,45
G 7	289,86	290,00	+ 0,14	55,854	55,90	+ 0,05
G 9	294,31	289,65	- 4,66	56,607	55,70	- 0,91
G 14	284,73	290,00	+ 5,27	54,725	55,90	+ 1,17
G 16	286,92	287,43	+ 0,51	55,577	56,20	+ 0,62
G 18	291,52	290,95	- 0,57	55,397	55,80	+ 0,40
G 19	287,78	288,07	+ 0,29	55,920	56,40	+ 1,48
G 36	290,53	290,97	+ 0,44	55,336	55,30	- 0,04
G 40	288,46	289,20	+ 0,74	54,367	54,30	- 0,07
G 41	290,07	290,74	+ 0,67	55,070	55,10	+ 0,03
G 43	288,53	289,31	+ 0,78	54,446	54,40	- 0,05
G 49	290,23	290,96	+ 0,73	55,259	55,50	+ 0,24
G 51	287,83	288,74	+ 0,91	55,581	55,90	+ 0,32
G 58	293,81	289,50	- 4,31	55,409	54,50	- 0,91

7.8 Fertigung der Brennstäbe

7.8.1 Übersicht

Insgesamt wurden 30 Brennstäbe hergestellt und zwar je 15 mit den beiden Hüllwerkstoffen. Davon enthalten 14 Stäbe Brennstofftabletten, die einzeln vermessen und identifiziert sind. Tabelle XXII bringt eine Übersicht über die Tablettenzahlen in den Stäben. Die Angaben des Herstellers wurden den Stabbegleitkarten entnommen. Die anderen Zahlen wurden aus den Röntgen-Aufnahmen, Abb. 12 (Seite 64), ermittelt. Bei den Stäben G 2, G 9, G 16, G 18 und G 19 differieren die Zahlen um 1 Tablette. Offenbar stimmen in diesen Fällen die Angaben auf den Stabbegleitkarten nicht, siehe den weiteren Kommentar in 7.9.7.

7.8.2 Ablauf der Fertigung

Der Fertigungsablauf der Stäbe aus den bereitgestellten Komponenten ist folgendermaßen gegliedert:

- Verschweißen des unteren Endstopfens mit dem Hüllrohr
- Ablängen des Hüllrohres
- Einfüllen der Tablettensäulen und der Spaltgasraumteile
- Füllen mit Helium und Aufsetzen des oberen Endstopfens
- Verschweißen des oberen Endstopfens
- Endkontrollen am fertigen Stab.

7.8.3 Verschweißen des unteren Endstopfens

Die Endstopfen und die Hüllrohrenden wurden sorgfältig gereinigt. Anschließend wurden die Endstopfen in einer geeigneten Vorrichtung in die Hüllrohre eingepreßt und unter Argonatmosphäre verschweißt. Die Schweißnähte wurden geröntgt und auf Dichtigkeit geprüft. Außerdem wurde die Schweißnahterhöhung gemessen. Wenn die ermittelten Daten spezifikationsgerecht waren, dann wurden die Hüllrohre auf das festgelegte Endmaß abgelängt.

Um genügend Stabhüllen für begleitende Erprobungen zu haben, wurden (bei der Fa. Nukem)

- 30 einseitig verschlossene Hüllrohre aus dem Material
Werkstoff-Nr. 1.4961

und

Tabelle XXII

Anzahl der Tabletten in den Brennstäben

Stäbe mit Hüllwerkstoff Nr. 1.4988					Stäbe mit Hüllwerkstoff Nr. 1.4961				
Stab- Nr.	Brennstoff - Tabletten			Brutstoff- Tabletten Anzahl nach Rö-Aufnahme	Stab- Nr.	Brennstoff - Tabletten			Brutstoff- Tabletten Anzahl nach Rö-Aufnahme
	einzel- vermessen	Anzahl				einzel- vermessen	Anzahl		
		nach Stab- begleitkarte	nach Rö- Aufnahme			nach Stab- begleitkarte	nach Rö- Aufnahme		
G 2	ja	57 ^{+))}	58	21	G 36	ja	58	58	21
G 4	nein		58	21	G 39	nein		58	21
G 6	nein		59	20	G 40	ja	58	58	21
G 7	ja	58	58	21	G 41	ja	58	58	21
G 8	nein		58	21	G 43	ja	58	58	21
G 9	ja	59 ^{+))}	58	21	G 46	nein		58	21
G 12	nein		58	21	G 49	ja	58	58	21
G 14	ja	57	57	21	G 50	nein		58	21
G 16	ja	57 ^{+))}	58	21	G 51	ja	57		
G 17	nein		58	21	G 52	nein			
G 18	ja	58 ^{+))}	57	21	G 56	nein		58	21
G 19	ja	57 ^{+))}	58	21	G 57	nein		58	21
G 21	nein		58	21	G 58	ja	59		
G 24	nein		58	21	G 59	nein		58	21
G 33	nein		58	21	G 61	nein		58	21

+) Abweichung von der Zahl aus der Röntgen-Aufnahme

- 33 einseitig verschlossene Hüllrohre aus dem Material
Werkstoff-Nr. 1.4988

hergestellt. Zur Ermittlung eines geeigneten Schweißprogrammes wurden umfangreiche Vorversuche gemacht. Die Schweißbedingungen mit einer programmgesteuerten Rohrschweißmaschine waren:

Schutzgas:	Argon
Zünden:	16 A (über Stromrelais)
Anlauf:	2 sec auf 38 Amp. steigend
Schweißen:	3,5 sec von 38 auf 32 Amp. abfallend
Auslauf:	2 sec von 32 auf 0 Amp. abfallend
Schweißgeschwindigkeit:	475 mm/Minute

Jede fünfte Schweißnaht wurde entsprechend den Forderungen der Spezifikation als Probeschweißung durchgeführt und metallografisch untersucht. Alle Schweißnähte wurden in einer Ausgleichsform aus Stahl in zwei um 90° versetzten Ebenen geröntgt. Als Fehlerform wurde ein DIN-Steg (10 ISO 16) und ein Stahlzylinder von der Firma Belgonucleaire mit eingedrehten Rillen mitgeröntgt.

Der Heliumlecktest am einseitig verschweißten Rohr wurde mit einem Atlas-Gasdetektor, Typ MS 61, ausgeführt. Die Empfindlichkeit des Gerätes betrug $1 \cdot 10^{-9}$ Torr-liter/sec. Das Eichleck hatte eine Helium-Leckrate von $3,8 \cdot 10^{-7}$ Atm. cm^3 /sec. Die Leckrate war in allen Fällen kleiner als 10^{-8} Torr-liter/sec.

7.8.4 Einfüllen der Hüllrohre

Die gelegten Säulen wurden, auf Paletten mit prismatischen Einschnitten liegend, in die aktive Füllbox eingeschleust und auf einer Auflage fixiert. Das einseitig verschweißte Hüllrohr trug eine gegen Kontamination des Hüllrohrendes schützende Einfüllkappe und wurde gegen eine zwischen aktiver und inaktiver Füllbox sitzenden Trennwand so gedrückt, daß die einzelnen Säulenabschnitte von Hand leicht in das Hüllrohr eingeschoben werden konnten. Die gefüllten Hüllrohre wurden sorgfältig nach hinten aus der Füllkappe gezogen und am offenen Hüllrohrende mehrmals mit einem nicht-fasernden Material dekontaminiert. Wenn ein Wischtest eine α -Impulsrate < 10 Impulse/Minute anzeigte, dann konnte das Hüllrohr zum Einfüllen der Spaltgasraumteile freigegeben werden. Diese wurden dann ohne besondere Vorrichtung in das Hüllrohr von Hand eingeschoben.

7.8.5 Füllen mit Helium und Aufsetzen des oberen Endstopfens

Das einseitig offene, mit Tabletten gefüllte Hüllrohr wurde in eine Evakuier- und Stopfenaufdrückvorrichtung, in der bereits der obere Endstopfen saß, eingeschoben und abgedichtet. Die Kammer wurde mindestens dreimal auf 5×10^{-2} Torr evakuiert und anschließend mit Helium geflutet. Dann wurde der obere Endstopfen in das Hüllrohr eingedrückt.

7.8.6 Verschweißen des oberen Endstopfens

Das verschlossene Hüllrohr wurde in die Schweißkammer gebracht. Die Kammer war mittels O-Ring, der gegen das Hüllrohr drückt, dicht verschlossen und das Hüllrohr mit Hilfe einer Spannzange exakt fixiert. Anschließend kam die Elektrode in Schweißposition, die Kammer wurde evakuiert, mit Argon geflutet und das Hüllrohr verschweißt, wobei das Schweißprogramm über eine Lochkartensteuerung vorgegeben ist.

Die Schweißdaten beim oberen Endstopfen entsprachen dem Programm beim unteren Endstopfen, wobei der Maximalstrom um 3 Amp. höher gewählt wurde. Jede Schweißnaht wurde geröntgt. Außerdem wurde wieder jede fünfte Schweißnaht als Probeschweißung ausgeführt und metallografisch untersucht. Bezüglich Leckuntersuchungen siehe Kapitel 7.9.

7.8.7 Stabbegleitkarten

Alle Hüllrohre erhielten beim Einschweißen des unteren Endstopfens eine Stabnummer (G 1, G 2 usw.) und eine Stabbegleitkarte ("Pin Identification Card"), dort sind alle wesentlichen Einzeldaten über die Stabfertigung sowie über Zwischen- und Endprüfungen festgehalten. Als Beispiel ist im Anhang 4 die Stabbegleitkarte für den tatsächlich fertiggestellten und ausgelieferten Brennstab Nr. G 2 angeführt.

7.8.8 Endkontrollen

Die fertigen Brennstäbe wurden zuerst auf wischbare und nicht wischbare Kontaminationen geprüft. Die wischbare Kontamination ergab sich mittels Wischtest mit kleinen Filterpapieren, die nicht wischbare

durch Drehung des Brennstabes unter dem feststehenden flachen α -Zähler. Wenn die Kontamination unter dem spezifizierten Wert lag, dann wurde der Brennstab zum Röntgen- und Heliumlecktest freigegeben. Anschließend waren noch die verschiedenen geforderten Dimensionsprüfungen durchzuführen.

Eine abschließende visuelle Prüfung des gesamten Brennstabes und Einschweißen in eine Plastikfolie beendete den Fertigungsvorgang.

7.9 Prüfungen an den fertigen Brennstäben

7.9.1 Dichtheitsprüfung

Die Dichtheit der fertigen Stäbe wurde mit einem Helium-Lecksuchgerät (Veeco, Typ MS 9) geprüft. Die Empfindlichkeit des Gerätes betrug 2×10^{-10} Torr-liter/sec. Das Eichleck hatte eine Helium-Leckrate von $3,4 \times 10^{-8}$ Torr-liter/sec.

Die Dichtheit war bei allen ausgelieferten Brennstäben spezifikationsgerecht.

7.9.2 Füllgasanalyse

Die Füllgasanalyse wurde indirekt vorgenommen. Dazu wurden im Rahmen der Fertigung zwei leere Hüllrohre in den bestehenden Fertigungseinrichtungen mit Helium gefüllt und verschweißt analog zur Stabherstellung. Die Gaszusammensetzung wurde dann an jedem "Leerstab" unabhängig voneinander untersucht. Tabelle XXIII bringt das Ergebnis dieser beiden Analysen. Der Reinheitsgrad entspricht etwa der Spezifikation.

Tabelle XXIII Füllgasanalysen

Analyse I durch Transurane-Institut, Karlsruhe		Analyse II durch Firma Nukem, Wolfgang	
He	99,1 %	He	99,9 %
N ₂	0,6	Luft	< 0,1
O ₂	0,12		
H ₂	0,15		
CO ₂	0,03		
Ar	0,008		
H ₂ O	0,008		

7.9.3 Dimensionsprüfungen

Die Einzelmessungen hinsichtlich der äußeren Dimensionen der Stäbe wurden mittels Mikrometer und Meßuhren durchgeführt. Außerdem wurde eine kontinuierliche profilometrische Vermessung vorgenommen.

Die Stabbegleitkarten enthalten die Meßergebnisse für

- Stablänge
- Durchmesser des unteren Stopfens
- Durchmesser der unteren Schweißnaht
- Durchmesser der oberen Schweißnaht
- Stabdurchmesser im Abstand von 5 zu 5 cm
- Profilometrie
- Ovalität des Querschnitts
- Durchbiegung

Alle diese Meßergebnisse sind in der Übersichtstabelle im Anhang 3 eingetragen.

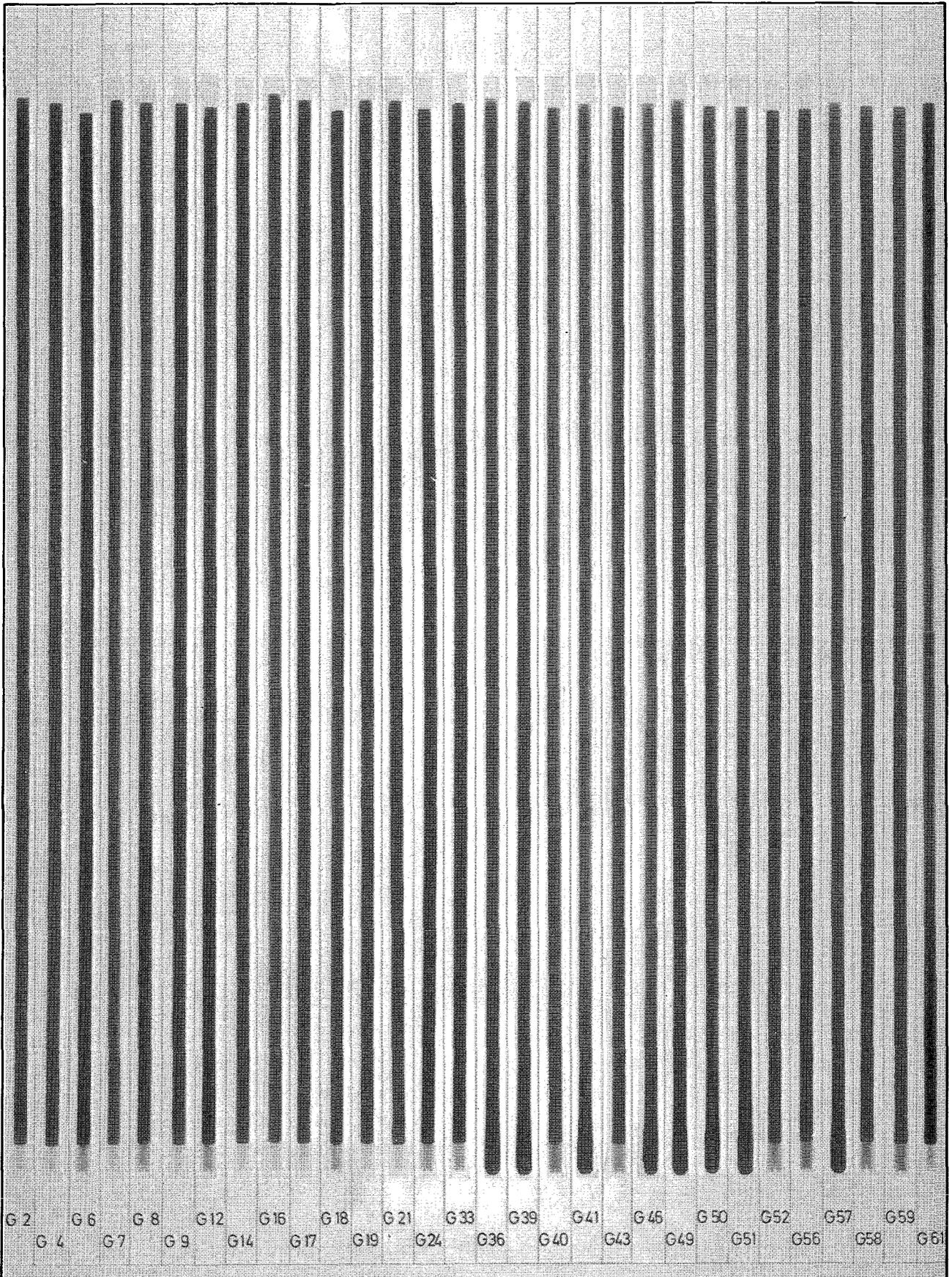
In einem Fall (Stab G 6) liegt der maximale Schweißnahtdurchmesser um rund 100 μ über der oberen Toleranzgrenze, in einigen weiteren Fällen ist diese Grenze um 10 - 40 μ überschritten. Auch die Stopfendurchmesser liegen in einigen Fällen geringfügig außerhalb der Toleranz, ebenso die Durchbiegung. Die Durchmesserwerte des Stabkörpers selbst sind jedoch vollständig innerhalb der Toleranzgrenzen.

7.9.4 Stabgewicht

Von jedem fertigen Brennstab wurde das Gesamtgewicht ermittelt und ebenfalls in den Stabbegleitkarten festgehalten.

7.9.5 Röntgen-Durchleuchtung

Die Röntgen-Durchleuchtung wurde sowohl in Karlsruhe als auch in Dounreay (vor dem Einsatz in den DFR) vorgenommen. In Abb. 11 sind die Aufnahmen vom Hersteller für alle 30 Stäbe wiedergegeben. Abb. 12 bringt die Röntgen-Aufnahmen, wie sie für die 27 nach Dounreay gelieferten Stäbe nach der Ankunft dort angefertigt wurden.

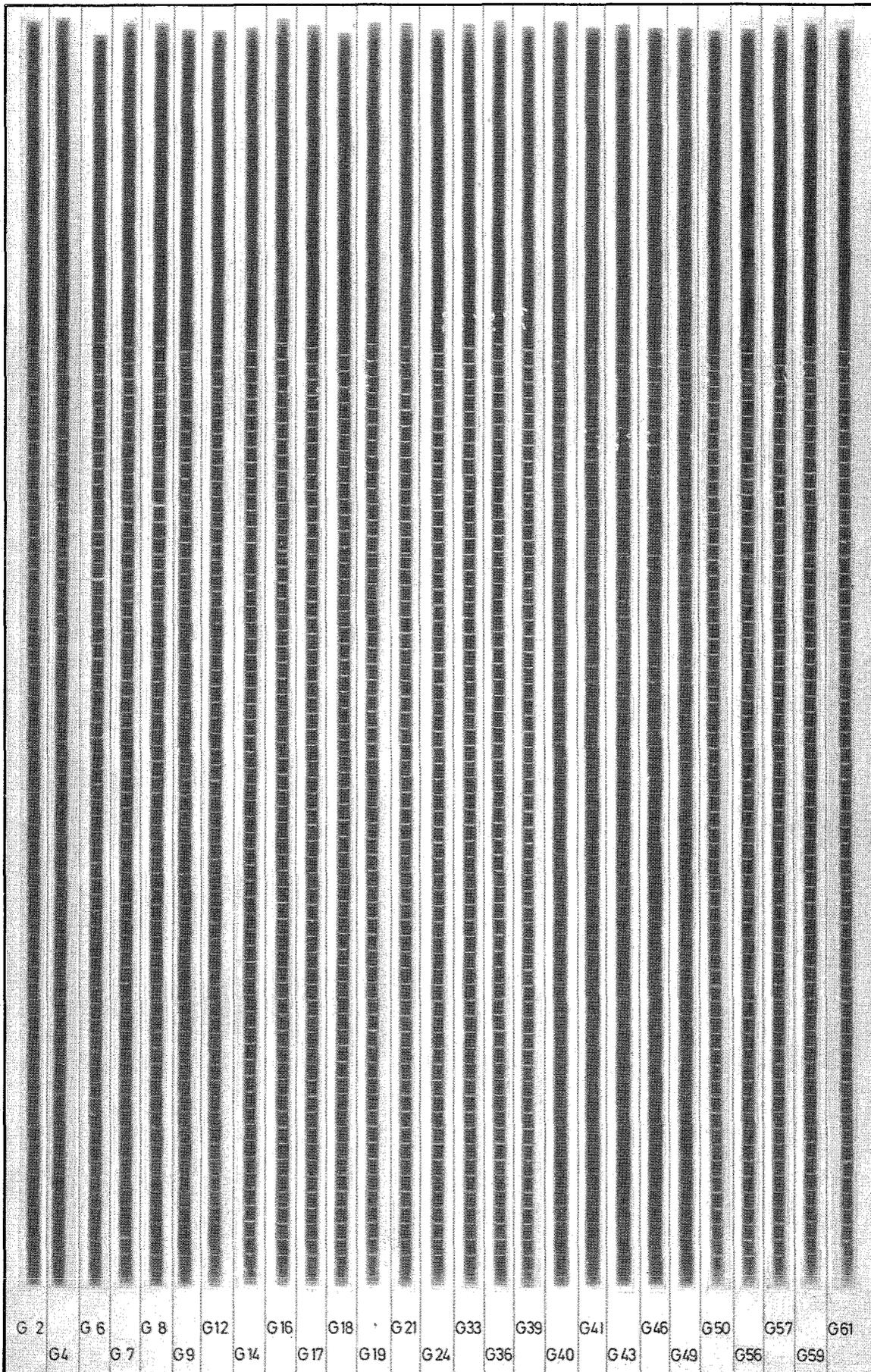


GfK Karlsruhe

IMF/LB

Röntgen-Aufnahmen der 30 Stäbe nach der Fertigung (Aufnahm.von Fa.Alkem). Die schwarz erscheinenden Säulen umfassen (von unt.nach ob.) Isoliertablette, Brennstoff u. Brutstoff

Abb. 11



GfK Karlsruhe IMF/LB	Röntgen-Aufnahmen in Dounreay vor der Bestrahlung	Abb. 12
-------------------------	--	---------

7.9.6 Zusammenstellung der Prüf- und Meßdaten

Die Daten im einzelnen sind in den Stabbegleitkarten enthalten, siehe Beispiel für Stab G 2 in Anhang 4. In der zusammenfassenden Tabelle im Anhang 3 finden sich (als Auszug aus den Stabbegleitkarten) alle wichtigen Angaben und Ergebnisse.

7.9.7 Fehler beim Einfüllen der Stäbe

Beim Einfüllen der Stäbe sind offenbar Fehler unterlaufen, die Ursachen hierfür sind nicht mehr eindeutig zu klären. Folgende Unstimmigkeiten sind nachweisbar:

- Die Stäbe G 2, G 16 und G 19 enthalten tatsächlich je eine Brennstofftablette mehr als in den Stabbegleitkarten angegeben ist. Dies erklärt auch die Gewichtsabweichungen in Tabelle XXI.
- Die Stäbe G 9 und G 18 enthalten tatsächlich je eine Brennstofftablette weniger als in den Stabbegleitkarten angegeben ist. Bei Stab G 9 wird das durch eine passende Gewichtsabweichung bestätigt, bei G 18 nicht.
- Bei Stab G 14 stimmt zwar die Tablettenzahl auf Stabbegleitkarte und Röntgen-Bild überein. Die starke positive Höhen- und Gewichtsabweichung bei der Brennstoffsäule läßt aber vermuten, daß dort eine Isolier- oder Bruttatablette fälschlicherweise mitgemessen wurde.
- Von Stab G 58 liegt keine diesbezüglich auswertbare Röntgen-Aufnahme vor. Es wird wegen der stark negativen Höhen- und Gewichtsabweichung aber vermutet, daß in Stab G 58 nur 58 Stück Brennstofftabletten (und nicht wie angegeben 59 Stück) enthalten sind.

8. Bestrahlungseinrichtung

Als Bestrahlungsträger für die Brennstäbe wurde die 77-Stabbündel-Konstruktion mit rautenförmigem Querschnitt in der Originalausführung der UKAEA verwendet. In Abb. 13 ist eine Originalskizze dieser Bündelkonstruktion wiedergegeben. Die 77 Stäbe wurden hierin durch wabenförmige Abstandshalter positioniert, die einige Bewegungsfreiheit in Längsrichtung gewähren. Die doppelwandige Umhüllung des Bündels bildet einen Gasspalt, durch den radiale Wärmeflüsse verhindert werden. Der Kühlmittelfluß (von oben nach unten) wird durch einen Kalibrierauslaß am Fuß des Bündels eingestellt.

Die ungefähren Größenverhältnisse der Bündelkonstruktion sowie die Positionsmaße der Abstandshaltergitter sind in Abbildung 14 gegeben.

Abb. 15 bringt die Platzverteilung der 77 Stäbe im Bündelquerschnitt.

Die 23 GFK-Stäbe sind darin folgendermaßen verteilt:

	Hüllmaterial 1.4988	Hüllmaterial 1.4961	Summe
Innenzone	8 Stäbe	6 Stäbe	14 Stäbe
Außenzone	5 Stäbe	4 Stäbe	9 Stäbe
Summe	13 Stäbe	10 Stäbe	

Der wesentliche Unterschied zwischen Außen- und Innenzone im Bündel besteht darin, daß das Kühlmittel am Rand des Bündels weniger aufgeheizt wird. Die Temperaturunterschiede betragen bis zu 100°C.

Die radiale Positionierung des Bündels im Kern des DFR geht aus dem Kernquerschnitt, Abb.1(S.6), eindeutig hervor. Eine stumpfe Ecke des Bündelquerschnitts liegt (von der konstruktiven Abschrägung dieser Ecke abgesehen) im Mittelpunkt des DFR-Kerns.

Die axiale Lage des Bündels im Kern ist so, daß vom 290 mm langen Brennstoffteil der Stäbe 229 mm unterhalb und 61 mm oberhalb der Kernmittelebene stehen. Die schematische Zeichnung in Abb. 16 macht die Positionierung anschaulich. Dort ist auch die Ebene des maximalen DFR-Flusses eingetragen. Sie liegt um etwa 25 mm unterhalb der Kern-Mittelebene.

Der Zusammenbau des Bündels erfolgte durch die UKAEA selbst. Die Bestrahlungskunden (GFK, BN und CEA) stellten die fertigen Stäbe zur Verfügung. Die Bündelbauteile wie Kopf- und Fußstück, Umhüllung, Abstandshalter wurden von der UKAEA beige stellt.

77 Fuel Pin Sub-assembly

The 77 Fuel Pin Sub-assembly has been designed to irradiate clusters of fast reactor fuel pins. Initial assemblies have contained 77 pins of 0.23 to 0.24 inches (0.585 to 0.61 cm) o.d. and 21 inches (53.3 cm) total length. The wrapper is of the gas-gap type so that the heat generated is carried away by the coolant flowing through the sub-assembly and is not transferred to the bulk coolant around the sub-assembly.

The coolant flow through the rig is controlled by a calibrated orifice. The mixed mean outlet temperature attainable is of the order of 550°C.

The fuel pins are mounted in an assembly which maintains the lateral pitch whilst allowing a limited amount of longitudinal float. The fuel pin assembly is a push-fit in the wrapper and is so designed that the fuel pins can be removed for inspection between irradiation periods.

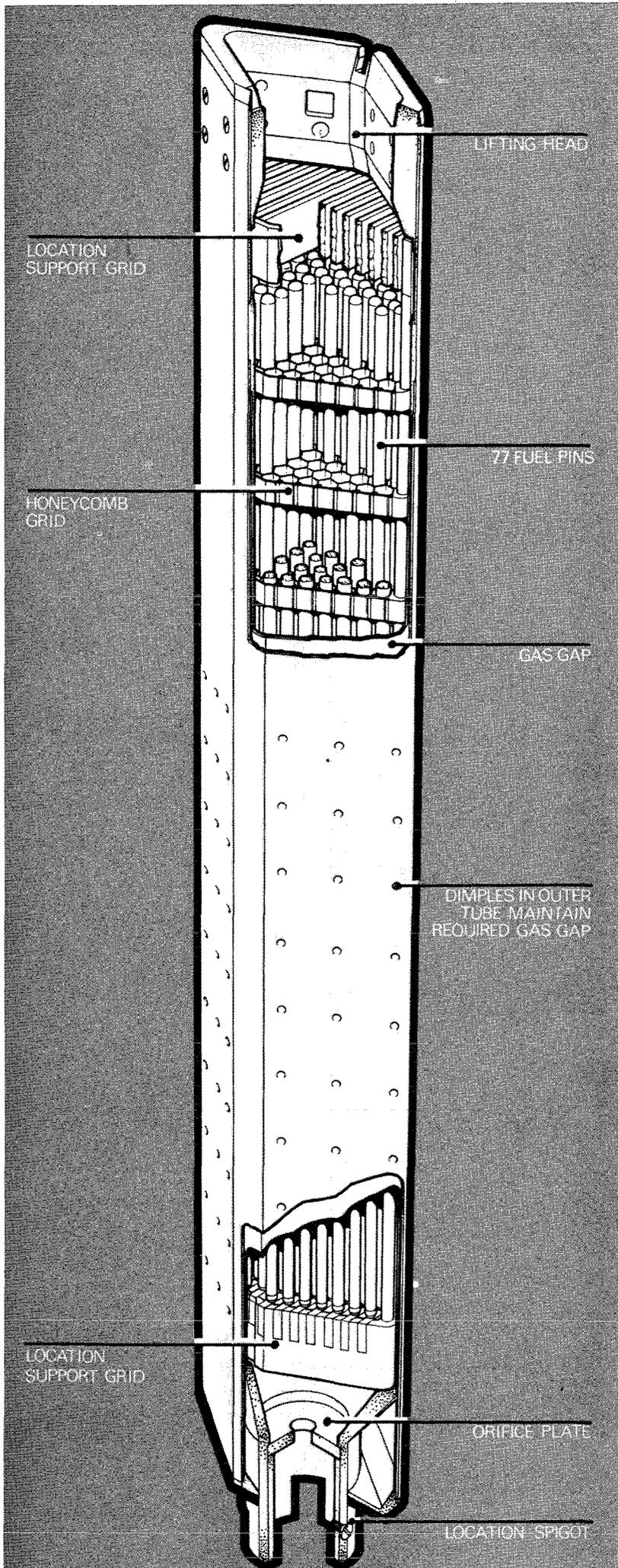
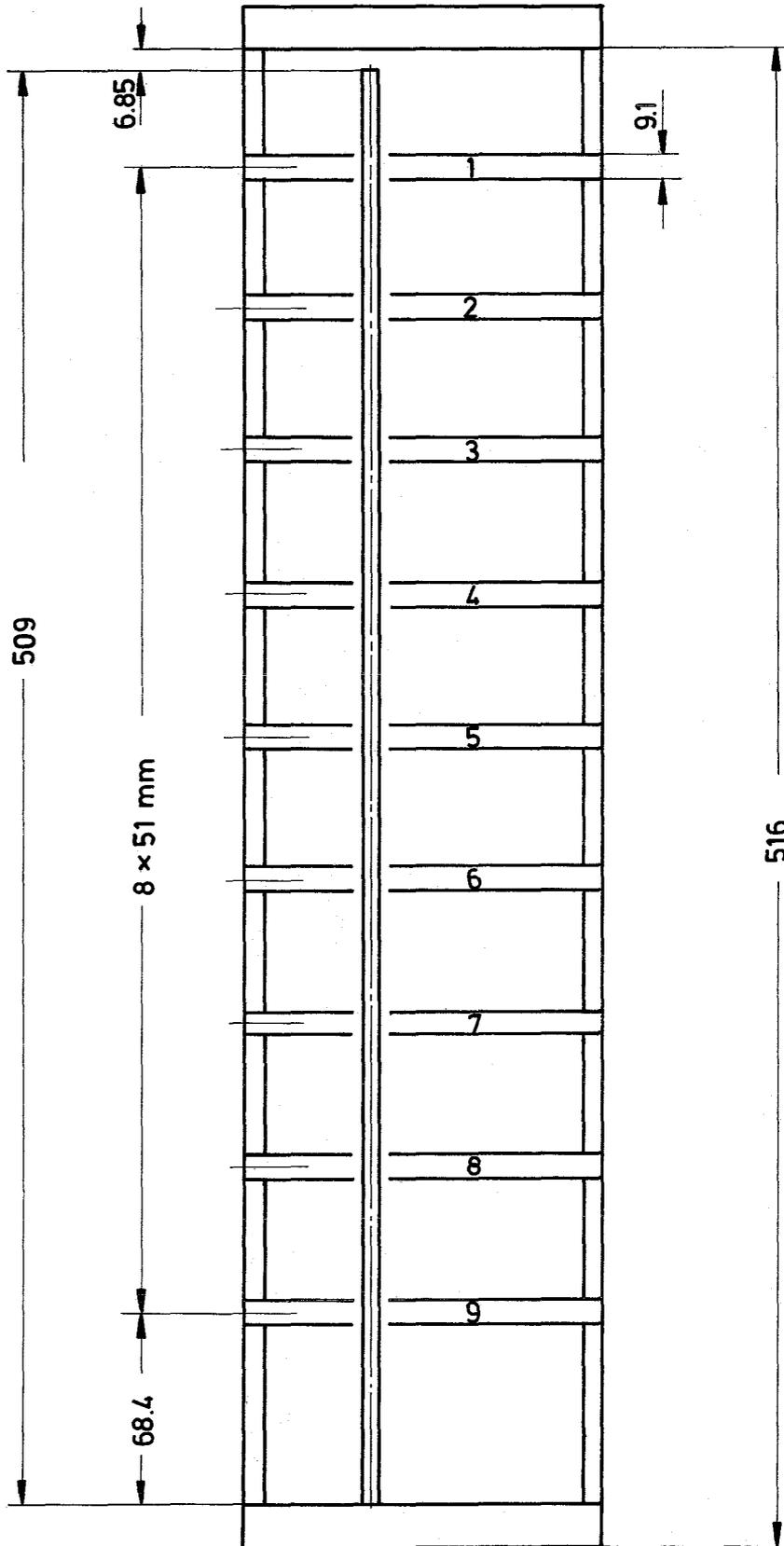


Abb. 13 77-Stab-Bündel

(Abbildung entnommen aus der Druckschrift:

D.F.R. Irradiation Testing, UKAEA, Juni 1971)



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Positionsmaße der Ab-
standshalter

Abb. 14



GfK - Stäbe mit Hüllmaterial-Nr. 1.4988



CEA - 38 Stäbe



GfK - 23 "

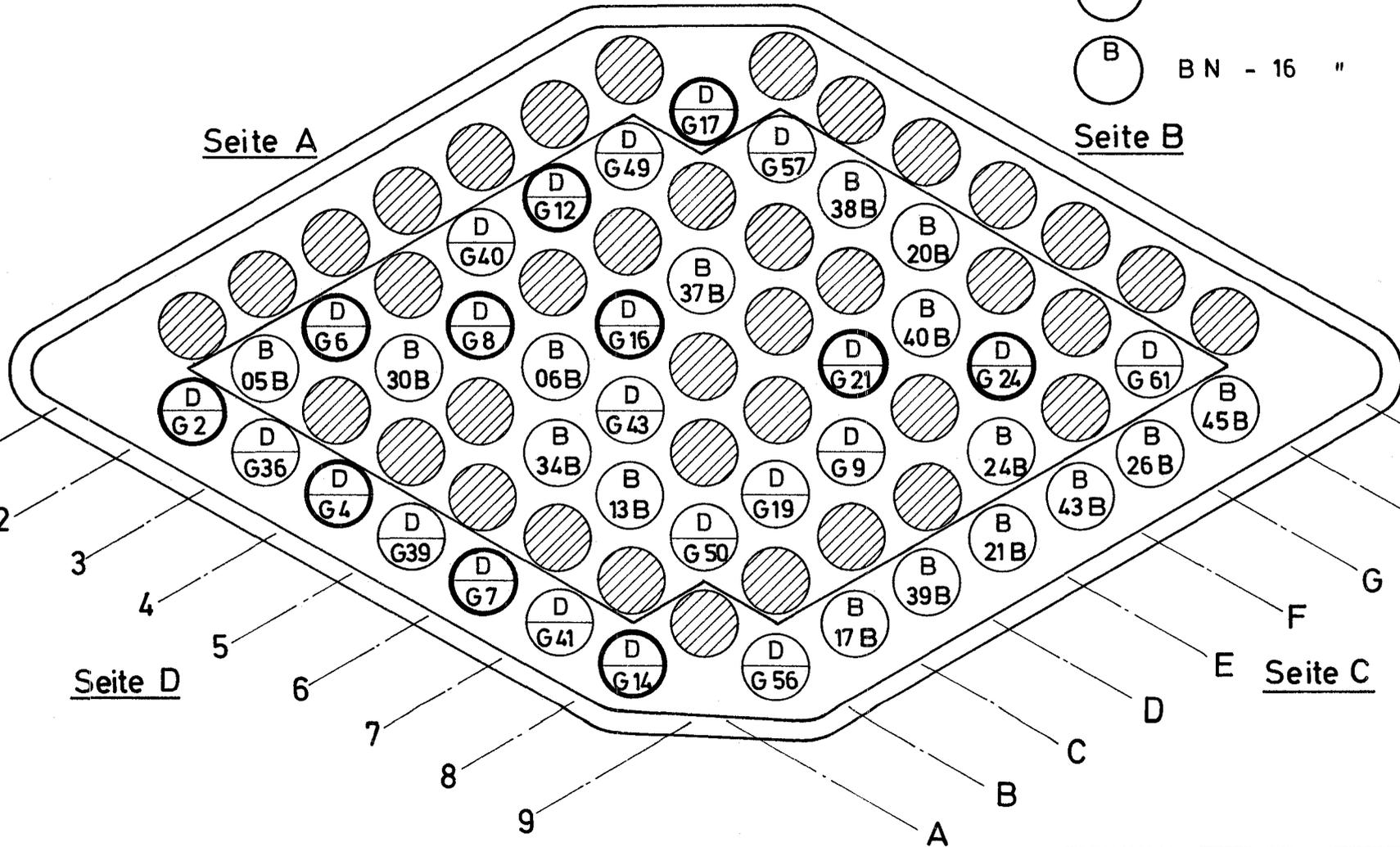


BN - 16 "

Reaktormitte

Seite A

Seite B

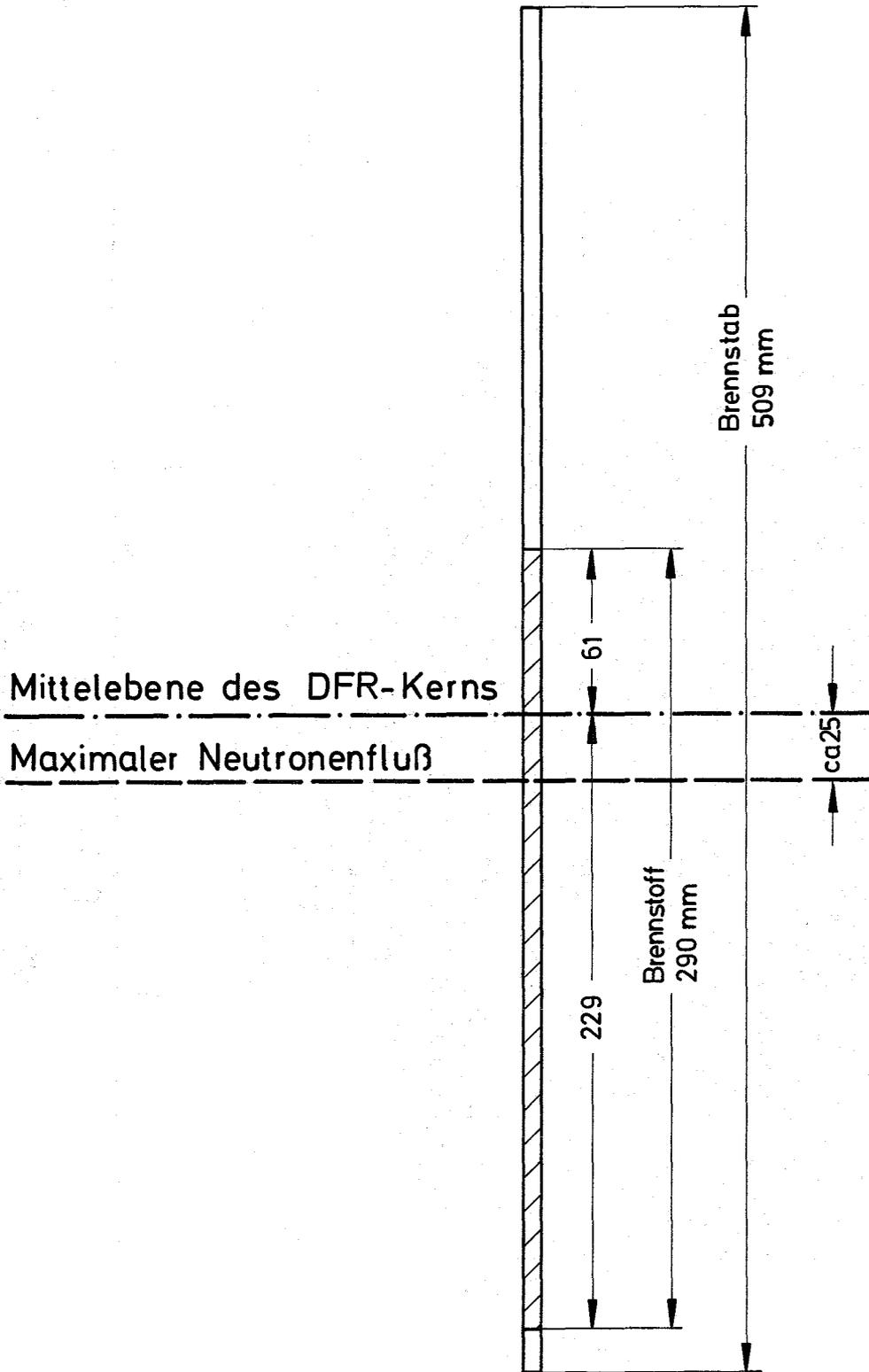


GfK Karlsruhe
IMF/LB

DFR - 350
77 - Stab - Bündel

Abb. 15

69



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Axiale Positionierung des
Brennstabes im DFR-Kern

Abb. 16

9. Ablauf der Bestrahlung

9.1 Bestrahlungszeit und Reaktorzyklen

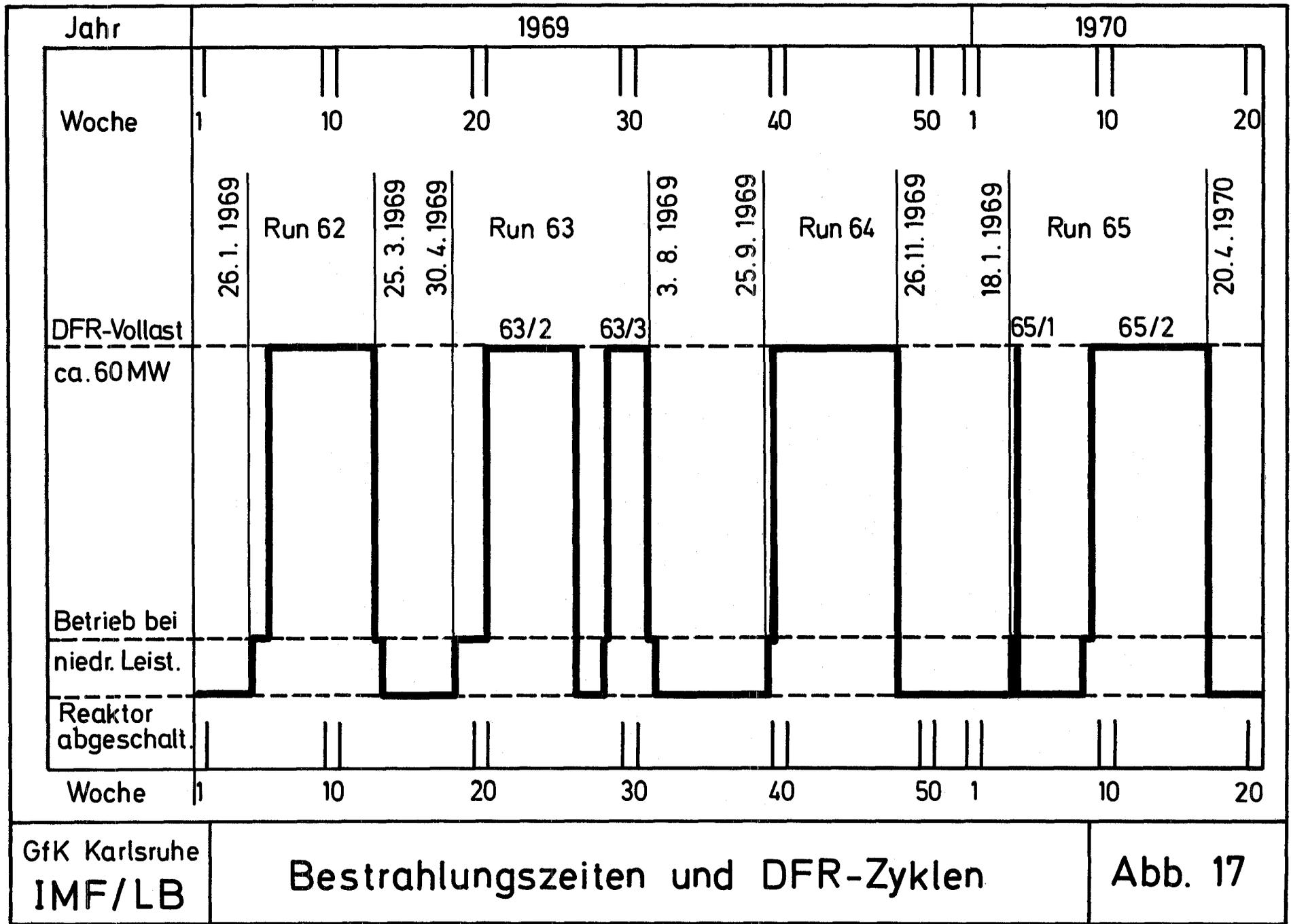
Die Bestrahlung des Bündels begann am 26.1.1969 und dauerte bis zum 20.4.1970. In dieser Zeit absolvierte der DFR 4 große Betriebszyklen, nämlich Run 62, 63, 64 und 65. Jeder Zyklus dauert normalerweise ca. 55 Tage und darauf folgt eine Abschaltperiode von 25 bis 30 Tagen. In jedem Run wurde durch mehrere Zwischenabschaltungen des Reaktors die kontinuierliche Bestrahlung bei 60 MW Reaktor-Nennleistung unterbrochen.

Eine zusammenfassende Übersicht über den ganzen zeitlichen Bestrahlungsablauf wird zuerst in der grafischen Darstellung von Abb. 17 gegeben. Die Abb. 18 bis 21 bringen dann den Leistungsverlauf des DFR für die 4 Reaktorzyklen mit allen Zwischenabschaltungen und Leistungsreduktionen. Schließlich sind in Tabelle XXIV die Zeit- und Leistungsdaten genau zusammengestellt. Bei der Zahl der Abschaltungen ist die betriebsmäßige Abschaltung am Schluß des jeweiligen Zyklus mit eingerechnet.

9.2 Neutronenfluß- und-fluenz

Der örtlich maximale Neutronenfluß des DFR tritt in der Zylinderachse des Kerns (Radius $r = 0$) einige Zentimeter unterhalb der Mittelebene $z = 0$ auf. Er beträgt - alle Energiegruppen eingeschlossen - nach den Standard-Betriebsbedingungen

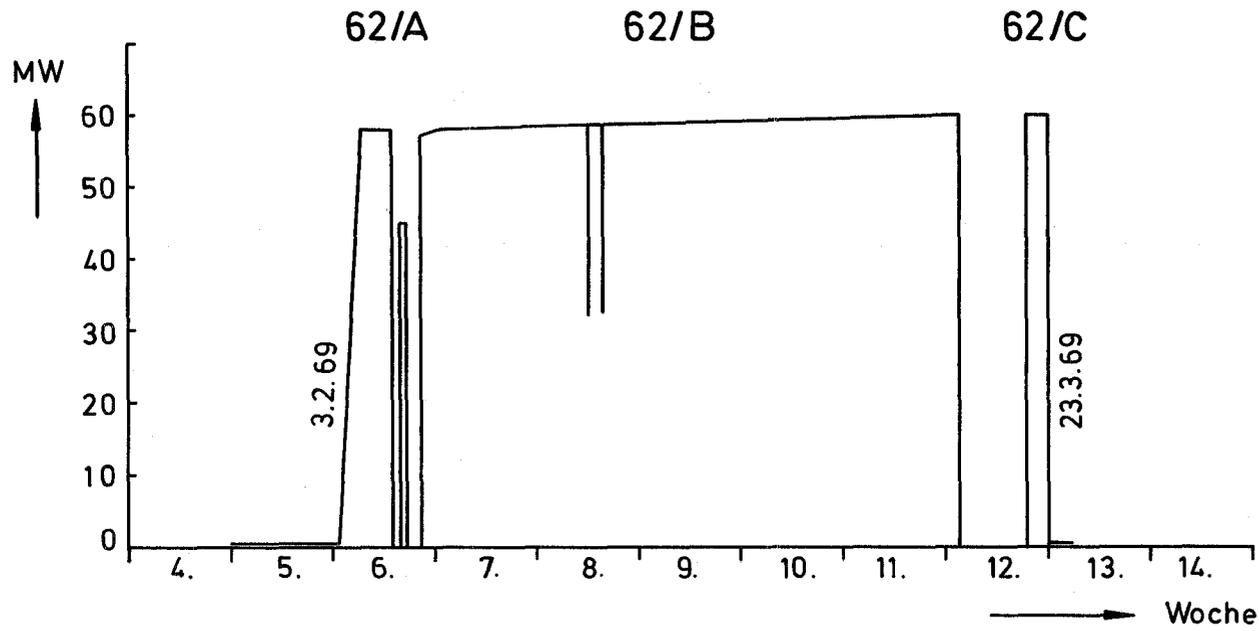
$$- 2,5 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ sec.}$$



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Bestrahlungszeiten und DFR-Zyklen

Abb. 17



41.8 Vollasttage

GfK Karlsruhe

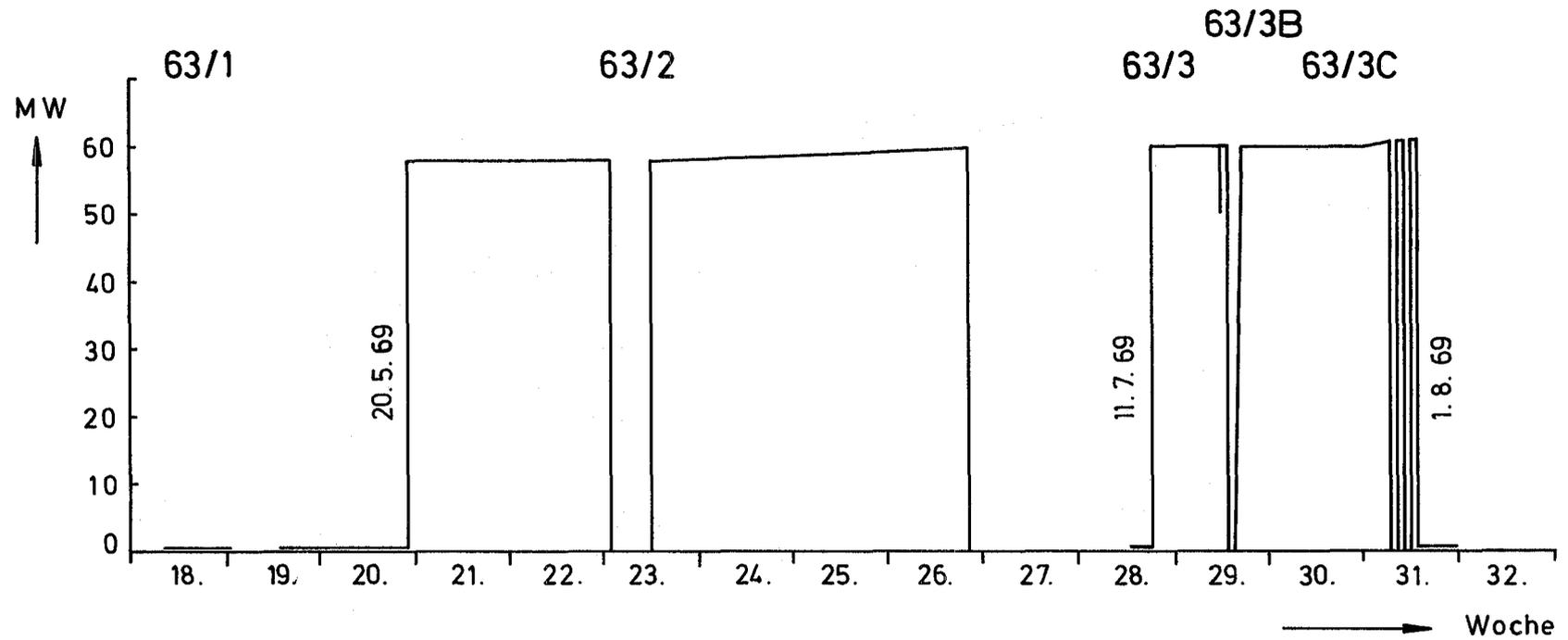
IMF/LB

Leistungsverlauf des DFR in Run 62

(26.1.69 - 25.3.69)

Abb. 18

-73-

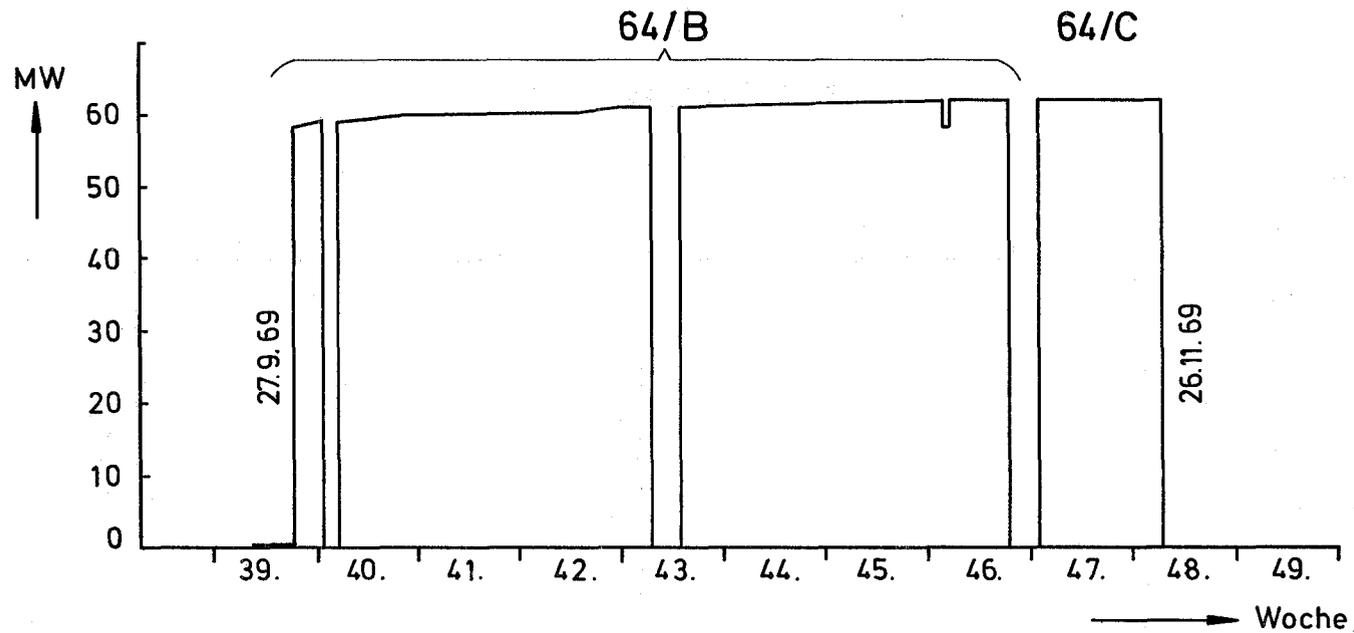


54.4 Vollasttage

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Leistungsverlauf des DFR in Run 63
(30.4.69 - 3.8.69)

Abb. 19

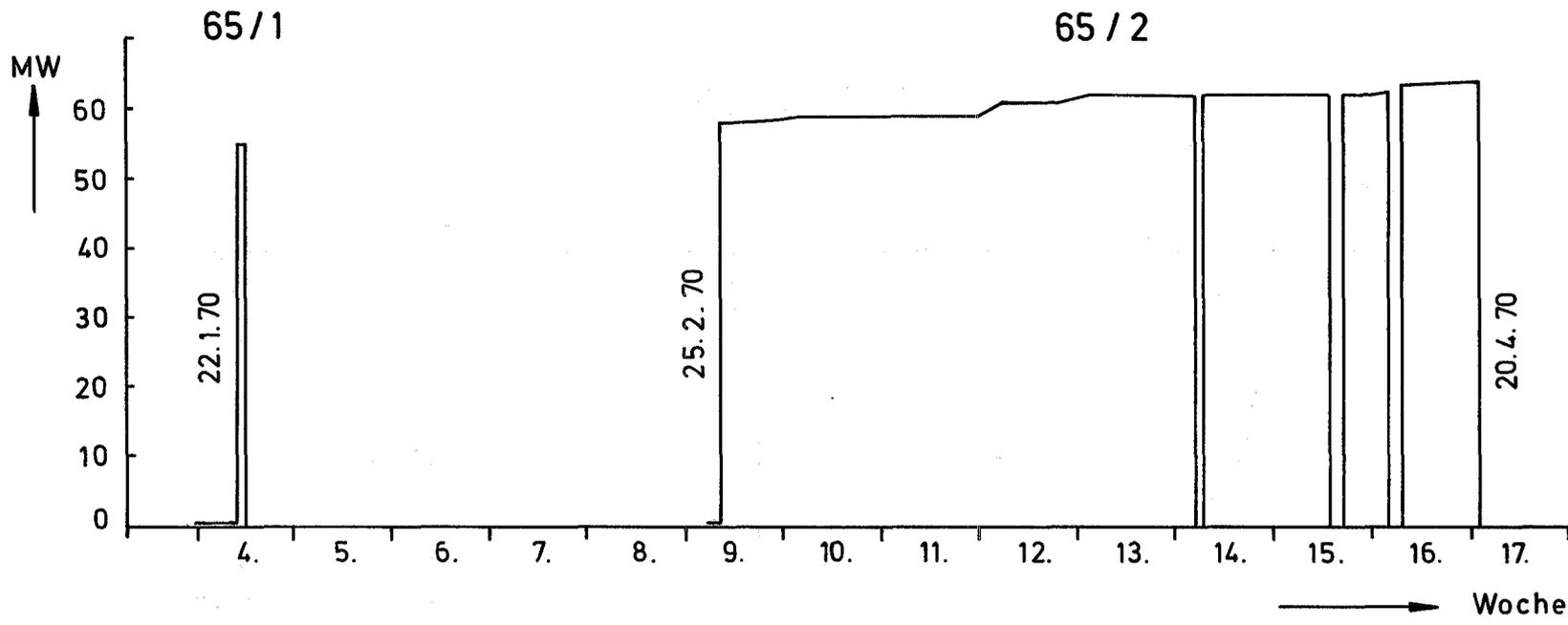


53.5 Vollasttage

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Leistungsverlauf des DFR in Run 64
(25.9.69 - 26.11.69)

Abb. 20



53.0 Vollasttage

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Leistungsverlauf des DFR in Run 65
(18.1.70 - 20.4.70)

Abb. 21

Tabelle XXIV

Zeit- und Leistungsdaten der DFR-Zyklen

DFR- Zyklus	Beginn Ende	Zyklus- Tage	Vollast- Tage	Zahl der Abschaltungen	Max. DFR- Leistung	MW-Tage des DFR	
						im Zyklus	kumuliert
Run 62	26.1.69 25.3.69	ca. 58	41,8	4	60 MW	2449	2449
Run 63	30.4.69 3.8.69	ca. 95	54,5	6	61,1 MW	3274	5723
Run 64	25.9.69 26.11.69	ca. 62	53,5	4	62,72 MW	3266	8989
Run 65	18.1.70 20.4.70	ca. 92	53,0	5	63,86 MW	3216	12205
S u m m e n		ca. 307	202,7	19			

Die radiale Veränderung des Neutronenflusses ist über den Bereich des zentralen DFR-Hexagon hinweg noch wenig spürbar. Wie Abb. 22 zeigt, nimmt der totale Neutronenfluß bis zu $r = 80$ mm hin ($\hat{=}$ etwa der radialen Ausdehnung des Bündels) in der Mittelebene des DFR-Kerns um höchstens 10 % ab. Die Neutronengruppen höherer Energie weisen sogar relativ noch mehr radiale Abflachung auf.

Der axiale Flußverlauf ist dadurch gekennzeichnet, daß das Maximum 2,5 - 5 cm unterhalb der Kern-Mittelebene auftritt. Der Verlauf für die Zylinderachse ist in Abb. 23 wiedergegeben.

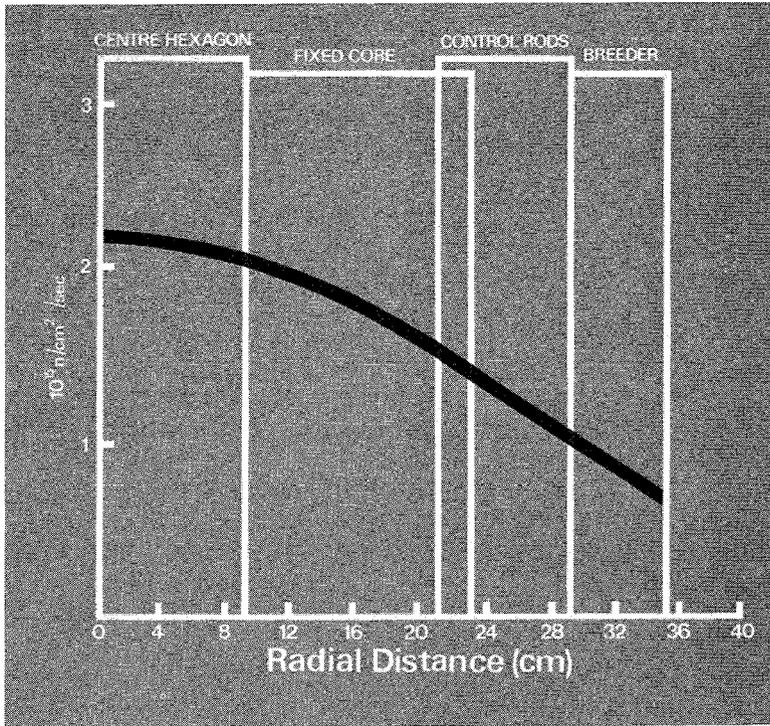
Den örtlichen Flußverläufen entsprechend ist die Neutronendosis lokal verschieden. Wir können aber die radialen Unterschiede vernachlässigen. Die axialen Unterschiede dagegen sind erheblich. In der Tabelle XXV ist für einen Abstand von etwa 50 mm von der DFR-Kernachse ("pitch 2") die Neutronenfluenz, die das Bündel im Lauf der Bestrahlung erhalten hat, für die hier wichtigen axialen Positionen von $z = + 35$ cm bis $z = - 25$ cm angegeben. Neben der totalen Fluenz findet sich dort auch eine Aufteilung in einige Gruppen der Neutronenenergie. Die maximale Dosis beträgt

$$- 4,33 \cdot 10^{22} \text{ n/cm}^2 .$$

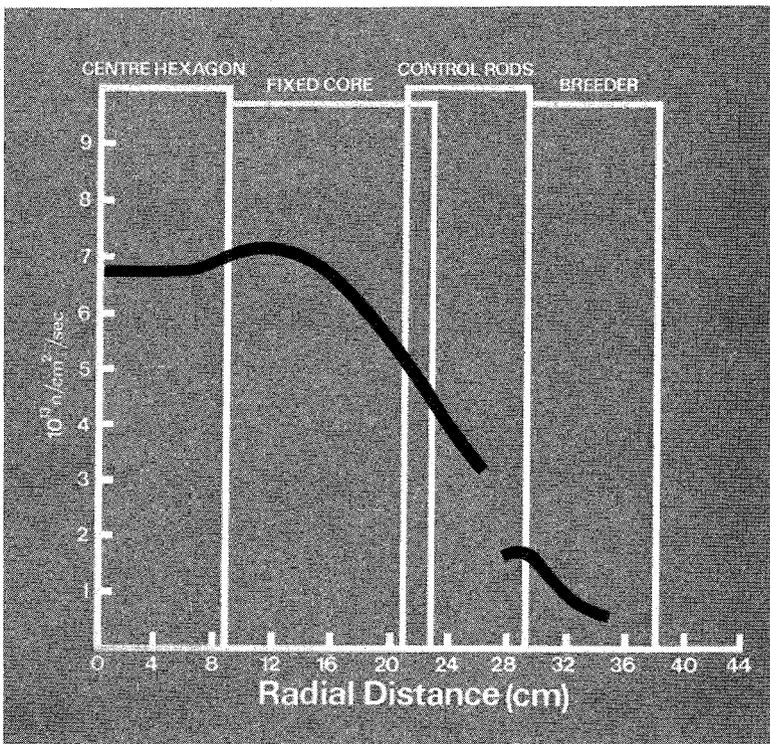
Unmittelbar in der Kernmittellachse gerechnet, käme man auf einen Wert von $4,38 \cdot 10^{22} \text{ n/cm}^2$. Der Unterschied ist vernachlässigbar gering.

9.3 Spezifische Leistung und Stableistung

Die spezifische Leistung b_{ox} , bezogen auf die Oxidmenge, wurde vom DERE für jede Betriebsperiode angegeben. Die Werte beziehen sich auf Standard-Betriebsbedingungen. Durch Multiplikation mit der linearen Brennstoffdichte $g = 1,89 \text{ g/cm}$ erhält man daraus die Stableistung λ . In Tabelle XXVI sind die Zahlenwerte für die in Betracht kommenden Axialpositionen zusammengefaßt. Abb. 24 bringt den axialen Verlauf der Stableistung am Anfang und am Ende der Bestrahlung, Abb. 25 zeigt die Stableistungsabnahme im Laufe der Bestrahlung für die Mittelebene $z = 0$.



Radial variation of the total neutron flux in the centre plane, $z=0$. Standard operating conditions, by definition, correspond to a centre flux of $2.5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$.



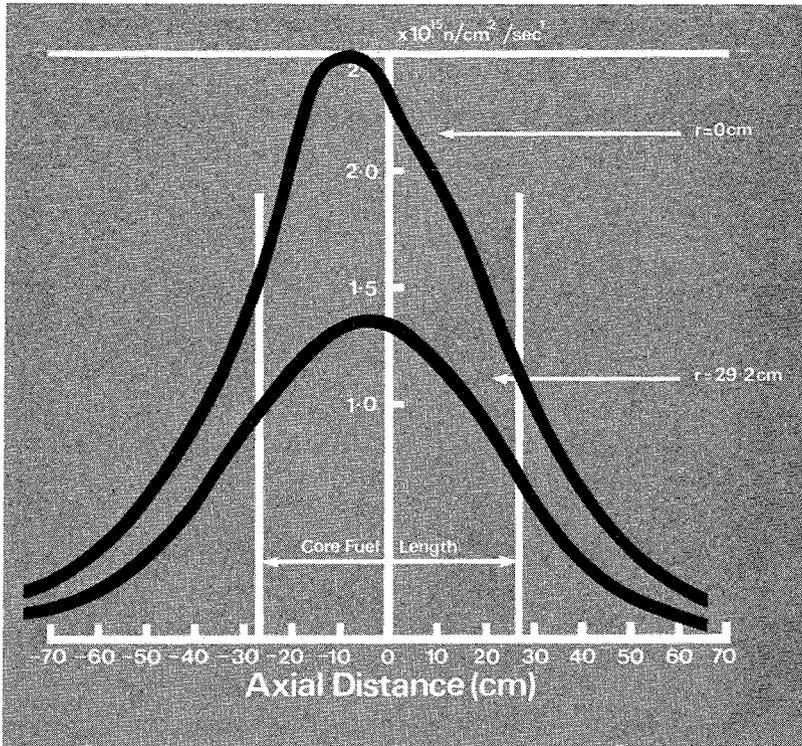
Radial variation of the group I flux, i.e. above 3.68 MeV energy

Abb. 22

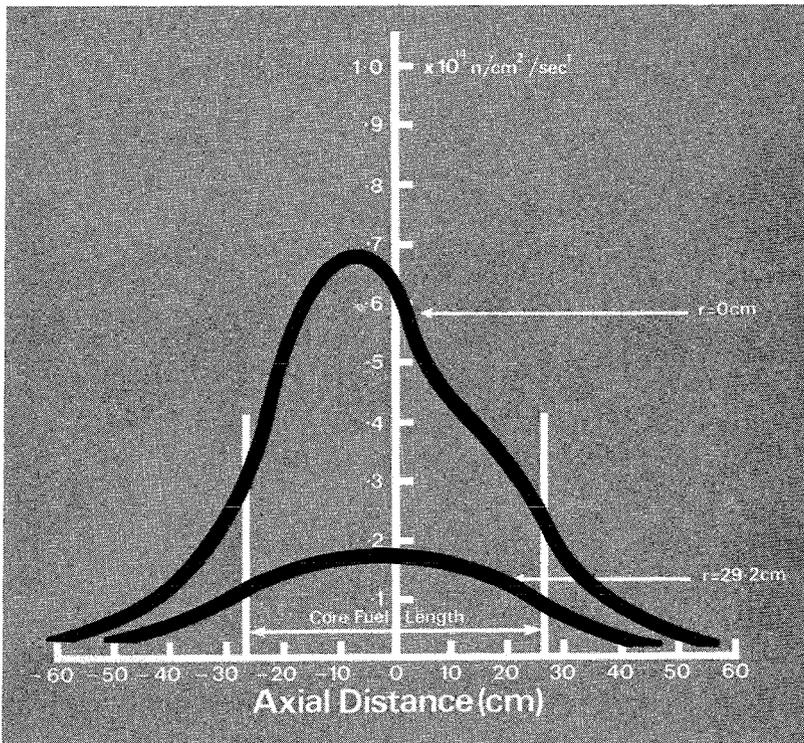
Radialer Flußverlauf im DFR

(Abbildung entnommen aus der Druckschrift:

D.F.R. Irradiation Testing, UKAEA, Juni 1971)



Axial variation of the total neutron flux at the core centre ($r=0$) and at the first row of the breeder ($r=29.2$ cm) of the total flux.



Axial variation of the group I flux at the core centre ($r=0$) and at the first row of the breeder ($r=29.2$ cm).

Abb. 23 Axialer Flußverlauf im DFR
(Abbildung entnommen aus der Druckschrift:
D.F.R. Irradiation Testing, UKAEA, Juni 1971)

Tabelle XXV

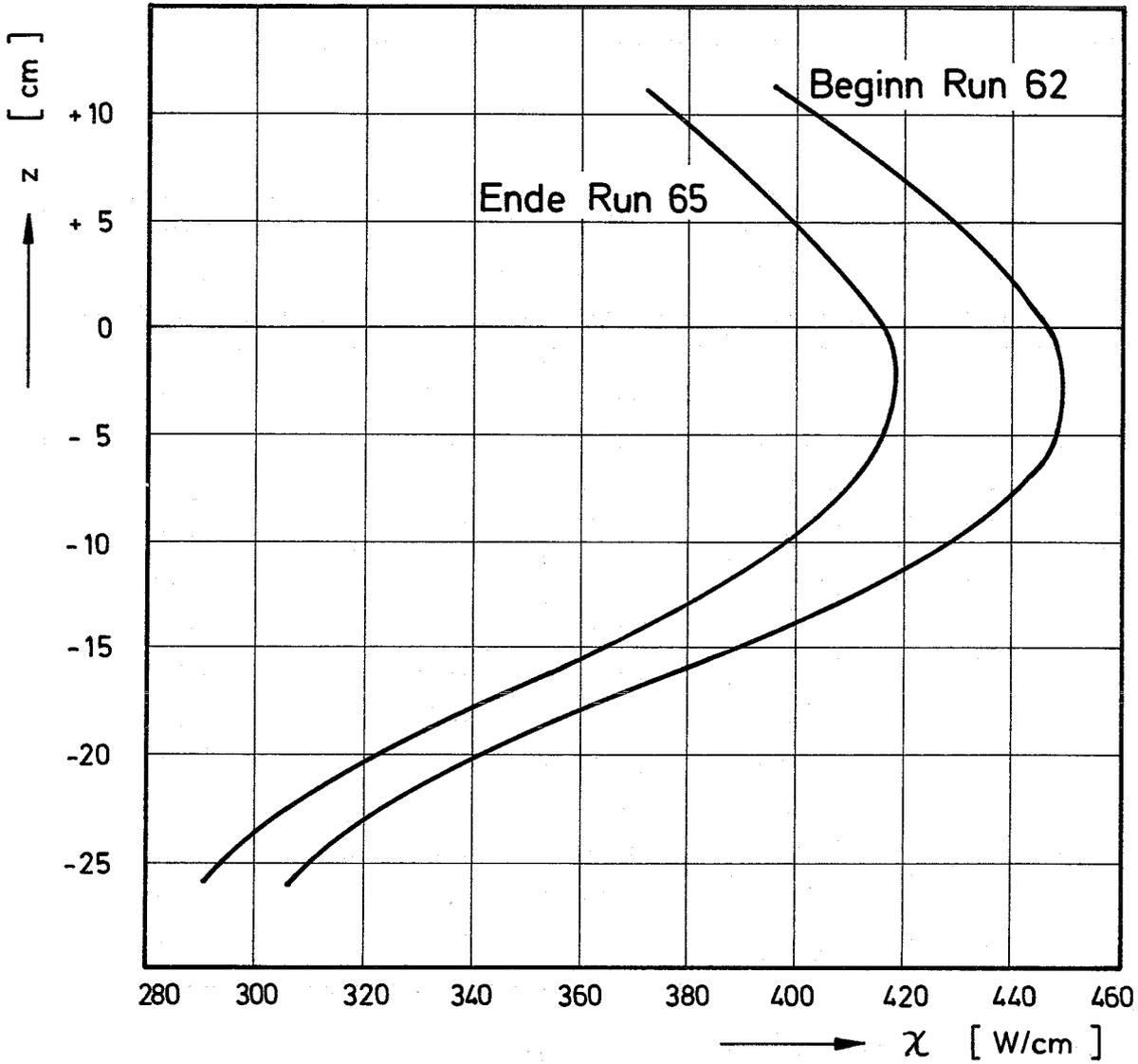
Neutronendosis am Ende der Bestrahlung

Axiale Position z (cm)	Neutronendosis (10^{22} n/cm ²) für Neutronen der Energie			Totale Dosis (10^{22} n/cm ²)
	>1,35 MeV	>111 keV	>1,23 keV	
+ 35	0,14	1,19	1,67	1,74
+ 30	0,22	1,58	2,06	2,11
+ 25	0,33	2,06	2,54	2,57
+ 20	0,44	2,54	3,03	3,04
+ 15	0,52	2,95	3,46	3,46
+ 10	0,60	3,28	3,81	3,81
+ 5	0,68	3,55	4,09	4,09
0	0,77	3,77	4,32	4,32
- 5	0,79	3,78	4,33	4,33
- 10	0,75	3,59	4,12	4,13
- 15	0,66	3,21	3,72	3,72
- 20	0,51	2,64	3,13	3,14
- 25	0,35	2,08	2,58	2,61

Tabelle XXVI

Spezifische Leistung und Stableistung

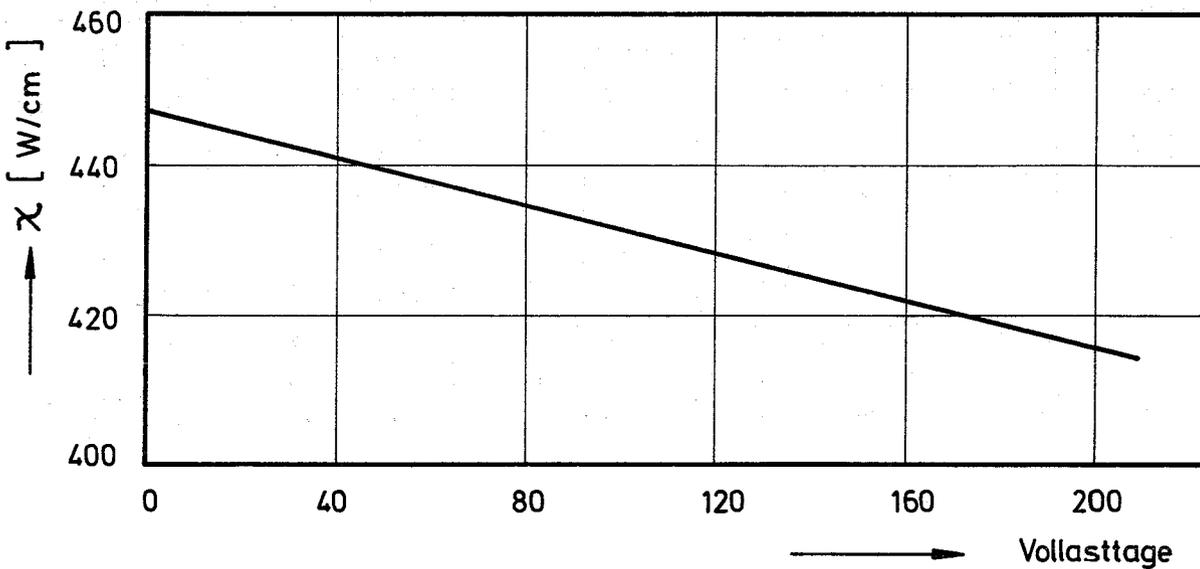
Axiale Pos. z (cm)	Beginn Run 62		Ende Run 62		Ende Run 63		Ende Run 64		Ende Run 65	
	b _{ox} (W/g)	κ (W/cm)								
+ 10	213,1	403	210,2	397	206,5	390	202,9	383	199,4	377
+ 5	226,3	428	223,1	422	218,9	414	214,8	406	211,0	399
0	236,6	447	233,1	441	228,5	432	224,2	424	220,0	416
- 5	236,8	448	233,3	441	228,7	432	224,4	424	220,2	416
- 10	226,2	428	223,0	421	218,8	414	214,8	406	211,0	399
- 15	205,6	389	202,9	383	199,5	377	196,2	371	193,0	365
- 20	180,4	341	178,3	337	175,6	332	173,0	327	170,5	322
- 25	164,0	310	162,2	307	159,8	302	157,6	298	155,4	294



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Axialverlauf der Stableistung

Abb. 24



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Abnahme der Stableistung im
Laufe der Bestrahlung (Position $z=0$)

Abb. 25

9.4 Kühlmittel-Bedingungen

Das NaK-Flüssigmetall der Zusammensetzung 70 % Na und 30 % K hat einen Schmelzpunkt von 40°C . Im DFR ist der Kühlstrom von oben nach unten gerichtet. Der Druck im Kühlkreislauf am Eintritt in das 77-Stab-Bündel beträgt ca. 5 kg/cm^2 , die Druckdifferenz zwischen Eintritt und Austritt ist $0,712 \text{ kg/cm}^2$. Die laufende Reinheitsanalyse des NaK mit einem "Plugging"-Meter ergab in allen 4 Betriebszyklen einen Verunreinigungswert meist unter 20 ppm.

Die Temperatur des Kühlkreislaufes während der Abschaltperioden wird auf ca. 150°C gehalten. Beim Vollastbetrieb beträgt die Eintrittstemperatur des Kühlmittels in den Reaktorkern $230 \pm 5^{\circ}\text{C}$, die Austrittstemperatur wird auf 500°C eingeregelt. Bei Zwischenabschaltungen im Laufe der Betriebsperioden sank die Kühlmitteltemperatur nach den vorliegenden Betriebsprotokollen auf Werte zwischen 140 und 170°C ab.

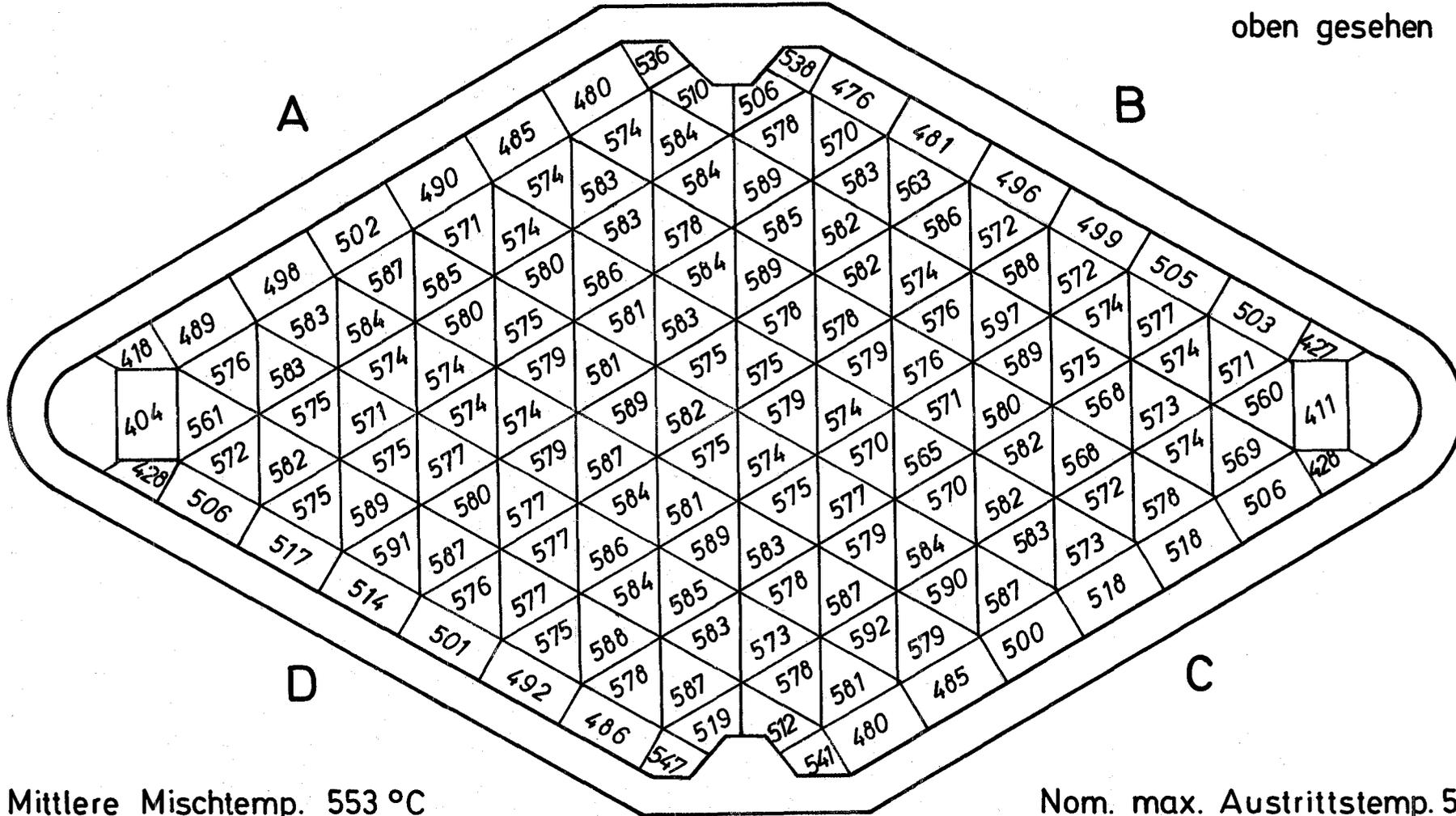
Die NaK-Temperatur am Bündelaustritt (oben) ist ebenfalls 230°C . Bei der Aufheizung des Kühlmediums im Bündel gibt es aber lokale Unterschiede zwischen Zentrum und Randpartien des Bündelquerschnittes. Die nominelle mittlere Auslaßtemperatur des Bündels beträgt 553°C , der lokale Maximalwert ist 581°C . Einen Eindruck von lokalen Schwankungen am Auslaß des Bündels bekommt man aus Abb. 26. Darin werden nach Berechnungen der UKAEA die NaK-Austrittstemperaturen in den einzelnen Kühlkanälen zwischen den Stäben angegeben. Die 77 Stäbe sitzen jeweils in den Schnittpunkten der Dreiecksseiten. In den Kühlkanälen am Rande des Bündels gibt es NaK-Austrittstemperaturen bis herab zu 404°C , die Höchstwerte in einigen Kühlkanälen gehen über 590°C hinaus.

Für den Temperaturverlauf längs eines Brennstabes sei auf die Rechnungen in Kapitel 5 sowie auf Abb. 3 verweisen. Für die maximale Kühlkanaltemperatur unter Berücksichtigung von Heißkanalfaktoren sowie für die dann entsprechende Hüllwandmittentemperatur liegt eine Berechnung von UKAEA/Risley vor, deren Ergebnisse in Abb. 27 wiedergegeben sind.

Nach dem Abschalten des Reaktors fällt die Temperatur im NaK-Kreislauf auf 150°C . Beim Entladen des Bündels steigen die Temperaturen in den abgebrannten Stäben wieder kurzzeitig an, überschreiten aber nicht - nach Angaben von DERE - die maximalen Betriebstemperaturen. Im Lagerbecken schließlich variiert die NaK-Temperatur mit der Reaktoreintrittstemperatur, d.h. zwischen 150 und 230°C .

Reaktor-Mitte

Bündel von oben gesehen



Mittlere Mischtemp. 553 °C

Nom. max. Austrittstemp. 581 °C

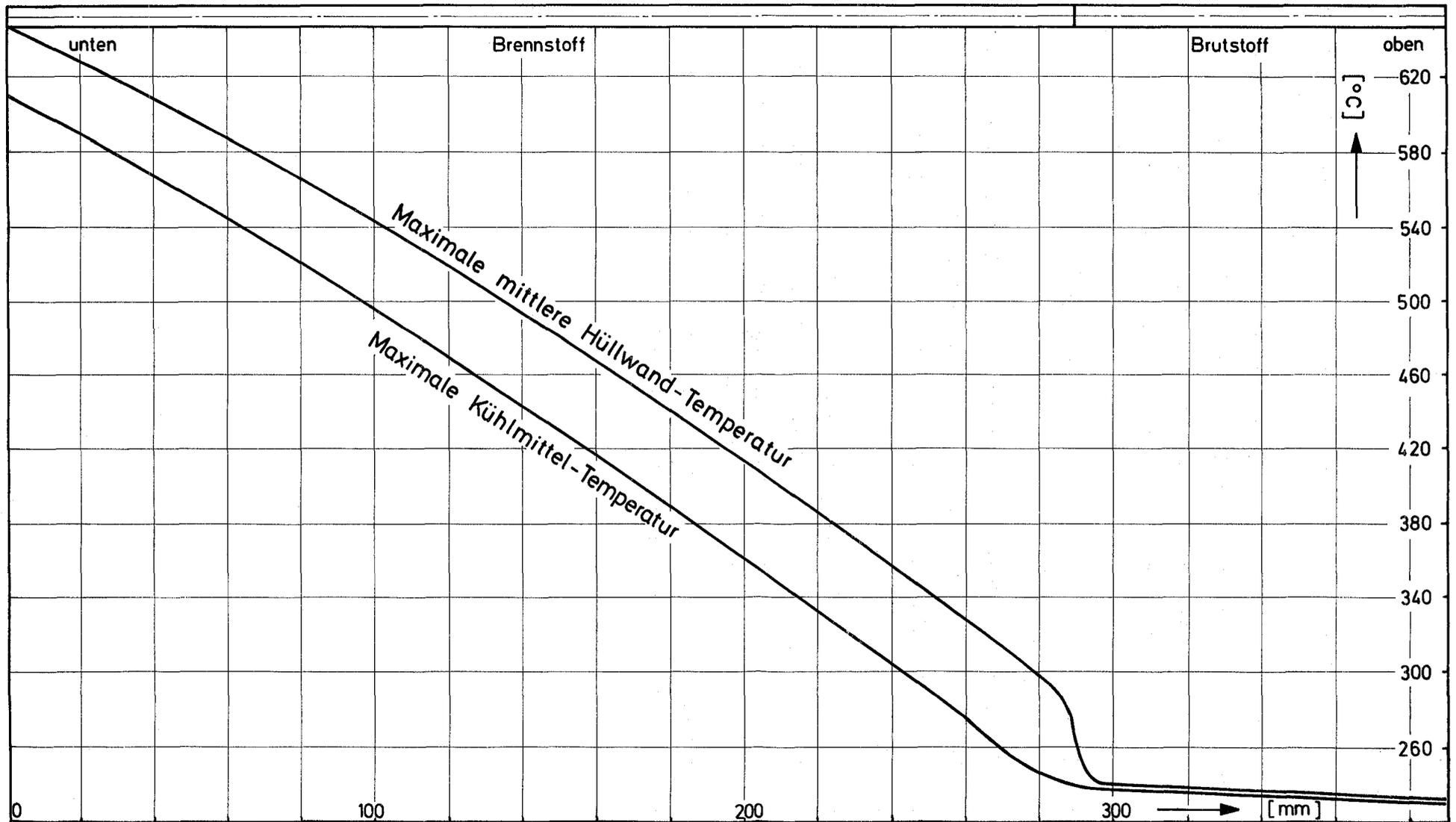
GfK Karlsruhe

IMF/LB

DFR - 350

Kühlmittel - Austrittstemperaturen in °C

Abb. 26



-85-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

DFR-350 Brennstab
Anfängliche Hüllrohr- und Kühlmittel-Temperaturen

Abb. 27

9.5 Abbrand

In jedem der 4 Betriebszyklen des DFR wurde an der maximal belasteten Stelle im Brennstab (2,5 - 5 cm unterhalb der Core-Mittelebene) ein Abbrand zwischen 1,20 und 1,55 % der schweren Atome erreicht. Die genauen Abbrandwerte nach den DFR-Betriebsprotokollen sind in Tabelle XXVII wiedergegeben. Die axiale Position z bezieht sich auf die Core-Mittelebene. Es ist zu beachten, daß die Angaben für $z = + 10$ und für $z = - 25$ cm für das 77-Stabbündel nur fiktiven Charakter haben, da die Brennstoffzone in den Stäben nur von $z = + 6$ cm bis $z = - 23$ cm reicht.

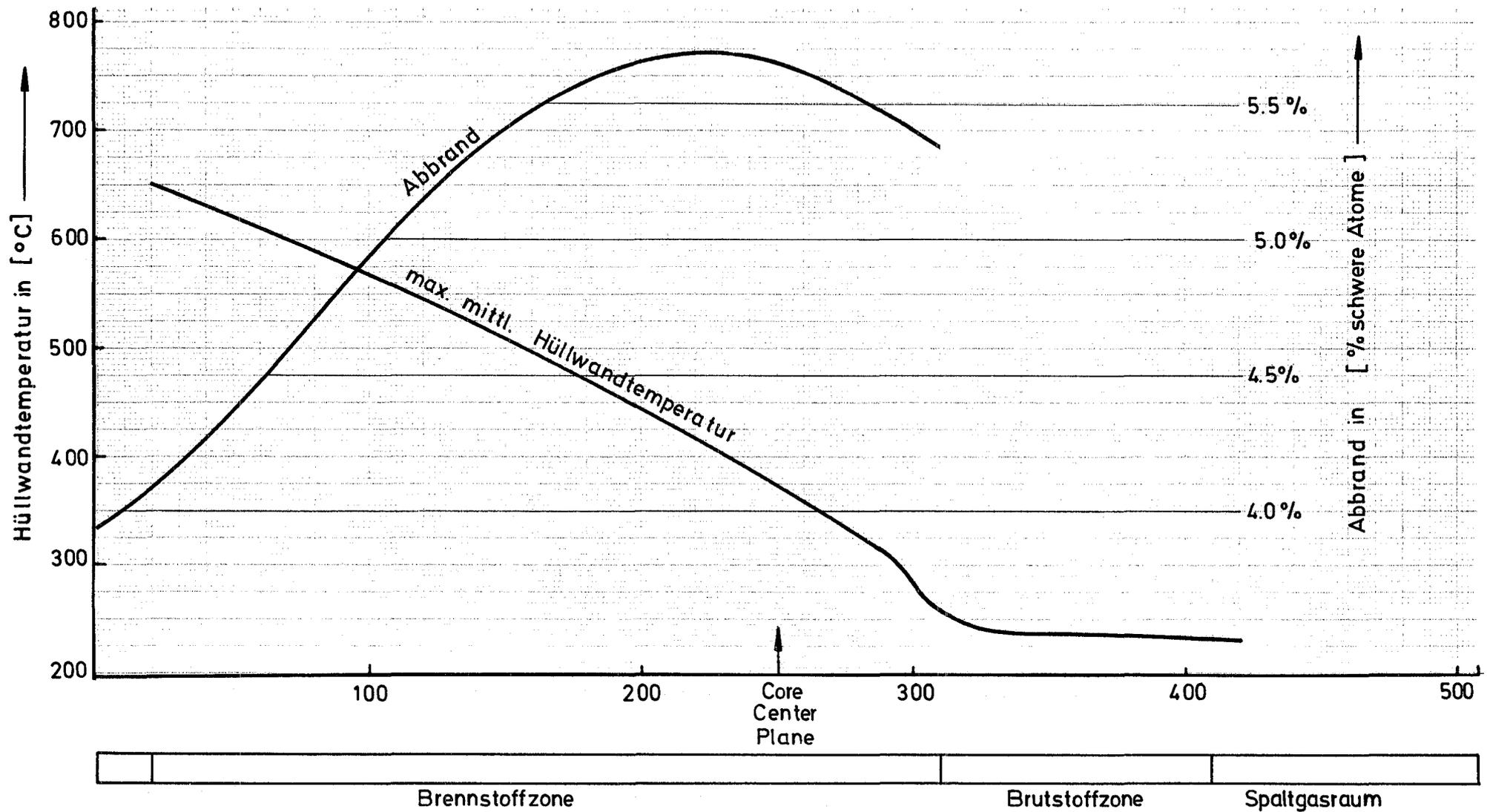
Der lokal maximale Abbrand beträgt somit 52800 Mwd/t Me. Die Unterschiede von Stab zu Stab sind nicht näher bekannt, sie machen wegen des flachen radialen Flußverlaufes im DFR-Hexagon weniger als 3 % aus.

Der axiale Verlauf des Abbrandes längs der Brennstoffzone eines Stabes ist dagegen sehr ausgeprägt. Das geht aus den Einzeldaten der Tabelle XXVII für die verschiedenen axialen Positionen hervor. In Abb. 28 ist dieser Abbrandverlauf über die Stablänge aufgezeichnet. Zur Ergänzung der Anschaulichkeit ist dort schließlich auch noch die Hüllwandtemperatur mit eingetragen.

Tabelle XXVII Abbrandwerte in den Betriebszyklen der Bestrahlung

Axiale Pos. z (cm)	A b b r a n d am Ende von Run 62			A b b r a n d am Ende von Run 63			A b b r a n d am Ende von Run 64			A b b r a n d am Ende von Run 65		
	%	MWd/t Ox	MWd/t Me									
	+ 10	1,08	8848	10063	2,48	20327	23117	3,82	31277	35570	5,10	41797
+ 5	1,15	9392	10681	2,63	21566	24526	4,05	33168	37721	5,40	44304	50386
0	1,20	9817	11165	2,75	22534	25627	4,23	34644	39400	5,64	46259	52609
- 5	1,20	9825	11174	2,75	22553	25649	4,23	34673	39433	5,65	46299	52654
- 10	1,15	9389	10678	2,63	21561	24521	4,05	33161	37713	5,40	44297	50378
- 15	1,04	8538	9710	2,39	19624	22318	3,68	30206	34352	4,93	40381	45924
- 20	0,91	7498	8527	2,10	17249	19617	3,24	26574	30222	4,34	35556	40437
- 25	0,83	6816	7752	1,91	15686	17839	2,94	24177	27496	3,94	32363	36805

Anmerkung: Die Zahlenwerte in % und in MWd/t Oxid stammen aus den Protokollen des D.E.R.E. Die Umrechnung auf MWd/t Metall erfolgte unter Verwendung des in Tabelle XII ausgewiesenen Schwermetallgehaltes von 87,93 Gewichts-%.



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay - Bündel DFR - 350
Abbrand und Hüllwandtemperatur

Abb. 28

10. Nachuntersuchung des Bündels

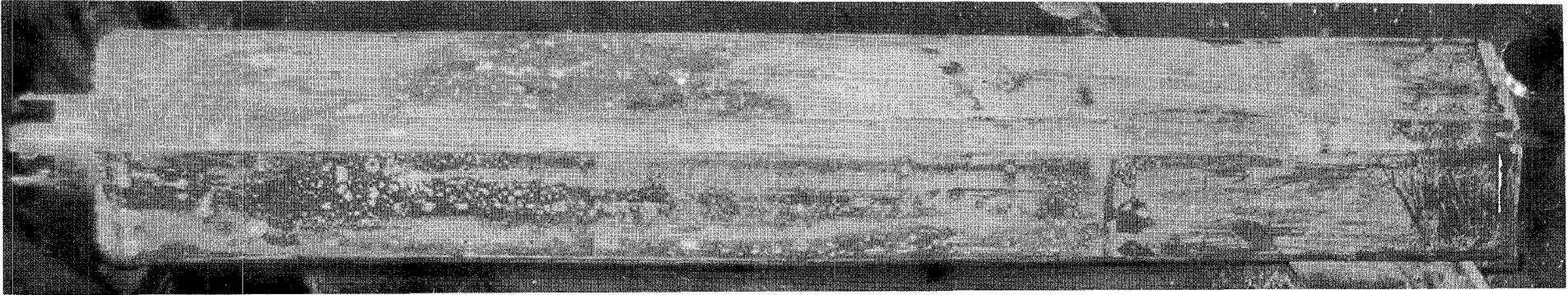
Das Brennstab-Bündel wurde bis zum Abklingen der wichtigsten kurzlebigen Spaltprodukte im Reaktortank unter NaK gelagert, um bei der Untersuchung ohne Zwangskühlung arbeiten zu können. Nach einer durch andere Ursachen verlängerten Abkühlzeit von 186 Tagen konnte das Bündel in einem mit Stickstoff gefluteten Behälter in die ebenfalls mit Stickstoffatmosphäre arbeitenden Heißen Zellen überführt werden. Hier wurden bei einer ersten visuellen Kontrolle keine schadhafte Veränderungen festgestellt. Ein noch anhaftender NaK-Film verhinderte allerdings die genauere Beurteilung der Oberfläche des Mantelrohrs. Abb. 29 zeigt die Oberfläche des Mantelrohres von beiden Stumpf-Seiten.

10.1 Röntgendurchleuchtung

Das ungereinigte Bündel wurde mit einer 300 kV-Röntgenröhre durchleuchtet, wobei 3 Bildserien aufgenommen wurden, die sich jeweils über die gesamte Bündellänge erstreckten. Die Durchleuchtungsrichtung wurde dabei so gewählt, daß in der hexagonalen Anordnung der Stäbe durchgehende Längsspalte sichtbar wurden. In Abb. 30 sind die Durchleuchtungsrichtungen als X, Y und Z-Richtung eingezeichnet. Beim Durchsehen der Aufnahmen wurde folgendes gefunden:

- a) Die Spalte zwischen den Stäben sind mit Ausnahme der weiter unten erwähnten Abweichungen gleichmäßig über die Bündellänge. Somit ist eine erhebliche Stabverformung auszuschließen (Abb. 31).
- b) Die unteren Enden der Stäbe sind unterhalb des letzten (neunten) Abstandhalters zum Zentrum des Bündels hin gebogen (Abb. 32).
- c) An der Außenfläche B des Mantelrohres ist etwa 25 cm vom oberen Ende eine leichte Einbeulung festzustellen. An dieser Stelle ist auch der Abstand zur darunterliegenden ersten Stabreihe schmaler als normal.
- d) Die Spaltweiten, obwohl gleichmäßig in ihrem Verlauf, waren unterschiedlich breit. Dies bedeutet, daß die Stäbe nicht genau hintereinander standen, sondern teilweise seitlich versetzt waren.
- e) Oberhalb der Stäbe war innerhalb des Mantelrohres ein formloses Stück Fremdmaterial niedriger Dichte zu sehen.

Seite D

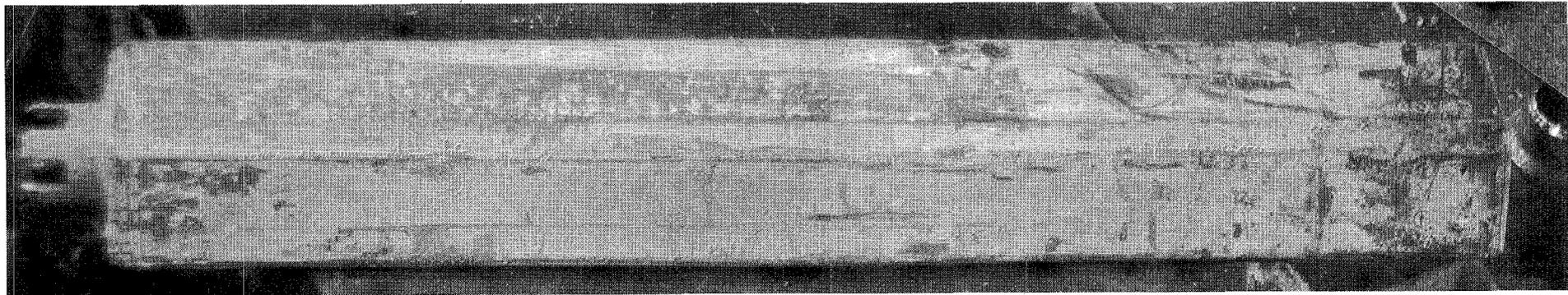


Seite C

unten

oben

Seite B

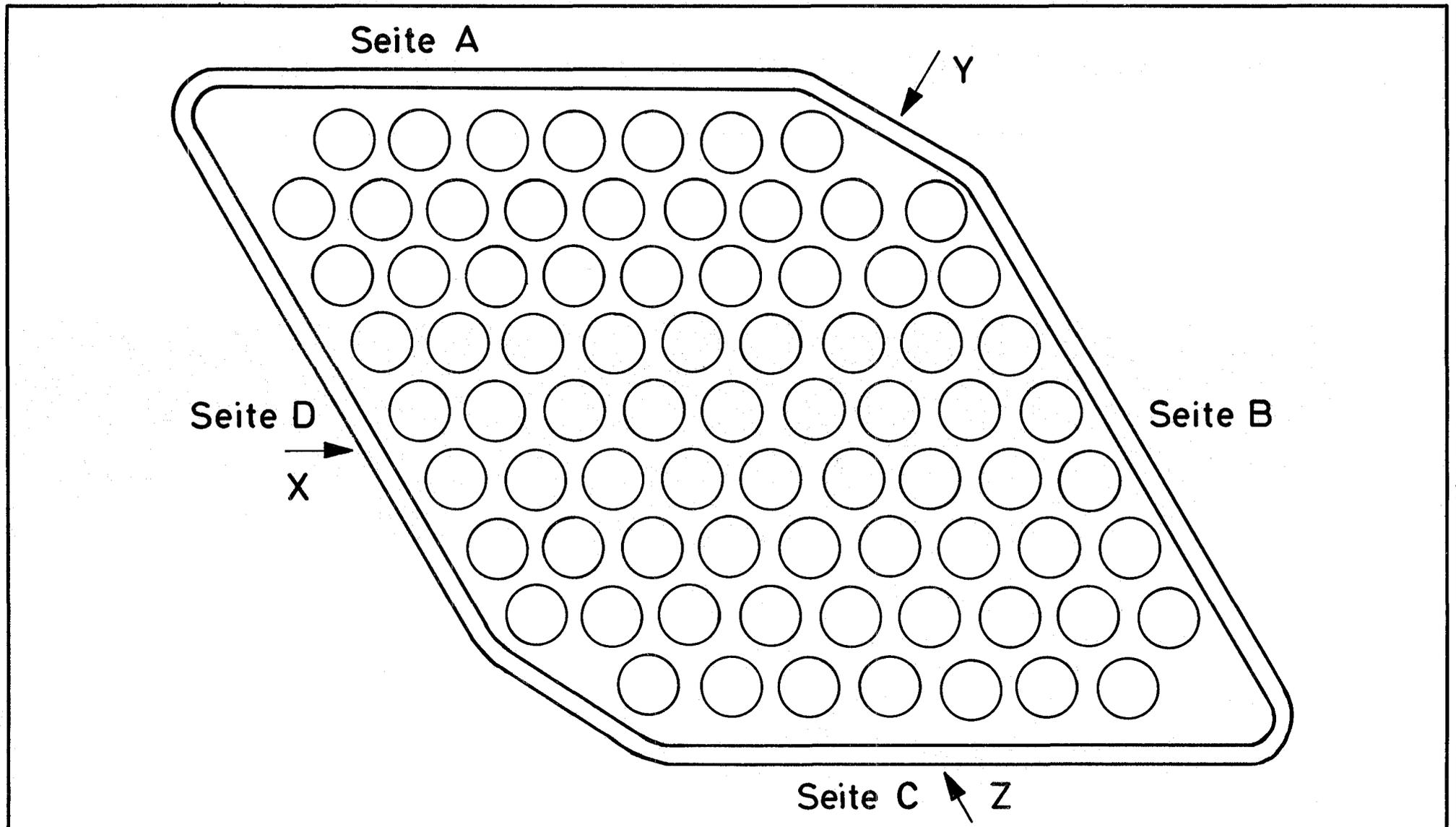


Seite A

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Mantelrohr vor der Dampfreinigung

Abb. 29

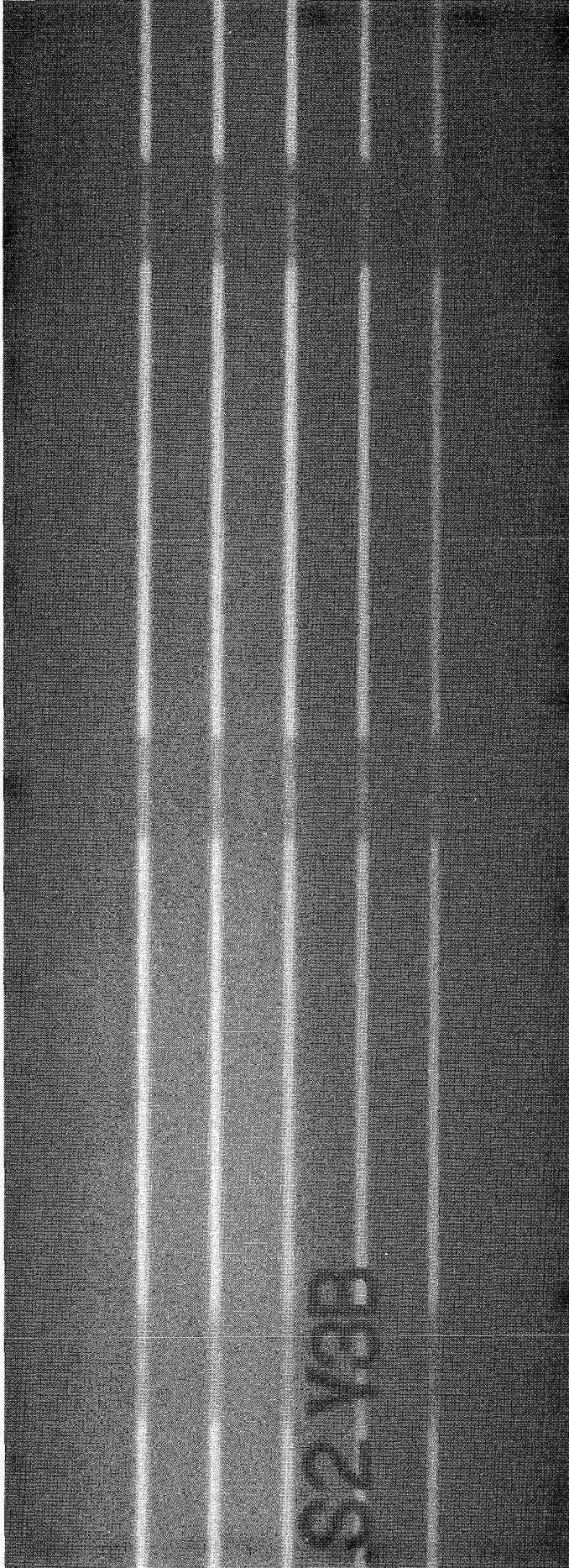


-16-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Position des Bündels bei der Röntgen -
Durchleuchtung

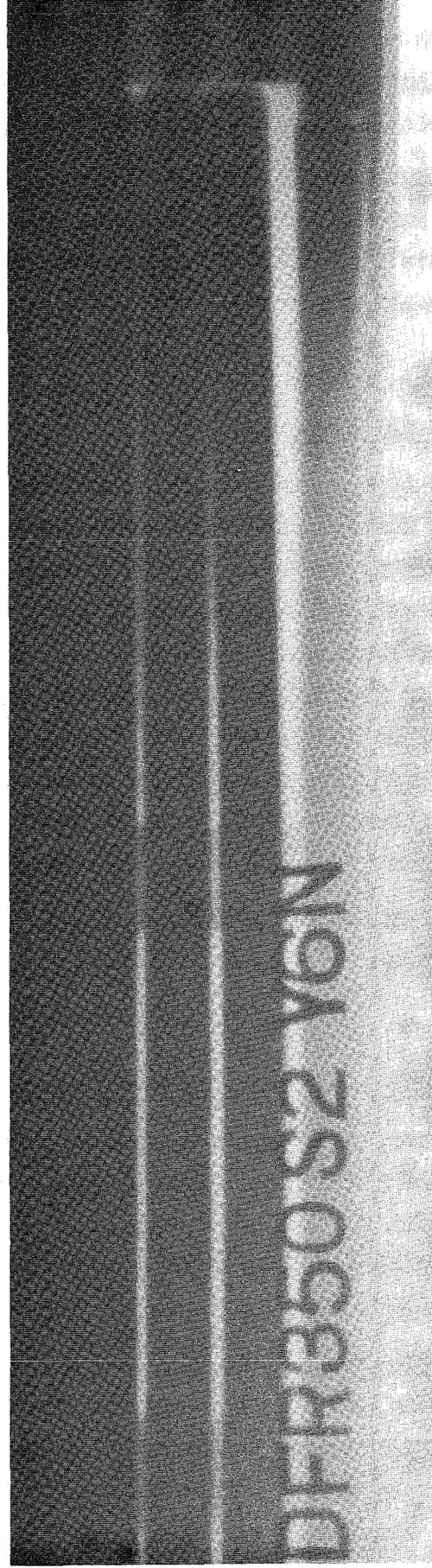
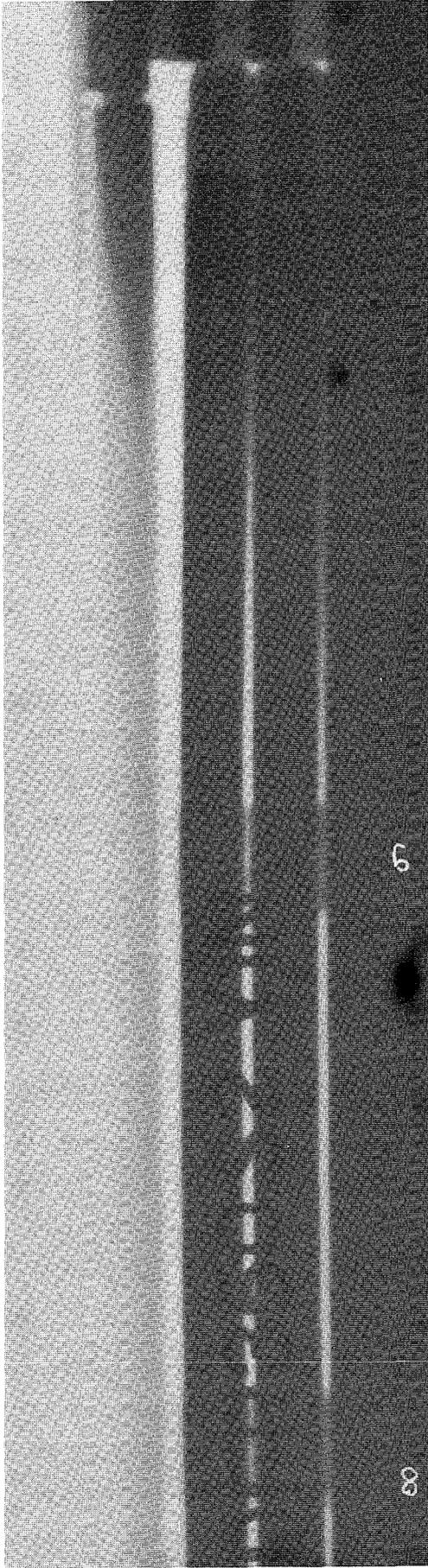
Abb. 30



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Röntgen - Durchleuchtung , gleichmäßige Spalte

Abb. 31



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Röntgen - Durchleuchtung , verbogene Stäbe

Abb. 32

Die gesamte Röntgendurchleuchtung wurde nach der Dampfreinigung wiederholt. Hierbei zeigt sich, daß alle unter a) bis d) gemachten Beobachtungen unverändert geblieben waren, das formlose Stück Fremdmaterial dagegen verschwunden war. Die anfängliche Vermutung, daß das Fremdmaterial ein Brocken NaK-Oxid sei, wurde damit bestätigt.

Das Ergebnis der Röntgenuntersuchung ist die Aussage, daß die Bündelkonfiguration über die Bestrahlungszeit hinweg intakt geblieben ist, und die Einzelstäbe keine Schäden erlitten haben, die zu einer äußeren Deformation führten.

10.2 Dampf-Reinigung

Zum Entfernen des noch anhaftenden Kühlmittels NaK wurde das Bündel einem Reinigungsverfahren unterworfen. Dabei wurde zunächst heißer Stickstoff durch das Bündel geblasen. Später wurden dem Stickstoffstrom steigende Mengen Wasserdampf zugesetzt bis zuletzt nur noch nasser Wasserdampf durchgeblasen wurde. Die gleiche Prozedur wurde für den Gas-Spalt im Mantelrohr, der mit dem Innern des Bündels nicht verbunden ist, wiederholt. Anschließend wurde zum Herauslösen der in ihre Hydroxide umgewandelte Alkalimetalle das Bündel in einem Wasserbad ausgespült. Eine vollständige Entfernung der Hydroxidreste, etwa durch mehr faches Spülen, wurde nicht versucht.

Nach der Dampf-Reinigung wurde das Bündel in Luft-Atmosphäre weiter untersucht.

10.3 Visuelle Inspektion und Außenvermessung des Mantelrohrs, Radon-Analyse

Die Oberfläche des Mantelrohres wurde visuell untersucht und dabei auf der Seitenfläche B eine etwa 1 mm tief eingedrückte Fläche mit den Ausmaßen 2,5 x 5 cm festgestellt. Weitere Besonderheiten waren nicht zu beobachten. Ebenfalls ohne Befund blieb die Inspektion des oberen und unteren Bündelendes.

Nachforschungen über die Ursache der Einbeulung in der Seitenfläche B ergaben, daß beim Herausziehen des Bündels aus dem Reaktortank in die Transportflasche das Mantelrohr gequetscht wurde, als die Flasche geschlossen werden sollte und das Bündel noch nicht vollständig hochgezogen war. Damit war sichergestellt, daß die Einbeulung nicht schon

während des Betriebes vorhanden war. Wegen der geringen Eindringtiefe war ein ins Gewicht fallender Einfluß auf das Stabbündel im innern auszuschließen.

Das Mantelrohr wurde später vermessen und die visuelle Beobachtung an der Seitenfläche B bestätigt. Die maximale Eindringtiefe betrug 1,4 mm. Alle anderen Seiten zeigten die bei diesen Bündeln üblichen Dickschwankungen.

Am Bündel wurde unmittelbar nach dem Entladen aus dem Reaktortank ein Radon-Test gemacht, um einen Hinweis auf eventuell defekte Brennstäbe zu erhalten. Dieser Test verlief positiv, so daß man zunächst mit einem defekten Brennstab rechnete. Der Radon-Test wurde nach der Dampfreinigung wiederholt und verlief diesmal eindeutig negativ. Als Erklärung wird angenommen, daß das positive Signal durch Radon hervorgerufen wurde, das aus einem anderen Bestrahlungsexperiment stammt und beim Entladen des Bündels aus dem Reaktor zusammen mit Reaktorschutzgas in die Transportflasche und damit in das Brennstabbündel gelangt ist.

10.4 Demontage

In der für diese Art von Bündel üblichen Weise wurden die Schrauben am Kopfstück des Bündels ausgebohrt und das Kopfstück abgenommen. Der Versuch, das Stabbündel mit einer Stange von unten nach oben aus dem Mantelrohr zu drücken, schlug fehl. Das Stabbündel ließ sich mit einer Schubkraft von ca. 10 kg nur zwei bis 3 cm herausdrücken. Als Ursache für die Schwierigkeiten wurde die Einbeulung an der Seitenfläche B angesehen. Da diese Einbeulung im oberen Bündelabschnitt etwa zwischen den Abstandshaltern 3 und 4 liegt, wurde versucht, das Bündel nach unten herauszudrücken, weil auf diese Art nur die Abstandshalter 3, 2 und 1 die Engstelle passieren müssen. Beim Herausdrücken nach oben sind es hingegen 6 Abstandshalter. So wurde unterhalb der unteren Stützplatte das Bündel durchgetrennt und mit einem Schieber von oben das Stabbündel aus dem Mantelrohr gedrückt. Dreimal gab es einen erhöhten Widerstand als die 3 Abstandshalter die Engstelle passierten und dann war das Stabbündel leicht herauszudrücken. Die maximal aufgewendete Druck-Kraft lag bei 10 bis 15 kg. Sie wurde durch den Schieber gleichmäßig auf alle Stäbe verteilt. Noch ehe das Bündel ganz aus dem Mantelrohr heraus war, wurde die Außentemperatur des Stabbündels bestimmt, indem ein Thermoelement

an die äußere Stabreihe angedrückt wurde. Zwischen den Abstandshaltern 7 und 8, am Ort maximaler Stabileistung während des Betriebes, wurde eine Temperatur von nur 67°C gemessen. Damit war man sicher, daß auch die innersten Stäbe nicht über ihre Betriebstemperatur erwärmt waren.

10.5 Visuelle Inspektion des offenen Stabbündels

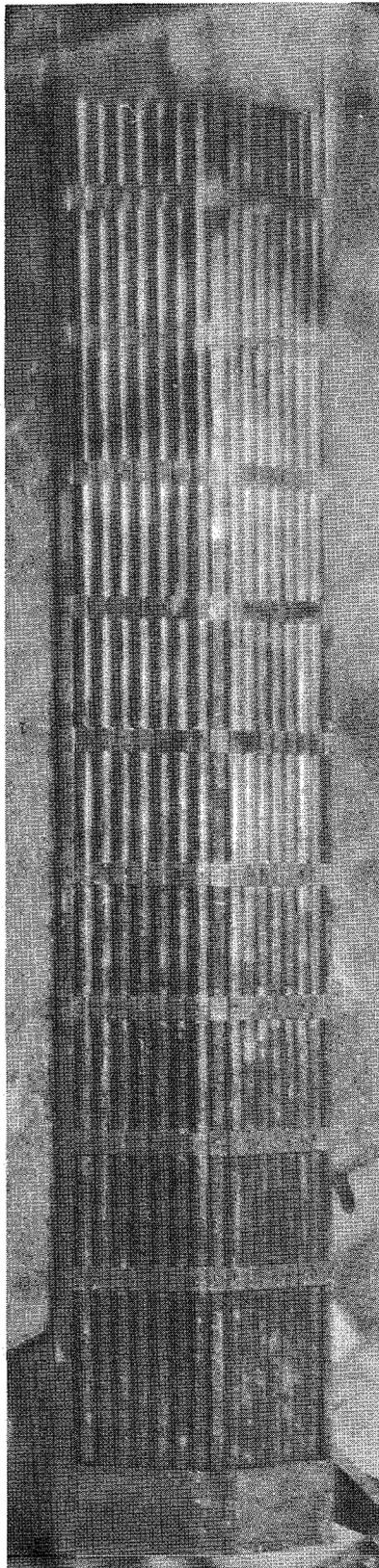
Das freigelegte Stabbündel wurde visuell untersucht. Es zeigte sich in den Hauptmerkmalen unverändert und ergab keine Hinweise auf einen Stabschaden. Entsprechend dem Temperaturgefälle waren die Stäbe am unteren, heißen Ende dunkel und mit einem samtartigen Überzug bedeckt, in der Mitte fortschreitend heller ohne Überzug und am oberen Ende metallisch hell glänzend (Abb. 33). Über die ganze Länge zeigten sich auf allen Stäben Flecken, die besonders zahlreich im Gebiet maximaler Stabileistung den Stäben ein eigenartiges getupftes Aussehen verliehen. Die Verbiegung der Außenstäbe unterhalb des letzten Abstandshalters war deutlich zu sehen. Außerdem hingen Reste von NaK-Hydroxid in einigen Ecken am Abstandshalter. In den Abb. 34 bis 38 ist die freigelegte Bündelseite D mit den Stäben G 14, G 41, G 7, G 39, G 4, G 36 und G 2 (von oben nach unten) zu sehen.

10.6 Stabbündel-Innenvermessung

Mit Hilfe von Fühlerlehren wurden die Abstände zwischen den einzelnen Stabreihen aus drei verschiedenen Richtungen (0° , 60° , 120°) gemessen. Die Meßorte lagen jeweils in der Mitte zwischen zwei Abstandshaltern, so daß neun Bündelquerschnitte vermessen wurden.

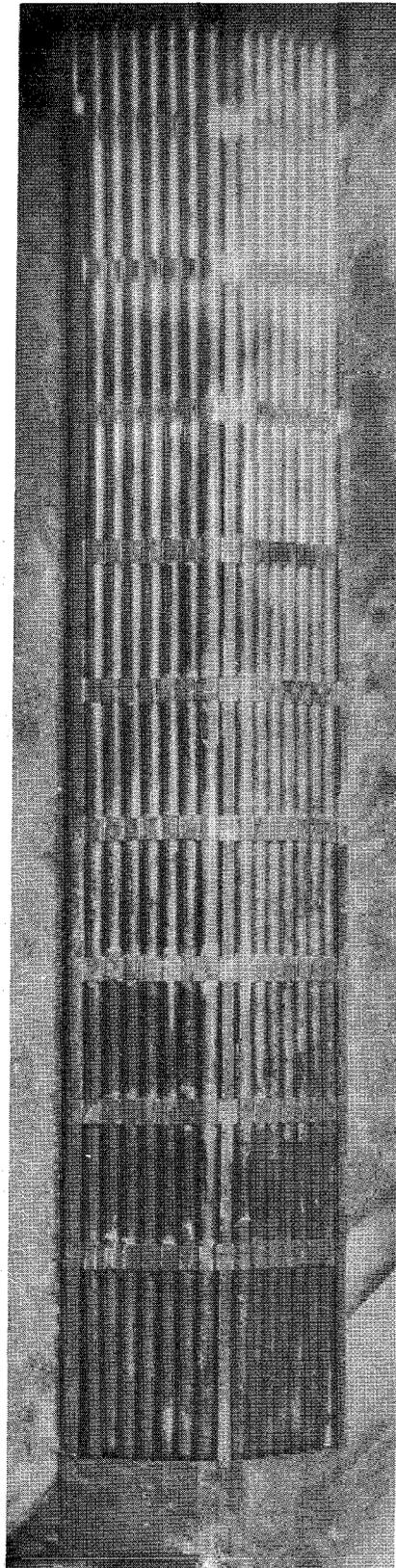
In einem idealen Bündel sollten die Abstände für eine $330\ \mu\text{m}$ -Lehre gerade noch gangbar sein. Aber schon bei der Vermessung vor der Bestrahlung zeigten sich in der Praxis kleinere Stababstände und zwar im oberen Bündelteil (bis Abstandshalter 6) minimal $230\ \mu\text{m}$ und weiter unten minimal $180\ \mu\text{m}$, unterhalb des letzten Abstandshalters sogar nur minimal $100\ \mu$. Außerdem war an der Kante zwischen Seitenfläche B und C eine Verengung auf $100\ \mu$ über mehrere Meßebenen hinweg vorhanden.

Bei der Nachuntersuchung waren im oberen Bündelteil keine wesentlichen Veränderungen festzustellen. Weiter unten, an der Stelle, an der das Bündel beim Transport gequetscht worden war, hatte der Abstand nur noch eine Weite von ca. $100\ \mu\text{m}$ (Abb. 39). Im Bereich maximaler Stabileistung



oben

unten



Seite D

Seite C

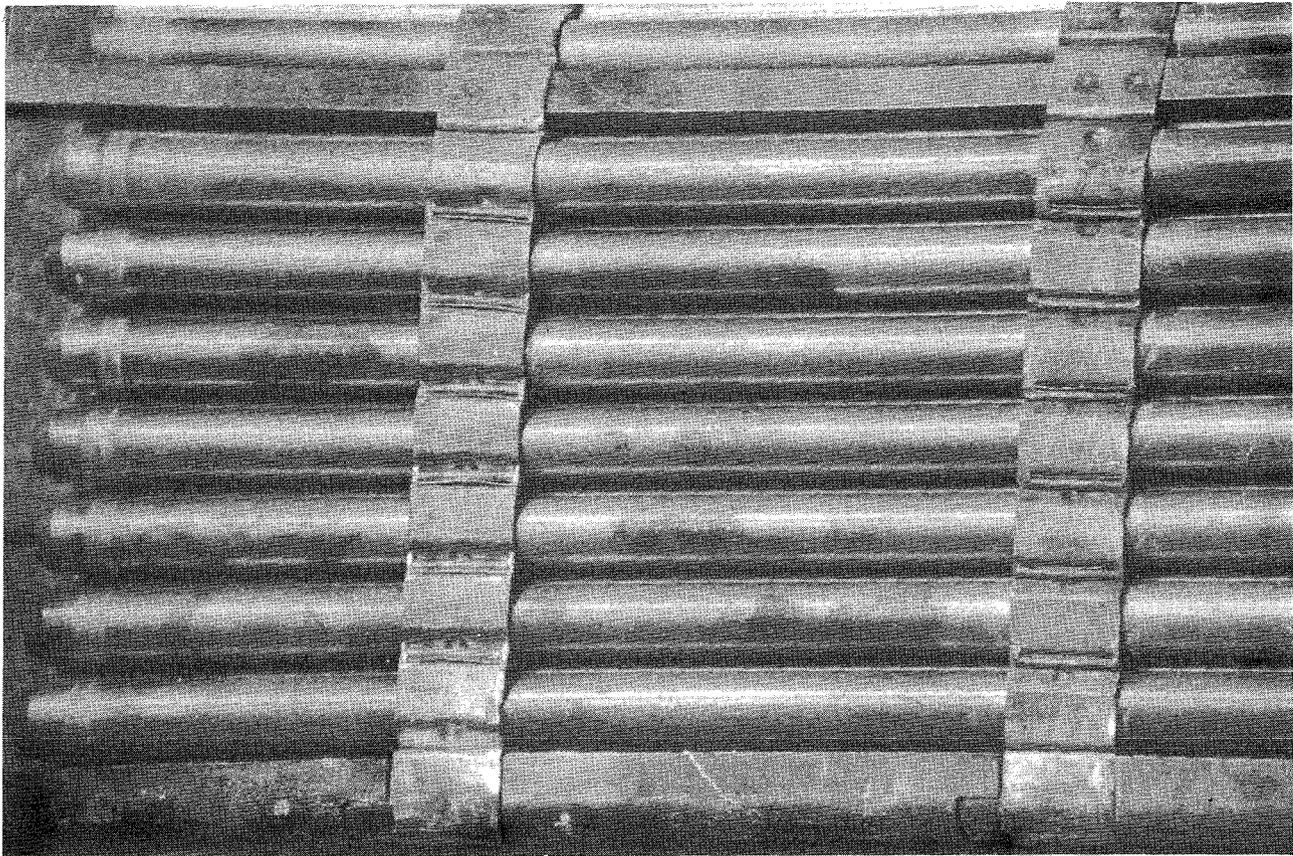
Seite B

Seite A

GfK Karlsruhe
IMF/LB

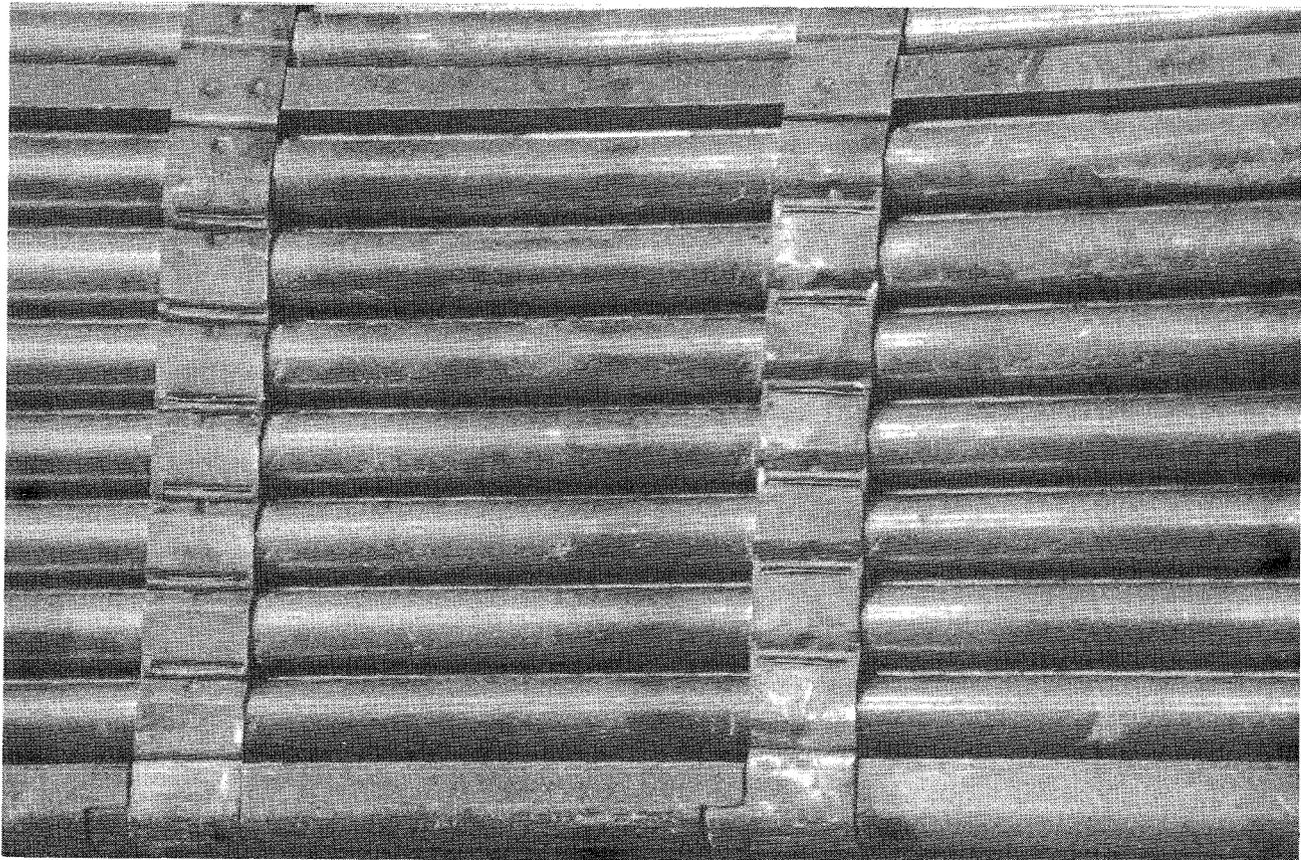
Freigelegtes Brennstabbündel

Abb. 33



A 1

A 2



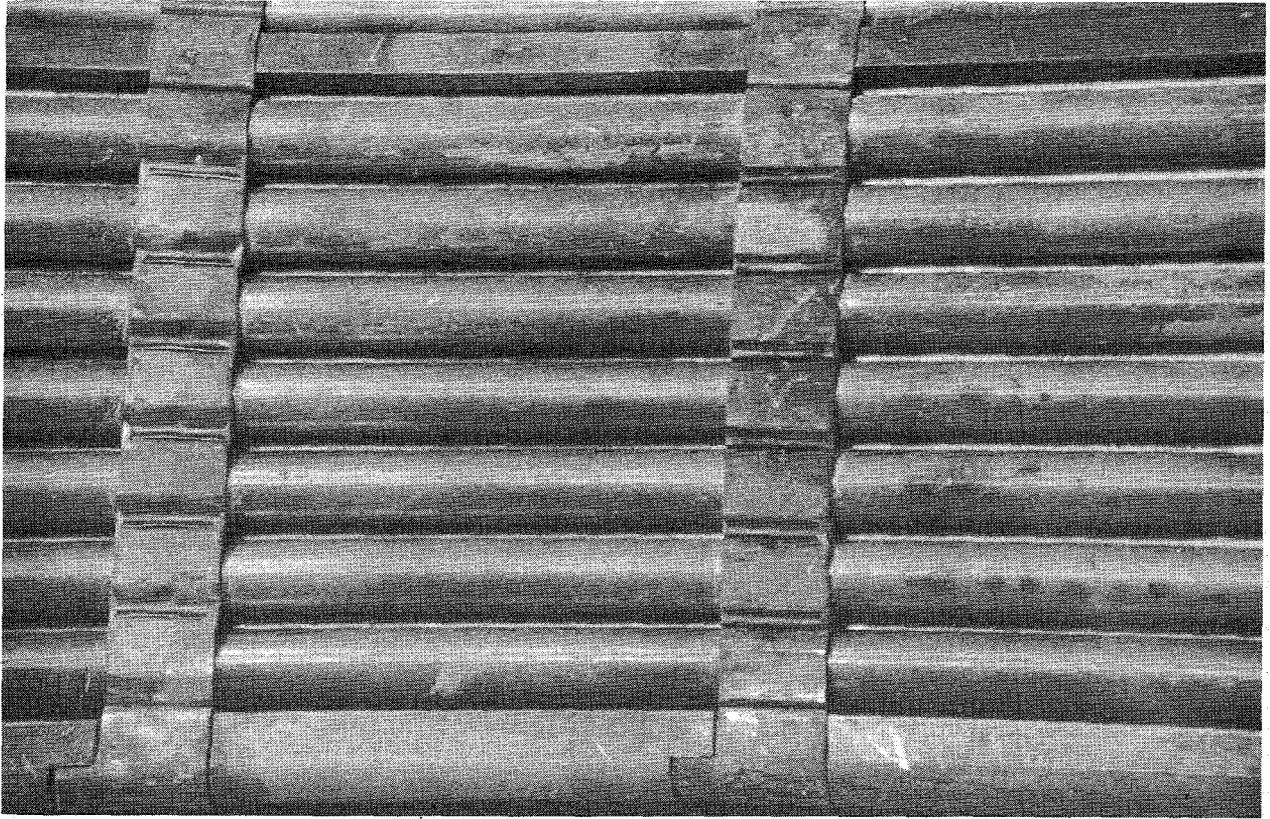
A 2

A 3

GfK Karlsruhe
IMF/LB

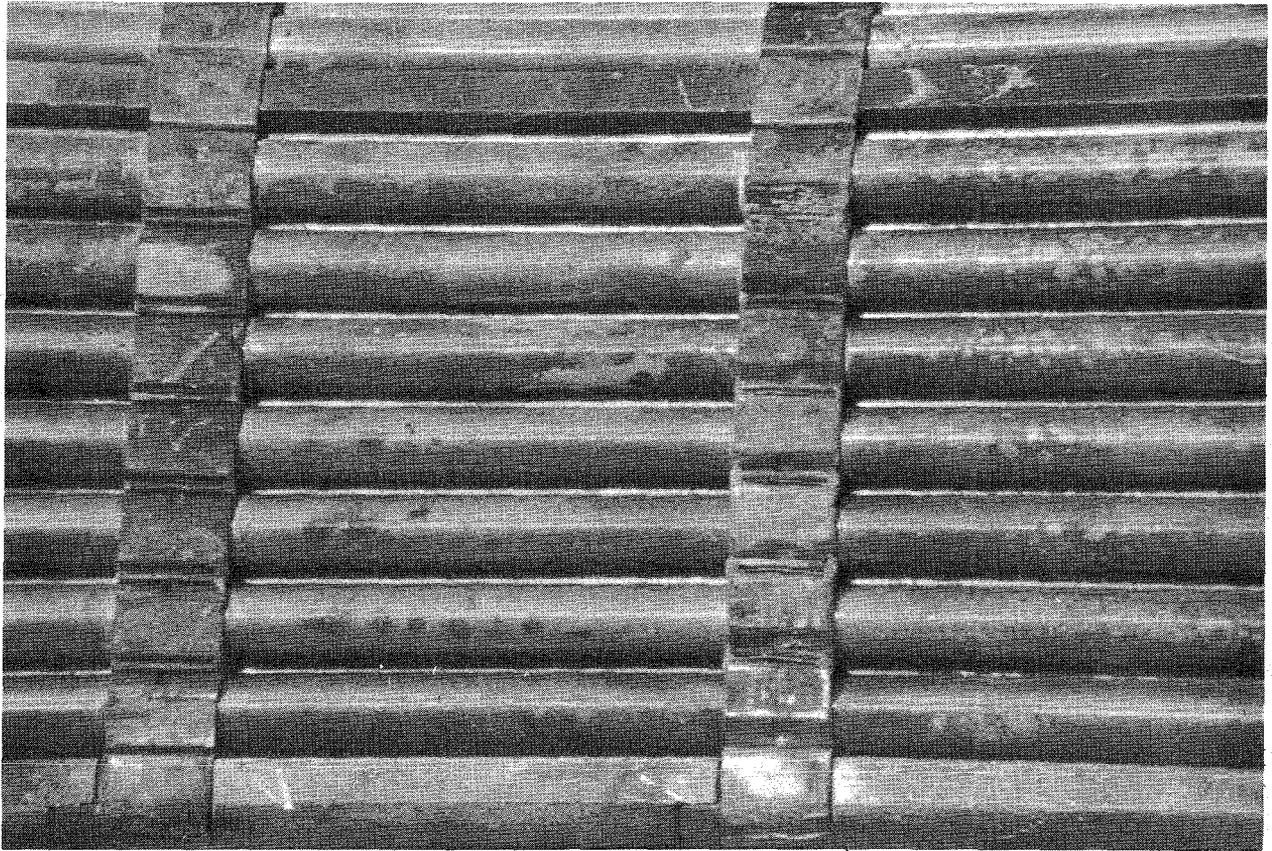
Bündel seite D
Teilansicht 1

Abb. 34



A 3

A 4



A 4

A 5

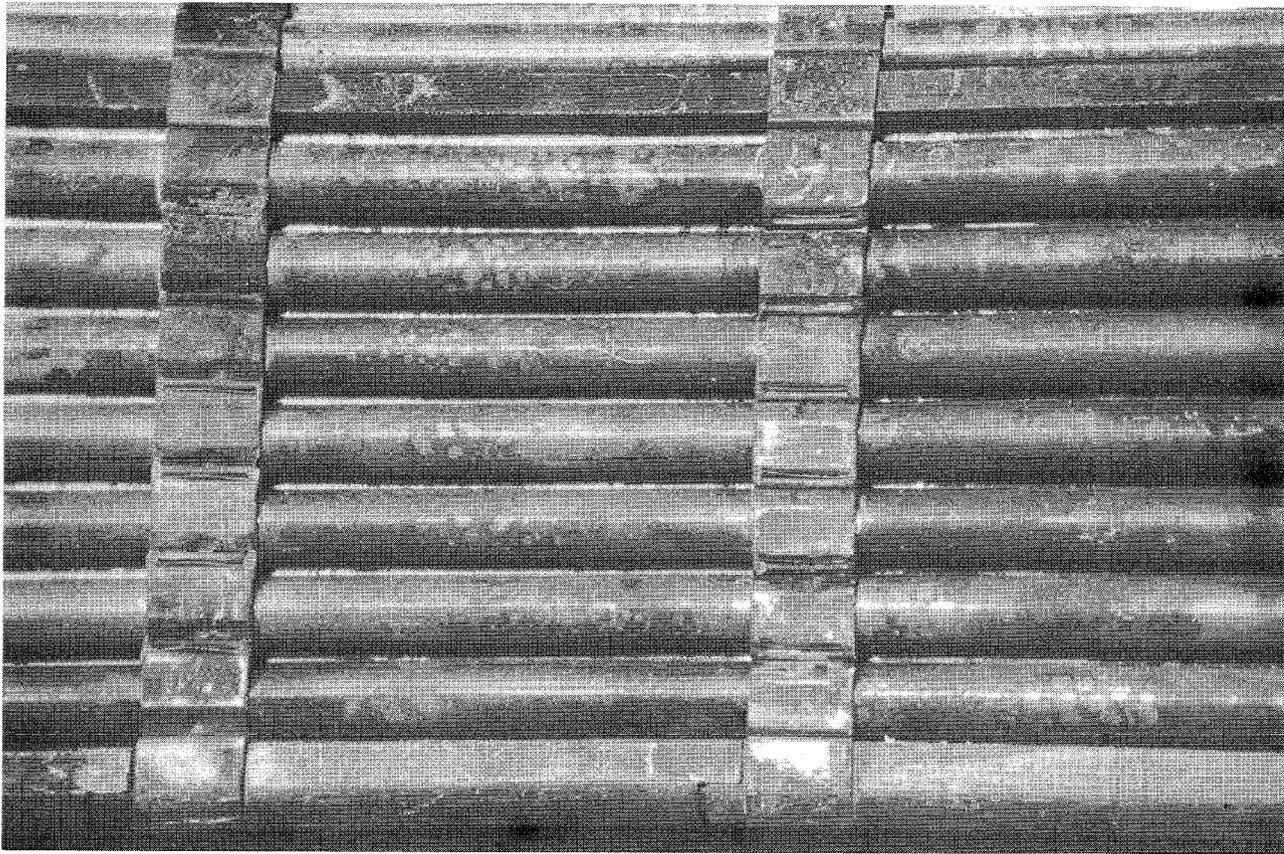
GfK Karlsruhe

IMF/LB

Bündelseite D

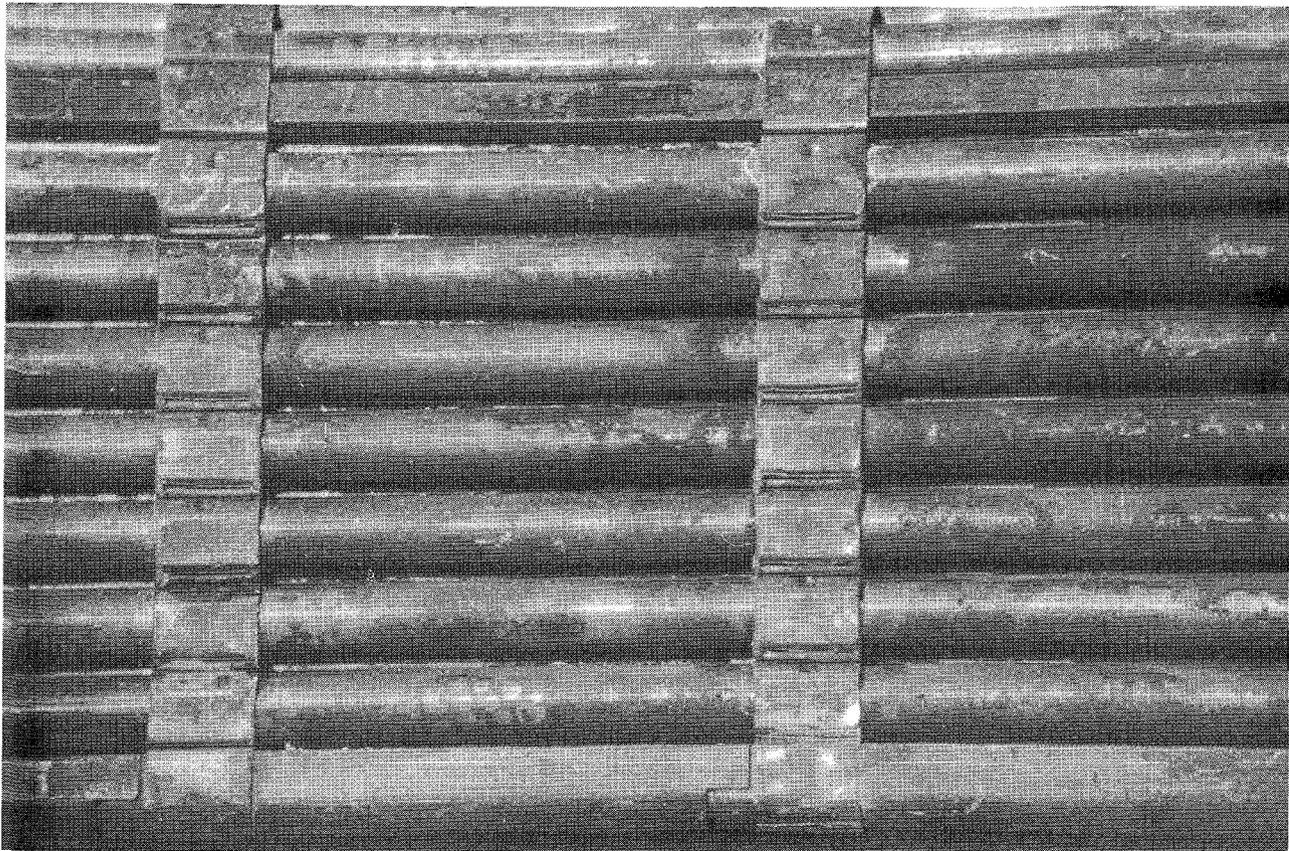
Teilansicht 2

Abb. 35



A 5

A 6



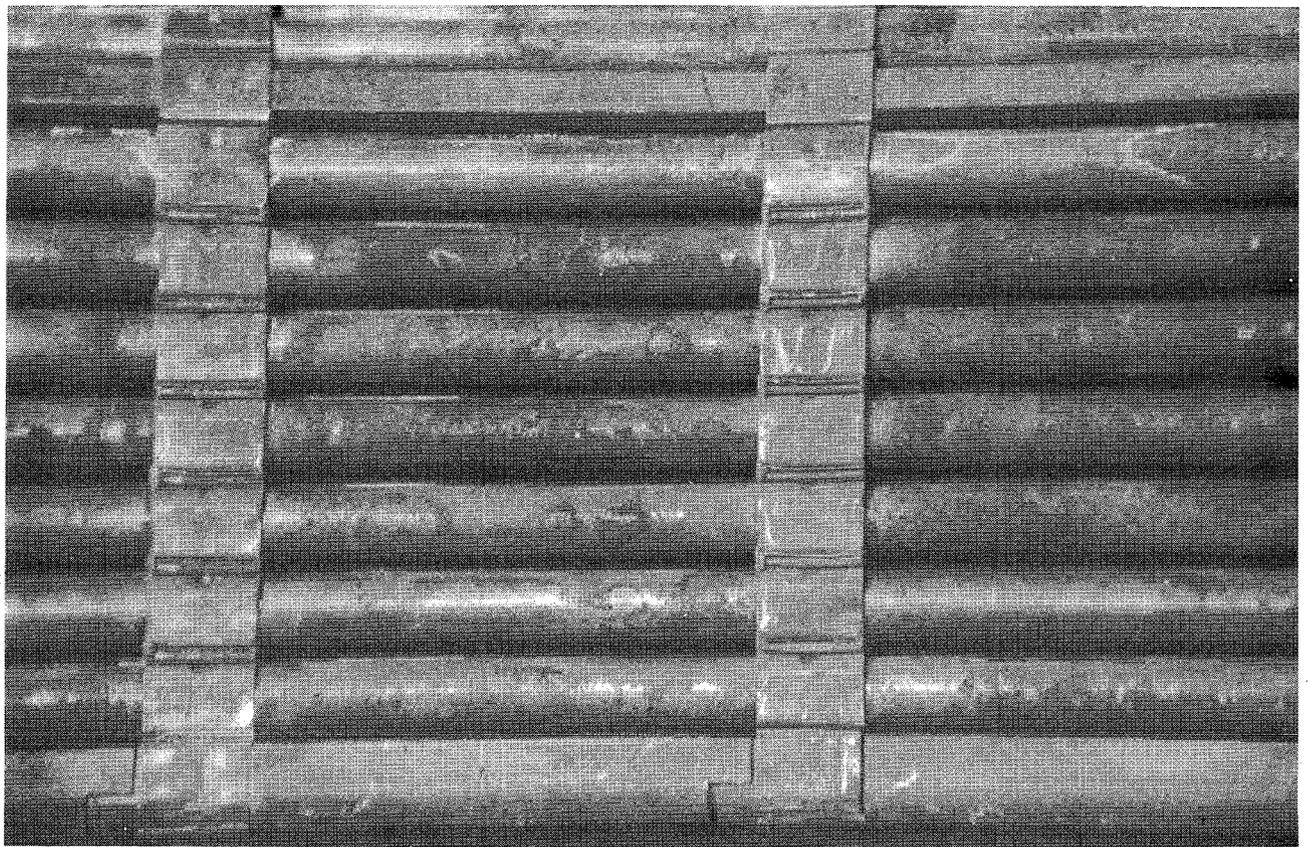
A 6

A 7

GfK Karlsruhe
IMF/LB

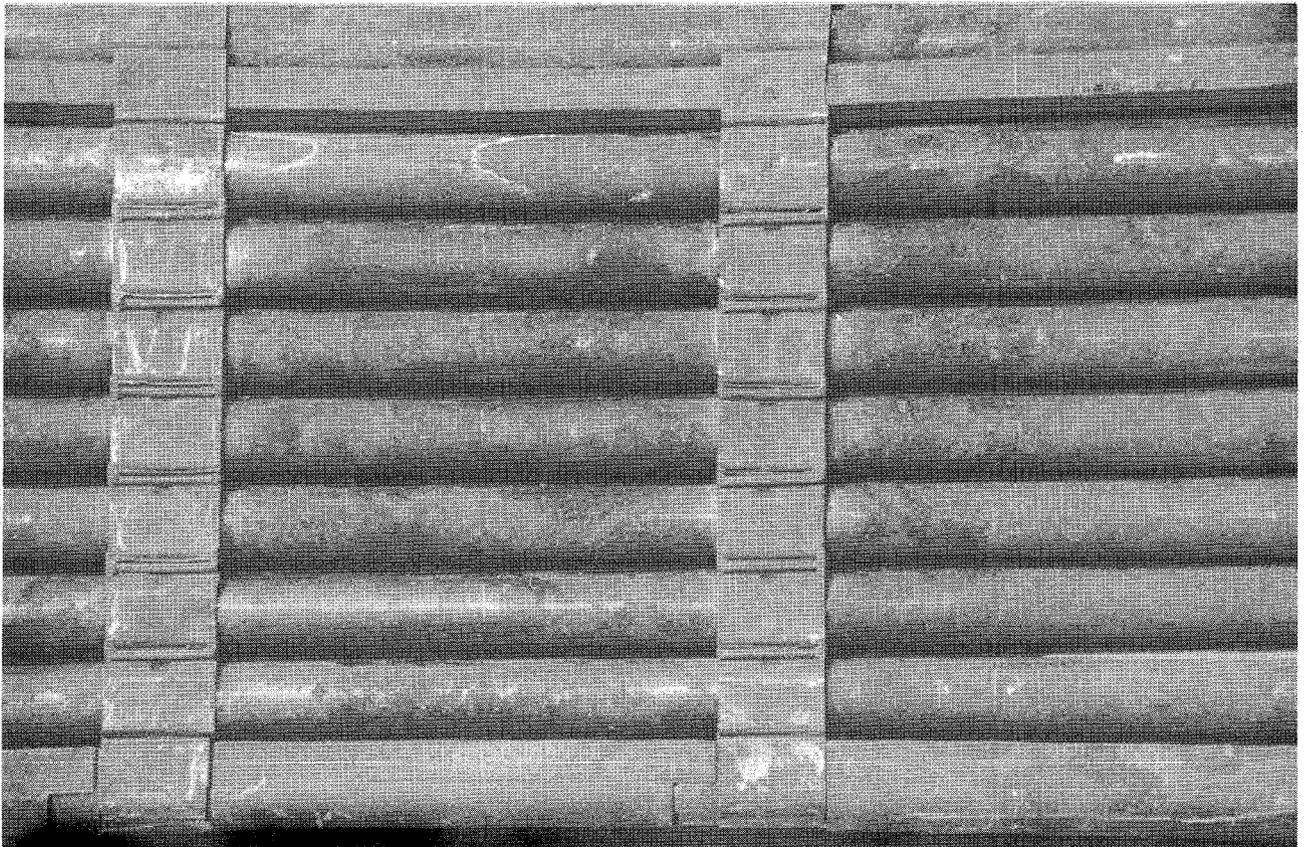
Bündelseite D
Teilansicht 3

Abb. 36



A 7

A 8



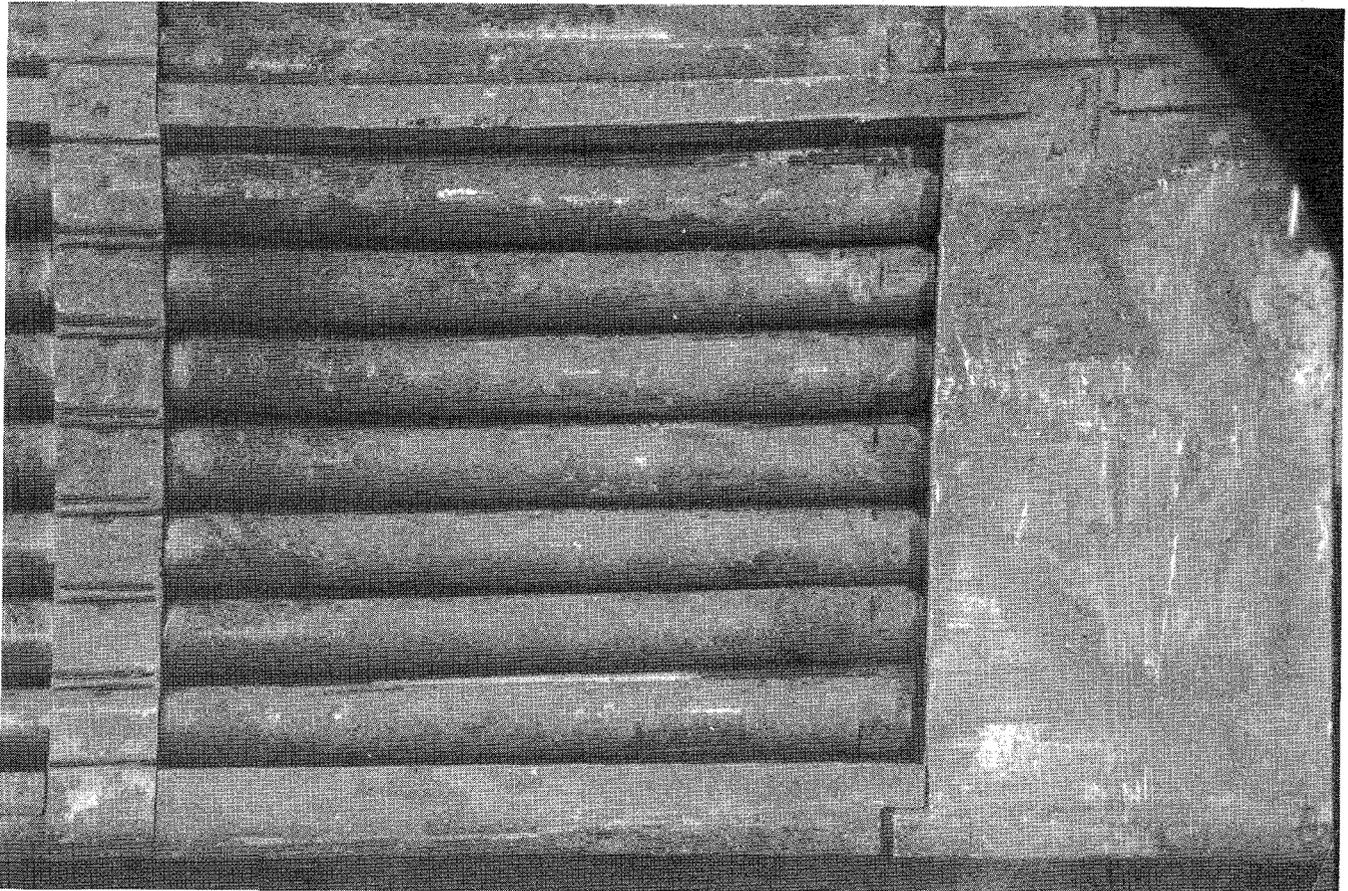
A 8

A 9

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Bündelseite D
Teilansicht 4

Abb. 37

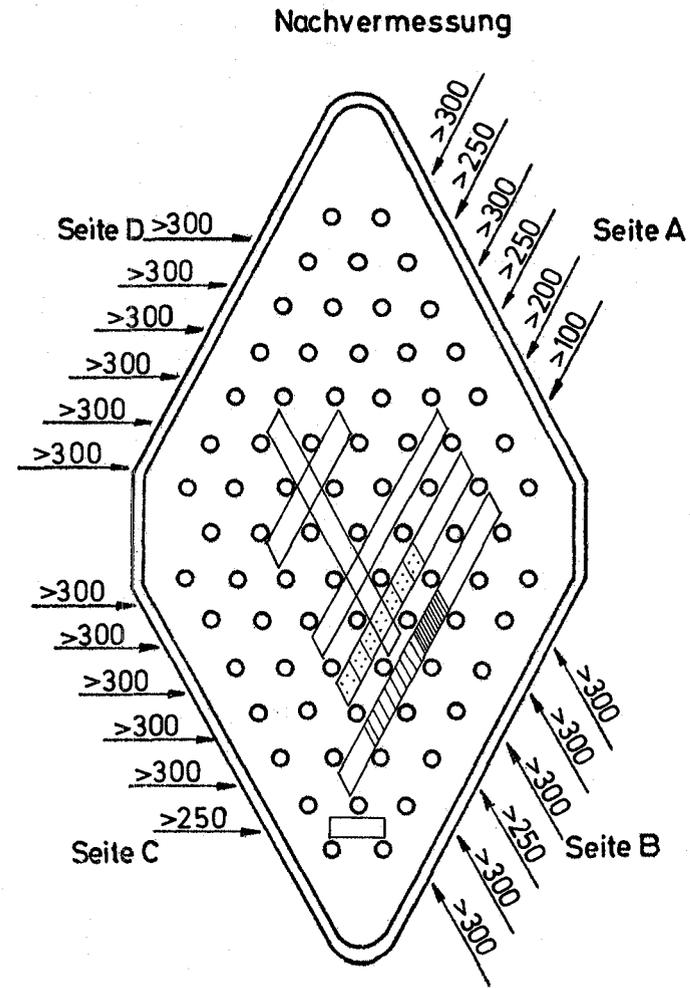
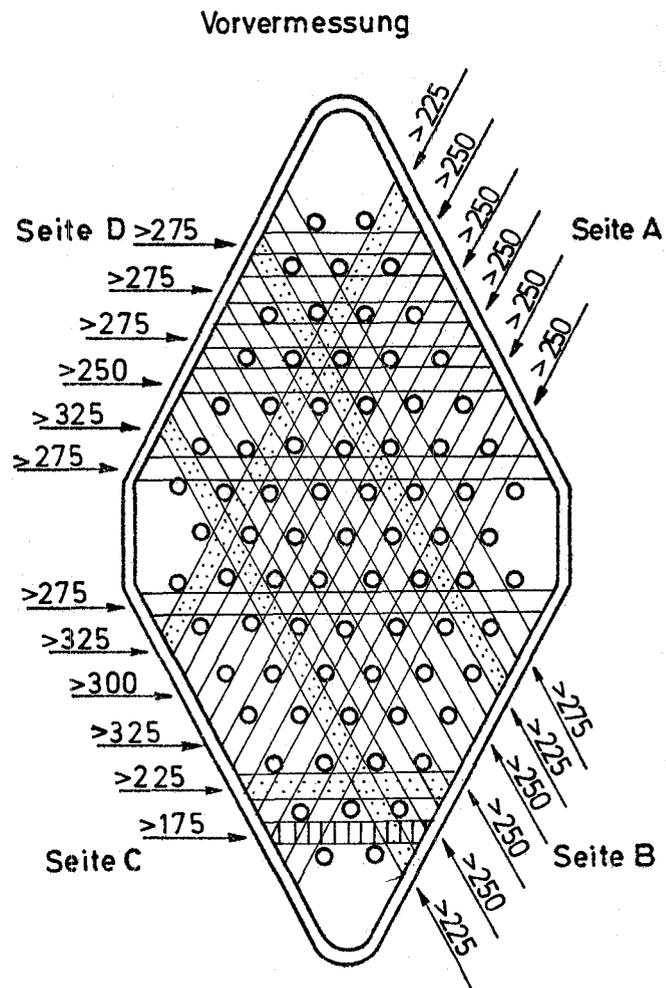


A 9

GfK Karlsruhe
IMF / LB

Bündelseite D
Teilansicht 5

Abb. 38



Position : Mitte zwischen Abstandhalter 3 und 4

(A-Halter 6 - 7) zeigte das Bündelzentrum wie erwartet geringfügige Verengungen (Abb. 40) und unterhalb des letzten Abstandhalters infolge der Stabverbiegung erhebliche Verengungen. Abb. 41 gibt in einem Histogramm die gesamten vermessenen Spalte des Bündels vor und nach der Bestrahlung wieder. Darin zeigt sich, daß die mittlere Spaltweite nach der Bestrahlung sogar größer geworden ist. Diese widersinnige Aussage kann nur dadurch erklärt werden, daß die Vermessungstechnik vor und nach der Bestrahlung offenbar sehr unterschiedlich ist. Ein Vergleich der Spaltweiten ist damit nur sehr grob möglich.

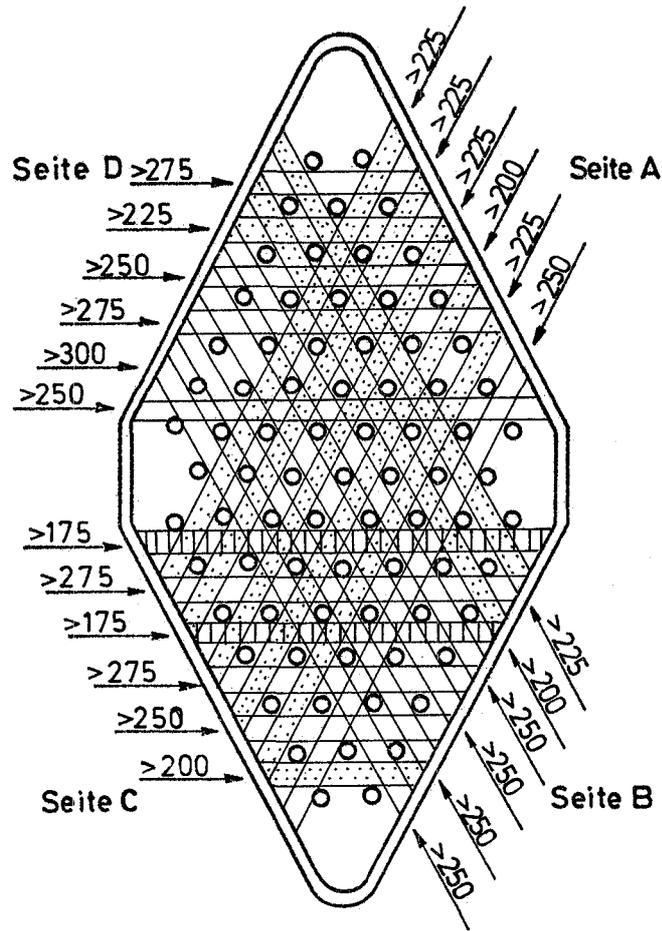
Eine weitere Vermessung der Stab-Abstände wurde mit einem kalibrierten Konus an den Außenschichten des Bündels vorgenommen. Es wurde ebenfalls wieder in der Mitte zwischen den Abstandshaltern gemessen. Die Spalte sollten bei dieser Messung ein Sollmaß von 1,3 mm haben. In der Vorvermessung lagen 90 % der Messungen zwischen 1,27 und 1,31 mm. Die Nachvermessung zeigte auch hier wieder höhere Werte, die nur durch verschiedene Meßverfahren - einmal per Hand, das andere Mal in den heißen Zellen - erklärbar sind. Eine Häufung breiter Spalte wurde an der eingedrückten Seite B festgestellt, was im Einklang mit den Fühlerlehren-Messungen steht.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Vermessung der Stababstände keine zusätzlichen Erkenntnisse bezüglich des Bündelverhaltens gebracht hat. Lediglich bei der eingedrückten Seite B konnte das Ausmaß der Verformung erkannt werden.

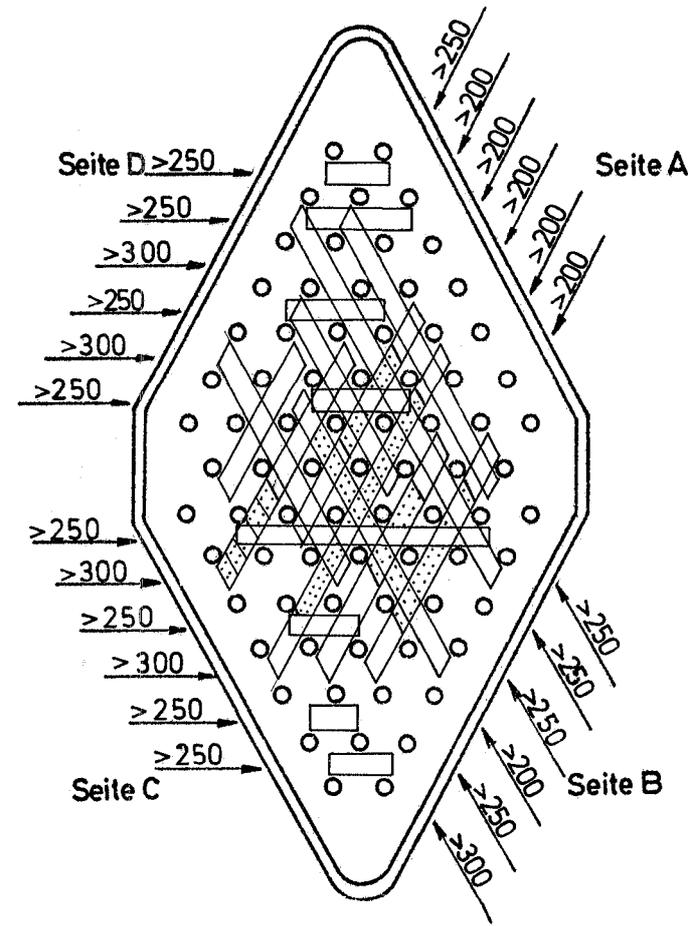
10.7 Einzelstabextraktion und Reinigung

Mit Hilfe einer Zugvorrichtung wurden die Einzelstäbe in horizontaler Lage aus dem oberen Ende des Bündels herausgezogen, wobei die jeweils notwendige Zugkraft gemessen wurde. Schneckenförmig wurden zunächst die oberste Stabschicht der Seite D, darauffolgend die Seiten C, B, A und dann die neu exponierten zweiten Stabschichten von D, C, B und A usw. abgeräumt. Hierbei ergaben sich keine Schwierigkeiten. Die gemessenen Zugkräfte blieben in den erwarteten Grenzen mit 7 kg als mittleren und 22 kg als maximalen Wert. Gewöhnlich ließen sich die Stäbe sehr leicht herausziehen. Die angegebenen Zugkräfte waren in der Regel nur bei Beginn des Zuges notwendig. Eine Erhöhung der Zugkräfte an der eingedrückten Seite B war nicht zu bemerken.

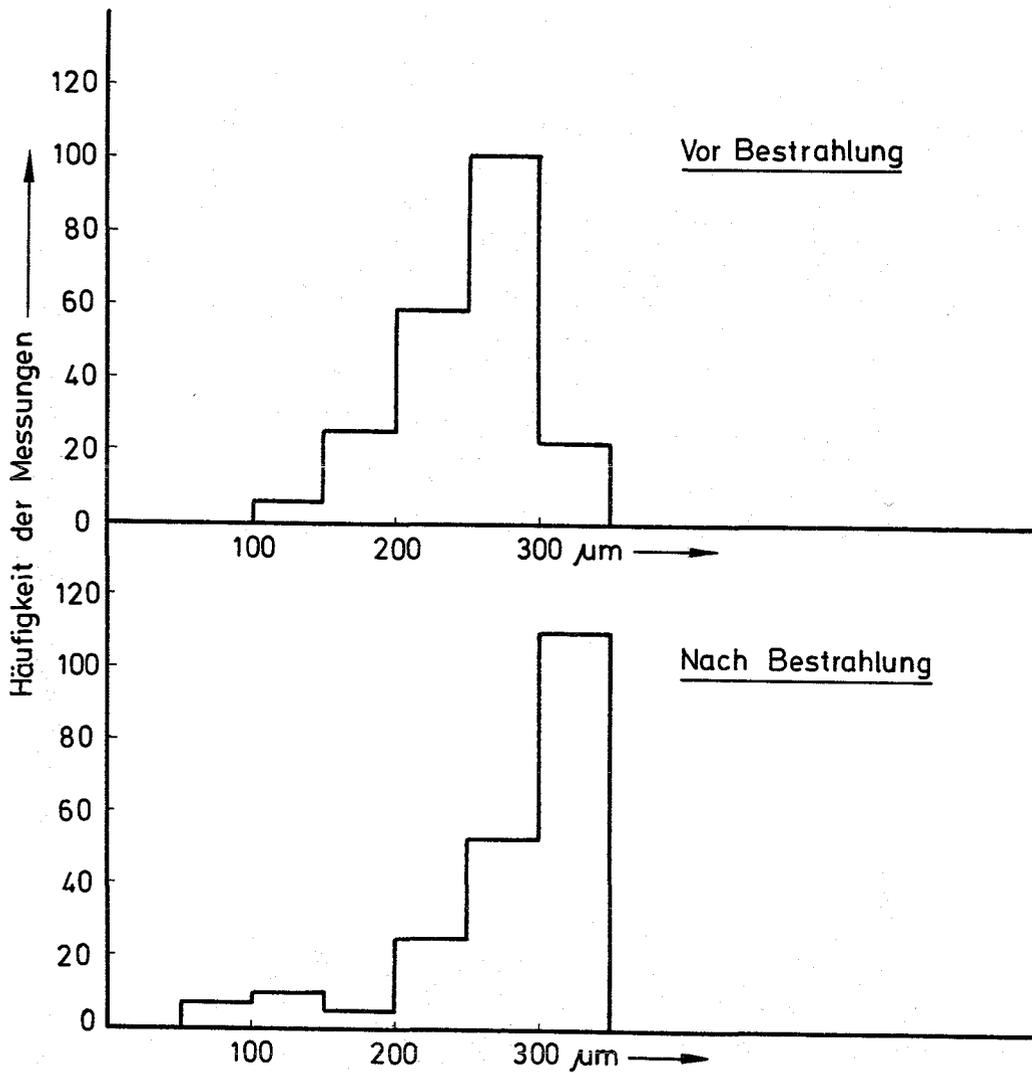
Vorvermessung



Nachvermessung



Position : Mitte zwischen Abstandhalter 6 und 7



DFR - 350

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Bündel-Spalte vor und nach
der Bestrahlung

Abb. 41

Um die Orientierung der Einzelstäbe festzulegen, wurde vor der Extraktion an der oberen Endkappe jedes Stabes eine schwarze Farbmarkierung angebracht, die in Richtung auf die Seite D zeigte. Eine derartige Markierung ist notwendig, um die Stabdurchbiegung der Orientierung zuzuordnen und eventuelle Wechselwirkungen zwischen mehreren Stäben zu erkennen.

Nach der Extraktion wurden die Stäbe mit einem feuchten Schwamm abgewischt und in verschlossenen Aluminiumrohren aufbewahrt.

10.8 Untersuchung der Abstandshalter

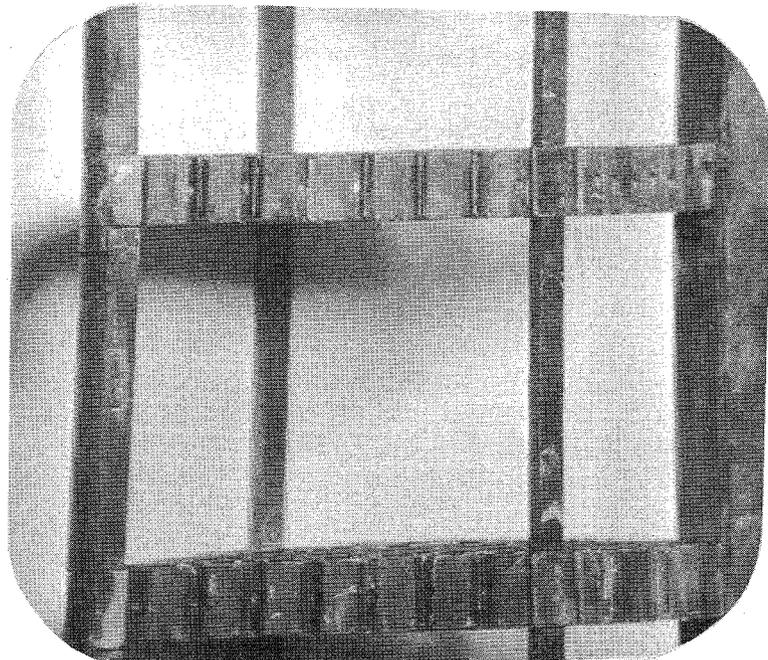
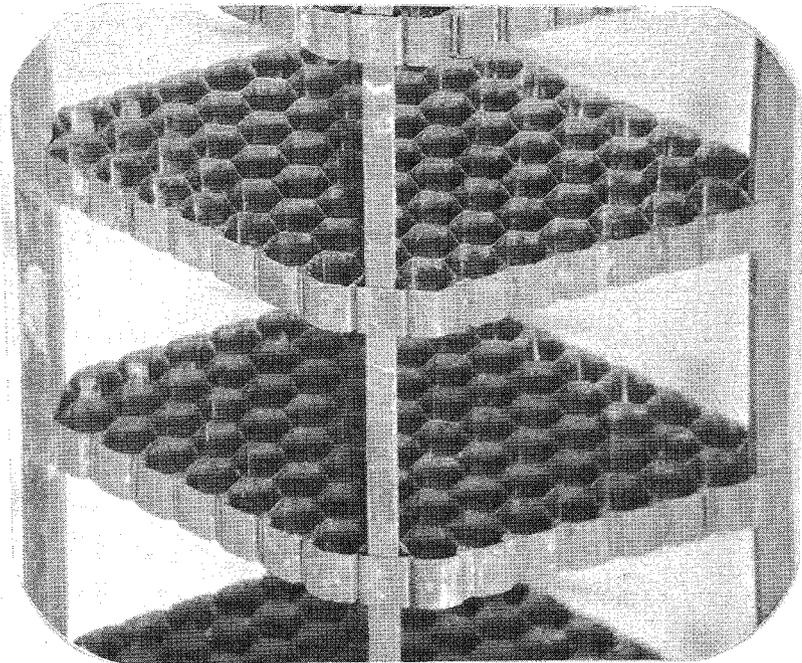
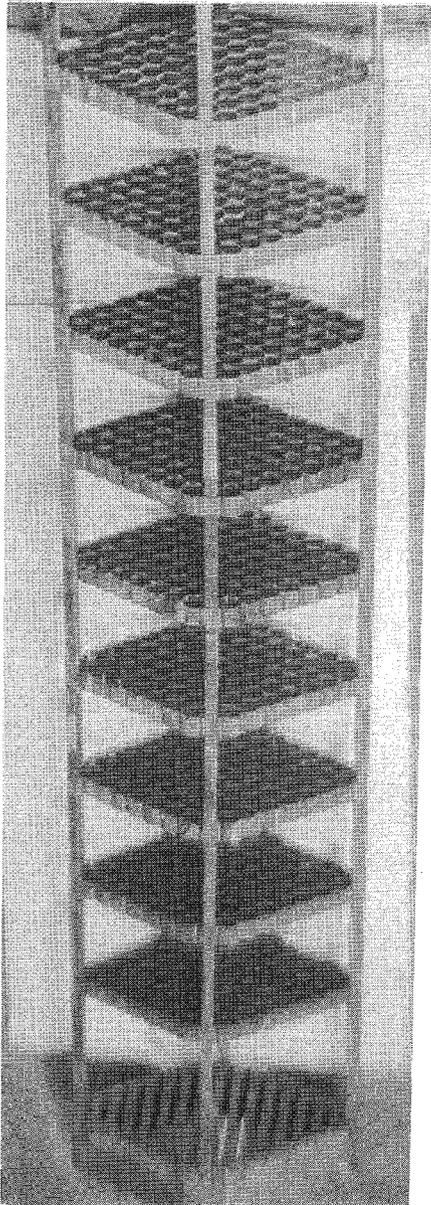
Nach der Extraktion der Stäbe wurde der leere Abstandshalter-Käfig visuell untersucht. Alle neun Abstandshalter sowie das Seitengestänge zeigten sich als regelmäßig und unverbogen. Es gab keinen Hinweis und eine Schädigung irgendwelcher Art. In Abb. 42 sind der gesamte Abstandshalterkäfig sowie die zwei Abstandshalter aus dem Bereich maximaler Leistung wiedergegeben.

11. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der GFK-Stäbe

Die 77 Stabpositionen des Bündels waren - wie bereits erläutert - von den drei Benutzern CEA, Belgonucleaire und GFK belegt. Es soll hier nur über die 23 GFK-Stäbe berichtet werden, deren Fertigung in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben wurde. Die im DFR eingesetzten Stäbe tragen nach Tabelle VII die Bezeichnung:

G 2, G 4, G 6, G 7, G 8, G 9, G 12, G 14, G 16, G 17, G 19, G 21, G 24,
G 36, G 39, G 40, G 41, G 43, G 49, G 50, G 56, G 57, G 61

Sie bilden hinsichtlich des Hüllmaterials zwei Gruppen. Aus dem rostfreien Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4988 wurden die Stäbe G 2 bis G 24, aus dem mit der Werkstoffnummer 1.4961 die Stäbe G 36 bis G 61 gefertigt.



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Abstandshalter nach der
Extraktion der Brennstäbe

Abb. 42

11.1 Visuelle Beobachtung

Die Oberflächen der Stäbe wurden mit einem feuchten Schwamm abgewischt und anschließend unter einem Periskop visuell untersucht. Typisch war für die Stäbe folgendes Aussehen:

1. Die Oberfläche war frei von Rissen und sonstigen Defekten.
2. Das obere (kalte) Stabende war bis herunter zur Brennstoffzone metallisch glänzend.
3. Nach unten hin wurden die Stäbe zunehmend dunkler.
4. Das untere Stabende war meist schwärzlich und matt.

In Abb. 43 sind Enden und Mittelbereiche von zwei typischen Brennstäben dargestellt. Das Stabaussehen entspricht dem für eine Edelhüllmaterial erwarteten.

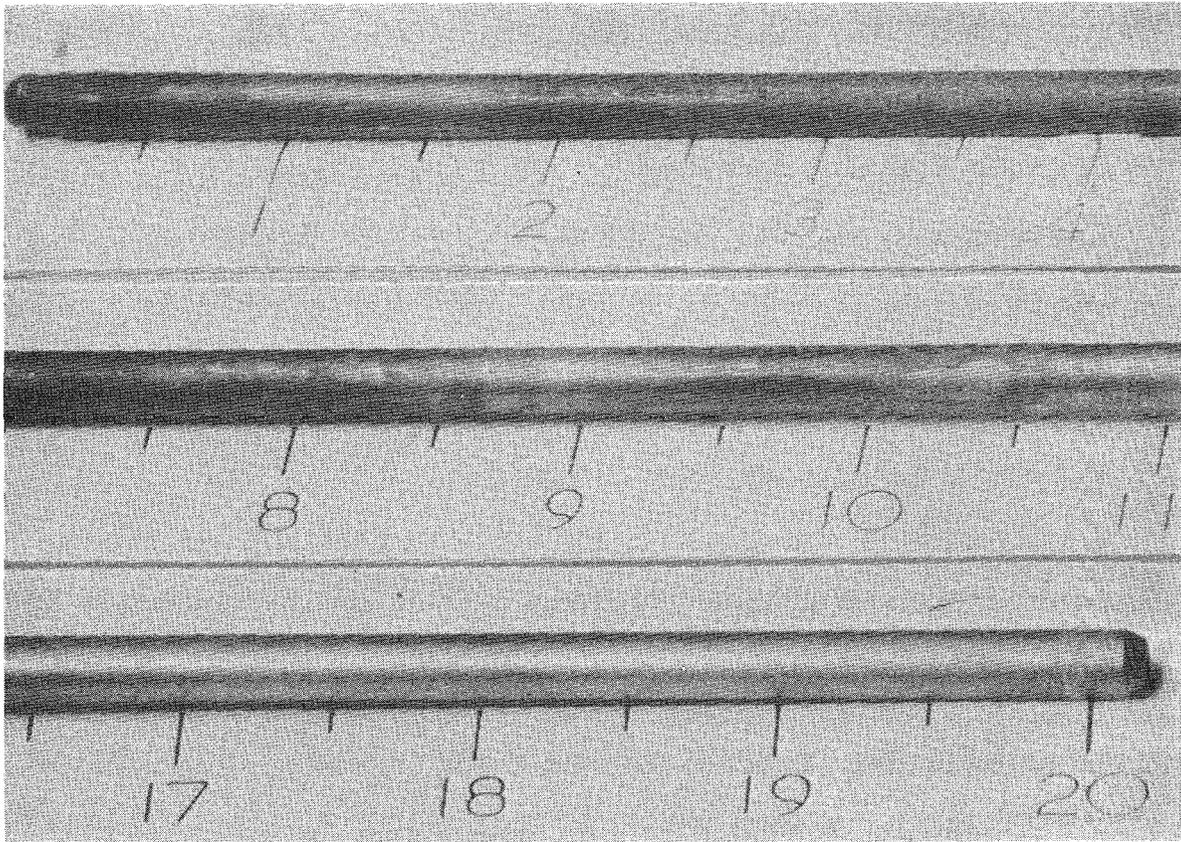
Abweichend vom üblichen Aussehen war an einigen Stäben das untere Ende wieder hell und zwar mit einem scharfen Übergang, etwa 4 cm oberhalb des Endstopfens (Abb. 44). Eine Erklärung aus der Stabposition innerhalb des Bündels oder aus dem Hüllmaterial wurde dafür nicht gefunden. Weiter war eine Reihe von Stäben ungefähr in Stabmitte mit zahlreichen runden Flecken übersät, die wie eingetrocknete Wassertröpfchen aussahen (Abb. 45). Da die Flecken jedoch nicht durch Abwischen mit einem feuchten Tuch entfernt werden konnten, wurde angenommen, daß es sich hier um Korrosionsspuren handelt, die durch NaK-Tröpfchen vermutlich bei der Dampfreinigung entstanden sind. Eine besondere Bedeutung wurde den Flecken nicht beigemessen.

11.2 Röntgendurchleuchtung

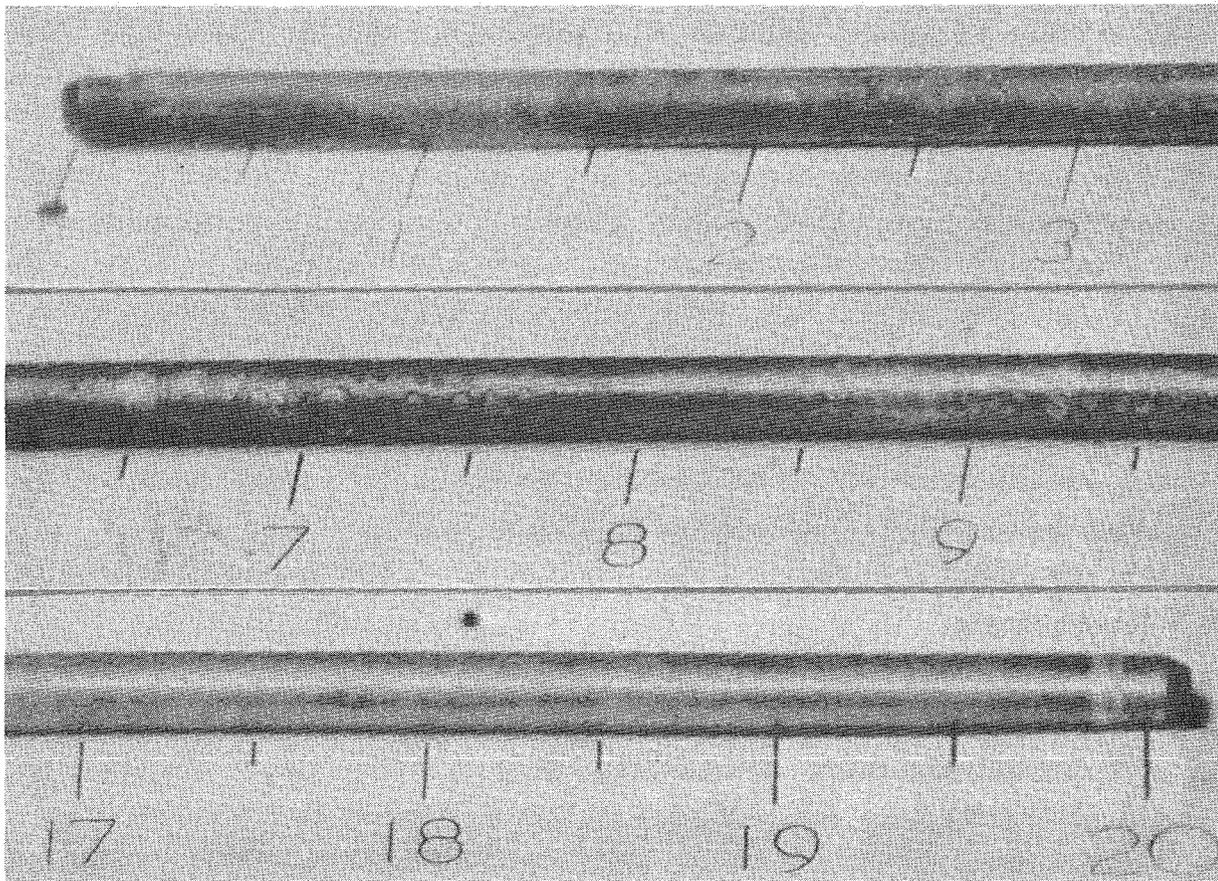
Jeder Stab wurde über seine ganze Länge mit einer Röntgenanlage dreimal auf verschiedene Weise durchleuchtet, wobei die Durchleuchtungen jeweils einen unterschiedlichen Untersuchungszweck hatten.

11.2.1 Durchbiegung

Zur Bestimmung der Durchbiegung wurden die Einzelstäbe zusammen mit einer Kalibrierstange auf einem ebenen Tisch mit geringer Belichtungszeit von oben her durchleuchtet. Hinsichtlich ihrer Krümmung nahmen die Stäbe dabei die natürliche Lage ein, d.h. die maximale Krümmung lag senkrecht zur Durchleuchtungsrichtung. Um die Krümmung der Stäbe im Bündel zuordnen zu können, wurde die Stabmarkierung (siehe 10.7) auf den Röntgen-



G4



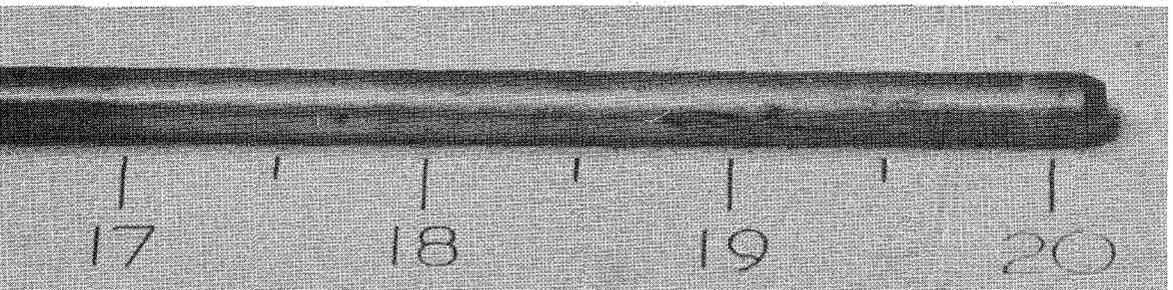
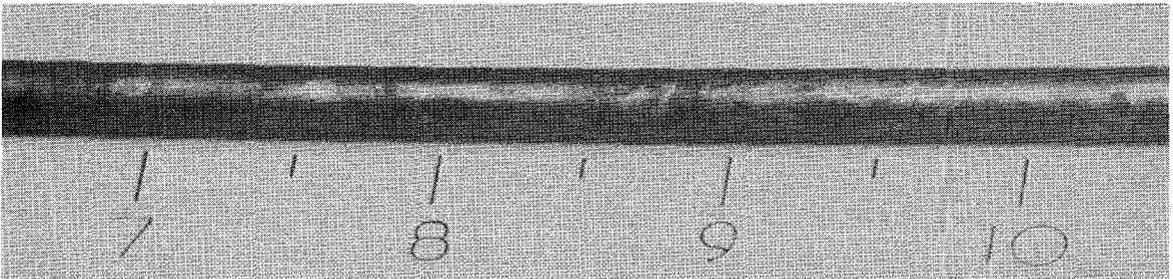
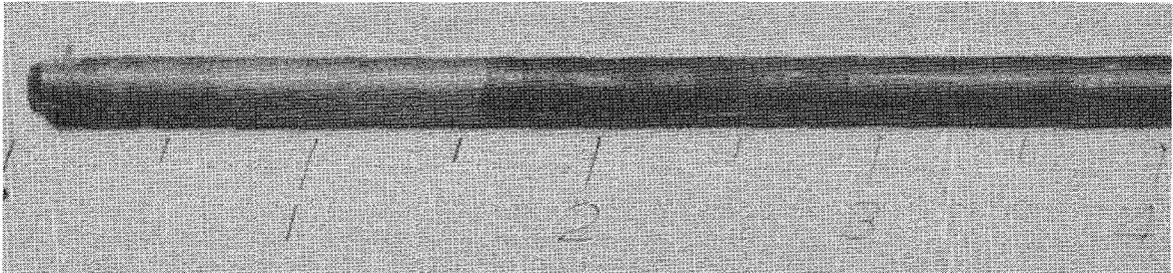
G17

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Typisches Aussehen der
DFR - 350 - Brennstäbe

Abb.43

unteres Stabende

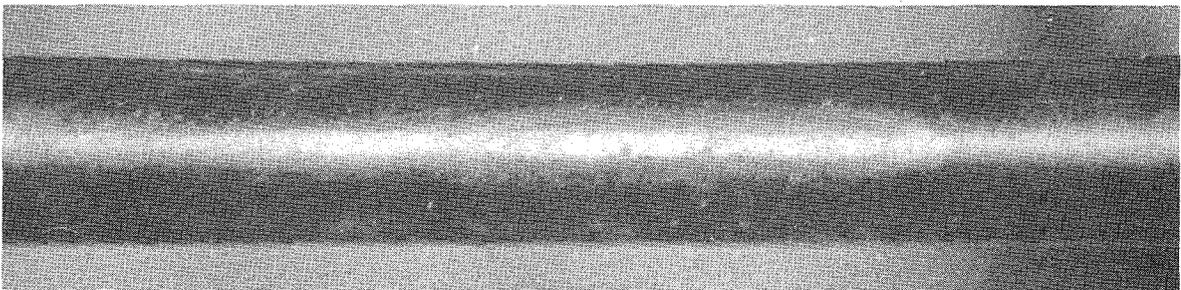
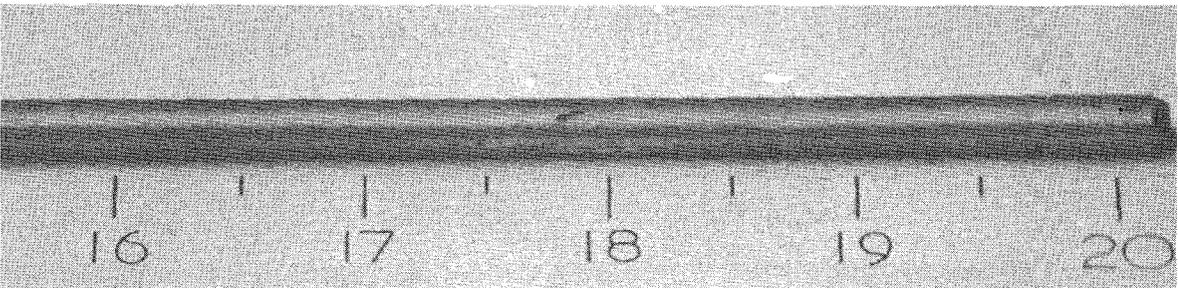
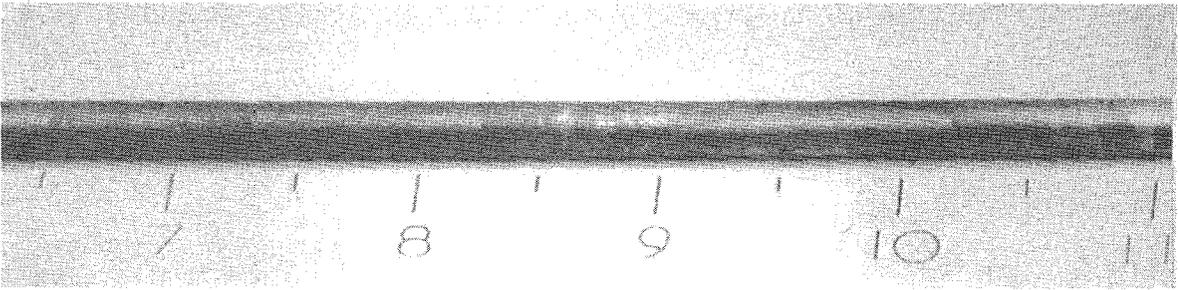
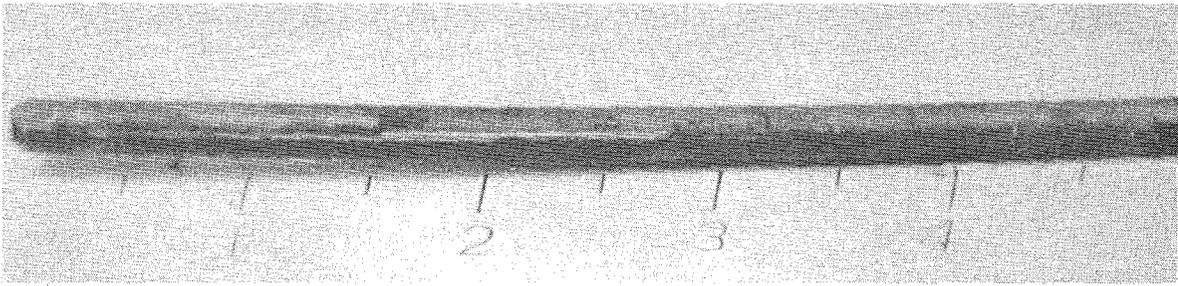


G 9

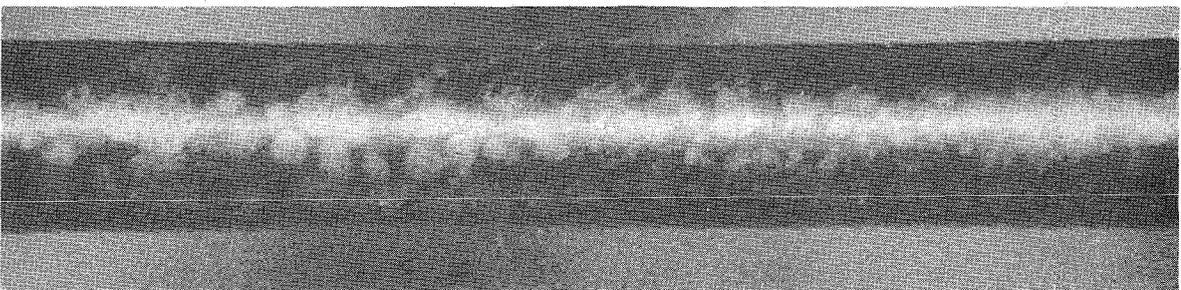
GfK Karlsruhe
IMF/LB

Blankes unteres Stabende
an einem DFR-350-Brennstab

Abb. 44



G 14



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Tropfen-Flecken an einem
DFR -350 - Brennstab

Abb. 45

bildern vermerkt. Die Durchbiegung wurde als maximale Auslenkung von einem an den geraden Teil des Stabes gelegtem Lineal gemessen. Tab. XXVIII gibt die an den Röntgenfilmen bestimmten Werte für die Auslenkung sowie ihre Orientierung im Stabbündel wieder. Alle Stäbe mit Auslenkungen > 3 mm standen in der äußersten Zone des Bündels, dem Mantelrohr benachbart. Ihre Durchbiegung nach innen wurde schon in den Durchleuchtungen des nicht demontierten Bündels beobachtet und auf eine ungleichmäßige Kühlung durch das NaK zurückgeführt. Die Auslenkungsrichtung, nämlich nach innen, wurde in den Einzelstabdurchleuchtungen bestätigt. Hingegen wurde bei keinem der Innenstäbe eine stärkere Auslenkung gefunden und auch keine Vorzugsrichtung festgestellt. Aus der Durchbiegung der Stäbe ergaben sich keine Hinweise auf verborgene Stabdefekte. Jedoch wurden bei der Auswahl für eine Weiterbestrahlung die Stäbe mit kleiner Auslenkung bevorzugt, da sie beim Einbau in die Bestrahlungseinrichtungen weniger Schwierigkeiten bereiten.

11.2.2 Durchleuchtung der Stabkomponenten

Zur Beurteilung des Stabaufbaus außerhalb von Brenn- und Brutstoffsäule wurden die Stäbe mit geringer Belichtungszeit geröntgt, wobei insbesondere das obere Stabende mit dem Spaltgasraum kontrastreich dargestellt wurde. Abb. 46 zeigt das typische Aussehen dieser Zone. Die Stahlfedern zum Andrücken der Mittelstopfen sind offenbar noch gespannt; Spalte zwischen Feder und Stopfen, die auf eine Verkürzung der Feder hinweisen würden, sind nicht zu sehen.

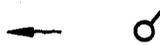
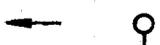
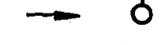
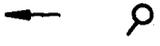
Die in den Mittelstopfen ursprünglich eingesteckten Radon-Monitore haben sich gelockert und sind bei vielen Stäben herausgefallen und freibeweglich im Spaltgasraum. Dies ist jedoch erst nach der Bestrahlung geschehen.

An den Endstopfen sowie an der Hülle entlang der Brenn- und Brutstoffsäule sind keine Veränderungen zu beobachten.

11.2.3 Durchleuchtung der Brennstoff- und Brutstoffzone

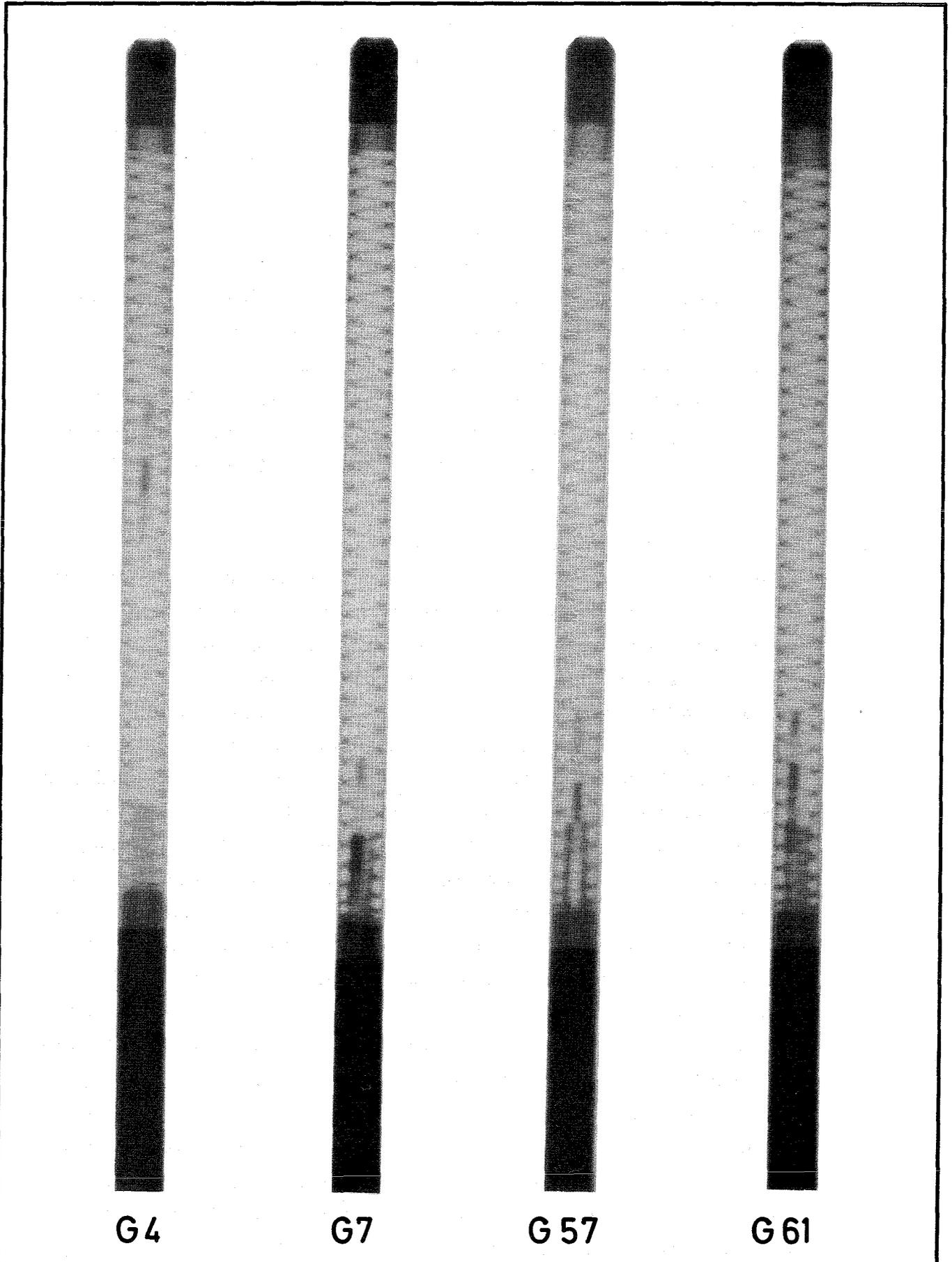
Die Brennstoff- und Brutstoffsäule kann selbst bei langer Belichtungszeit mit der verwendeten Röntgenanlage nur unvollkommen durchleuchtet werden. Eine Beurteilung des Zentralkanal-Verlaufes entfällt damit weitgehend, jedoch lassen sich Spalte, Querrisse sowie Hohlräume am Säulenrand gut erkennen.

Tabelle XXVIII Durchbiegung der Stäbe

Stab-Nr.	Position	Max. Auslenkung (mm)	Richtung der Auslenkung
G 2	außen	9	
G 4	"	4	
G 7	"	1,5	
G 14	"	8	
G 17	"	-	
G 36	"	7	
G 39	"	4	
G 41	"	5	
G 56	"	4	
G 6	innen	3	
G 8	"	0,3	
G 9	"	1,5	
G 12	"	0,5	
G 16	"	-	
G 19	"	0,5	
G 21	"	1	
G 24	"	1,5	
G 40	"	0,5	
G 43	"	1,5	
G 49	"	0,5	
G 50	"	-	
G 57	"	1	
G 61	"	1	

 Stabmarkierung zur Bündelseite D hin

 Richtung der Auslenkung



GfK Karlsruhe
IMF/LB

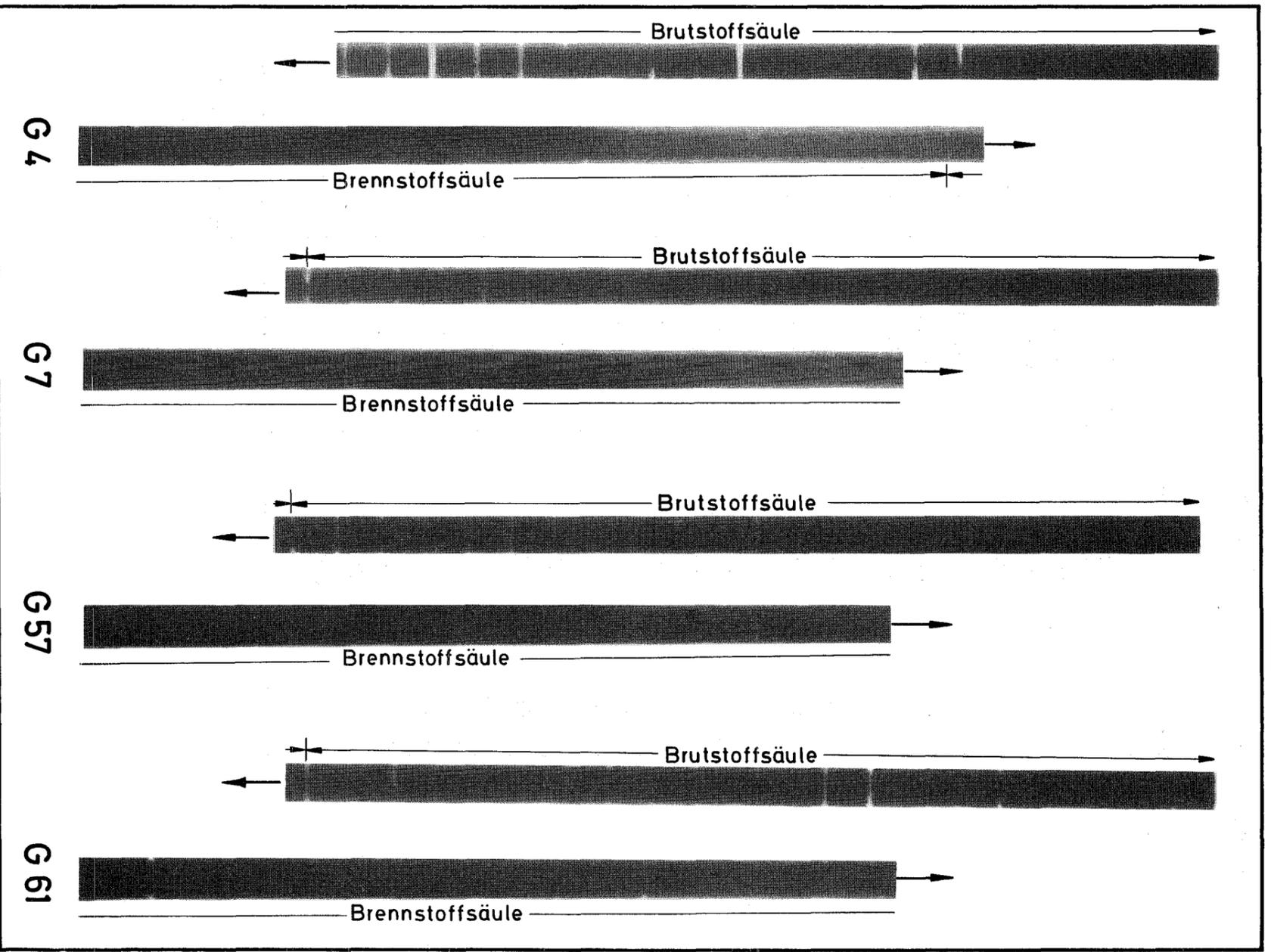
Röntgendurchleuchtung
der oberen Stabenden

Abb. 46

Bei der Beurteilung der Röntgenfotos zeigten die Stäbe ein einheitliches Bild. Im Bereich des Brutstoffes waren die Tabletten zum Teil auseinandergedrückt, so daß Querspalte von mehreren 100 μ Weite sichtbar wurden (Abb. 47). Dies läßt auf ein Nachlassen der Feder-
spannkraft sowie auf eine Beweglichkeit der Brutstoff-Tabletten schließen. Die Brennstoffsäule war zur Brutstoffsäule hin in der Mitte der Berühungsfläche aufgewölbt und bildete einen ringförmigen Hohlraum an der Übergangsstelle. Innerhalb der Brennstoffsäule war die ursprüngliche Tablettenstruktur nur im Bereich geringer Stableistung erkennbar. Feine Querspalte zeigten sich zwischen den Tabletten. Größere Risse quer durch die Tabletten waren nur vereinzelt zu finden und zwar hauptsächlich in der obersten Brennstofftablette. Der Zentralkanal konnte nur andeutungsweise wahrgenommen werden. Er zeigte keine Unregelmäßigkeiten in Verlauf und Größe.

11.2.4 Bestimmung der Brennstoffsäulenlänge

Anhand der Röntgenbilder vor und nach der Bestrahlung wurde die Veränderung der Brennstoffsäulenlänge ermittelt. In den zu vergleichenden Bildern sind die Stäbe mit verschiedenen Vergrößerungsmaßstäben dargestellt, so daß die im Bild gemessenen Längen auf ein internes Kalibriermaß bezogen werden mußten. Bei den Durchleuchtungen vor der Bestrahlung ist jeweils die gesamte Stablänge auf einem Röntgen-Negativ abgebildet. Deshalb konnte die Stablänge, die für jeden Stab genau bekannt war, als internes Kalibriermaß dienen. Die Stäbe sind beinahe im Maßstab 1:1 dargestellt. Damit war nur eine geringfügige Korrektur der Meßwerte notwendig. Bei den Durchleuchtungen nach der Bestrahlung wurde jeder Stab auf vier Negativen abgebildet. Um einen eindeutigen Anschluß der Bilder zu ermöglichen, wurde eine Kalibrierstange mit durchleuchtet, auf der die im Abstand von zwei Inch (50,8 mm) Markierungen angebracht waren. Die Vermessungswerte wurden jeweils auf diese Markierungen bezogen. Dabei zeigte sich, daß durch die Aufnahmetechnik Ungenauigkeiten in die Meßwerte hineingetragen wurden, je nachdem in der Bildmitte oder am Bildrand vermessen wurde. Die Abweichungen betragen bis zu 2 mm, was bei dem Vergrößerungsmaßstab von 1:1,65 in die endgültigen Meßwerte eine Ungenauigkeit von etwa einem Millimeter hineinbrachte. Eine weitere Schwierigkeit ergab sich daraus, daß die Enden der Brennstoffsäule nicht eindeutig



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Röntgendurchleuchtung
der oberen Stabenden

Abb. 47

Tabelle XXIX Länge der Brennstoffsäule

Stab-Nr.	L ä n g e		Differenz
	vor Bestrahlung	nach Bestrahlung	
G 2	295,0	295,5	+ 0,5
G 4	294,0	295,0	+ 1,0
G 6	295,5	295,5	-
G 7	294,5	292,0	- 2,5
G 8	295,0	295,0	-
G 9	293,5	294,0	+ 0,5
G 12	292,5	292,0	- 0,5
G 14	292,5	292,5	-
G 16	295,0	297,0	+ 2,0
G 17	294,0	295,0	+ 1,0
G 19	294,5	295,5	+ 1,0
G 21	294,0	295,0	+ 1,0
G 24	292,0	290,5	- 1,5
G 36	294,5	295,0	+ 0,5
G 39	293,0	295,5	+ 2,5
G 40	295,0	294,0	- 1,0
G 41	293,0	293,5	+ 0,5
G 43	293,0	292,5	- 0,5
G 49	292,5	296,0	+ 3,5
G 50	291,5	292,5	+ 1,0
G 56	292,0	293,5	+ 1,5
G 57	293,0	294,0	+ 1,0
G 61	293,0	293,5	+ 0,5

$\Delta \ell = + 0,52 \text{ mm}$

bestimmt werden konnten. Am unteren Säulenende wurde das Problem dadurch umgangen, daß die nur 5 mm lange Isoliertablette in die Messung einbezogen wurde. Für das obere Ende, das gewöhnlich nicht plan, sondern gegen die erste Brutstofftablette aufgewölbt ist, wurde die Mitte des sich aus der Aufwölbung ergebenden Ringspaltes als Säulenende angenommen. In Tabelle XXIX sind die korrigierten Meßwerte für Vor- und Nachvermessung wiedergegeben. Die geringen Differenzen liegen nahe der geschätzten Meßgenauigkeit von einem Millimeter. In der Tendenz läßt sich allerdings deutlich eine Verlängerung der Brennstoffsäule erkennen, die im Mittel jedoch nur 0,52 mm, das sind 0,2 %, der Länge beträgt.

11.3 Äußere Vermessung und Stabgewicht

11.3.1 Durchmesser

Der Außendurchmesser wurde über die Stablänge in Abständen von etwa 25 mm an insgesamt 17 Punkten pro Stab bestimmt. Hierbei wurden die Maximal- und Minimal-Werte mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ gemessen. In den 23 Diagrammen in Anhang 5 sind für jeden einzelnen bestrahlten Stab G 2, G 4 ... G 61 die maximalen, minimalen und mittleren Durchmesser für jeden Meßpunkt zusammen mit den Mittelwerten der Vorvermessung aufgetragen. In Tabelle XXX sind die Maximalwerte der Durchmesservergrößerung zum Vergleich zusammengestellt. Bei einer Durchmesserumvergrößerung zeigt sich deutlich, daß die beiden verwendeten Hüllmaterialien unterschiedliche Durchmesseränderungen hinsichtlich Größe und Form aufweisen. Für das Hüllmaterial Nr. 1.4988 gilt folgendes allgemeine Bild: Im Bereich des Spaltgasraumes und der Brutstoffzone bis herunter zu den obersten 4 cm der Brennstoffsäule ist der Stabdurchmesser gegenüber der Vorvermessung fast unverändert. Innerhalb der Brennstoffsäule vergrößert sich der Durchmesser bis zu einem flachen Maximum, das deutlich unterhalb der Zone maximaler Stableistung liegt und fällt nach unten zu wieder ab. Die den Maxima entsprechenden maximalen mittleren Hüllrohrtemperaturen liegen bei etwa 480°C . Am unteren Stabende ist bei etwa der Hälfte der Stäbe wieder ein leichtes Ansteigen des Stabdurchmessers zu bemerken. Für die Gruppe der 13 Stäbe ist als Mittelwert für die maximale Durchmesservergrößerung $\Delta d_{\text{mittel}} = 0,49 \%$ bestimmt worden. Eine Unterscheidung zwischen Innen- und Außenstäben im Bündel ist auf Grund der Durchmesser nicht zu machen.

Tabelle XXX

Maximalwerte der Durchmesservergrößerung bei den bestrahlten Stäben

Hüll- werkstoff Nr.	Brennstab	Maximale Durchmesservergrößerung	
		Einzelwerte Δd (%)	Mittelwert Δd (%)
1.4988	G 2	0,25	0,49
	G 4	0,52	
	G 6	0,57	
	G 7	0,53	
	G 8	0,55	
	G 9	0,43	
	G 12	0,45	
	G 14	0,50	
	G 16	0,52	
	G 17	0,52	
	G 19	0,58	
	G 21	0,52	
G 24	0,52		
1.4961	G 36	1,02	1,06
	G 39	1,19	
	G 40	1,19	
	G 41	1,09	
	G 43	0,92	
	G 49	1,30	
	G 50	1,14	
	G 56	0,80	
	G 57	0,82	
	G 61	1,09	

Beim Hüllmaterial 1.4961 sind als wesentlicher Unterschied die deutlich höheren Werte für die maximalen Durchmesserergrößerungen zu nennen. Für die Gruppe von 10 Stäben lag $\Delta d_{\text{mittel}} = 1,06\%$ mehr als doppelt so hoch wie beim Material 1.4988. Entsprechend den hohen Durchmesserergrößerungen war auch der Verlauf entlang der Stablänge steiler. Eine Verschiebung des Maximums auf der Stabachse konnte gegenüber dem Material 1.4988 nicht wahrgenommen werden, zumal die Kurvenmaxima über den Bereich von mehr als 10 cm verteilt waren. Diese Neigung, am unteren Stabende nochmals eine leichte Durchmesserergrößerung zu zeigen, war beim Material 1.4961 weniger ausgeprägt.

11.3.2 Länge

Die Länge wurde an den nicht eingespannten Stäben zwischen zwei parallelen Meßbacken bestimmt. Hierbei wird die unterschiedliche Durchbiegung der einzelnen Stäbe nicht berücksichtigt. Insofern können die Längenmessungen nicht die Genauigkeit der Durchmesserwerte beanspruchen. Eine Korrektur der Messungen in Bezug auf die erhöhte Stabtemperatur durch Spaltproduktaufheizung brauchte nicht vorgenommen werden. Thermoelementmessungen an der Staboberfläche hatten eine Hüllrohrtemperatur von 37°C angezeigt gegenüber 25°C Zellen-Raumtemperatur. Die sich daraus ergebende Korrektur läge bei nur etwa $5\ \mu\text{m}$. In Tabelle XXXI sind die Längenänderungen für die 23 Stäbe wiedergegeben. In Übereinstimmung mit den Durchmesserwerten zeigen die Stäbe mit Material-Nr. 1.4988 geringere Verlängerungen von $0,12\ \%$ entsprechend $\Delta l = + 0,588\ \text{mm}$, die Stäbe mit Material-Nr. 1.4961 dagegen $0,18\ \%$ entsprechend einem Δl von $+ 0,912\ \text{mm}$.

11.3.3 Gewicht

Die Bestimmung des Stabgewichtes nimmt in der Nachuntersuchung die Rolle eines Lecktests ein. Wie langjährige Erfahrungen in Dounreay gezeigt haben, ändert sich das Gewicht eines Stabes bei einem Schaden merklich und zwar entweder positiv durch eingedrungenes Kühlmittel oder negativ durch entwichenes Spaltgas. Als Grenze für einen Stabdefekt wird eine Änderung von 50 mg angesehen. In Tabelle XXXII sind die Stabgewichte vor und nach der Bestrahlung sowie die Gewichtsänderungen wiedergegeben. Der Grenzwert von 50 mg wird in keinem

Tabelle XXXI Länge der Brennstäbe

Stab-Nr.	L ä n g e		Differenz (mm)	
	vor Bestrahlung (mm)	nach Bestrahlung (mm)		
G 2	508,965	509,372	+ 0,407	1.4988:Δ ℓ + 0,588 mm = 0,12 %
G 4	508,838	509,473	+ 0,635	
G 6	508,737	509,397	+ 0,660	
G 7	508,762	509,448	+ 0,686	
G 8	509,041	509,575	+ 0,530	
G 9	508,813	509,372	+ 0,559	
G 12	508,914	509,778	+ 0,864	
G 14	508,914	509,397	+ 0,483	
G 16	508,762	509,372	+ 0,610	
G 17	508,914	509,397	+ 0,483	
G 19	508,787	509,372	+ 0,585	
G 21	508,889	509,473	+ 0,584	
G 24	508,940	509,499	+ 0,559	
G 36	508,635	509,803	+ 1,168	
G 39	508,889	510,007	+ 1,118	
G 40	508,864	509,854	+ 0,990	
G 41	508,787	509,600	+ 0,813	
G 43	508,890	509,651	+ 0,761	
G 49	508,914	510,007	+ 1,093	
G 50	508,965	509,829	+ 0,864	
G 56	509,016	509,727	+ 0,711	
G 57	509,041	509,803	+ 0,762	
G 61	508,940	509,778	+ 0,838	

Tabelle XXXII Gewicht der Brennstäbe

Stab-Nr.	Gewicht		Differenz (mg)
	vor Bestrahlung (g)	nach Bestrahlung (g)	
G 2	110,42	110,42	-
G 4	110,60	110,59	- 10
G 6	109,47	109,43	- 40
G 7	110,92	110,92	-
G 8	110,57	110,53	- 40
G 9	110,99	110,97	- 20
G 12	109,86	109,83	- 30
G 14	111,51	111,50	- 10
G 16	111,63	111,58	- 50
G 17	110,51	110,50	- 10
G 19	110,98	110,96	- 20
G 21	110,61	110,57	- 40
G 24	109,50	109,48	- 20
G 36	108,85	108,84	- 10
G 39	109,53	109,52	- 10
G 40	109,15	109,12	- 30
G 41	108,62	108,63	+ 10
G 43	108,27	108,25	- 20
G 49	111,04	111,02	- 20
G 50	107,95	107,91	- 40
G 56	110,00	109,98	- 20
G 57	108,67	108,67	-
G 61	109,64	109,64	-

Fall überschritten. Wegen der Ungenauigkeit der Wägung (± 20 mg) kommt den Gewichts-differenzen, die hier meist einen Gewichtsverlust ausweisen, keine weitere Bedeutung zu. Insbesondere darf aus den Werten nicht auf einen Materialabtrag durch Außenkorrosion geschlossen werden.

11.4 Gamma-Profile

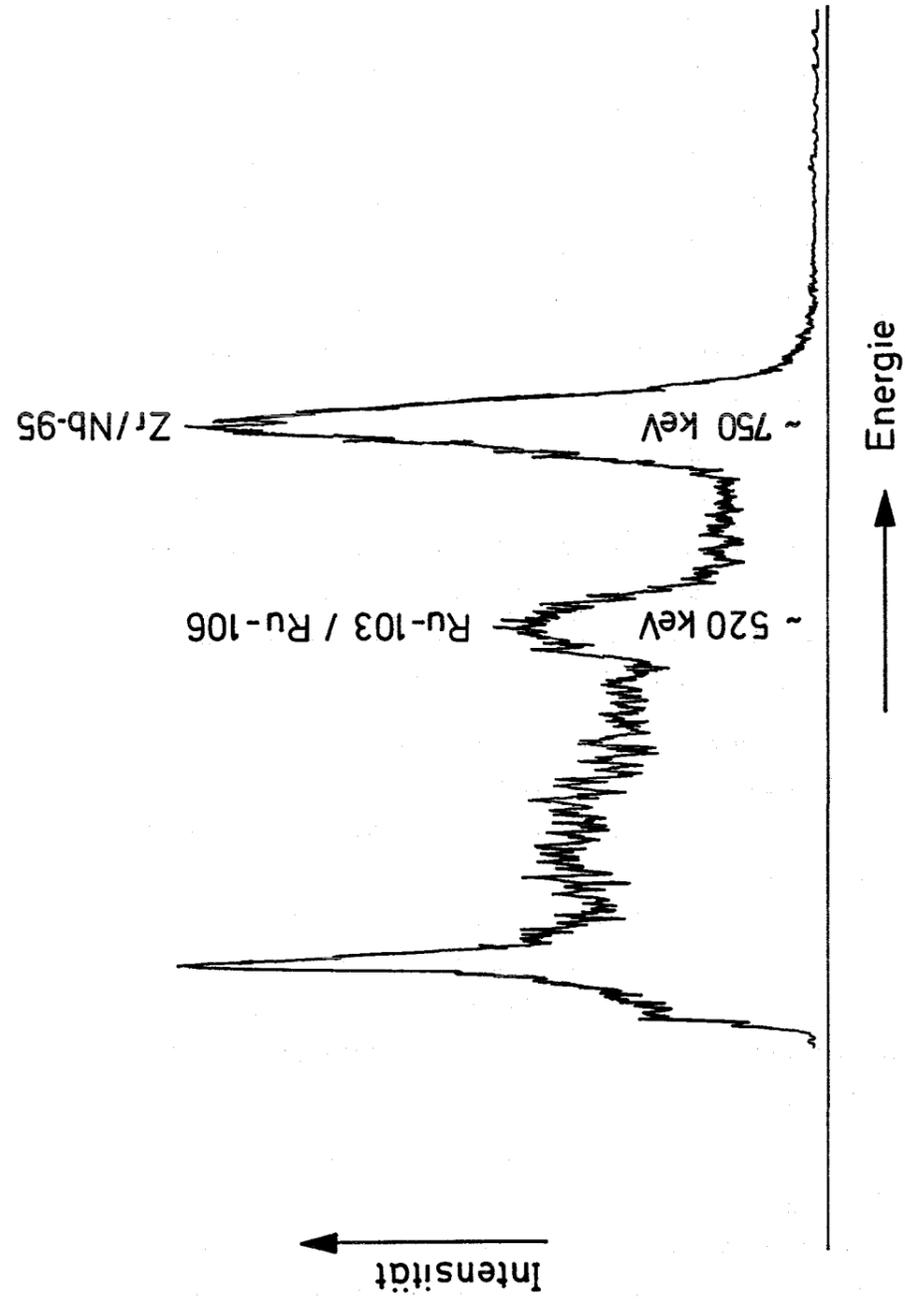
Die Stäbe wurden in der folgenden Art γ -spektrometrisch analysiert: Mit einem NaI-Detektor und Einkanal-Impulsanalysator wurde zu Beginn der Untersuchung etwa in Stabmitte ein γ -Spektrum aufgenommen. Abb. 48 zeigt ein typisches Spektrum dieser Art. Im Energiegebiet oberhalb von 300 keV sind nur zwei Spitzen vertreten, von denen die eine dem Ru-103/Ru-106, die andere dem Zr/Nb-95 zuzuordnen ist. Aufgrund der geringen Auflösung des Detektors waren in den Spektren Einzelnuclide wie z.B. Ru-103 oder Zr-95 nicht analysierbar. Da ferner durch die lange Abklingzeit - ca. 200 Tage seit Bestrahlungsende - kurzlebige Nuclide wie J-131 oder Ba/La-140 unterhalb der Meßbarkeitsgrenze lagen, fiel die γ -spektrometrische Analyse verhältnismäßig grob aus.

Im Anschluß an die Aufnahme des γ -Spektrums wurden von den Stäben jeweils bis zu drei verschiedene Aktivitätsprofile entlang ihrer Längsachse aufgenommen und zwar:

- (1) Ein integrales Profil mit der unteren Energieschwelle von 400 keV,
- (2) ein Zr/Nb-95-Profil mit dem Energiebereich der im Spektrum erkennbaren entsprechenden γ -Spitze,
- (3) ein Ru-103/Ru-106-Profil ebenfalls mit dem entsprechenden Energiebereich aus dem γ -Spektrum.

Die Energie-Fenster für die Profile(2)und(3)wurden jeweils so gelegt, daß sie die gesamte γ -Spitze aus dem Spektrum einschlossen. Damit war gewährleistet, daß kleine Schwankungen bei der elektronischen Verstärkung der Impulse sich nicht auf die Gestalt des Profils auswirken konnten.

An sieben Stäben (G2, G7, G12, G14, G17, G19, G21) wurden zusätzlich mit Hilfe eines Halbleiterdetektors hochaufgelöste γ -Spektren an auffälligen Bereichen der Brennstoffsäule aufgenommen. Diese Messungen



GfK Karlsruhe
IMF/LB

DFR - 350 Stab G 21
γ - Spektrum in Stabmitte

Abb. 48

erbrachten jedoch keine wesentlich neuen Aussagen, so daß hier darauf verzichtet wird, die Ergebnisse gesondert darzustellen. Sie werden bei der Erläuterung der γ -Profile berücksichtigt.

Der typische Verlauf der integralen und Zr/Nb-95-Profile ist in den Abb. 49 und 50 wiedergegeben. Er entspricht im wesentlichen der Kurve, die den axialen Leistungsverlauf darstellt, allerdings ohne deren Genauigkeit wiederzugeben. So ist z.B. ein Maximum in den Profilen nur schwer lokalisierbar. Die Tatsache, daß beide Arten von Profilen ein sehr ähnliches Aussehen haben, ist dadurch begründet, daß, wie im γ -Spektrum der Abb. 48 erkennbar, das Zr/Nb-95 den größten Anteil der im Stab vorhandenen γ -Aktivität stellt.

Im Bereich der Brutstoffsäule ist der Aktivitätsverlauf gleichmäßig, nach oben zu abnehmend. Unmittelbar am Übergang zwischen Brenn- und Brutstoff beträgt das Aktivierungsverhältnis etwa 6:1.

Bei etwa der Hälfte aller Stäbe wurde außerhalb der Brennstoffsäule, zwischen dem unteren Endstopfen und der Isoliertablette, eine starke Aktivitätsansammlung beobachtet. In Abb. 51 ist dieser Effekt besonders deutlich zu sehen. Aus Untersuchungen, die nicht Inhalt dieses Berichtes sind, geht hervor, daß diese Aktivität sich aus Cs-137 zum Teil zusammen mit Cs-134 zusammensetzt.

Innerhalb der Brennstoffsäule wurden bei einer Reihe von Stäben Unregelmäßigkeiten festgestellt (Abb. 52, 53 und 54). Von den Spitzen wurden einige mit Hilfe von Halbleiter-Spektren analysiert. Hierbei zeigte sich, daß die Aktivitätserhöhungen durch die Nuklide Nb-95 oder Ru-106 hervorgerufen wurden, wobei die Form der Spitzen (schmal oder breit) nicht kennzeichnend für das verursachende Nuklid ist. Ein Grund für die Ansammlungen der beiden Nuklide konnte sowohl aus dem Bestrahlungsablauf als auch aus den Brennstab-Spezifikationen nicht ermittelt werden.

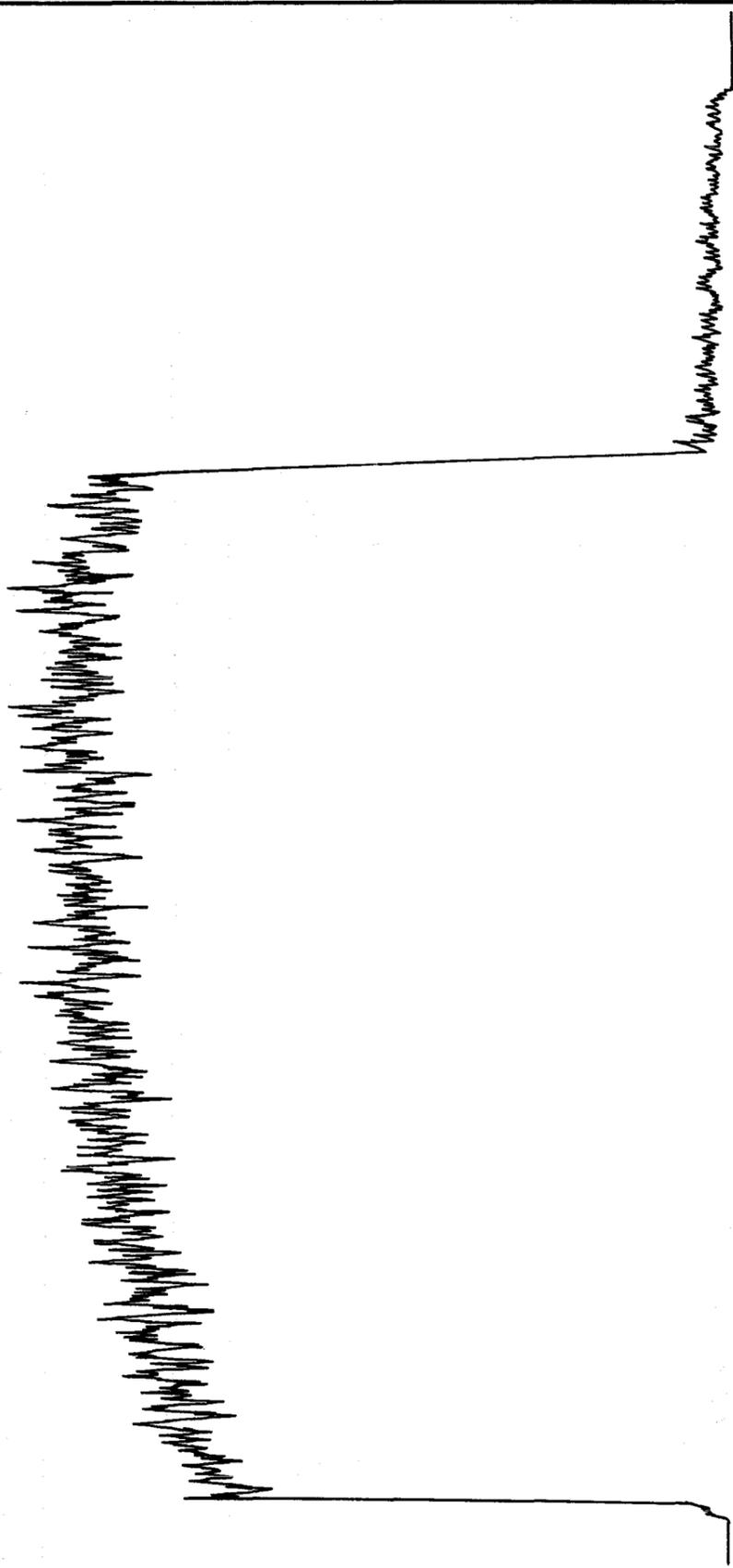
In Tabelle XXXIII ist eine Auswertung aller aufgenommenen γ -Profile wiedergegeben. Sie zeigt, daß mehr als 75 % der Brennstoffsäulenprofile ohne besondere Merkmale sind und somit als "normal" bezeichnet werden können. Ob die Unregelmäßigkeiten in den anderen Profilen als Hinweis auf bevorstehende Stabdefekte angesehen werden können soll erst eine zerstörende Stabuntersuchung klären. Zur Zeit wird diesen Abweichungen keine lebensdauerbegrenzende Bedeutung beigemessen.



GfK Karlsruhe
IMF/LB

DFR-350 Stab G 43
Integrales Profil $\gamma > 400 \text{ keV}$

Abb. 49



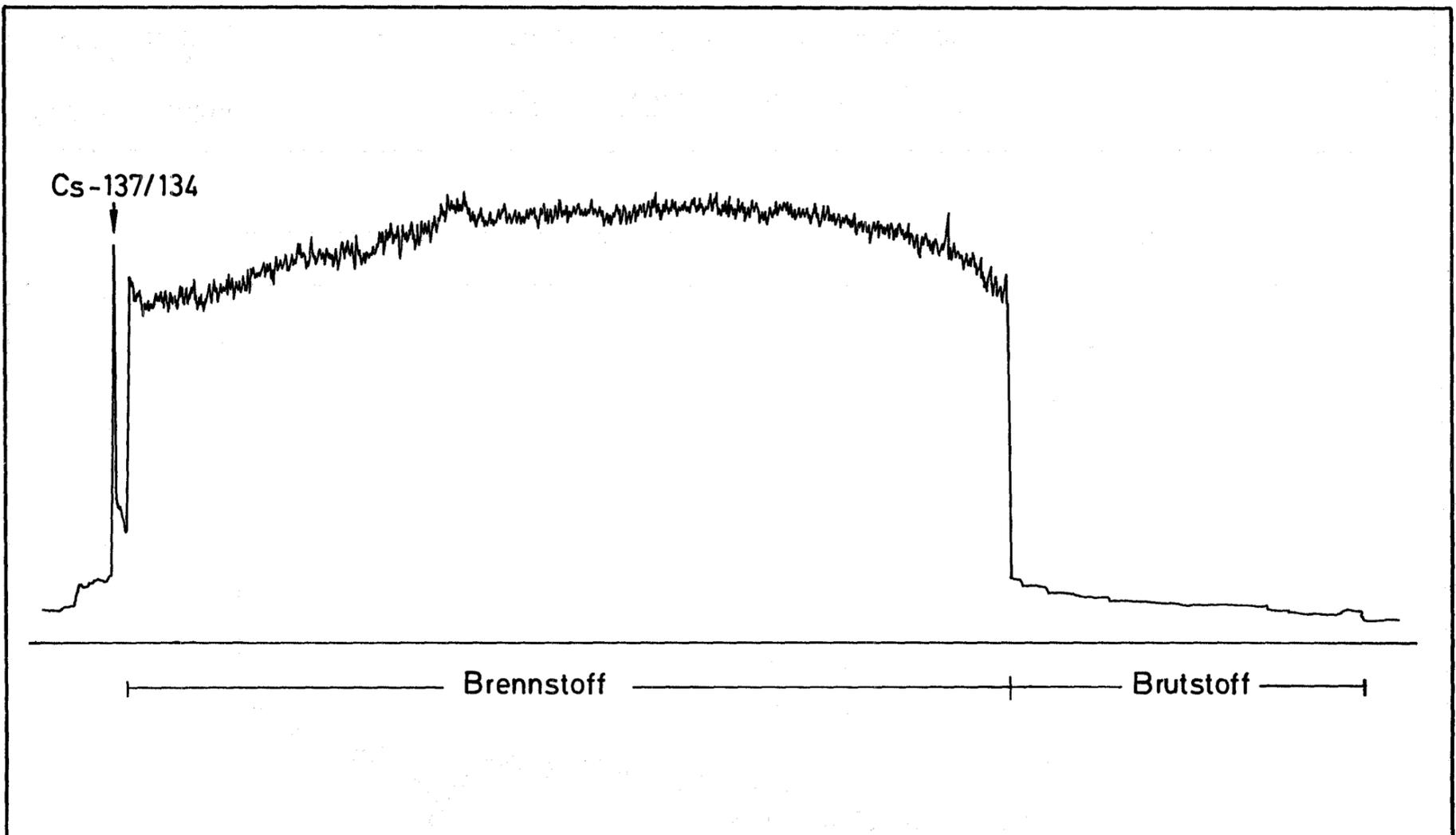
— Brennstoff —

— Brutstoff —

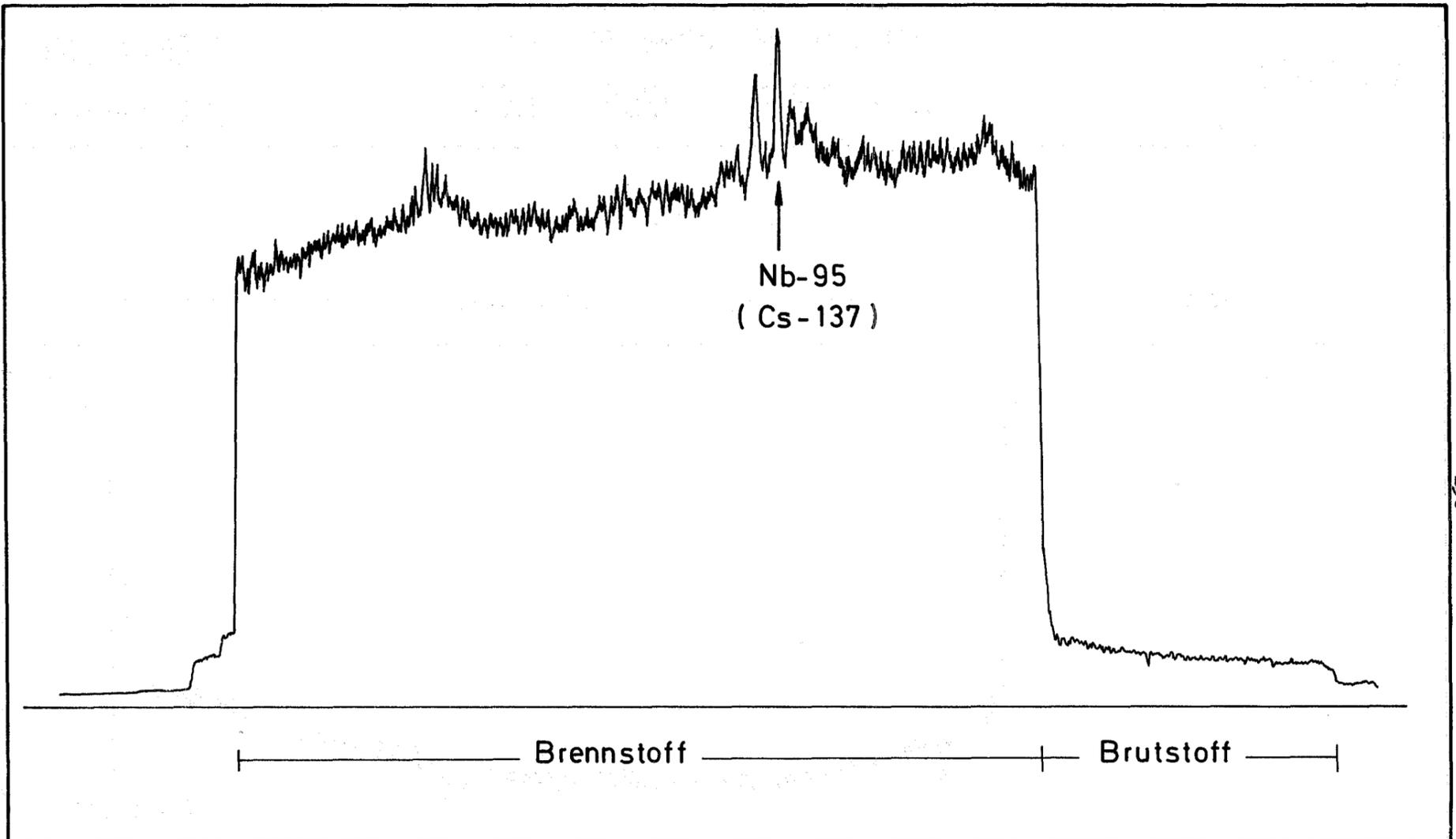
GfK Karlsruhe
IMF/LB

DFR-350 Stab G 8
Zr/Nb-95 - Profil

Abb. 50

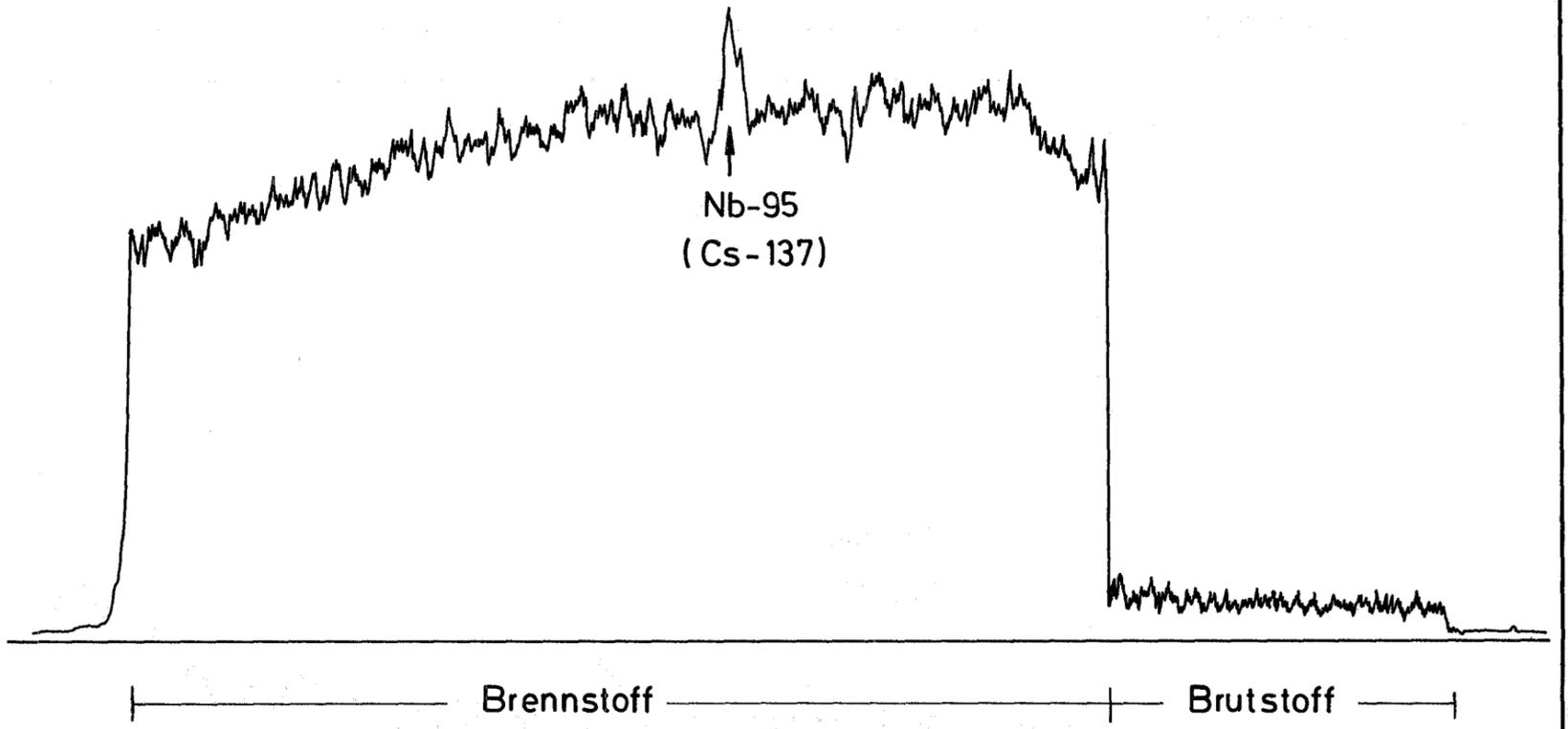


GfK Karlsruhe IMF/LB	DFR - 350 Stab G7 Integrales Profil $\gamma > 400$ keV	Abb. 51
-------------------------	--	---------



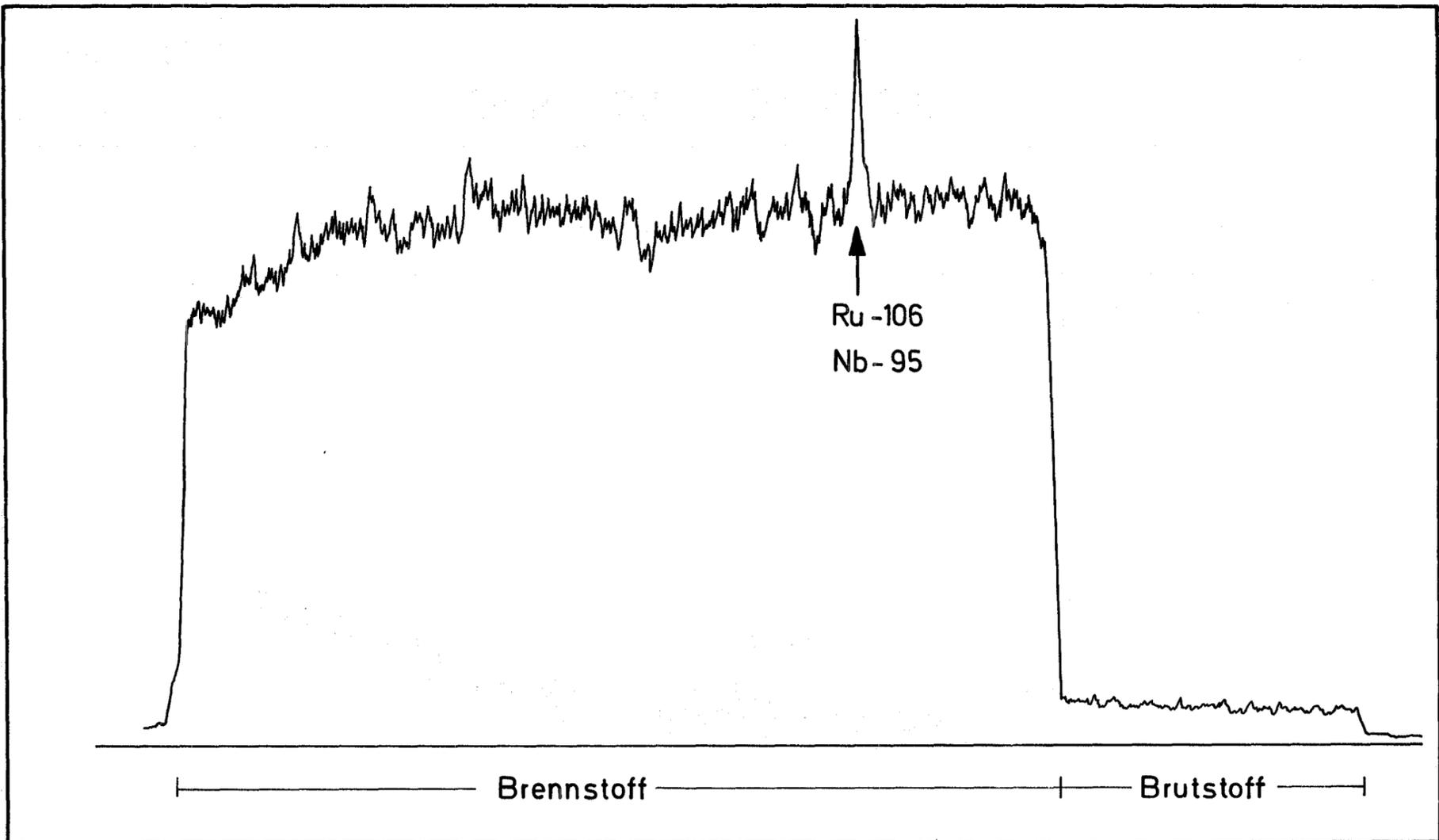
-130-

<p>GfK Karlsruhe IMF/LB</p>	<p>DFR - 350 Stab G 21 Integrales Profil $\gamma > 400$ keV</p>	<p>Abb. 52</p>
---------------------------------	---	----------------



-131-

GfK Karlsruhe IMF/LB	DFR - 350 Stab G 19 Zr / Nb - 95 - Profil	Abb. 53
--------------------------------	--	----------------



GfK Karlsruhe IMF/LB	DFR - 350 Stab G 12 Zr/Nb - 95 - Profil	Abb. 54
-------------------------	---	---------

Tabelle XXXIII

Auswertung der Gamma-Profile

Stab- bezeichng.	Integrales Profil	Zr/Nb-95-Profil	Ru-106-Profil
G 2	Sp. U	Sp. U	-
G 4	N	N	-
G 6	N	N	-
G 7	N Sp. unt.	N	-
G 8	N Sp. unt.	N	-
G 9	N Sp. unt.	N	-
G 12	N Sp. O	Sp. O	-
G 14	Sp. M	N	Sp. M
G 16	N	N	N
G 17	N Sp. unt.	N	-
G 19	Sp. M, Sp. unt.	Sp. M	N
G 21	Sp. M, Sp. U.	Sp. M, Sp. U	N
G 24	N Sp. unt.	N	N
G 36	N	N	-
G 39	N Sp. unt.	N	-
G 40	Ei. O	-	-
G 41	N Sp. unt.	N	N
G 43	N	N	-
G 49	N	N	-
G 50	N Sp. ob.	N	-
G 56	N Sp. unt.	N	N
G 57	N	N	-
G 61	-	N	-

Auswertungsschlüssel:

- Sp.unt. = Spitze oberhalb Brennstoffsäule
 Sp. ob. = Spitze unterhalb Brennstoffsäule
 N = Normal
 Sp.O = am Brennstoff, Spitze im oberen Säulenbereich
 Sp.M = " " Spitze im mittleren Säulenbereich
 Sp.U = " " Spitze im unteren Säulenbereich
 Ei.O = " " Einbruch im oberen Säulenbereich
 Ei.M = " " Einbruch im mittleren Säulenbereich
 Ei.U = " " Einbruch im unteren Säulenbereich

Liste der Tabellen:

Tabelle	Thema	Seite
I	Wärmeentbindung pro cm Stablänge	17
II	Toleranzen der lokalen Wärmeentbindung	17
III	Toleranzen in der Gesamtleistung eines Stabes	18
IV	Zielabbrand bei Maximalfluß	18
V	Temperaturen und Spannungen in der Brennstabhülle	26
VI	Umfangskriechdehnung der Hülle	28
VII	Stabbezeichnungen und Einsatz im DFR	30
VIII	Materialdaten des UO_2 -Pulvers mit 86,4 % U-235	31
IX	Materialdaten des PuO_2 -Pulvers	32
X	Mischprotokoll für den Brennstoff	34
XI	Preßdichte der Grünlinge und Endsinterdichte	35
XII	Zusammensetzung der Tabletten	37
XIII	Verunreinigungen in den Brennstofftabletten	37
XIV	Isotopenanalyse im Sinterkörper	38
XV	Einsenk-Volumen der Sinterkörper	39
XVI	Rechtwinkeligkeit der Tabletten	42
XVII	Tablettenstatistik	49
XVIII	Zusammensetzung des UO_2 und Verunreinigungen	50
XIX	Durchmesser, Höhe und Dichte der Brutstoff-Tabletten	51
XX	Zuordnung von Hüllrohr und Brennstab	53
XXI	Vergleich zwischen den Einzelwerten der Tabletten und den Gesamtwerten der Tablettensäulen	56
XXII	Anzahl der Tabletten in den Brennstäben	58
XXIII	Füllgasanalysen	61
XXIV	Zeit- und Leistungsdaten der DFR-Zyklen	77
XXV	Neutronendosis am Ende der Bestrahlung	81
XXVI	Spezifische Leistung und Stableistung	81
XXVII	Abbrandwerte in den Betriebszyklen der Bestrahlung	87
XXVIII	Durchbiegung der Stäbe	114
XXIX	Länge der Brennstoffsäule	118
XXX	Maximalwerte der Durchmesserergrößerung bei den bestrahlten Stäben	120
XXXI	Länge der Brennstäbe	122
XXXII	Gewicht der Brennstäbe	123
XXXIII	Auswertung der Gamma-Profile	133

Liste der Abbildungen:

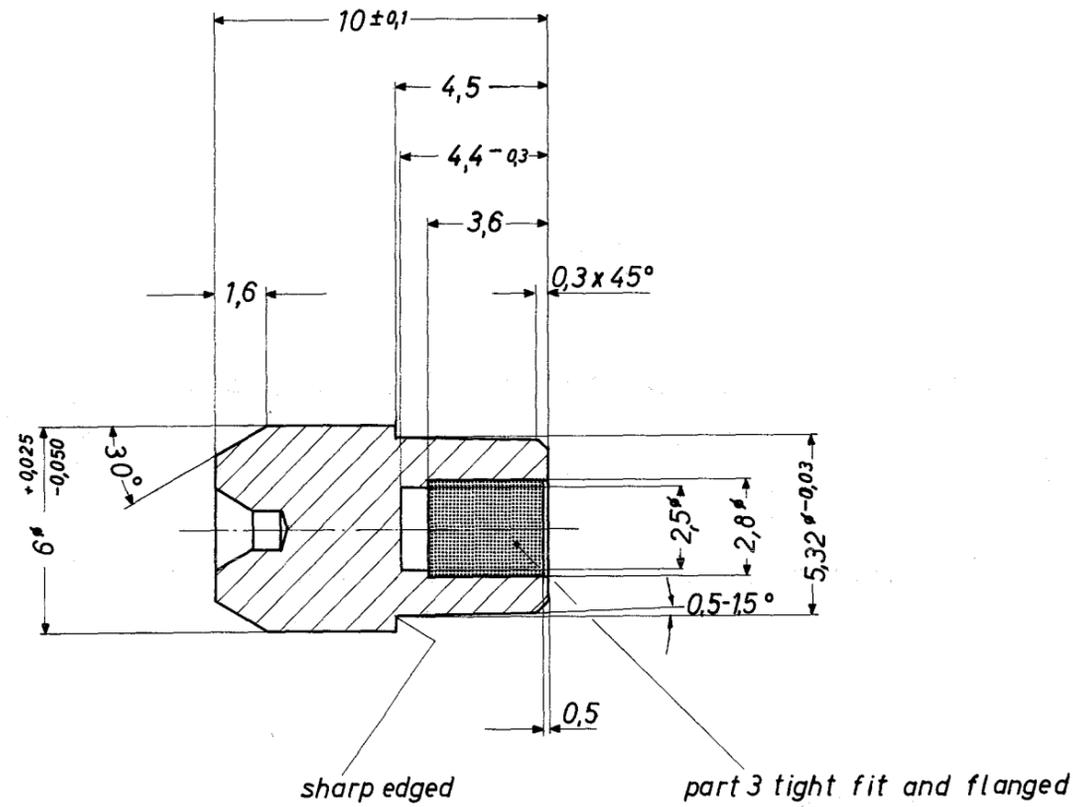
Abbildung	Thema	Seite
1	Querschnitt durch den Dounreay Fast Reactor	6
2	DFR-350, Aufbau eines Brennstabes	8
3	Die Temperaturverteilung längs des Brennstabes	21
4	Tabletten mit Abplatzungen als Vergleichsstandard	43
5	Alpha-Autoradiografien von Brennstofftabletten	43
6	Häufigkeitsverteilung der Tablettenhöhe	45
7	Häufigkeitsverteilung des Tablettengewichtes	46
8	Häufigkeitsverteilung der Materialdichte	47
9	Häufigkeitsverteilung der linearen Dichte	48
10	Schema der Tablettensäule	55
11	Röntgen-Aufnahmen der 30 Stäbe nach der Fertigung	63
12	Röntgen-Aufnahmen in Dounreay vor der Bestrahlung	64
13	77-Stab-Bündel	67
14	Positionsmaße der Abstandshalter	68
15	DFR-350, 77-Stab-Bündel	69
16	Aximale Positionierung des Brennstabes im DFR-Kern	70
17	Bestrahlungszeiten und DFR-Zyklen	72
18	Leistungsverlauf des DFR in Run 62	73
19	Leistungsverlauf des DFR in Run 63	74
20	Leistungsverlauf des DFR in Run 64	75
21	Leistungsverlauf des DFR in Run 65	76
22	Radialer Flußverlauf im DFR	79
23	Axialer Flußverlauf im DFR	80
24	Axialverlauf der Stableistung	82
25	Abnahme der Stableistung im Laufe der Bestrahlung	82
26	DFR-350, Kühlmittel-Austrittstemperaturen in °C	84
27	DFR-350 Brennstab, Anfängliche Hüllrohr- und Kühlmittel-Temperaturen	85
28	Dounreay-Bündel DFR-350, Abbrand und Hüllwandtemperatur	88
29	Mantelrohr vor der Dampfreinigung	90
30	Position des Bündels bei der Röntgendurchleuchtung	91
31	Röntgen-Durchleuchtung, gleichmäßige Spalte	92
32	Röntgen-Durchleuchtung, verbogene Stäbe	93
33	Freigelegtes Brennstabbündel	97

34	Bündelseite D, Teilansicht 1	98
35	Bündelseite D, Teilansicht 2	99
36	Bündelseite D, Teilansicht 3	100
37	Bündelseite D, Teilansicht 4	101
38	Bündelseite D, Teilansicht 5	102
39	Fühler-Lehren-Vermessung des DFR-350-Bündels	103
40	Fühler-Lehren-Vermessung des DFR-350-Bündels	105
41	Bündel-Spalte vor und nach der Bestrahlung	106
42	Abstandshalter nach der Extraktion der Brennstäbe	108
43	Typisches Aussehen der DFR-350-Brennstäbe	110
44	Blankes unteres Stabende an einem DFR-350-Brennstab	111
45	Tropfen-Flecken an einem DFR-350-Brennstab	112
46	Röntgendurchleuchtung der oberen Stabenden	115
47	Röntgendurchleuchtung der oberen Stabenden	117
48	Stab G 21, γ -Spektrum in Stabmitte	125
49	Stab G 43, Integrales γ -Profil	127
50	Stab G 8, Zr/Nb-95-Profil	128
51	Stab G 7, Integrales γ -Profil	129
52	Stab G 21, Integrales γ -Profil	130
53	Stab G 19, Zr/Nb-95-Profil	131
54	Stab G 12, Zr/Nb-95-Profil	132

A n h a n g 1

Konstruktionszeichnungen

- TA 2K - 16 - 07 - 3 - 3051 Teststab der DFR-Bündelbestrahlung
- 4 - 3052 Oberer Endstopfen
- 4 - 3053 Hüllrohr
- 4 - 3054 Federkappe
- 4 - 3055 UO_2 - PuO_2 -Tablette
- 4 - 3056 Unterer Endstopfen

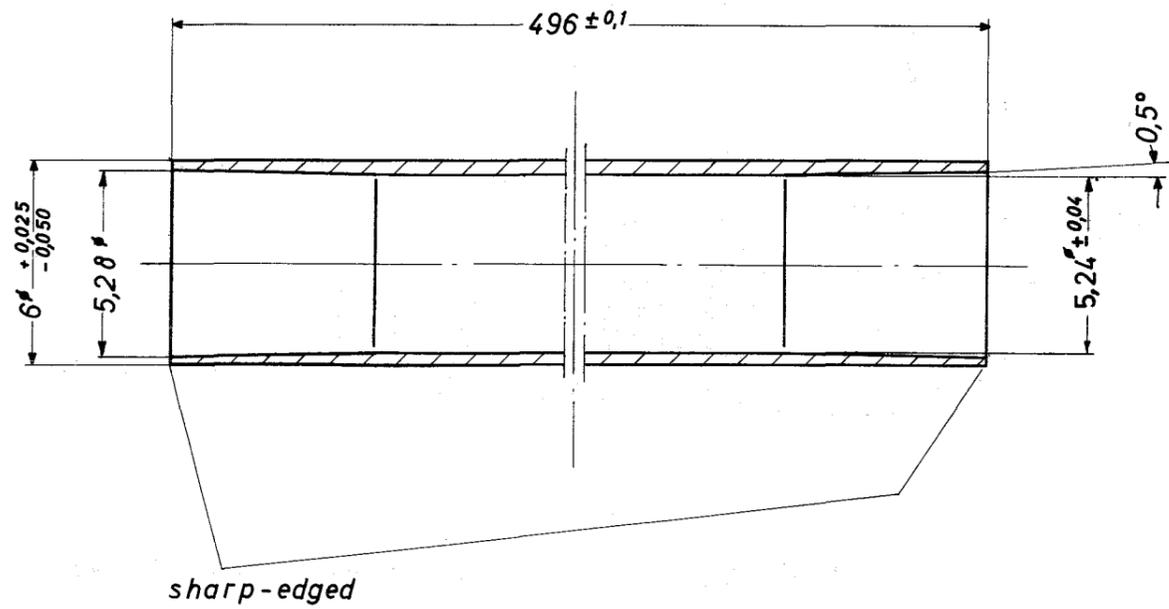


center bor according to A1 DIN 332

Part 1 ∇

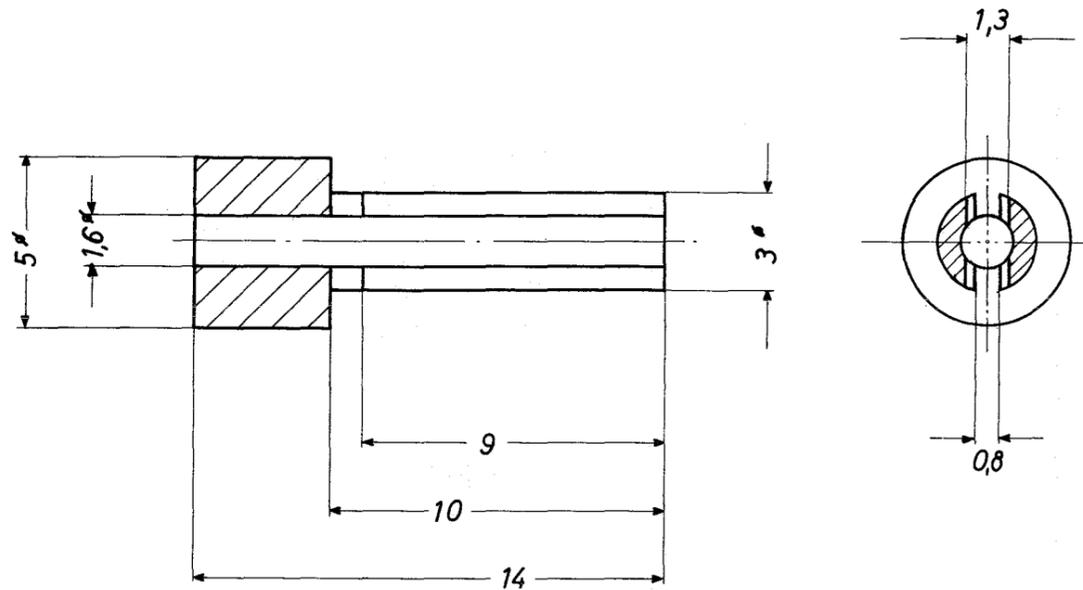
1	1	4988/61	6° x 10			
Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr. Norm	Bemerkung
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	
Rauhtiefe max. in μ	1000	40	10	4	1,6	
Freimaßtoleranz						
1968	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung	Zugeh. Zchnng.	
gez.	20.2.	<i>[Signature]</i>		m. b. H.		
gepr.				7500 Karlsruhe	Ersatz für	
ges.				Postfach 947	Ersetzt durch	
Maßstab	Benennung	Zeichnungs Nr.				
5:1	Upper End Cap	TA2K-16-07-4-3052				

Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patentierung oder Gebrauchsmusteranmeldung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mißbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz und können strafrechtliche Folgen haben.



Part 2 ∇

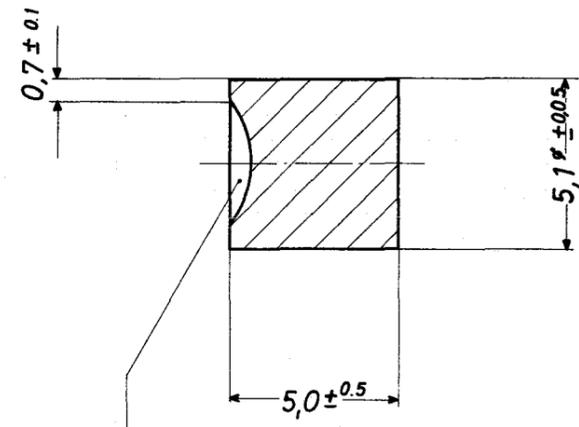
2	1	4988/61 6#Q38x496									
Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr. Norm	Bemerkung	
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz	bis 6	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
Rauhtiefe max. in μ	1000	40	10	4	1,6		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8
1968	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichng. TA2K-16-07-3-3051			
gez.	20.2.	Ka.						Ersatz für			
gepr.								Ersetzt durch			
ges.								Zeichnungs Nr. TA2K-16-07-4-3053			
Maßstab		Benennung									
5:1		Cladding Tube									



Part 6 W

Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der
 Patentierung oder Gebrauchsmusteranmeldung. Ohne unsere vorherige Zusage
 darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht
 werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise
 unbefugterweise verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schad-
 ersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

6	1					4961	5 ⁶ x 14							
Teil	Stück	Benennung				Werkstoff	Abmessung		Zeichngs.Nr. Norm		Bemerkung			
		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000		
Oberflächenzeichen		1000	40	10	4	1,6	Freimaßtoleranz		± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2
1968	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zchnng. TA 2K-16-07-3-3051						
gez.	20.2.	Ka.						Ersatz für						
gepr.								Ersetzt durch						
ges.								Zeichnungs Nr. TA2K-16-07-4-3054						
Maßstab		Benennung												
5 : 1		Slotted Spring Cap												



one side dished

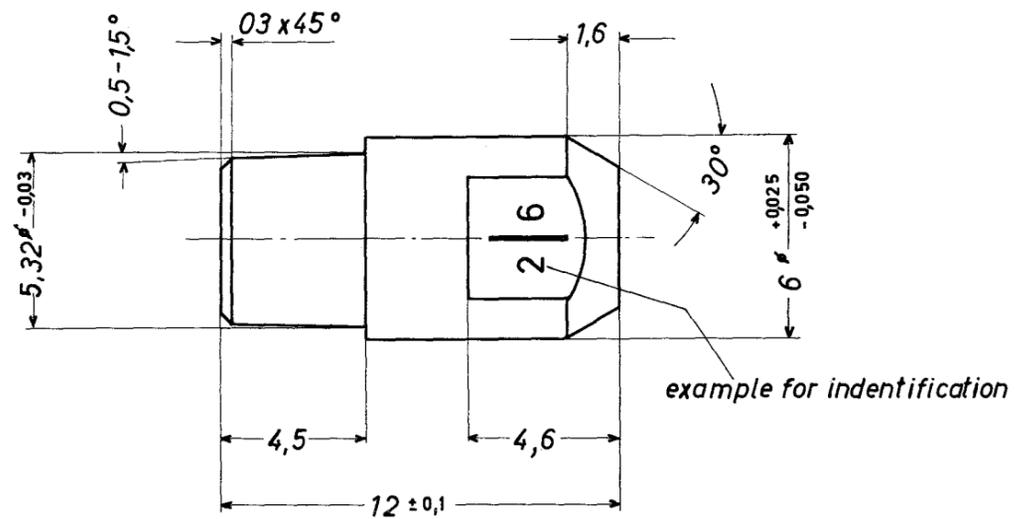
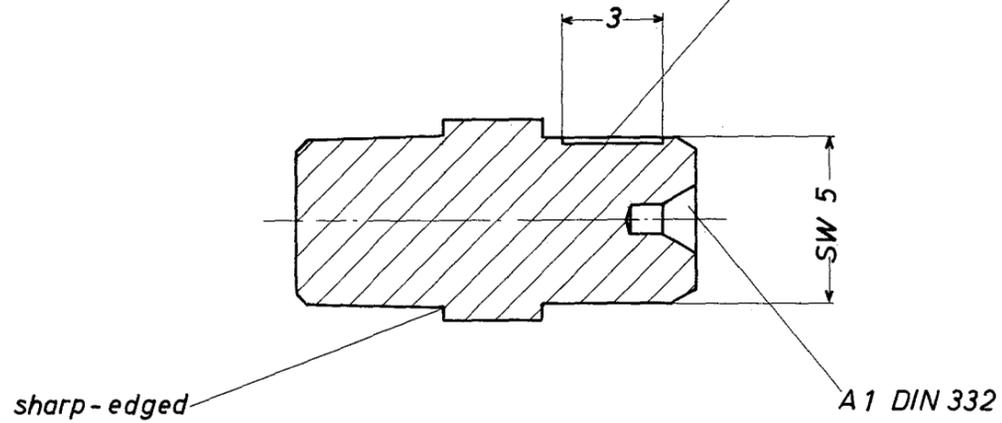
Part 8

Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmustererteilung. Ohne unsere vorherige Zustimmung darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Drucken zugänglich gemacht werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise mißbräuchlich verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

8	1	U ₂ /PUO ₂				5,1 x 5						
Teil	Stück	Benennung					Werkstoff	Abmessung		Zeichngs. Nr. Norm	Bemerkung	
Oberflächenzeichen		~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	Freimaßtoleranz					
Rauhtiefe max. in µ		1000	40	10	4	1,6	bis 6 ± 0,1	über 6 bis 30 ± 0,2	über 30 bis 100 ± 0,3	über 100 bis 300 ± 0,5	über 300 bis 1000 ± 0,8	über 1000 bis 2000 ± 1,2
1968	Tag	Name		Werkstoff		Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947		Zugeh. Zeichng. TA2K-16-07-3-3051				
gez.	20.2	/A.						Ersatz für				
gepr.								Ersetzt durch				
ges.								Zeichnungs Nr. TA2K-16-07-4-3055				
Maßstab		Benennung										
5 : 1		UO ₂ / PUO ₂ - Pellet										

Für diese Zeichnung behalten wir uns alle Rechte vor, auch für den Fall der
 Weiterverbreitung oder Gebrauchszweckänderung. Ohne unsere vorherige Zustimmung
 darf diese Zeichnung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht
 werden; sie darf durch den Empfänger oder Dritte auch nicht in anderer Weise
 mittel- oder unmittelbar verwendet werden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadens-
 ersatz und können strafrechtliche Folgen haben.

-145-
mark for orientation 3x0,3x0,3



Part 10 $\nabla\nabla$

Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichngs. Nr. Norm	Bemerkung
10	1		4988/61	6 ϕ x 12		
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	
Rauhtiefe max. in μ	1000	40	10	4	1,6	
Freimaßtoleranz					bis 6	über 6 bis 30
					über 30 bis 100	über 100 bis 300
					über 300 bis 1000	über 1000 bis 2000
					± 0,1	± 0,2
					± 0,3	± 0,5
					± 0,8	± 1,2
1968	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H. 7500 Karlsruhe Postfach 947	Zugeh. Zeichn. TA 2K-16-07-3-3051	
gez.	21.2.	ka.			Ersatz für	
gepr.					Ersetzt durch	
ges.					Zeichnungs Nr.	
Maßstab	Benennung				Zeichnungs Nr.	
5 : 1	Lower End Cap				TA2K-16-07-4-3056	

Anhang 2 Tablettenlisten, Tabellen 1 bis 14

Tabelle 1: Liste der UO₂-PuO₂-Tabletten in Stab G 2
57 Tabletten aus Sintercharge 2 +)

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
857	5,05	5,01	0,949		1,90
856	5,05	5,01	0,972		1,94
855	5,03	5,02	0,954	9,70	1,90
854	5,05	5,01	0,965		1,93
853	5,05	5,00	0,955		1,91
852	5,04	5,02	0,964	9,93	1,92
851	5,05	5,01	0,965		1,93
850	5,04	5,01	0,965		1,93
849	5,04	5,02	0,960	9,89	1,91
848	5,05	4,99	0,960		1,92
847	5,05	4,95	0,937		1,90
846	5,04	5,03	0,970	9,97	1,93
845	5,05	4,95	0,947		1,91
844	5,03	4,98	0,947	9,87	1,90
843	5,05	4,97	0,945		1,90
842	5,05	5,00	0,949		1,90
841	5,03	4,98	0,954	9,94	1,92
840	5,04	4,96	0,947		1,91
839	5,05	4,98	0,952		1,91
838	5,04	4,98	0,960	9,97	1,93
837	5,05	4,97	0,945		1,90
836	5,05	4,98	0,952		1,91
835	5,03	4,98	0,957	9,98	1,92
834	5,05	5,00	0,952		1,90
833	5,04	4,95	0,944		1,91
832	5,03	4,94	0,952	10,00	1,93
831	5,04	5,00	0,962		1,92
830	5,05	5,00	0,950		1,90
829	5,04	5,01	0,964	9,95	1,92
828	5,05	4,96	0,945		1,91
827	5,05	5,02	0,969		1,93
826	5,04	4,98	0,950	9,78	1,89
825	5,05	5,01	0,965		1,93
824	5,05	4,98	0,957		1,92
823	5,04	5,00	0,959	9,92	1,92
822	5,05	5,00	(0,955) ⁺⁺		1,93
821	5,04	5,01	0,964	9,94	1,92
820	5,03	4,96	0,939		1,89
819	5,05	5,00	0,959		1,92
818	5,05	4,98	0,957		1,92
817	5,04	5,01	0,970		1,94
816	5,05	4,98	0,952		1,91
815	5,04	4,97	0,949		1,91
814	5,04	4,97	0,954		1,92
813	5,05	4,97	0,952		1,92
812	5,04	5,00	0,964		1,93
811	5,03	4,98	0,952	9,87	1,91
810	5,05	4,98	0,952		1,91
809	5,05	4,97	0,945		1,90
808	5,03	4,96	0,942	9,82	1,90
807	5,04	4,98	0,959		1,93
806	5,05	5,02	0,967		1,93
805	5,03	4,97	0,950	9,90	1,91
804	5,04	4,99	0,955		1,91
803	5,05	4,99	0,960		1,92
802	5,04	5,00	0,964	9,97	1,93
801	5,05	4,97	0,952		1,92
Mittelwerte	5,044	4,989	0,9553	9,906	1,916
Summen		284,36	54,453		
Gesamtmessungen		287,07	55,90		

+) Hinweis auf Einfüllfehler: siehe Kapitel 7.9.7

++) Schätzwert, da Angabe des Herstellers fehlt.

Tabelle 2: Liste der UO₂-PuO₂-Tabletten in Stab G 7
58 Tabletten aus Sintercharge 2

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
1029	5,04	5,02	0,975	10,04	1,94
1028	5,05	4,98	0,961		1,93
1027	5,05	5,01	0,969		1,93
1026	5,03	4,98	0,960	10,00	1,93
1025	5,04	4,99	0,965		1,93
1024	5,05	5,02	0,975		1,94
1023	5,04	5,02	0,972	10,00	1,94
1022	5,05	4,97	0,956		1,92
1021	5,05	5,02	0,965		1,92
1020	5,03	4,99	0,953	9,91	1,91
1019	5,04	5,01	0,968		1,93
1018	5,05	4,96	0,950		1,92
1017	5,04	5,02	0,970	10,00	1,93
1016	5,05	5,00	0,956		1,91
1015	5,04	5,00	0,962		1,92
1014	5,04	4,99	0,958	9,92	1,92
1013	5,05	4,99	0,965		1,93
1012	5,05	4,94	0,955		1,93
1011	5,03	5,02	0,956	9,89	1,90
1010	5,05	4,99	0,957		1,92
1009	5,04	4,96	0,950		1,92
1008	5,03	4,97	0,955	9,97	1,92
1007	5,05	5,00	0,968		1,94
1006	5,03	4,97	0,953	9,95	1,92
1005	5,04	5,02	0,970		1,93
1004	5,05	5,00	0,968		1,94
1003	5,03	4,98	0,962	10,03	1,91
1002	5,05	5,02	0,957		1,91
1001	5,04	5,03	0,960		1,91
1000	5,03	4,97	0,955	9,97	1,92
999	5,05	4,99	0,965		1,93
998	5,04	4,98	0,956		1,91
997	5,05	5,01	0,975	10,02	1,94
996	5,05	5,00	0,964		1,92
995	5,04	5,00	0,970		1,94
994	5,04	5,00	0,971	10,04	1,94
993	5,05	4,99	0,962		1,92
992	5,05	4,97	0,953		1,92
991	5,03	4,97	0,950	9,92	1,91
990	5,05	5,02	0,968		1,92
989	5,05	4,99	0,958		1,91
988	5,04	4,99	0,964	9,99	1,93
987	5,04	5,02	0,975		1,94
986	5,05	5,02	0,951		1,89
985	5,04	5,01	0,970	10,01	1,93
984	5,04	5,01	0,962	9,93	1,92
983	5,04	5,01	0,972		1,94
982	5,04	4,99	0,956	9,91	1,91
981	5,04	5,01	0,965		1,92
980	5,04	5,01	0,968		1,93
979	5,04	5,03	0,970	9,97	1,92
978	5,04	5,02	0,972		1,93
977	5,04	5,02	0,974		1,94
976	5,03	4,98	0,958	9,99	1,92
975	5,04	4,99	0,954		1,91
974	5,04	4,94	0,952		1,92
973	5,05	5,02	0,972	9,97	1,93
972	5,05	5,03	0,981		1,95
Mittelwerte	5,042	4,998	0,9630	9,973	1,924
Summen		289,86	55,854		
Gesamtmessungen		290,00	55,90		

Anhang 2

Tabelle 3: Liste der UO_2 - PuO_2 -Tabletten in Stab G 9
59 Tabletten aus Sintercharge 2⁺)

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm^3)	Lineare Dichte (g/cm)
1088	5,05	4,99	0,959		1,92
1087	5,04	5,00	0,964		1,93
1086	5,03	4,97	0,952	9,94	1,92
1085	5,05	4,99	0,959		1,92
1084	5,05	4,95	0,938		1,92
1083	5,04	5,00	0,967	10,00	1,93
1082	5,05	4,98	0,955		1,92
1081	5,05	4,96	0,945		1,91
1080	5,04	5,00	0,968	10,01	1,94
1079	5,05	5,00	0,957		1,91
1078	5,05	5,01	0,950		1,90
1077	5,04	5,00	0,966	9,99	1,93
1076	5,04	4,93	0,945		1,92
1075	5,03	4,97	0,954	9,96	1,90
1074	5,05	5,00	0,965		1,93
1073	5,05	4,97	0,957		1,93
1072	5,04	5,00	0,968	10,01	1,94
1071	5,05	5,00	0,961		1,92
1070	5,04	5,03	0,975		1,94
1069	5,03	4,96	0,948	9,92	1,91
1068	5,05	4,98	0,958		1,93
1067	5,05	5,00	0,961		1,92
1066	5,03	4,98	0,960	10,01	1,93
1065	5,05	4,98	0,955		1,92
1064	5,04	4,99	0,957		1,92
1063	5,04	5,02	0,965	9,94	1,92
1062	5,05	5,02	0,949		1,89
1061	5,05	4,99	0,965		1,93
1060	5,04	4,99	0,960	9,95	1,92
1059	5,05	4,97	0,946		1,90
1058	5,04	5,02	0,965		1,92
1057	5,04	5,00	0,970	10,03	1,94
1056	5,05	5,01	0,974		1,94
1055	5,05	4,99	0,959		1,92
1054	5,03	4,96	0,948	9,92	1,91
1053	5,04	4,97	0,953		1,92
1052	5,04	5,03	0,972	10,00	1,93
1051	5,05	5,00	0,963		1,93
1050	5,05	4,96	0,948		1,91
1049	5,03	4,99	0,960	10,00	1,92
1048	5,05	5,01	0,973		1,94
1047	5,04	4,96	0,950		1,92
1046	5,03	4,99	0,963	10,02	1,93
1045	5,05	4,98	0,960		1,93
1044	5,05	4,98	0,958		1,92
1043	5,03	4,97	0,955	9,97	1,92
1042	5,04	4,98	0,965		1,94
1041	5,05	4,98	0,963		1,93
1040	5,03	4,97	0,955	9,97	1,92
1039	5,05	4,97	0,950		1,91
1038	5,05	5,00	0,967		1,93
1037	5,04	5,01	0,970	10,00	1,94
1036	5,05	5,00	0,960		1,92
1035	5,04	4,97	0,957		1,93
1034	5,03	5,01	0,969	10,00	1,93
1033	5,05	5,00	0,962		1,92
1032	5,05	5,00	0,970		1,94
1031	5,04	5,00	0,963	10,00	1,92
1030	5,04	4,97	0,956		1,92
Mittelwerte	5,043	4,988	0,9594	9,982	1,923
Summen		294,31	56,607		
Gesamtmessungen		289,65	55,70		

+¹) Hinweis auf Einfüllfehler:
siehe Kapitel 7.9.7

Tabelle 4: Liste der UO_2 - PuO_2 -Tabletten in Stab G 14
57 Tabletten aus Sintercharge 2⁺⁺)

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm^3)	Lineare Dichte (g/cm)
1145	5,05	5,05	0,975		1,93
1144	5,04	5,02	0,965	9,94	1,92
1143	5,04	5,03	0,968		1,92
1142	5,05	5,01	0,967		1,93
1141	5,04	5,00	0,963	9,96	1,93
1140	5,03	4,98	0,947		1,90
1139	5,05	5,02	0,974		1,94
1138	5,05	5,03	0,973	9,96	1,93
1137	5,04	5,03	0,961		1,91
1136	5,04	5,01	0,961		1,92
1135	5,05	5,02	0,972	9,97	1,94
1134	5,04	4,98	0,950		1,91
1133	5,05	4,99	0,953		1,91
1132	5,04	5,02	0,970	9,99	1,93
1131	5,05	5,01	0,955		1,91
1130	5,05	4,99	0,962		1,93
1129	5,04	5,01	0,970	10,01	1,92
1128	5,05	5,03	0,975		1,94
1127	5,04	5,01	0,968		1,93
1126	5,04	5,01	0,972	10,03	1,94
1125	5,05	5,01	0,970		1,94
1124	5,05	4,95	0,945		1,91
1123	5,04	5,01	0,969	10,00	1,93
1122	5,05	4,97	0,950		1,91
1121	5,04	5,00	0,961	9,94	1,92
1120	5,05	4,97	0,954		1,92
1119	5,04	4,96	0,948		1,92
1118	5,03	4,98	0,956	9,97	1,92
1117	5,05	4,98	0,956		1,92
1116	5,05	4,98	0,957		1,92
1115	5,03	4,98	0,955	9,95	1,92
1114	5,05	4,98	0,955		1,92
1113	5,03	4,98	0,952		1,91
1112	5,04	4,98	0,951	9,91	1,91
1111	5,05	5,00	0,965		1,93
1110	5,05	4,99	0,960		1,92
1109	5,04	4,97	0,950	9,88	1,91
1108	5,05	5,00	0,965		1,93
1107	5,05	5,01	0,970		1,94
1106	5,03	4,96	0,950	9,94	1,92
1105	5,04	4,98	0,960		1,93
1104	5,03	4,97	0,950		1,91
1103	5,05	5,02	0,968	9,93	1,93
1102	5,05	4,97	0,950		1,91
1101	5,05	5,00	0,963		1,93
1100	5,05	4,99	0,962	9,93	1,93
1099	5,04	4,97	0,946		1,90
1098	5,03	4,98	0,955	9,95	1,92
1097	5,05	4,98	0,945		1,90
1096	5,04	4,97	0,955		1,92
1095	5,05	5,05	0,983	10,03	1,95
1094	5,05	4,97	0,950		1,91
1093	5,05	4,99	0,960		1,92
1092	5,03	4,99	0,954	9,89	1,91
1091	5,05	5,00	0,960		1,92
1090	5,05	5,00	0,965		1,93
1089	5,04	4,99	0,959	9,94	1,92
Mittelwerte	5,044	4,995	0,9601	9,956	1,922
Summen		284,73	54,725		
Gesamtmessungen		290,00	55,90		

++¹) Hinweis auf Meßfehler:
siehe Kapitel 7.9.7

Anhang 2

Tabelle 5: Liste der UO_2 - PuO_2 -Tabletten in Stab G 16
57 Tabletten aus Sintercharge 2⁺⁾

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
914	5,05	5,05	0,982		1,94
913	5,06	5,08	0,999	10,09	1,96
912	5,05	5,00	0,967		1,93
911	5,05	5,03	0,977		1,94
910	5,06	5,02	0,987	10,09	1,96
909	5,05	5,00	0,969		1,93
908	5,05	5,02	0,974		1,94
907	5,05	5,02	0,973	9,98	1,93
906	5,05	5,02	0,975		1,94
905	5,05	5,03	0,980		1,94
904	5,05	5,00	0,961	9,90	1,92
903	5,07	5,08	1,000		1,96
902	5,05	5,00	0,969		1,93
901	5,05	5,03	0,975	9,98	1,93
900	5,05	5,04	0,975		1,93
899	5,05	5,04	0,980		1,94
898	5,05	5,05	0,990	10,12	1,96
897	5,05	5,01	0,972		1,94
896	5,09	5,15	0,975		1,89
895	5,05	5,03	0,970	9,93	1,92
894	5,05	5,04	0,985		1,95
893	5,05	5,07	0,995		1,96
892	5,05	5,05	0,980	9,99	1,94
891	5,05	5,03	0,973		1,93
890	5,07	5,07	0,995	10,03	1,96
889	5,06	5,06	0,988		1,95
888	5,05	5,06	0,980		1,94
887	5,05	5,02	0,970	9,95	1,93
886	5,05	5,04	0,975		1,93
885	5,05	5,03	0,978		1,94
884	5,04	5,02	0,970	9,99	1,93
883	5,05	4,97	0,965		1,94
882	5,05	5,02	0,975		1,94
881	5,05	5,01	0,966	9,93	1,93
880	5,07	5,09	1,002		1,96
879	5,07	5,07	0,993		1,96
878	5,05	5,22	0,974	9,99	1,94
877	5,06	5,04	0,985		1,95
876	5,10	5,16	0,975		1,89
875	5,05	5,02	0,973	9,98	1,94
874	5,06	5,06	0,988		1,95
873	5,05	5,02	0,970		1,93
872	5,06	5,04	0,980	9,98	1,94
871	5,05	5,04	0,980		1,94
870	5,05	5,02	0,965		1,92
869	5,05	5,03	0,978	10,01	1,94
868	5,05	5,02	0,947		1,89
867	5,03	5,00	0,950	9,79	1,90
866	5,04	5,01	0,967		1,93
865	5,05	5,00	0,949		1,90
864	5,04	5,00	0,964	9,93	1,93
863	5,05	5,01	0,957		1,91
862	5,05	5,02	0,969		1,93
861	5,04	5,03	0,967	9,93	1,92
860	5,04	5,01	0,960		1,92
859	5,05	5,00	0,969		1,94
858	5,04	5,02	0,970	10,00	1,93
Mittelwerte	5,053	5,034	0,9750	9,980	1,934
Summen		286,92	55,577		
Gesamtmessungen		287,43	56,20		

Tabelle 6: Liste der UO_2 - PuO_2 -Tabletten in Stab G 18
58 Tabletten aus Sintercharge 2⁺⁾

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
1261	5,03	5,01	0,945	9,79	1,89
1260	5,04	4,98	0,942		1,89
1259	5,03	5,01	0,941	9,75	1,88
1258	5,04	5,01	0,948		1,89
1257	5,05	5,02	0,950		1,89
1256	5,03	5,02	0,945	9,77	1,88
1255	5,05	5,01	0,950		1,90
1254	5,04	5,01	0,950		1,90
1253	5,04	5,00	0,947	9,79	1,89
1252	5,05	5,01	0,964		1,92
1251	5,04	5,00	0,932		1,86
1250	5,04	5,00	0,960	9,93	1,92
1249	5,04	5,01	0,943		1,88
1248	5,05	4,99	0,957		1,92
1247	5,04	5,04	0,965	9,90	1,91
1246	5,05	5,03	0,957		1,90
1245	5,04	5,02	0,965		1,92
1244	5,03	5,02	0,947	9,79	1,89
1243	5,05	5,02	0,951		1,89
1242	5,05	4,99	0,954		1,91
1241	5,03	5,02	0,950	9,82	1,89
1240	5,05	5,00	0,957		1,91
1239	5,04	5,00	0,955		1,91
1238	5,03	4,98	0,947	9,87	1,90
1237	5,04	4,98	0,950		1,91
1236	5,04	5,02	0,963	10,00	1,92
1235	5,04	4,98	0,933		1,87
1234	5,04	5,02	0,948		1,89
1233	5,03	4,98	0,952	9,92	1,91
1232	5,05	4,99	0,957		1,92
1231	5,05	5,00	0,951		1,90
1230	5,03	5,02	0,943	9,75	1,88
1229	5,04	5,01	0,948		1,89
1228	5,04	5,02	0,967		1,93
1227	5,03	5,01	0,948	9,82	1,89
1226	5,05	5,02	0,966		1,92
1225	5,05	5,05	0,962		1,90
1224	5,03	5,01	0,958	9,93	1,91
1223	5,05	5,00	0,947		1,89
1222	5,04	4,97	0,947		1,91
1221	5,04	5,02	0,968	9,97	1,93
1220	5,04	5,02	0,968		1,93
1219	5,05	5,01	0,966		1,93
1218	5,04	5,05	0,964	9,87	1,91
1217	5,05	5,00	0,958		1,92
1216	5,05	4,97	0,950		1,91
1215	5,04	4,99	0,953	9,87	1,91
1214	5,05	5,02	0,968		1,93
1213	5,04	5,02	0,967	9,96	1,93
1212	5,05	5,02	0,985		1,96
1211	5,04	5,00	0,962		1,92
1210	5,03	5,05	0,963	9,90	1,91
1209	5,05	5,01	0,967		1,93
1208	5,04	5,01	0,960		1,92
1207	5,03	5,02	0,953		1,90
1206	5,04	5,01	0,948		1,89
1205	5,05	5,02	0,970		1,93
1204	5,04	5,00	0,965	9,98	1,93
Mittelwerte	5,041	5,026	0,955	9,869	1,906
Summen		291,52	55,397		
Gesamtmessungen		290,95	55,80		

<sup>+) Hinweis auf Einfüllfehler:
siehe Kapitel 7.9.7</sup>

Anhang 2

Tabelle 7: Liste der UO_2 - PuO_2 -Tabletten in Stab G 19
57 Tabletten aus Sintercharge 2⁺⁾

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
971	5,05	5,06	0,992		1,96
970	5,07	5,03	0,981	10,04	1,95
969	5,06	5,05	0,990		1,96
968	5,05	5,02	0,980		1,95
968	5,05	5,04	0,982	10,03	1,94
966	5,05	5,05	0,981		1,94
965	5,05	4,84	0,915		1,89
964	5,05	5,02	0,974	9,99	1,94
963	5,05	5,02	0,970		1,93
962	5,06	5,06	0,990		1,96
961	5,06	5,06	0,995	10,09	1,96
960	5,06	5,06	0,993		1,96
959	5,05	5,02	0,974	9,99	1,94
958	5,05	5,09	0,980		1,92
957	5,05	5,04	0,985		1,95
956	5,06	5,03	0,985	10,04	1,95
955	5,06	5,07	0,991		1,95
954	5,05	5,03	0,983		1,95
953	5,05	5,03	0,980	10,03	1,94
952	5,09	5,17	0,987		1,91
951	5,09	5,10	0,989		1,94
950	5,07	5,08	1,005	10,11	1,96
949	5,05	5,05	0,965		1,91
948	5,06	5,06	0,990		1,95
947	5,05	5,04	0,982	10,03	1,94
946	5,05	5,03	0,979		1,94
945	5,05	5,04	0,982		1,94
944	5,05	5,02	0,977	10,02	1,94
943	5,06	5,06	0,990		1,95
942	5,05	5,00	0,969		1,93
941	5,05	5,02	0,975	10,00	1,94
940	5,05	5,04	0,976		1,93
939	5,05	4,99	0,970		1,94
938	5,12	5,21	0,989	9,51	1,90
937	5,05	5,04	0,980		1,94
936	5,05	5,02	0,970	9,95	1,93
935	5,05	5,06	0,996		1,96
934	5,08	5,05	0,988		1,95
933	5,10	5,18	0,982	9,57	1,90
932	5,05	5,04	0,980		1,94
931	5,07	5,10	0,978		1,92
930	5,05	5,02	0,972	9,97	1,93
929	5,05	5,02	0,975		1,94
928	5,05	5,03	0,978		1,94
927	5,05	5,03	0,979	10,02	1,94
926	5,05	5,02	0,977		1,94
925	5,05	5,04	0,977		1,93
924	5,05	5,03	0,978	10,01	1,94
923	5,06	5,00	0,975		1,95
922	5,09	5,18	0,990		1,91
921	5,05	5,03	0,975	9,98	1,93
920	5,07	5,09	1,001		1,96
919	5,05	5,02	0,968		1,92
918	5,07	5,11	0,988	9,88	1,93
917	5,05	5,07	0,990		1,95
916	5,05	5,00	0,980		1,96
915	5,07	5,07	0,997	10,05	1,96
Mittelwerte	5,058	5,049	0,981	9,966	1,939
Summen		287,78	55,920		
Gesamtmessungen		288,07	56,40		

<sup>+) Hinweis auf Einfüllfehler:
siehe Kapitel 7.9.7</sup>

Tabelle 8: Liste der UO_2 - PuO_2 -Tabletten in Stab G 36
58 Tabletten aus Sintercharge 1

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
173	5,04	5,04	0,965		1,91
172	5,05	5,03	0,965	9,88	1,92
171	5,04	4,99	0,945		1,89
170	5,03	4,99	0,942		1,89
169	5,04	5,01	0,945	9,75	1,89
168	5,05	5,03	0,970		1,93
167	5,05	4,98	0,956		1,92
166	5,04	5,00	0,942	9,74	1,88
165	5,05	5,02	0,968		1,93
164	5,04	5,02	0,956	9,85	1,90
163	5,04	5,02	0,956	9,85	1,90
162	5,05	5,04	0,965		1,91
161	5,04	5,00	0,949		1,90
160	5,03	5,01	0,962	9,94	1,92
159	5,04	4,99	0,957		1,92
158	5,03	5,03	0,974	10,01	1,94
157	5,04	5,00	0,948		1,90
156	5,04	5,02	0,965		1,92
155	5,05	5,02	0,955	9,80	1,90
154	5,05	5,03	0,963		1,91
153	5,04	5,05	0,975		1,93
152	5,04	5,00	0,949	9,81	1,90
151	5,05	5,00	0,941		1,88
150	5,05	5,00	0,945		1,89
149	5,04	5,02	0,956	9,85	1,90
148	5,03	5,00	0,952		1,90
147	5,05	4,98	0,935		1,88
146	5,04	5,00	0,946	9,78	1,89
145	5,05	4,98	0,940		1,89
144	5,03	5,01	0,945		1,89
143	5,04	4,98	0,930	9,66	1,87
142	5,05	5,05	0,968		1,92
141	5,04	4,99	0,940		1,88
140	5,05	5,00	0,951	9,80	1,90
139	5,03	5,00	0,943		1,89
138	5,05	5,02	0,963		1,92
137	5,04	5,02	0,954	9,83	1,90
136	5,03	5,01	0,961		1,92
135	5,04	4,98	0,946	9,829	1,90
134	5,05	5,00	0,947		1,89
133	5,04	5,01	0,955		1,91
132	5,03	5,00	0,950	9,86	1,90
131	5,05	5,00	0,946		1,89
130	5,04	5,01	0,958		1,91
129	5,05	5,01	0,960	9,87	1,92
128	5,05	5,00	0,950		1,90
127	5,04	5,00	0,941		1,88
126	5,05	5,02	0,959	9,84	1,91
125	5,03	5,03	0,968		1,92
124	5,05	5,00	0,952		1,90
123	5,04	5,05	0,971	9,94	1,92
122	5,04	5,03	0,970		1,93
121	5,05	4,98	0,960		1,93
120	5,05	5,05	0,966	9,85	1,91
119	5,05	5,00	0,949		1,90
118	5,04	5,03	0,958		1,90
117	5,04	4,97	0,930	9,68	1,87
116	5,05	5,05	0,967		1,91
Mittelwerte	5,043	5,009	0,954	9,828	1,904
Summen		290,53	55,336		
Gesamtmessungen		290,97	55,30		

Anhang 2

Tabelle 9: Liste der UO₂-PuO₂-Tabletten in Stab G 40
58 Tabletten aus Sintercharge 1

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
464	5,03	4,95	0,935	9,81	1,89
463	5,03	4,96	0,922		1,86
462	5,05	4,96	0,924		1,86
461	5,04	4,95	0,922	9,63	1,86
460	5,04	4,97	0,942		1,90
459	5,04	4,98	0,947		1,90
458	5,04	4,97	0,934	9,72	1,88
457	5,04	4,99	0,950		1,90
456	5,03	4,95	0,922	9,67	1,86
455	5,04	4,96	0,946		1,91
454	5,03	4,97	0,934		1,88
453	5,04	4,98	0,940	9,76	1,89
452	5,04	4,99	0,945		1,89
451	5,05	4,98	0,949		1,91
450	5,04	4,97	0,928	9,65	1,87
449	5,05	4,97	0,937		1,89
448	5,03	4,97	0,930		1,87
447	5,05	4,96	0,930	9,66	1,88
446	5,04	4,98	0,940		1,89
445	5,04	4,97	0,934		1,88
444	5,04	4,95	0,920	9,61	1,86
443	5,04	4,98	0,946		1,90
442	5,04	4,98	0,937		1,88
441	5,03	4,96	0,940	9,84	1,90
440	5,05	4,99	0,947		1,90
439	5,05	4,97	0,947		1,91
438	5,04	4,99	0,938	9,72	1,88
437	5,05	4,96	0,924		1,86
436	5,03	4,96	0,930		1,88
435	5,03	4,97	0,929	9,70	1,87
434	5,04	4,98	0,949		1,91
433	5,05	4,98	0,944	9,76	1,90
432	5,04	4,96	0,938		1,89
431	5,04	4,97	0,932		1,88
430	5,05	4,97	0,932	9,73	1,89
429	5,03	4,99	0,950		1,90
428	5,03	5,00	0,942		1,88
427	5,05	4,95	0,940	9,78	1,90
426	5,04	4,96	0,938		1,89
425	5,03	4,99	0,940		1,88
424	5,05	5,00	0,945	9,73	1,89
423	5,04	5,00	0,940		1,88
422	5,05	4,99	0,934		1,87
421	5,05	4,95	0,925	9,62	1,87
420	5,05	4,98	0,931		1,87
419	5,04	4,94	0,924		1,87
418	5,04	4,97	0,933	9,71	1,88
417	5,03	4,99	0,929		1,86
416	5,05	4,97	0,937		1,89
415	5,05	4,98	0,936	9,68	1,88
414	5,05	5,00	0,953		1,91
413	5,04	4,98	0,938		1,88
412	5,03	4,96	0,931	9,74	1,88
411	5,05	4,99	0,945		1,89
410	5,04	4,96	0,950	9,90	1,92
409	5,03	4,99	0,935		1,87
408	5,04	4,98	0,955		1,92
407	5,05	4,99	0,945	9,75	1,89
Mittelwerte	5,040	4,973	0,937	9,722	1,885
Summen		288,46	54,367		
Gesamtmessungen		289,20	54,30		

Tabelle 10: Liste der UO₂-PuO₂-Tabletten in Stab G 41
58 Tabletten aus Sintercharge 1

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
289	5,05	4,98	0,941		1,89
288	5,04	4,98	0,935		1,88
287	5,03	4,99	0,954	9,92	1,91
286	5,05	4,99	0,927		1,86
285	5,04	4,97	0,941		1,89
284	5,05	4,95	0,918	9,55	1,85
283	5,04	4,97	0,936		1,88
282	5,05	4,97	0,950		1,91
281	5,04	4,98	0,934	9,70	1,88
280	5,05	5,03	0,954		1,90
279	5,04	4,98	0,935		1,88
278	5,05	4,91	0,946	9,92	1,93
277	5,05	4,97	0,935		1,88
276	5,04	5,00	0,940		1,88
275	5,03	5,03	0,954	9,85	1,90
274	5,04	5,02	0,955		1,90
273	5,03	5,00	0,946	9,82	1,89
272	5,03	5,03	0,962		1,91
271	5,04	5,00	0,945		1,89
270	5,04	5,00	0,945		1,89
269	5,05	5,01	0,948		1,89
268	5,05	5,02	0,958		1,91
267	5,04	5,04	0,978	10,03	1,94
266	5,05	5,02	0,966		1,92
265	5,04	4,98	0,953		1,91
264	5,05	5,00	0,970	9,99	1,94
263	5,04	5,02	0,975		1,94
262	5,05	5,00	0,956		1,91
261	5,04	5,00	0,948	9,80	1,90
260	5,05	5,00	0,948		1,90
259	5,04	5,01	0,950		1,90
258	5,05	5,06	0,980	9,97	1,94
257	5,03	5,02	0,950		1,89
256	5,04	4,98	0,943		1,89
255	5,05	5,00	0,940	9,68	1,88
254	5,04	4,99	0,944		1,89
253	5,05	5,01	0,943		1,88
252	5,03	4,98	0,935	9,75	1,88
251	5,04	5,00	0,945		1,89
250	5,05	5,02	0,954	9,79	1,90
249	5,04	5,02	0,948		1,89
248	5,03	5,00	0,949		1,90
247	5,04	4,99	0,950	9,84	1,90
246	5,03	5,03	0,971		1,93
245	5,04	4,99	0,955		1,91
244	5,05	5,03	0,953	9,76	1,89
243	5,05	5,00	0,940		1,88
242	5,04	5,00	0,953		1,91
241	5,05	5,02	0,942	9,66	1,88
240	5,04	5,01	0,954		1,90
239	5,05	5,02	0,960		1,91
238	5,03	5,00	0,941	9,77	1,88
237	5,04	4,98	0,938		1,88
236	5,05	5,00	0,955		1,91
235	5,04	5,06	0,962	9,83	1,90
234	5,05	4,98	0,944		1,90
233	5,05	5,05	0,965		1,91
232	5,04	4,98	0,953	9,89	1,91
Mittelwerte	5,311	5,001	0,9495	9,817	1,898
Summen		290,07	55,070		
Gesamtmessungen		290,74	55,10		

Anhang 2

Tabelle 11: Liste der UO_2 - PuO_2 -Tabletten in Stab G 43
58 Tabletten aus Sintercharge 1

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm^3)	Lineare Dichte (g/cm)
347	5,05	4,99	0,935	9,65	1,87
346	5,04	4,97	0,947		1,91
345	5,05	4,99	0,935		1,87
344	5,03	4,96	0,933	9,76	1,88
343	5,03	4,95	0,930	9,75	1,88
342	5,03	4,99	0,935		1,87
341	5,05	4,94	0,933	9,73	1,89
340	5,03	4,98	0,945		1,90
339	5,04	4,94	0,928		1,88
338	5,03	4,95	0,940	9,86	1,90
337	5,03	4,99	0,935		1,87
336	5,05	4,99	0,950		1,90
335	5,04	4,96	0,930	9,69	1,88
334	5,05	4,99	0,925		1,85
333	5,05	4,95	0,930		1,88
332	5,04	5,00	0,950	9,82	1,90
331	5,03	4,97	0,937		1,89
330	5,04	4,98	0,940		1,89
329	5,05	4,96	0,924	9,59	1,86
328	5,03	4,98	0,935		1,88
327	5,04	4,98	0,939		1,89
326	5,04	4,97	0,936	9,74	1,88
325	5,03	4,98	0,940		1,89
324	5,05	5,00	0,940		1,88
323	5,04	4,97	0,935	9,73	1,88
322	5,04	4,95	0,930		1,88
321	5,03	4,99	0,942		1,89
320	5,05	4,96	0,940	9,76	1,90
319	5,03	4,99	0,945		1,89
318	5,05	4,96	0,950	9,86	1,92
317	5,04	4,95	0,942		1,90
316	5,03	4,98	0,945		1,90
315	5,04	4,94	0,935	9,79	1,89
314	5,03	4,95	0,922		1,86
313	5,05	4,97	0,940		1,89
312	5,04	4,99	0,943	9,77	1,89
311	5,03	4,99	0,937		1,88
310	5,04	4,98	0,939		1,89
309	5,05	4,96	0,937	9,73	1,89
308	5,04	4,99	0,939		1,88
307	5,05	4,95	0,939		1,88
306	5,03	4,97	0,970	9,82	1,89
305	5,04	4,98	0,944		1,90
304	5,05	4,99	0,950		1,90
303	5,04	4,98	0,945	9,81	1,90
302	5,04	5,00	0,953		1,91
301	5,05	5,00	0,967		1,93
300	5,04	4,98	0,935	9,71	1,88
299	5,03	4,98	0,942		1,89
298	5,05	4,96	0,937		1,89
297	5,04	4,97	0,925		1,86
296	5,04	5,02	0,941	9,69	1,87
295	5,05	4,97	0,936		1,88
294	5,03	4,94	0,919		1,86
293	5,04	4,98	0,938	9,74	1,88
292	5,04	4,98	0,942		1,89
291	5,03	4,99	0,948		1,90
290	5,03	5,01	0,931	9,65	1,86
Mittelwerte	5,040	4,975	0,9387	9,745	1,886
Summen		288,53	54,446		
Gesamtmessungen		289,31	54,40		

Tabelle 12: Liste der UO_2 - PuO_2 -Tabletten in Stab G 49
58 Tabletten aus Sintercharge 1

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm^3)	Lineare Dichte (g/cm)
115	5,03	5,02	0,960		1,91
114	5,04	4,95	0,943	9,85	1,91
113	5,04	5,00	0,951		1,90
112	5,03	5,03	0,956	9,87	1,90
111	5,04	5,01	0,951		1,90
110	5,04	5,00	0,959		1,92
109	5,05	5,00	0,950	9,79	1,90
108	5,05	4,99	0,957		1,92
107	5,04	5,01	0,950		1,90
106	5,05	4,96	0,945	9,81	1,91
105	5,04	5,00	0,946		1,89
104	5,03	4,99	0,943		1,89
103	5,04	5,00	0,942	9,74	1,88
102	5,05	5,04	0,960		1,90
101	5,05	5,02	0,958		1,91
100	5,05	5,01	0,961	9,88	1,92
99	5,04	5,00	0,949		1,90
98	5,03	5,05	0,961		1,90
97	5,03	5,00	0,947	9,83	1,89
96	5,04	5,02	0,966		1,92
95	5,05	5,01	0,968		1,93
94	5,05	4,99	0,956	9,87	1,92
93	5,03	5,03	0,960		1,91
92	5,04	5,00	0,961		1,92
91	5,04	5,05	0,961	9,84	1,90
90	5,04	5,00	0,946	9,78	1,89
89	5,05	5,02	0,946		1,88
88	5,05	4,98	0,950		1,91
87	5,03	4,99	0,937	9,75	1,88
86	5,04	5,00	0,952		1,90
85	5,05	5,02	0,960		1,91
84	5,04	5,00	0,956	9,89	1,91
83	5,04	5,00	0,947		1,89
82	5,03	5,03	0,956		1,90
81	5,04	5,00	0,949	9,81	1,90
80	5,04	4,99	0,940		1,88
79	5,05	4,96	0,941		1,90
78	5,05	5,00	0,950	9,79	1,90
77	5,05	5,04	0,958		1,90
76	5,04	4,89	0,938		1,88
75	5,05	5,00	0,960	9,89	1,92
74	5,05	4,97	0,942		1,90
73	5,04	4,95	0,946		1,91
72	5,04	4,99	0,941	9,75	1,89
71	5,05	4,99	0,956		1,92
70	5,04	5,02	0,952		1,90
69	5,04	4,99	0,942	9,76	1,89
68	5,05	4,97	0,932	9,66	1,88
67	5,04	5,02	0,974		1,94
66	5,05	5,04	0,976	9,97	1,94
65	5,04	5,00	0,943		1,89
64	5,05	5,01	0,950		1,90
63	5,05	5,04	0,963	9,84	1,91
62	5,04	5,01	0,958		1,91
61	5,03	5,01	0,965		1,93
60	5,04	5,03	0,965	9,92	1,92
59	5,04	5,00	0,945		1,89
60	5,03	5,00	0,962		1,92
Mittelwerte	5,042	5,004	0,9527	9,823	1,904
Summen		290,23	55,259		
Gesamtmessungen		290,96	55,50		

Anhang 2

Tabelle 13: Liste der UO₂-PuO₂-Tabletten in Stab G 51
57 Tabletten aus Sintercharge 1

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
57	5,05	4,98	0,936	9,68	1,88
56	5,05	5,02	0,960		1,91
55	5,05	4,98	0,956		1,92
54	5,03	5,01	0,947	9,81	1,89
53	5,04	5,01	0,945		1,89
52	5,05	4,98	0,937		1,88
51	5,05	5,02	0,954	9,79	1,90
50	5,04	4,97	0,928		1,87
49	5,03	4,98	0,943		1,89
48	5,03	5,00	0,945	9,81	1,89
47	5,05	5,00	0,959		1,92
46	5,04	5,04	0,955		1,89
45	5,04	5,00	0,962	9,95	1,92
44	5,05	5,02	0,955		1,90
43	5,05	5,10	1,000		1,96
42	5,05	5,05	0,974	9,93	1,93
41	5,05	5,08	0,989		1,95
40	5,05	5,06	0,980		1,94
39	5,05	5,06	0,975	9,92	1,93
38	5,05	5,05	0,987		1,95
37	5,05	5,05	0,982		1,94
36	5,05	5,07	0,987	10,03	1,95
35	5,05	5,06	0,984		1,94
34	5,05	5,07	0,991		1,95
33	5,05	5,04	0,971	9,92	1,93
32	5,05	5,05	0,975		1,93
31	5,05	5,12	1,005		1,96
30	5,05	5,02	0,976	10,01	1,94
29	5,05	5,08	0,990		1,95
28	5,05	5,00	0,967		1,93
27	5,05	5,02	0,977	10,02	1,95
26	5,05	5,05	0,984		1,95
25	5,05	5,03	0,962		1,91
24	5,05	5,08	0,994	10,07	1,96
23	5,05	5,03	0,976	9,99	1,94
22	5,05	5,13	1,002		1,95
21	5,05	5,04	0,976		1,94
20	5,05	5,05	0,985	10,05	1,95
19	5,05	5,10	1,001		1,96
18	5,05	5,03	0,966		1,92
17	5,05	5,06	0,984	10,02	1,94
16	5,05	5,05	0,968		1,92
15	5,05	5,07	0,982		1,94
14	5,05	5,03	0,962	9,82	1,91
13	5,05	5,10	1,001		1,96
12	5,05	5,13	0,996		1,94
11	5,05	5,06	0,991	10,09	1,96
10	5,05	5,06	0,983		1,94
9	5,05	5,12	0,998		1,95
8	5,05	5,06	0,976	9,93	1,93
7	5,05	5,11	0,993		1,94
6	5,05	5,07	0,979		1,93
5	5,05	5,07	0,985	10,01	1,94
4	5,05	5,11	1,000		1,95
3	5,05	5,07	0,980		1,93
2	5,05	5,11	0,994		1,94
1	5,05	5,02	0,971	9,96	1,93
Mittelwerte	5,048	5,050	0,9751	9,941	1,930
Summen		287,83	55,581		
Gesamtmessungen		288,74	55,90		

Tabelle 14: Liste der UO₂-PuO₂-Tabletten in Stab G 58
59 Tabletten aus Sintercharge 1^{*)}

Tabl. Nr.	Durchm. (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (g)	Materialdichte (g/cm ³)	Lineare Dichte (g/cm)
406	5,04	4,94	0,932		1,89
405	5,03	4,98	0,940		1,89
404	5,05	4,97	0,938	9,72	1,89
403	5,05	4,96	0,944		1,90
402	5,04	4,95	0,930		1,88
401	5,03	4,97	0,935	9,77	1,88
400	5,04	4,99	0,940		1,88
399	5,05	4,96	0,936		1,89
398	5,05	4,91	0,924	9,69	1,87
397	5,04	4,97	0,932		1,88
396	5,04	4,98	0,941		1,89
395	5,03	4,93	0,931	9,80	1,89
394	5,05	5,00	0,951		1,90
393	5,04	5,00	0,940		1,88
392	5,05	4,98	0,932	9,64	1,87
391	5,04	4,92	0,925		1,88
390	5,05	4,99	0,942		1,89
389	5,04	4,98	0,945	9,81	1,90
388	5,05	4,99	0,934		1,87
387	5,03	5,00	0,955	9,91	1,91
386	5,04	4,97	0,938		1,89
385	5,04	4,98	0,934		1,88
384	5,05	4,95	0,933	9,71	1,88
383	5,04	5,00	0,942		1,88
382	5,03	4,97	0,935		1,88
381	5,05	4,97	0,932	9,66	1,88
380	5,04	4,99	0,940		1,88
379	5,04	4,98	0,946		1,90
378	5,04	5,00	0,945	9,77	1,89
377	5,03	5,00	0,950		1,90
376	5,05	4,96	0,926		1,87
375	5,04	4,98	0,930	9,66	1,87
374	5,03	4,99	0,935		1,87
373	5,05	4,99	0,937		1,88
372	5,05	4,97	0,931	9,65	1,87
371	5,04	4,98	0,939		1,89
370	5,05	4,98	0,927		1,86
369	5,04	4,98	0,932	9,68	1,87
368	5,04	5,00	0,943		1,89
367	5,05	5,00	0,940		1,88
366	5,03	5,00	0,953	9,89	1,91
365	5,05	5,00	0,943	9,71	1,89
364	5,04	5,12	1,001		1,96
363	5,05	4,98	0,935		1,88
362	5,04	4,97	0,933	9,71	1,88
361	5,03	4,97	0,950		1,91
360	5,03	5,00	0,947		1,89
359	5,05	4,98	0,932	9,64	1,87
358	5,05	5,00	0,945		1,89
357	5,03	4,99	0,944		1,89
356	5,05	5,00	0,948	9,76	1,90
355	5,04	4,97	0,933		1,88
354	5,03	4,97	0,940		1,89
353	5,05	4,96	0,929	9,65	1,87
352	5,05	4,99	0,940		1,88
351	5,04	4,94	0,925		1,87
350	5,03	5,00	0,948	9,84	1,90
349	5,04	4,99	0,948		1,90
348	5,04	4,97	0,933		1,88
Mittelwerte	5,042	4,980	0,9391	9,734	1,886
Summen		293,81	55,409		
Gesamtmessungen		289,50	54,50		

^{*)} Hinweis auf Einfüllfehler:
siehe Kapitel 7.9.7

Anhang 3: Datenübersicht für die fertigen Brennstäbe

Position 1	Stab-Bezeichnung	G 2	G 4	G 6	G 7	G 8	G 9	G 12	G 14	G 16	G 17	G 18	G 19	G 21	G 24	G 33	G 36	G 39	G 40	G 41	G 43	G 46	G 49	G 50	G 51	G 52	G 56	G 57	G 58	G 59	G 61		
2	Hüllmaterial Werkstoff-Nr. 1.	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4988	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961	4961		
4	Ultraschall-Wanddicke (mm) max. nominal 0,38 mm min. spez.: minimal 0,34 mm	0,382	0,390	0,386	0,384	0,380	0,387	0,385	0,385	0,388	0,375	0,375	0,389	0,378	0,384	-	0,360	0,375	0,378	0,349	0,386	0,404	0,385	0,382	0,380	0,372	0,400	0,360	0,371	0,400	0,395		
		0,358	0,374	0,367	0,376	0,370	0,360	0,370	0,375	0,368	0,360	0,368	0,370	0,362	0,360	-	0,338	0,355	0,350	0,336	0,350	0,380	0,378	0,335	0,358	0,355	0,380	0,341	0,350	0,352	0,350		
5	Innendurchmesser (mm) max. spez.: 5,24 ± 0,04 mm min.	5,235	5,250	5,248	5,251	5,251	5,251	5,248	5,247	5,245	5,248	5,253	5,251	5,248	5,246	-	5,272	5,251	5,249	5,275	5,260	5,250	5,245	5,272	5,254	5,246	5,244	5,258	5,273	5,260	5,245		
		5,225	5,241	5,241	5,243	5,240	5,240	5,242	5,241	5,238	5,242	5,248	5,238	5,244	5,239	-	5,263	5,244	5,235	5,267	5,248	5,244	5,236	5,261	5,237	5,242	5,235	5,250	5,261	5,249	5,235		
6	Außendurchmesser (mm) max. spez.: 6,00 + 0,025 mm - 0,050 mm min.	5,984	6,015	6,015	6,009	6,013	6,003	6,005	6,005	6,006	6,015	6,007	6,009	6,004	6,005	-	5,985	5,997	5,997	5,985	5,973	6,012	6,016	5,983	5,998	6,017	6,014	5,977	5,983	5,981	5,996		
		5,963	5,998	5,999	5,998	5,996	5,993	5,992	5,996	5,994	5,996	5,999	5,994	5,994	5,994	-	5,967	5,988	5,977	5,986	5,960	5,995	6,000	5,968	5,985	5,984	5,980	5,980	5,968	5,970	5,968		
10	Tabletten vermessen?	ja	nein	nein	ja	nein	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	nein	nein	nein	ja	nein	ja	ja	ja	nein	ja	nein	ja	nein	nein	nein	ja	nein	nein		
11	Gewicht der Brennstoffsäule (g) spez. 54,88 ± 1,64 g	55,90	55,20	55,20	55,90	55,30	55,70	54,50	55,90	56,20	55,30	55,80	56,40	55,50	54,20	55,30	55,30	54,60	54,30	55,10	54,40	54,70	55,50	54,30	55,90	54,40	54,60	54,80	54,50	54,90	54,40		
12	Gewicht der Brutstoffsäule (g)	21,70	21,80	20,60	21,60	21,70	21,60	21,80	21,60	21,80	21,60	21,60	21,50	21,60	21,70	21,70	21,60	21,70	21,60	21,70	21,80	21,60	21,70	21,60	21,60	21,80	21,80	21,60	21,70	21,70	21,70		
13	Länge der Brennstoffsäule (mm) spez. 290 ± 3 mm	287,07	289,53	291,86	290,00	289,70	289,65	287,40	290,00	287,43	289,70	290,95	288,07	289,66	287,28	289,54	290,97	288,62	289,20	290,74	289,31	289,00	290,96	287,40	288,74	287,50	287,56	289,04	289,50	289,30	287,30		
14	Länge der Brenn- und Brutstoff-säule, spez. 390 ± 3 mm	388,89	391,60	388,86	391,75	391,51	391,15	389,56	391,46	389,43	391,35	392,30	389,47	391,36	388,99	391,40	392,77	390,38	391,04	392,60	391,51	390,50	392,88	389,33	390,47	389,25	389,38	390,54	391,45	390,94	389,00		
20	Stablänge spez.: 509 ± 1 mm (mm)	508,9	508,8	508,8	508,8	508,9	508,8	508,8	508,9	508,8	508,9	508,7	508,8	508,9	508,8	508,9	508,7	508,9	508,9	508,8	508,9	508,9	508,9	509,0	508,9	508,9	509,0	508,9	509,0	508,9	508,8		
21	Stabgewicht (g)	110,4	110,6	109,7	111,0	110,8	111,0	110,0	111,5	111,7	110,5	111,1	111,0	110,7	109,6	110,7	109,0	109,7	109,3	108,7	108,3	110,1	111,0	108,1	110,6	109,4	110,0	108,8	108,4	109,0	109,7		
25	Durchmesser des unteren Stopfens (mm)	Azmut 0°	6,005	5,973	5,982	6,014	5,998	6,012	5,984	6,053	6,025	6,020	6,040	6,071	5,988	6,018	5,982	5,997	5,995	5,986	5,986	6,000	6,031	6,030	5,976	5,992	6,013	6,007	5,990	5,990	6,000	6,005	
		90°	6,014	5,973	5,985	6,017	6,019	6,031	6,000	5,991	6,017	6,018	6,045	6,064	5,999	6,006	5,973	5,969	6,001	5,988	5,985	6,004	6,011	5,989	5,978	5,992	6,012	6,011	5,992	6,013	6,015	5,998	
26	Durchmesser der unteren Schweißnaht (mm)	0°	6,052	6,074	6,081	6,076	6,081	6,065	6,087	6,088	6,087	6,092	6,105	6,105	6,100	6,084	6,062	6,047	6,066	6,027	6,042	6,052	6,068	6,088	6,062	6,074	6,081	6,067	6,045	6,079	6,072	6,053	
		60°	6,058	6,064	6,072	6,087	6,077	6,096	6,085	6,089	6,077	6,082	6,098	6,095	6,095	6,071	6,069	6,056	6,047	6,047	6,038	6,071	6,011	6,012	6,076	6,102	6,093	6,079	6,046	6,068	6,084	6,074	
		120°	6,051	6,065	6,080	6,080	6,068	6,066	6,078	6,090	6,078	6,092	6,092	6,104	6,093	6,110	6,073	6,035	6,071	6,036	6,045	6,060	6,135	6,085	6,083	6,096	6,100	6,072	6,063	6,062	6,077	6,063	
		max.	6,10	6,13	6,11	6,13	6,12	6,10	6,08	6,13	6,10	6,12	6,14	6,13	6,13	6,12	6,08	6,09	6,11	6,06	6,07	6,13	6,15	6,12	6,11	6,15	6,15	6,11	6,12	6,19	6,110	6,090	
27	Durchmesser des oberen Stopfens (mm)	0°	5,999	5,970	6,015	5,982	5,983	6,000	5,986	5,992	5,980	5,992	5,968	5,983	5,983	6,010	5,990	6,005	5,966	5,989	5,977	5,995	6,008	5,994	6,004	5,966	6,020	5,980	5,989	5,990	5,993	5,998	
		90°	5,999	5,976	6,018	5,988	5,985	6,000	5,987	5,992	5,984	5,992	5,970	5,990	5,981	5,990	5,993	6,006	6,005	5,993	5,979	5,995	6,000	5,995	6,003	5,966	6,017	5,990	5,992	5,996	5,993	6,001	
28	Durchmesser der oberen Schweißnaht (mm)	0°	6,049	6,071	6,211	6,071	6,077	6,070	6,070	6,080	6,110	6,060	6,100	6,058	6,072	6,108	6,078	6,062	6,150	6,116	6,060	6,108	6,115	6,080	6,066	6,127	6,145	6,080	6,053	6,035	6,094	6,074	
		60°	6,052	6,061	6,200	6,081	6,067	6,089	6,070	6,065	6,121	6,067	6,104	6,056	6,071	6,081	6,081	6,080	6,180	6,142	6,047	6,125	6,104	6,103	6,053	6,115	6,121	6,074	6,064	6,078	6,140	6,104	
		120°	6,059	6,060	6,227	6,074	6,075	6,072	6,067	6,074	6,121	6,080	6,105	6,057	6,073	6,071	6,089	6,076	6,160	6,104	6,067	6,143	6,084	6,082	6,073	6,118	6,128	6,090	6,053	6,060	6,140	6,101	
29	Durchmesser des Hüllrohres bei Azmut 0° in Abständen a von der unteren Schweißnaht (mm)	a = 5 cm	5,966	5,994	5,993	5,990	5,997	5,987	6,007	5,992	5,991	5,990	5,996	5,993	5,993	5,993	5,994	5,964	5,980	5,980	5,964	5,955	6,000	5,995	5,966	5,980	5,986	5,994	5,957	5,967	5,959	5,975	
		10 cm	5,966	5,994	5,993	5,990	5,995	6,010	5,993	5,993	5,992	5,989	5,945	5,989	5,995	5,990	5,993	5,966	5,984	5,976	5,967	5,956	5,996	5,996	5,967	5,980	5,985	5,993	5,959	5,965	5,960	5,981	
		15 cm	5,967	5,993	5,991	5,990	5,992	5,992	5,991	5,992	5,992	5,991	5,997	5,991	5,994	5,990	5,993	5,960	5,985	5,975	5,962	5,956	5,996	5,997	5,965	5,975	5,984	5,990	5,962	5,964	5,960	5,978	
		20 cm	5,960	5,993	5,995	5,995	5,991	5,990	5,992	5,993	5,994	5,992	5,994	5,988	5,992	5,990	5,993	5,965	5,983	5,976	5,964	5,959	5,995	5,994	5,962	5,980	5,984	5,992	5,961	5,962	5,962	5,977	
		25 cm	5,965	5,995	5,993	5,994	5,992	5,991	5,992	5,992	5,992	5,992	5,997	5,991	5,993	5,991	5,993	5,961	5,983	5,975	5,965	5,955	5,996	6,000	5,965	5,983	5,985	5,991	5,960	5,965	5,962	5,979	
		30 cm	5,965	5,993	5,991	5,995	5,994	5,990	5,993	5,993	5,990	5,993	5,995	5,991	5,993	5,991	5,995	5,964	5,984	5,973	5,964	5,955	5,995	5,996	6,000	5,965	5,983	5,985	5,991	5,964	5,963	5,959	5,979
		35 cm	5,964	5,995	5,993	5,990	5,991	5,985	5,992	5,992	5,993	5,990	5,995	5,992	5,993	5,991	5,993	5,965	5,984	5,975	5,966	5,956	5,993	5,996	5,996	5,962	5,980	5,981	5,991	5,960	5,967	5,957	5,979
		40 cm	5,960	5,994	5,992	5,993	5,994	5,988	5,991	5,992	5,992	5,990	5,995	5,989	5,988	5,989	5,992	5,966	5,985	5,974	5,967	5,956	5,996	5,996	5,996	5,965	5,984	5,984	5,990	5,960	5,965	5,960	5,979
45 cm	5,965	5,997	5,990	5,994	5,996	5,985	5,995	5,991	5,992	5,993	5,896	5,992	5,993	5,990	5,996	5,964	5,980	5,977	5,963	5,956</													

Stabbegleitkarte für den

Brennstab G 2

The GfK - BN Dounreay Bundle Irradiation

Pin Identification card

(This card has to be issued for each pin delivered by the manufacturer.)

1. Pin-number ----- 26

(This number has to be applied to the flat-face of the first end cap not bearing the azimuthal orientation mark. The second flat-face shall bear G for Germany resp. B for Belgium.)

2. Material of the tube and of the end caps ----- 4988

3. Number of tube as delivered by Siemens ----- 26 1/1d

4. Results of US-test:

Wall thickness:

specified nominal 0,38 mm
 minimum 0,34 mm

measured maximum mm ----- 0,382
 minimum mm ----- 0,358

5. Result of I.D.test:

specified: 5,24 ± 0,04 mm

measured maximum mm ----- 5,235
 minimum mm ----- 5,225

maximum ovality of I.D. μm -----

6. Result of O.D.test:

specified 6,00 + 0,025
 - 0,050

measured maximum mm ----- 5,984
 minimum mm ----- 5,969

7. Number of the weld of the first end cap
within the series of first end cap weldings 44

8. N^o of X-ray pictures showing the weld together with DIN-Steg 10 ISO 16 and the BN-standard defects and at

a) azimuth 0° AA2/1A/2

b) azimuth 60° AA2/1B/2

c) azimuth 120° AA2/1C/2

9. Leak test of first end cap (torr l/sec) $< 1 \times 10^{-9}$

10. Identification numbers of the fuel pellets used Batch II

801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, =

813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, =

825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, =

837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, =

849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, . . . 57

(These numbers have to be given only if the stack contains measured pellets. The identification numbers of these pellets have to be enlisted in the at random sequence as they form the fuel stack. The list of numbers has to start with the pellet nearest the first end cap and ends with the pellet nearest to the blanket.)

11. Weight of fuel stack

specified: $54,88 \pm 1,64$ g measured 55,90

12. Weight of blanket stack, measured 21,70

13. Length of fuel stack
specified 290 ± 3 mm, measured mm - - - - 287,07
14. Length of fuel and blanket stack
specified 390 ± 3 mm, measured mm - - - - 388,89
15. Length of open sheath-end after filling
of fuel and blanket mm - - - - 97,5
16. Uncompressed length of spring mm - - - - 105
17. Number of the weld of the second end cap
within the series of the second end cap - - - - 37
weldings
18. N^o of X-ray pictures showing the second
weld together with DIN-Steg 10 ISO 16 and
the BN-standard defects
- at a) azimuth 0° - - - - - 2/4/A
- b) azimuth 60° - - - - - 2/4/B
- c) azimuth 120° - - - - - 2/4/C
19. Result of leak test [torr l/sec] - - 4×10^{-9}
20. Length of total pin mm - - - - 508,9
21. Weight of completed pin g - - - - 110,4
22. N^o of X-ray picture of the total pin, showing
the correct position of the fuel, the position
of the radon monitor and spring compression 3/4
23. N^o of Y-autoradiography for BN-pin - - - - X

24. Contamination of the completed pin

α	dec/ sec ^{mm} ^{mm} ^{mm} -----	422
β	dec/sec mm ² -----	x

25. Diameter measurement of the lower end cap

a)	at azimuth 0° -----	6,005
b)	at azimuth 90° -----	6,014

26. Diameter of the lower weld

a)	at azimuth 0° -----	6,052
b)	at azimuth 60° -----	6,058
c)	at azimuth 120° -----	6,051
d)	max ϕ -----	6,70

27. Diameter of the upper end cap

a)	at azimuth 0° -----	5,999
b)	at azimuth 90° -----	5,999

28. Diameter of the upper weld

a)	at azimuth 0° -----	6,049
b)	at azimuth 60° -----	6,052
c)	at azimuth 120° -----	6,059

29. Diameter of the tube at azimuth zero

at 5 cm	distance from lower weld	-----	5,966
at 10 cm	" " "	-----	5,966
at 15 cm	" " "	-----	5,967
at 20 cm	" " "	-----	5,960

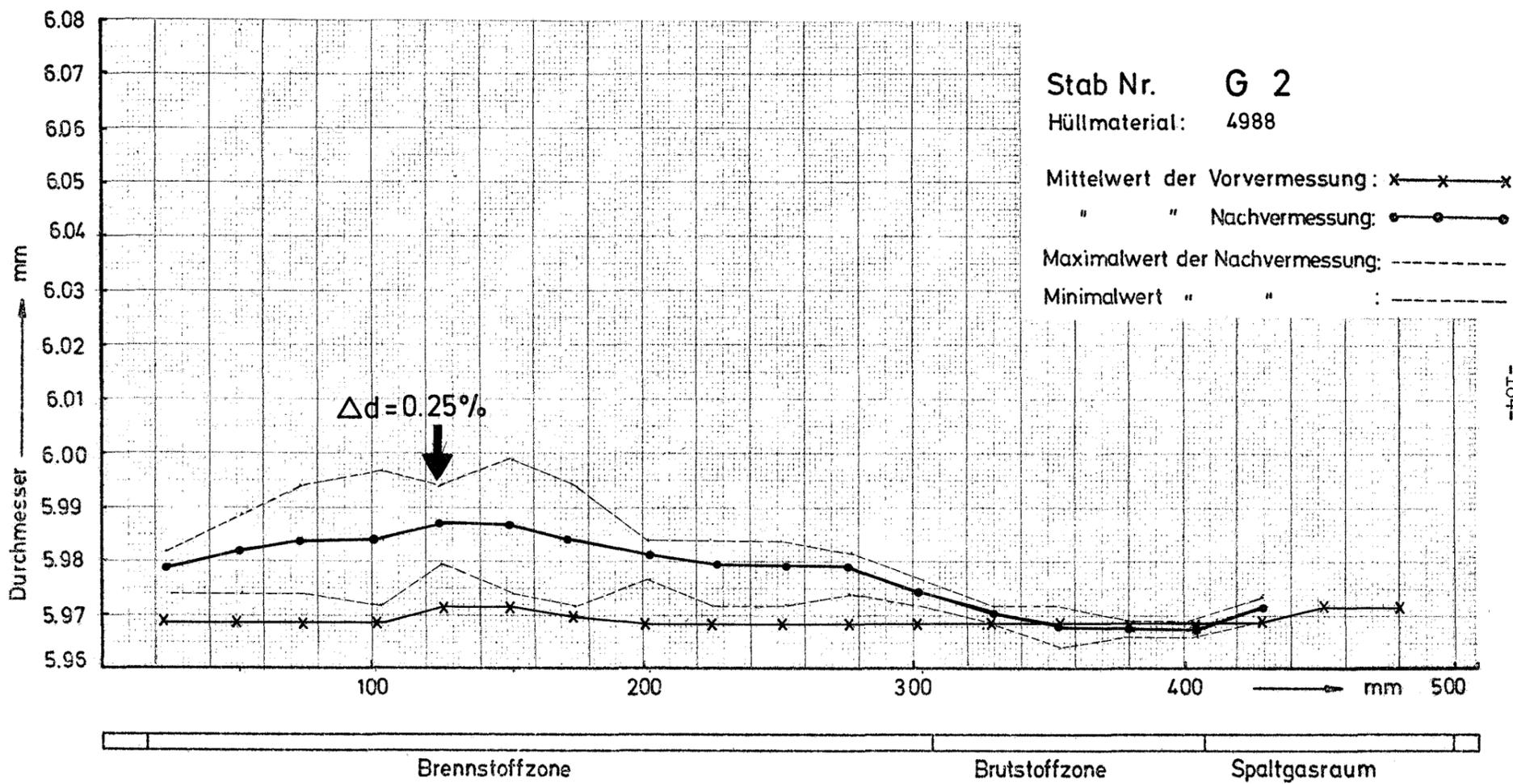
at 25 cm distance from lower weld	---				5,965
at 30 cm " " "	---				5,965
at 35 cm " " "	---				5,964
at 40 cm " " "	---				5,960
at 45 cm " " "	---				5,965
at 50 cm " " "	---				X
at 55 cm " " "	---				X
30. Number of profilogram	---				62
31. Evaluation of profilogram					
a) O.D. average	mm	---			5,972
maximum	mm	---			5,987
minimum *	mm	---			5,900
b) Maximum local ovality	μm	---			OK
c) Maximum local bowing	μm/10 cm	---			<50

* Concession granted

A n h a n g 5

Diagramme für die Stabdurchmesser

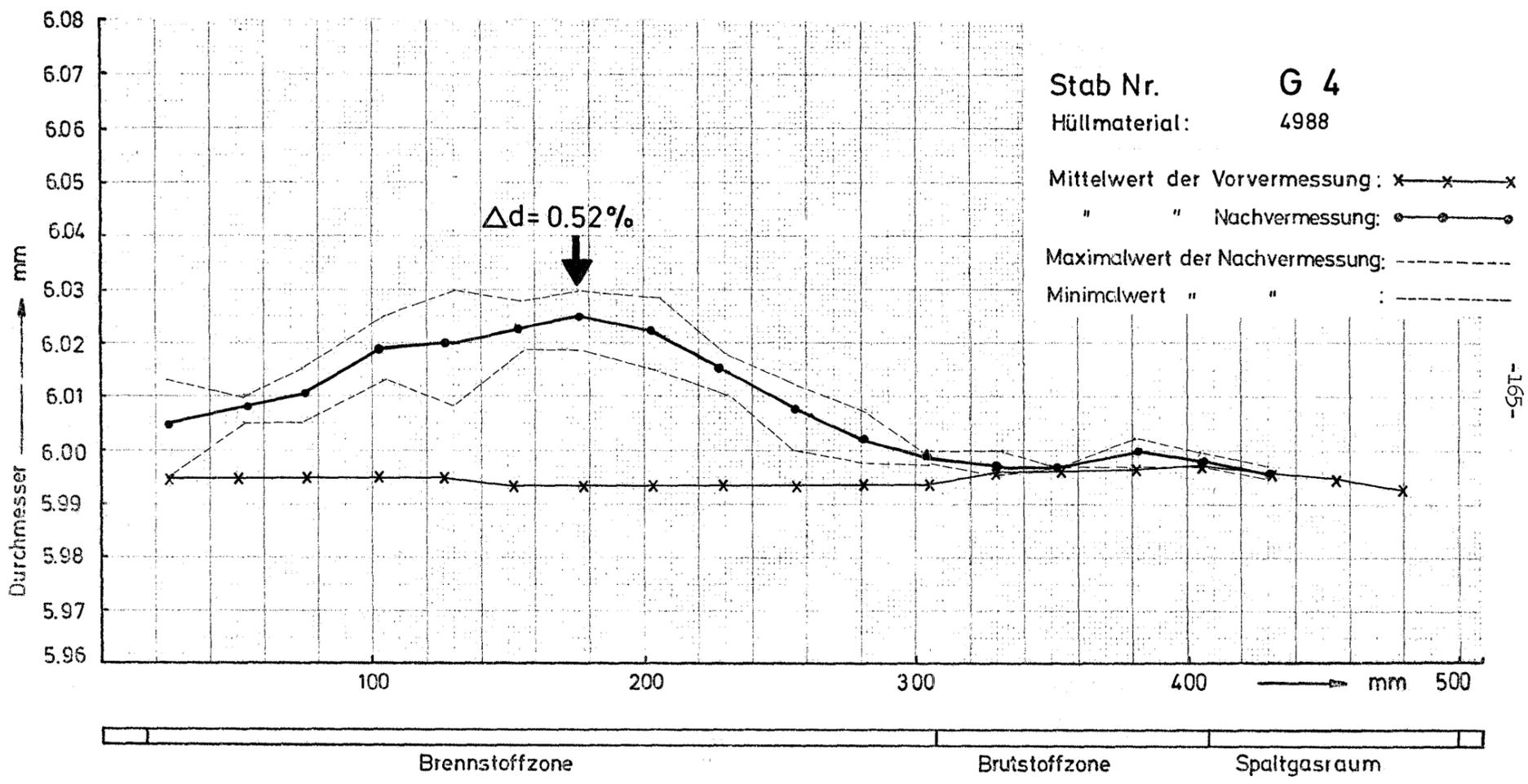
Stab-Nr. G 2
G 4
G 6
G 7
G 8
G 9
G 12
G 14
G 16
G 17
G 19
G 21
G 24
G 36
G 39
G 40
G 41
G 43
G 49
G 50
G 56
G 57
G 61



-164-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

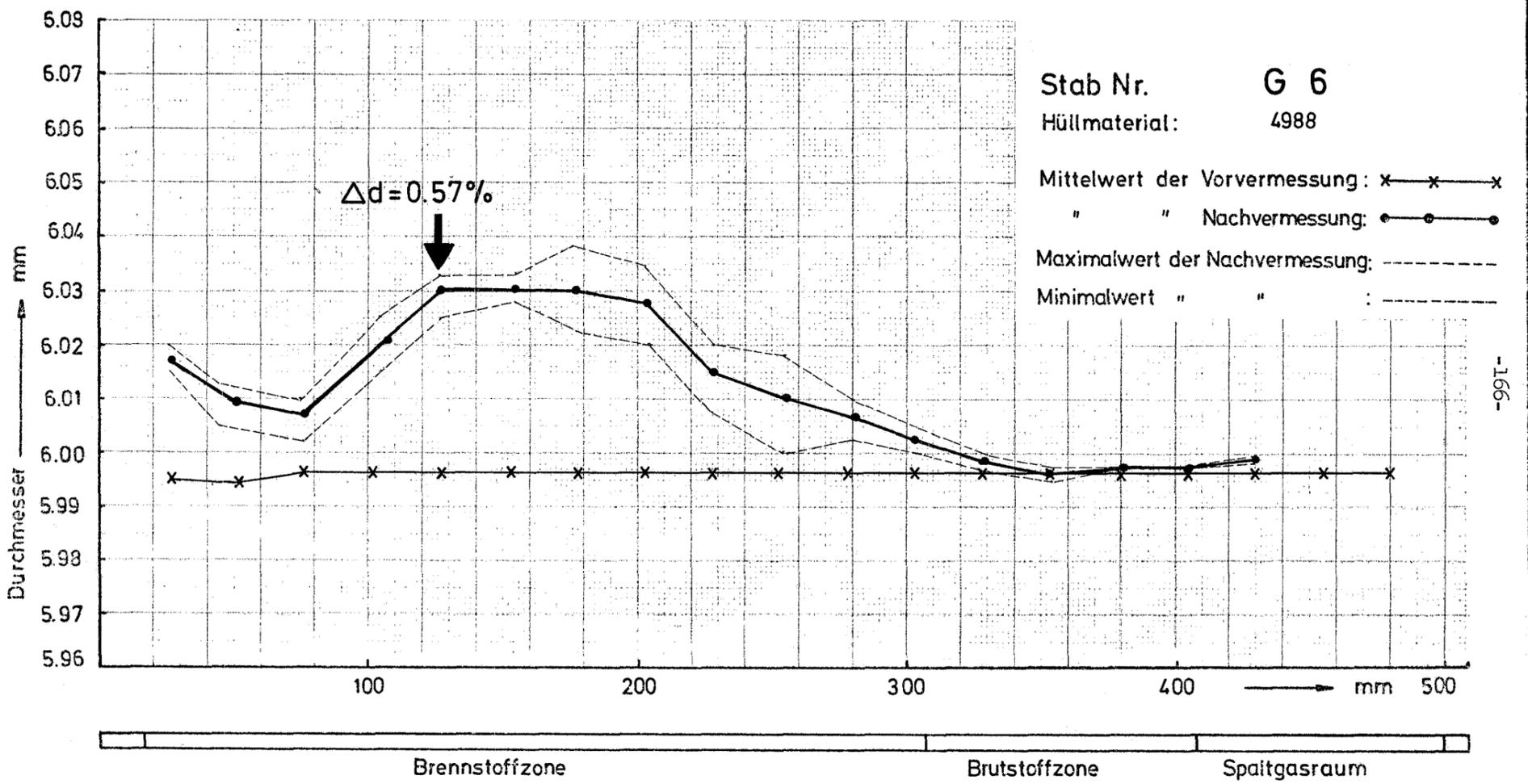
Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



-165-

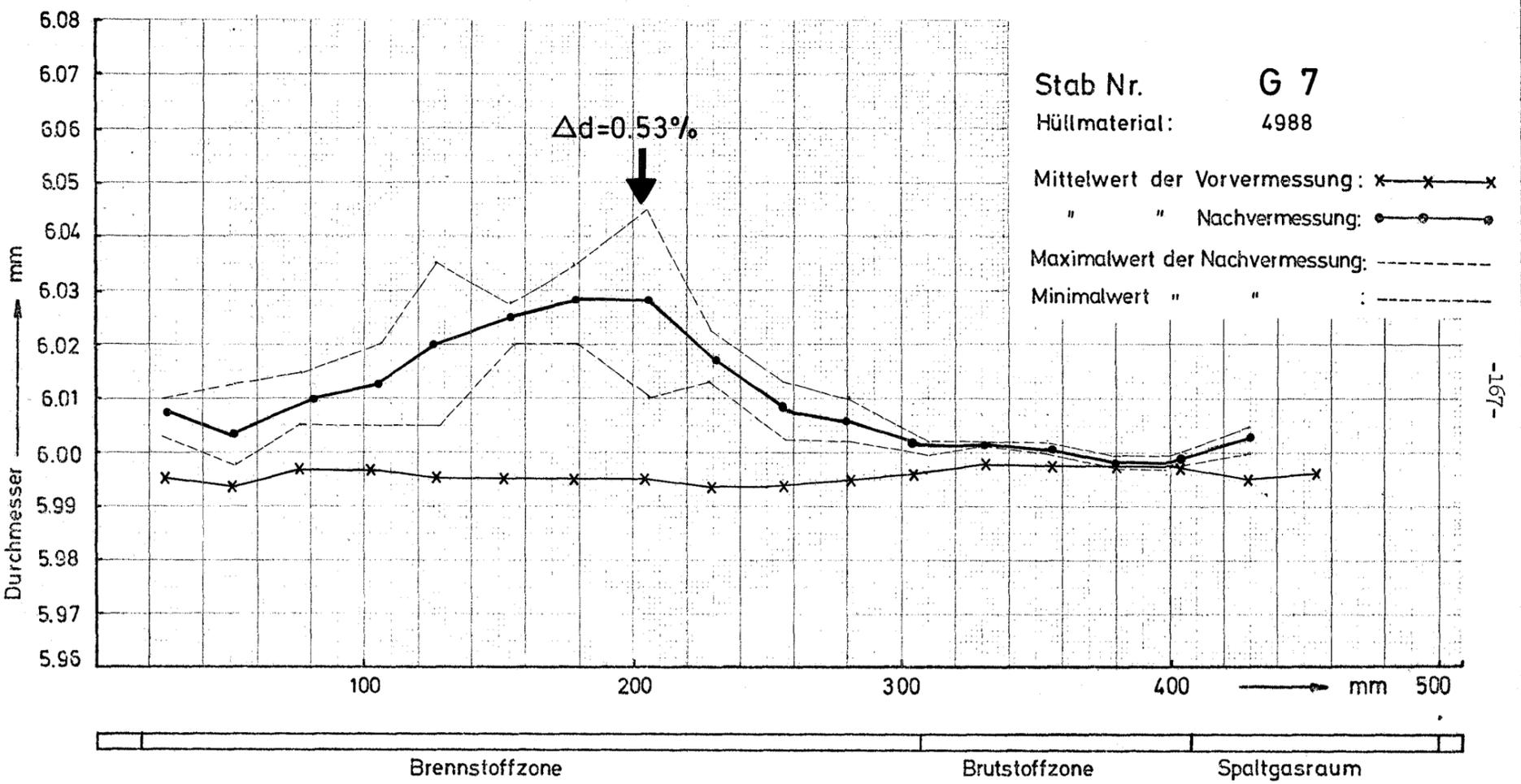
GfK Karlsruhe
 IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
 1. Vermessung des Stabdurchmessers



GfK Karlsruhe
IMF/LB

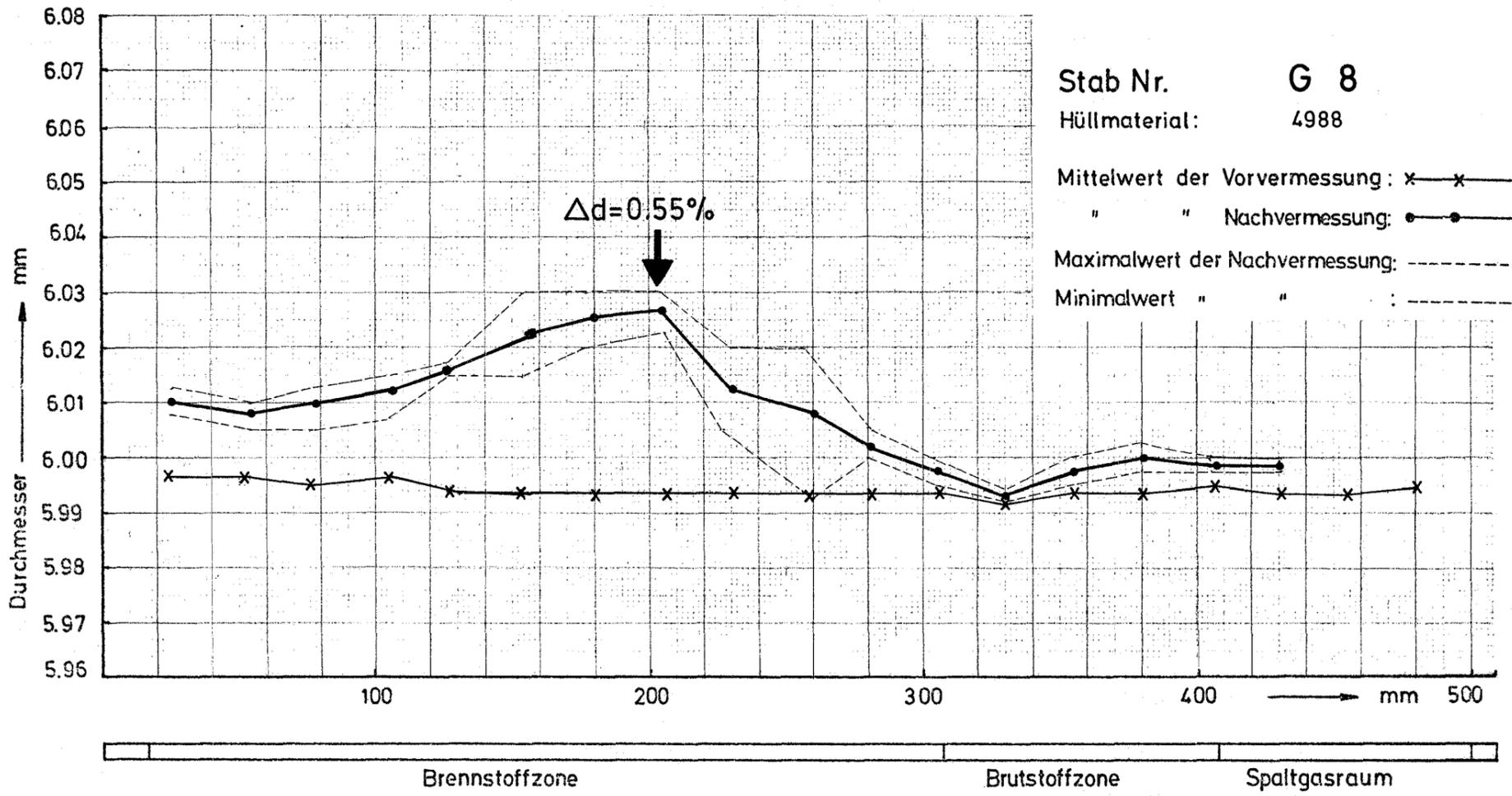
Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



-167-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

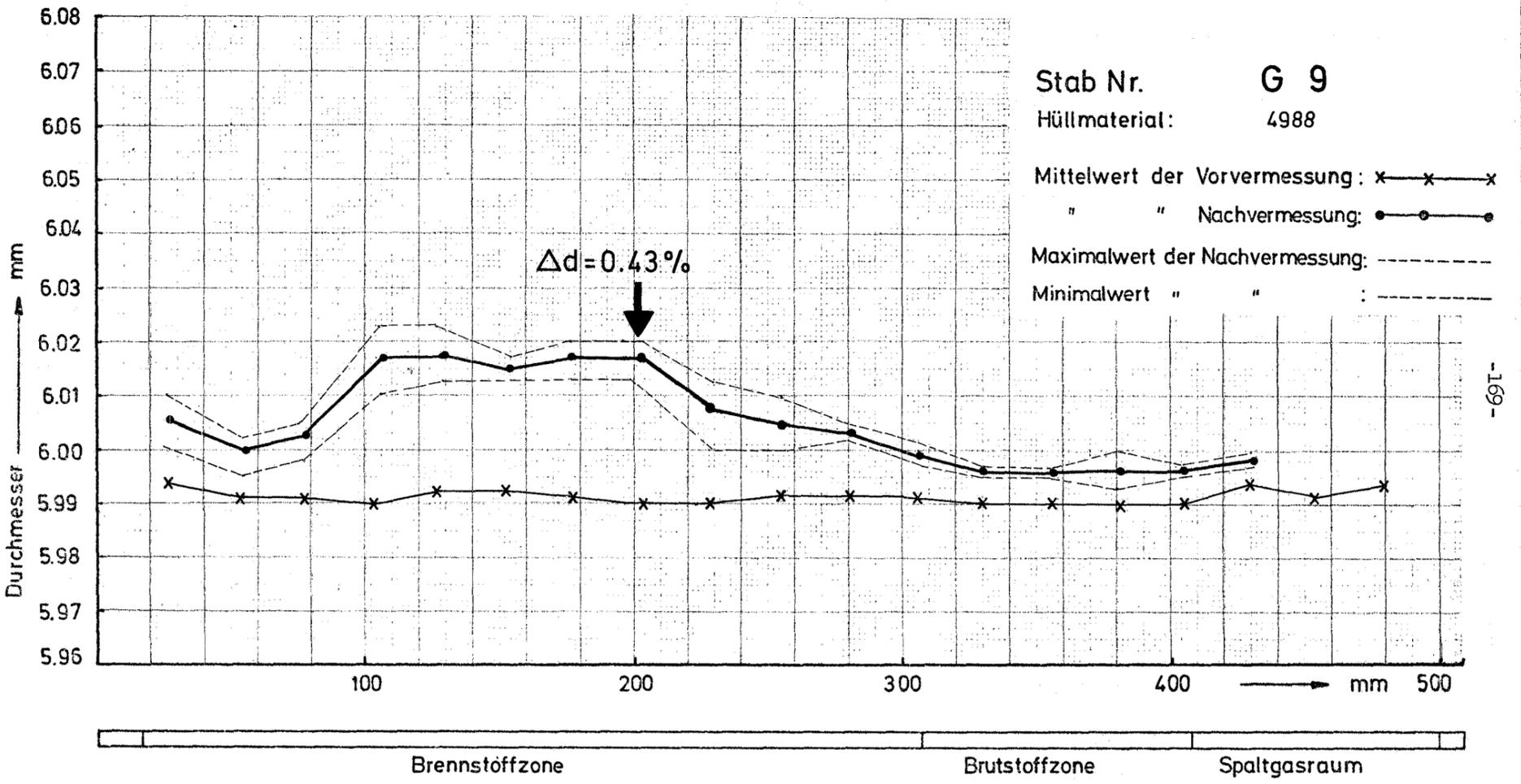
Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



-168-

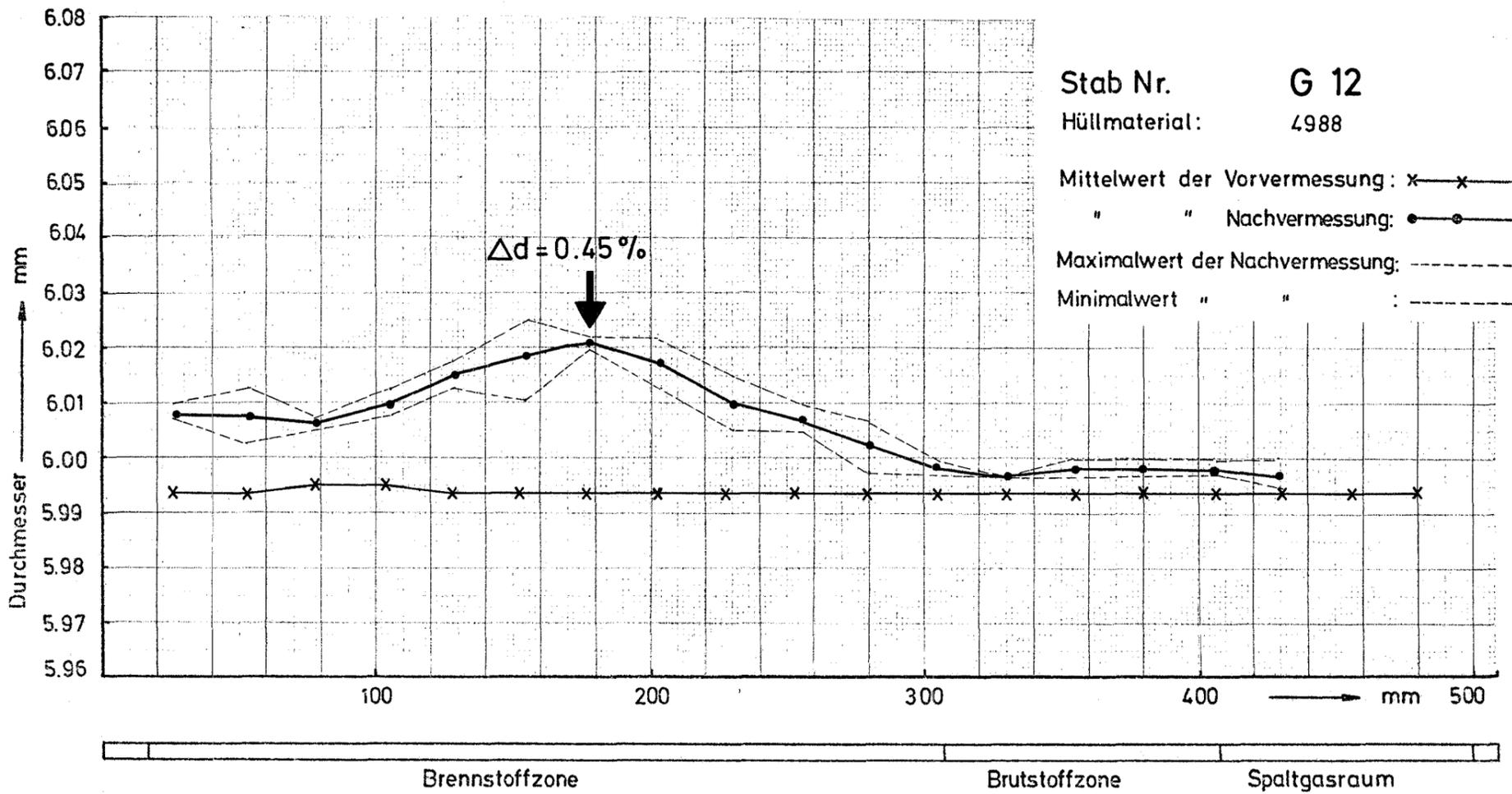
GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



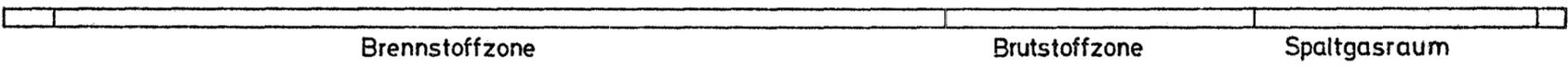
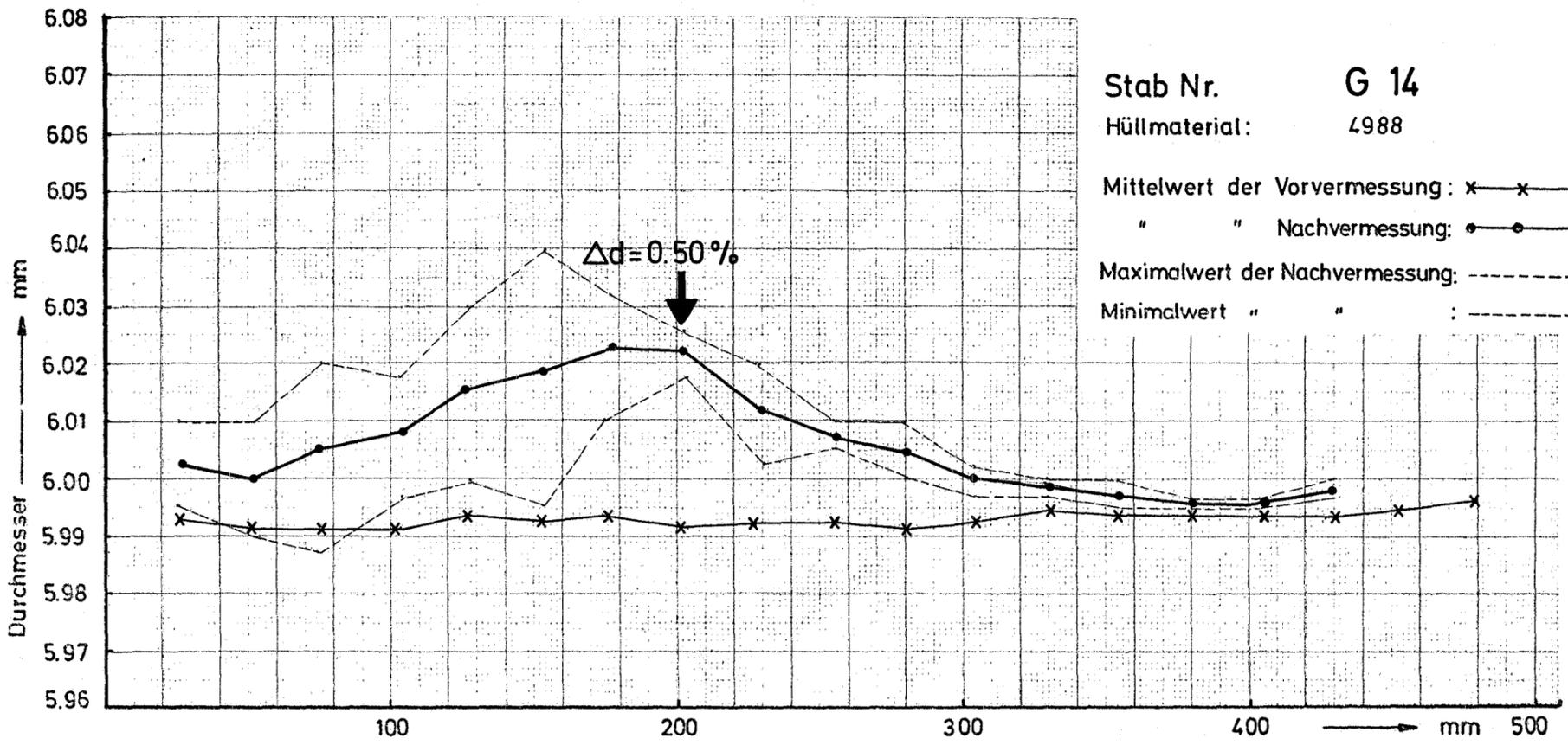
GfK Karlsruhe
 IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
 1. Vermessung des Stabdurchmessers



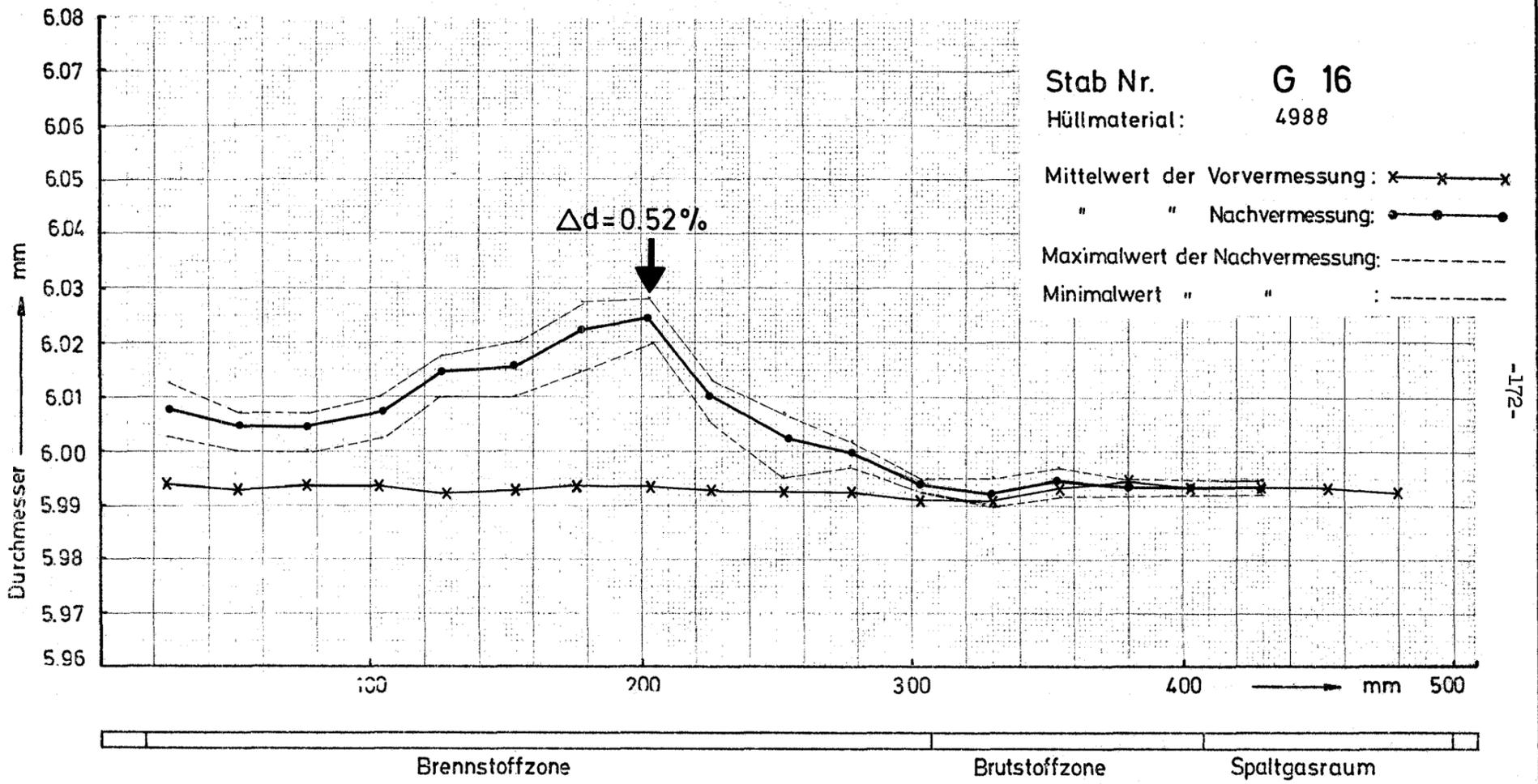
GfK Karlsruhe
 IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
 1. Vermessung des Stabdurchmessers



-171-

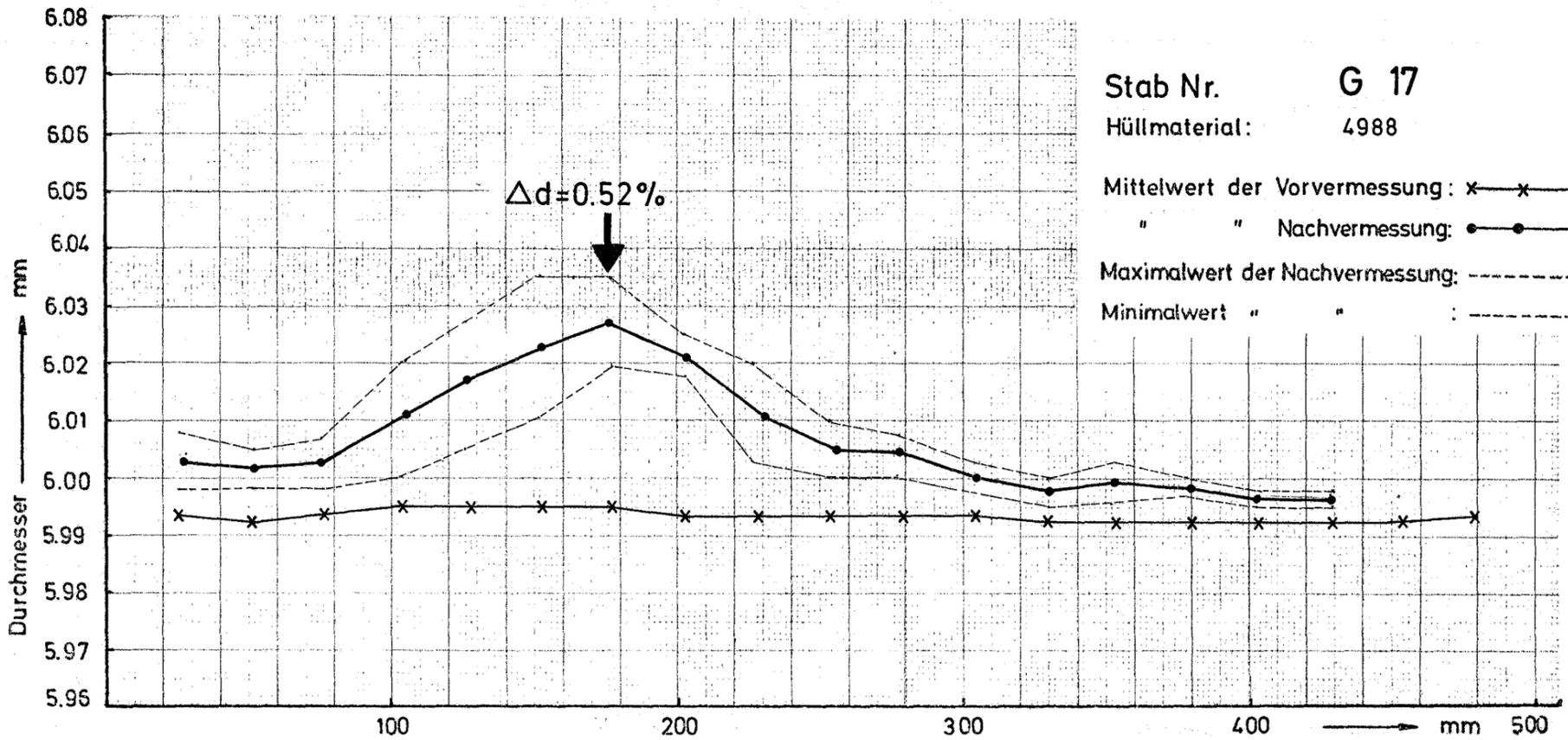
GfK Karlsruhe IMF/LB	Dounreay-Bündel DFR - 350 1. Vermessung des Stabdurchmessers	
-------------------------	--	--



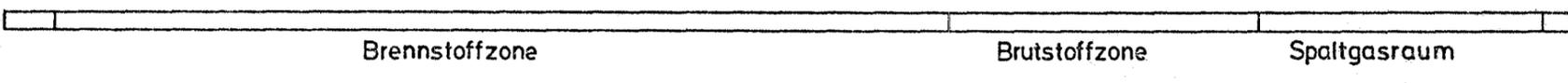
-172-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers

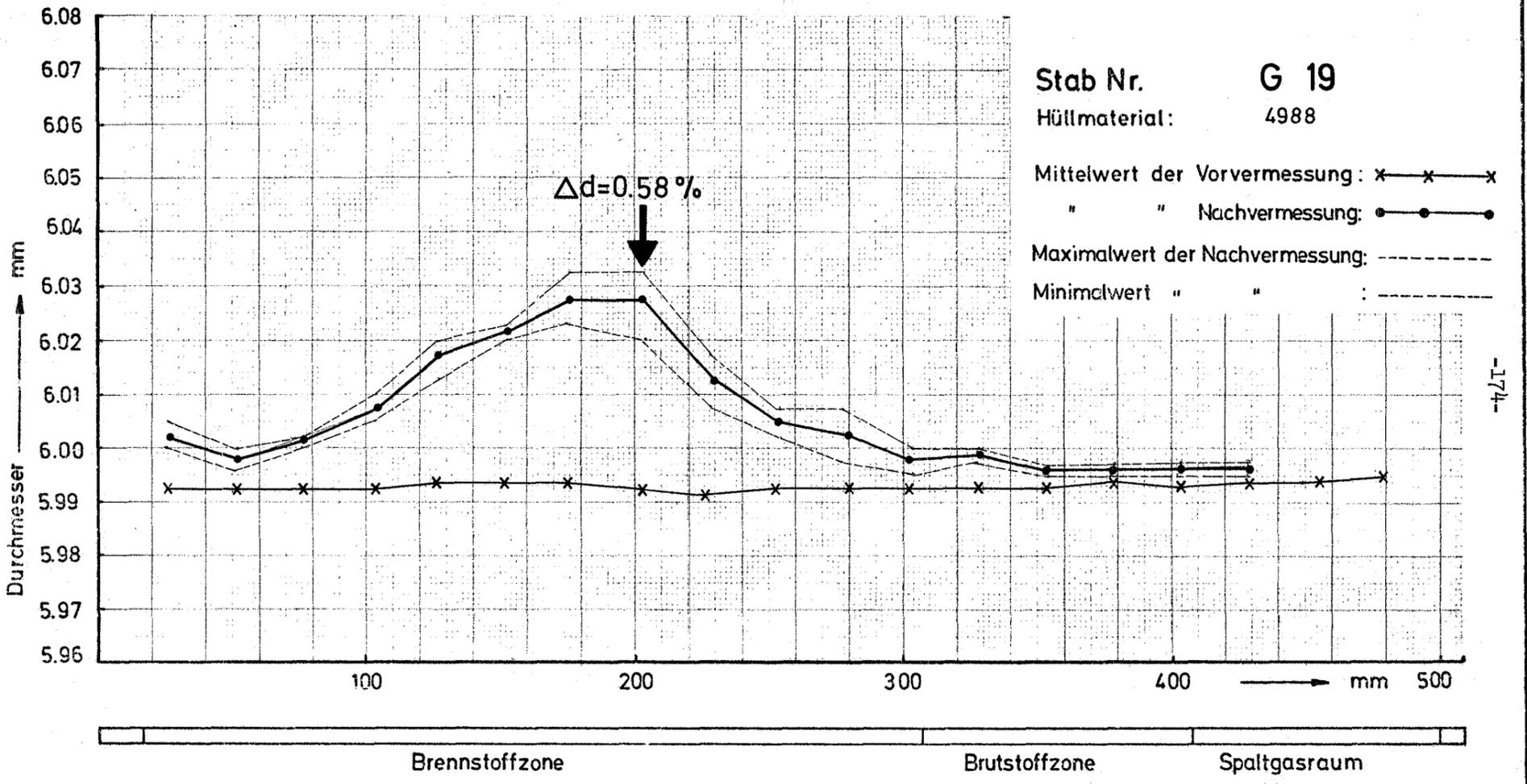


-173-



GfK Karlsruhe
 IMF/LB

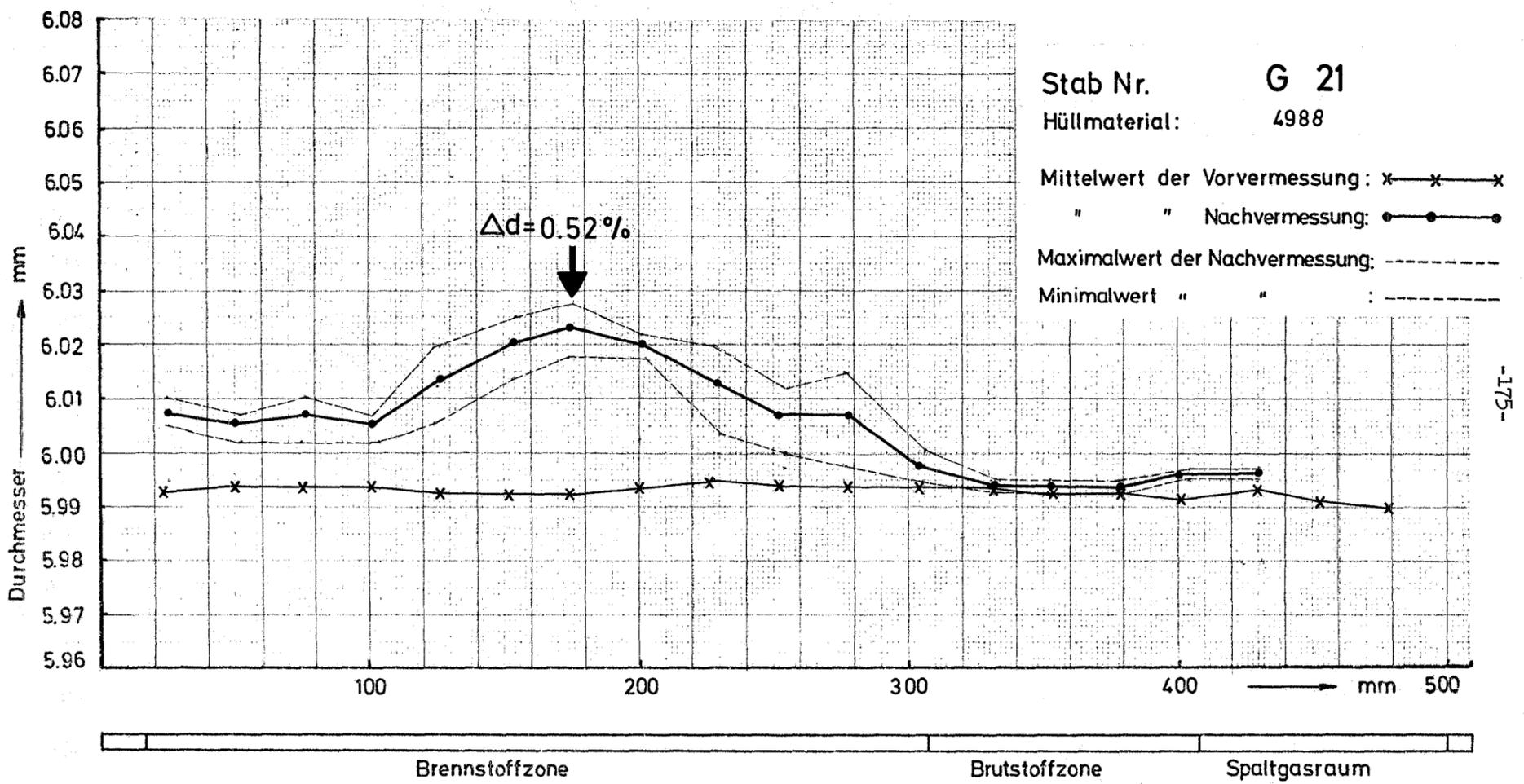
Dounreay-Bündel DFR - 350
 1. Vermessung des Stabdurchmessers



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers

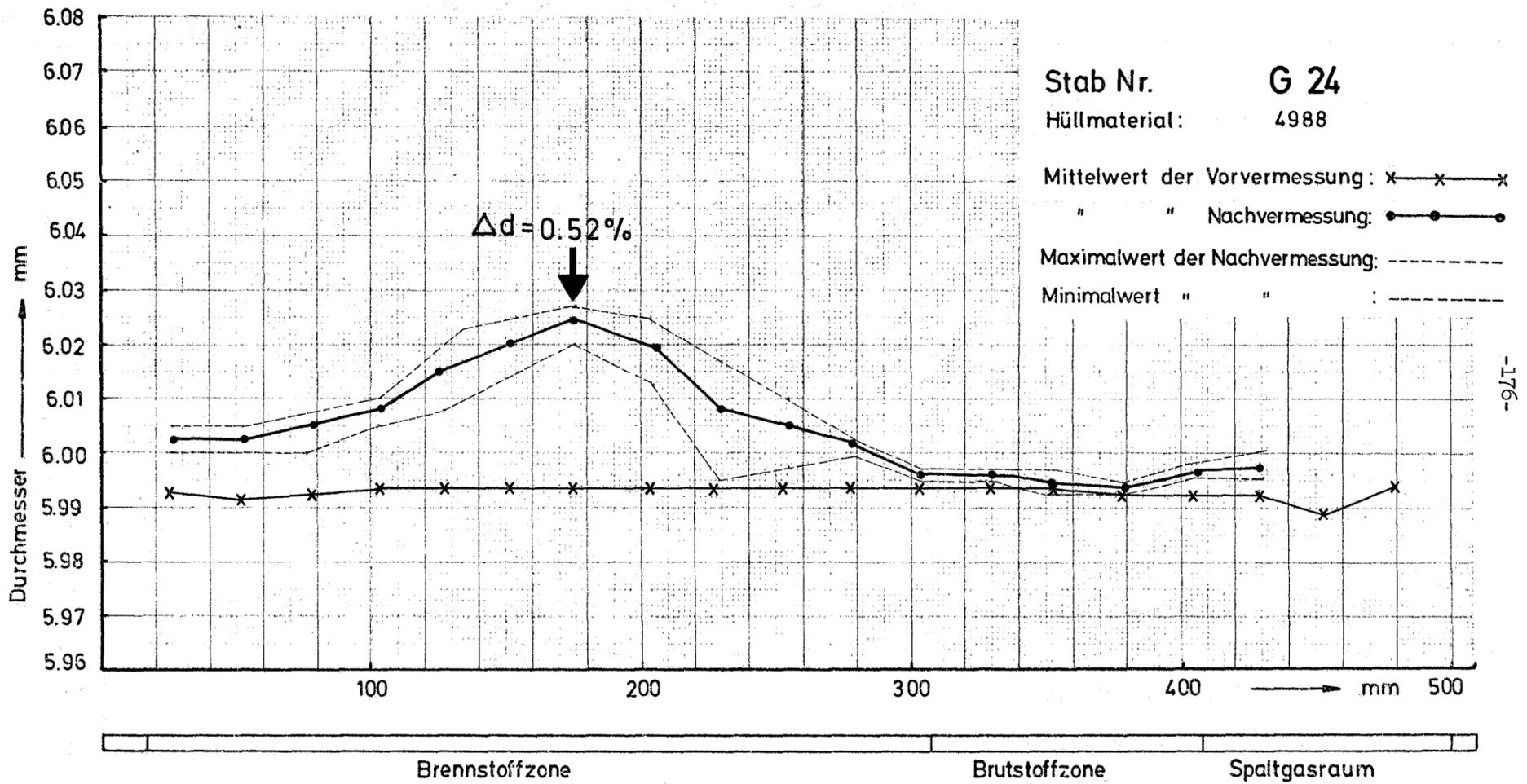
-174-



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers

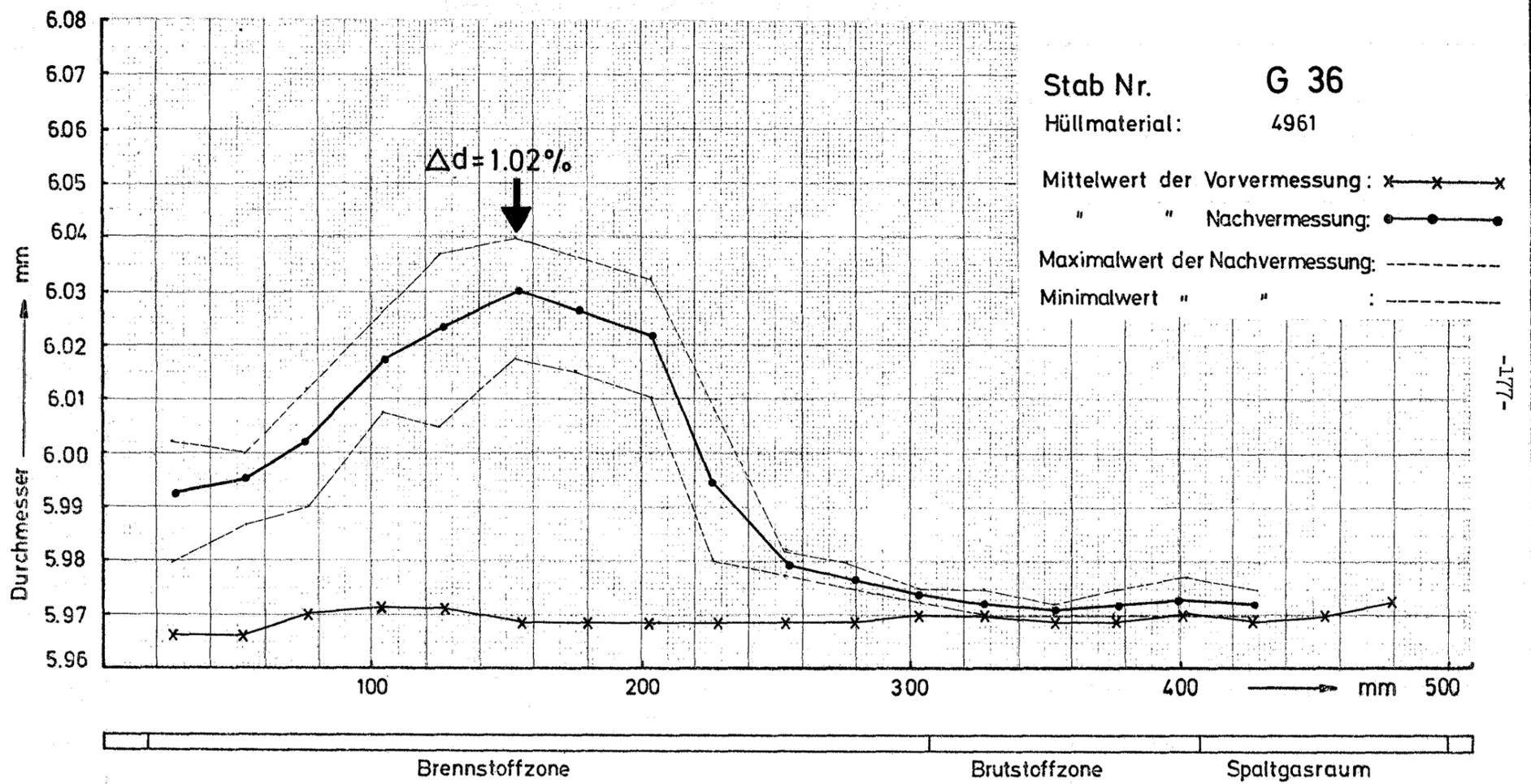
-175-



GfK Karlsruhe
 IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
 1. Vermessung des Stabdurchmessers

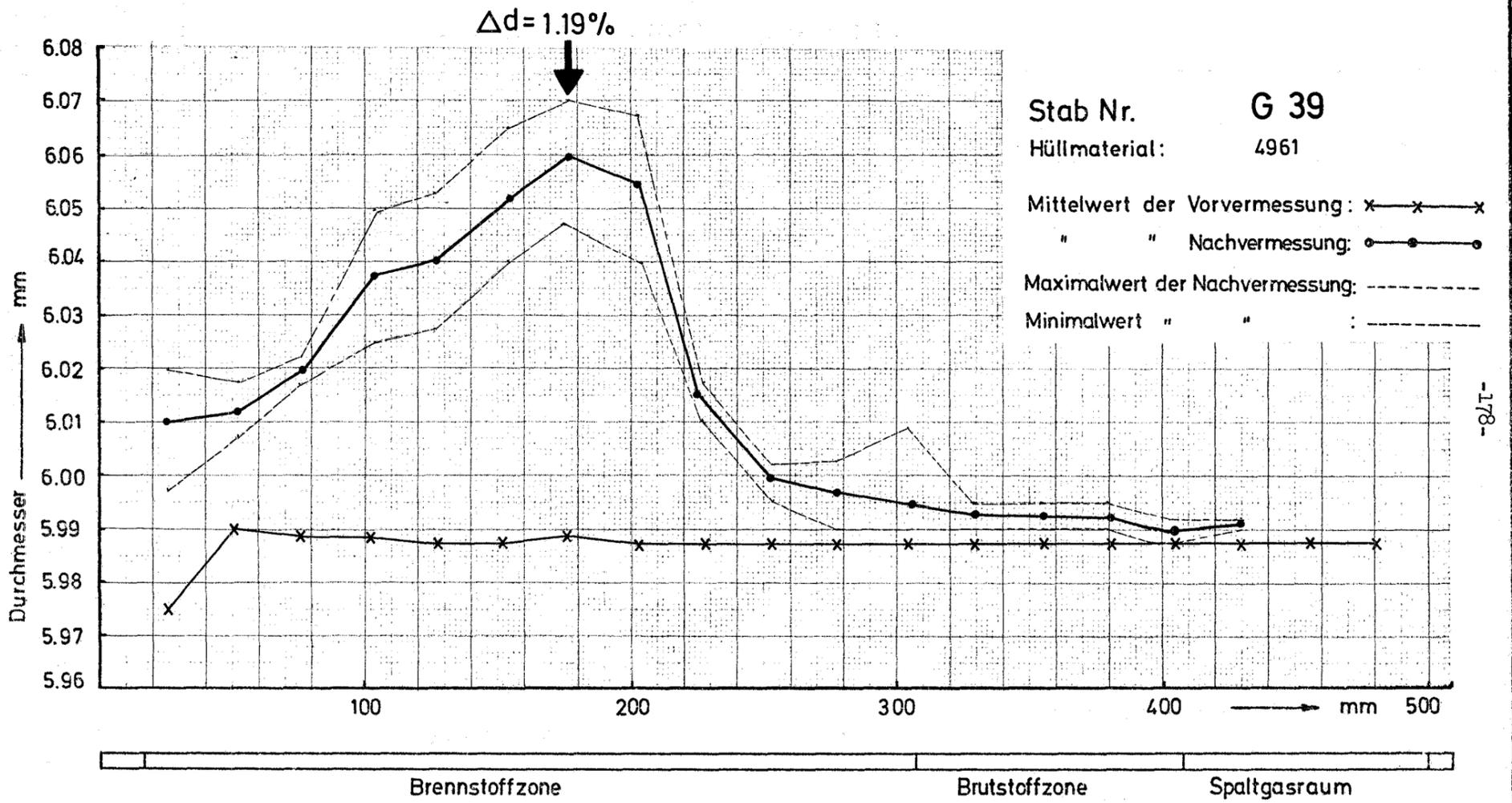
-176-



-177-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

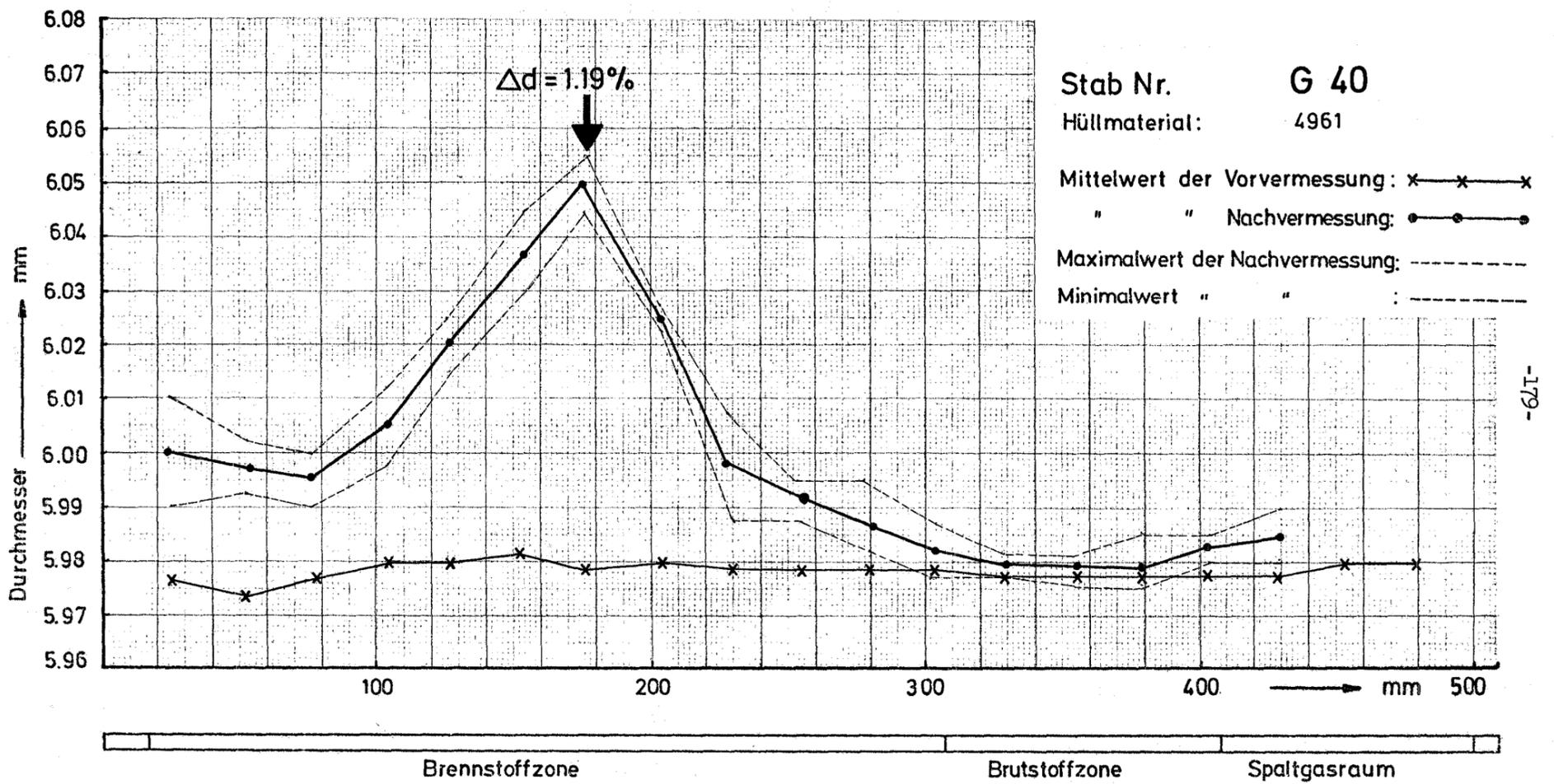
Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers

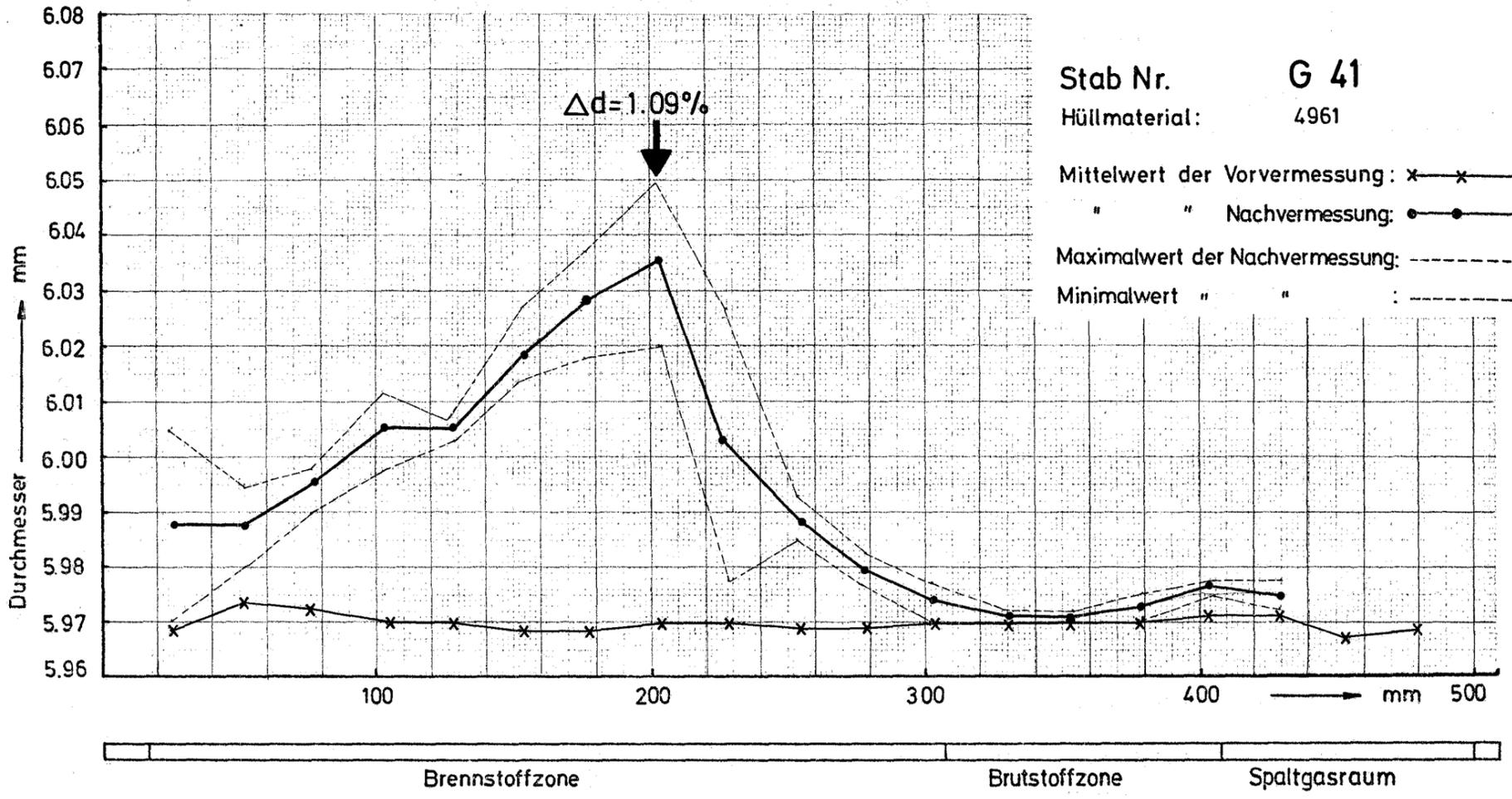
-178-



GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers

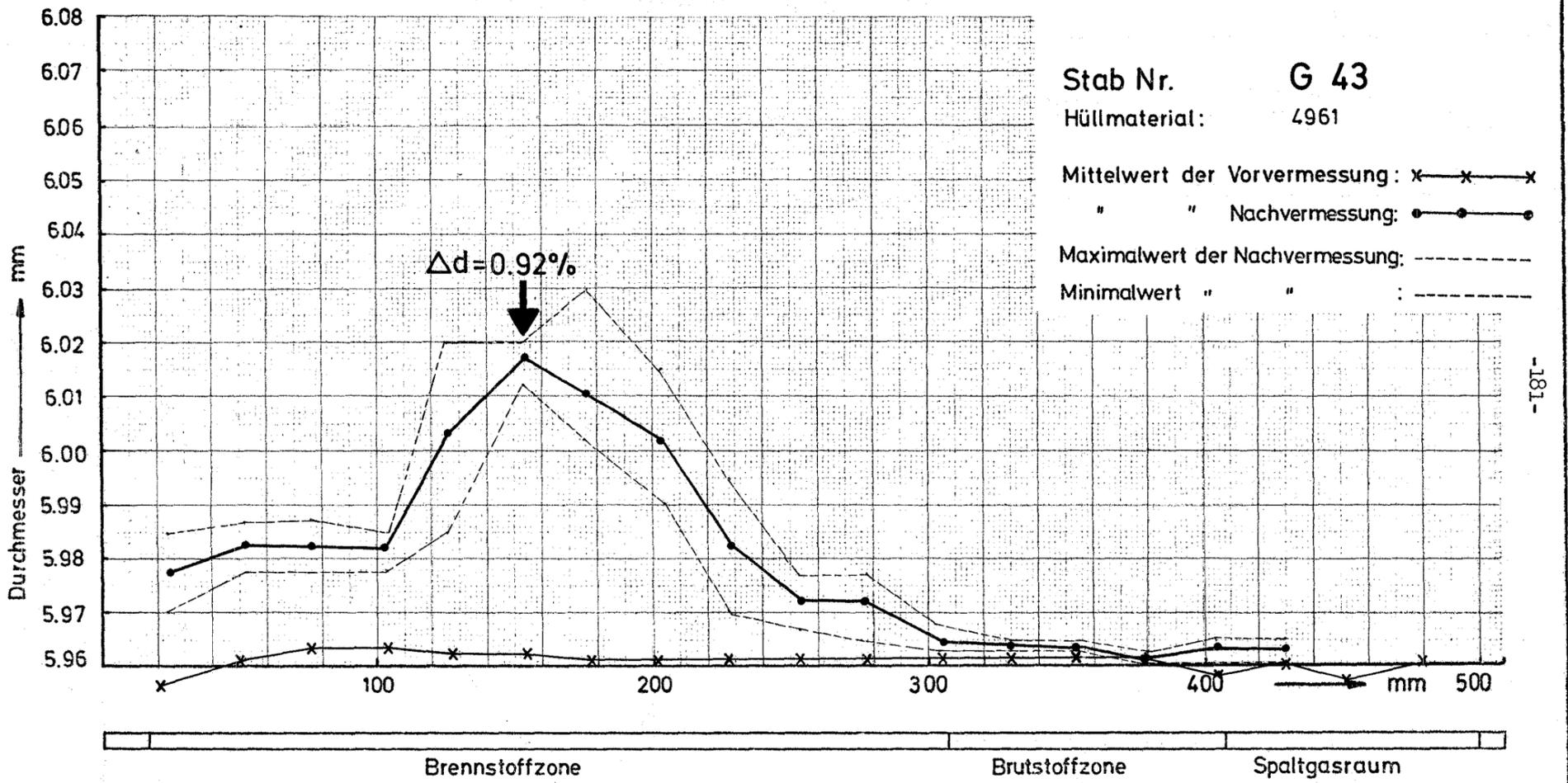
-179-



-180-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

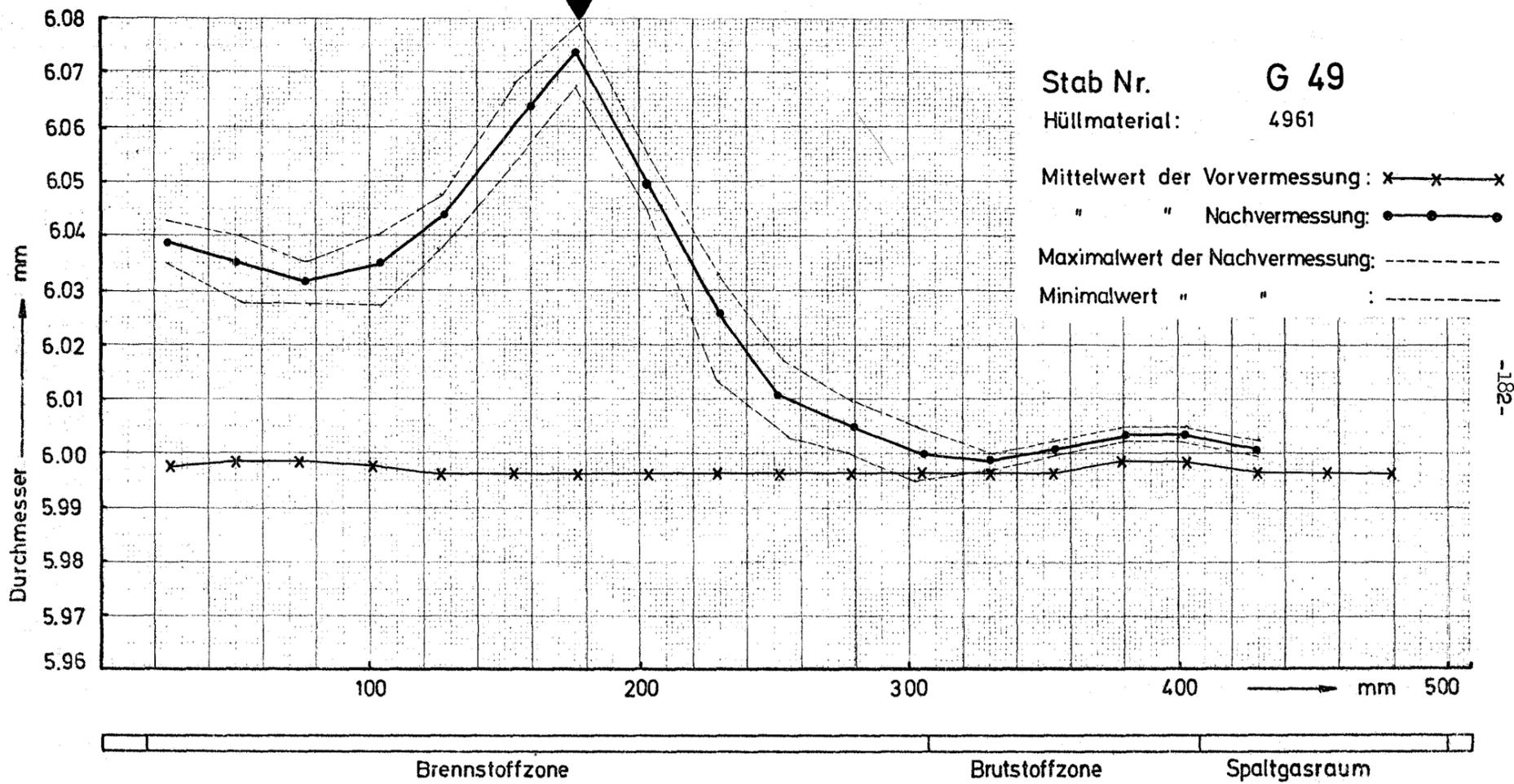
Downreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



GfK Karlsruhe
IMF/LB

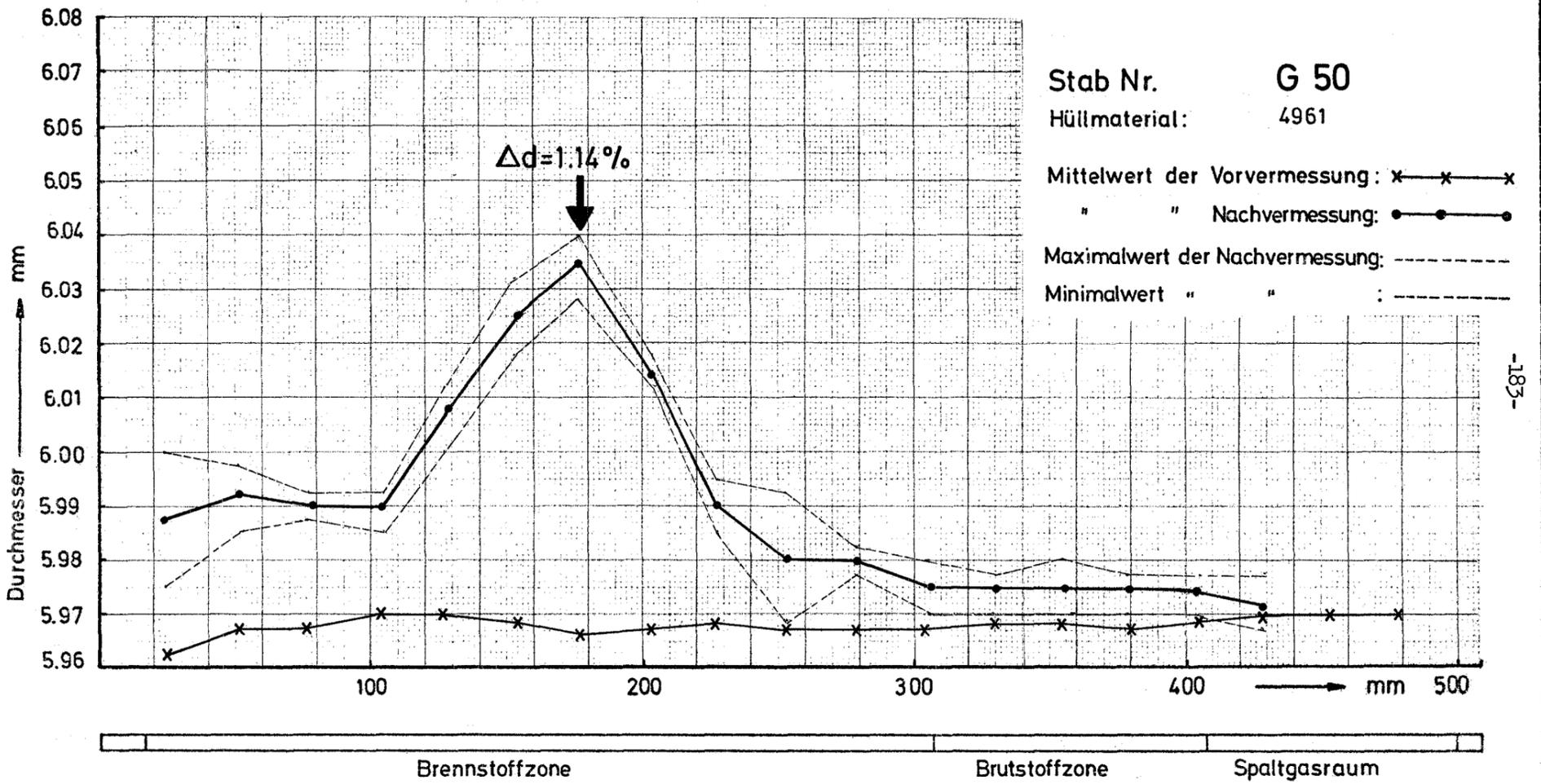
Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers

$\Delta d = 1.30\%$



GfK Karlsruhe
IMF/LB

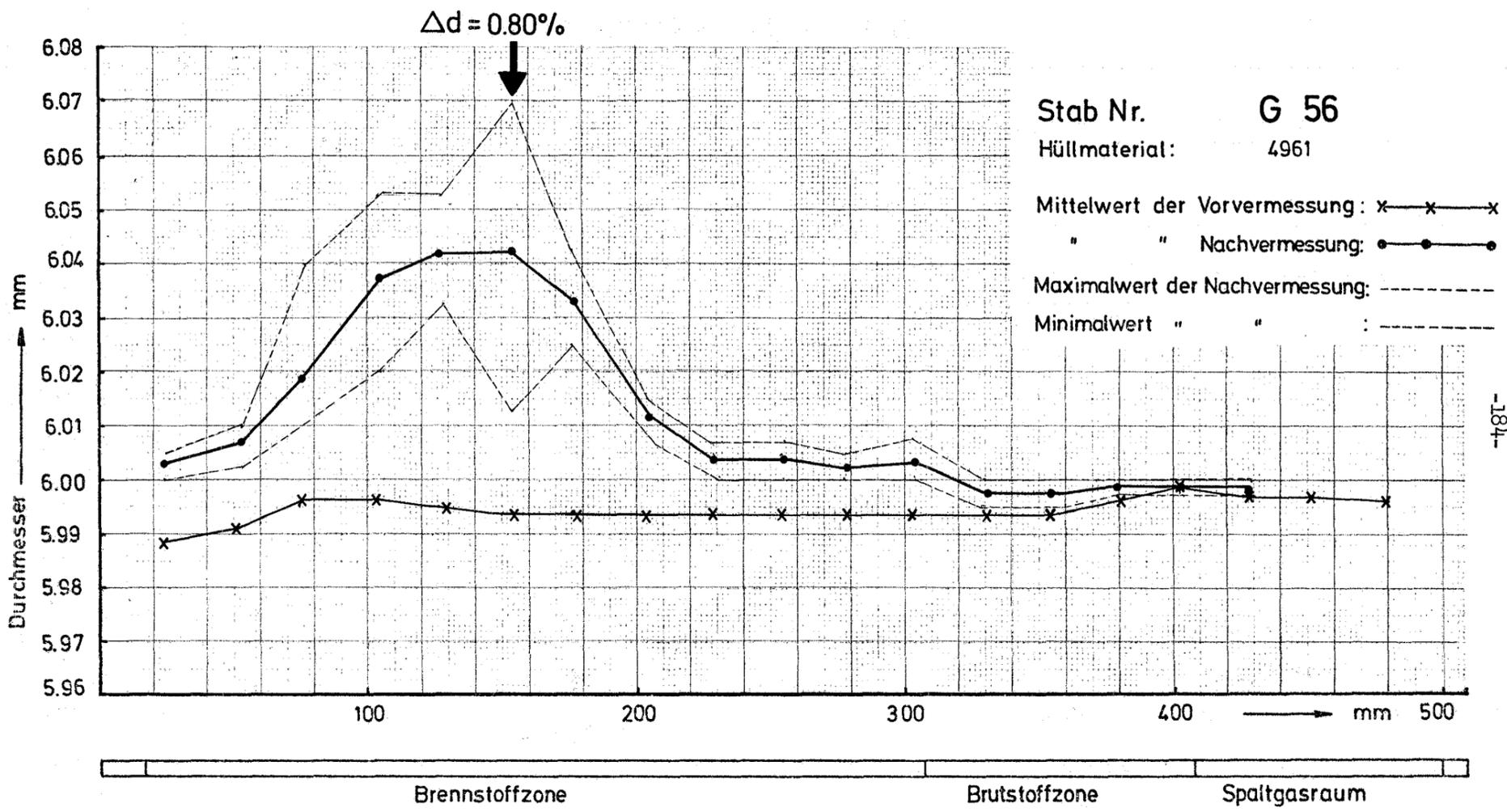
Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



-183-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

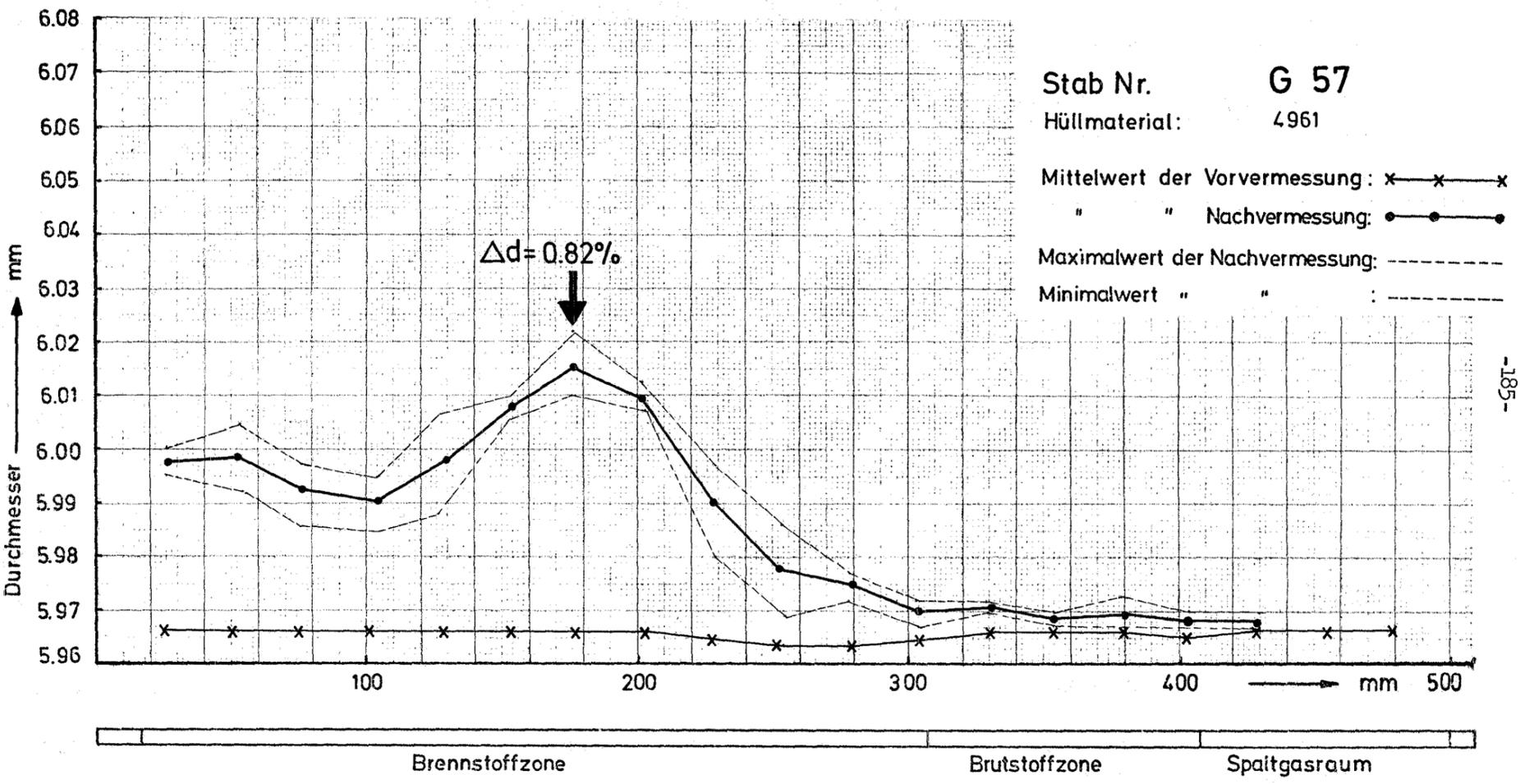
Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



-184-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

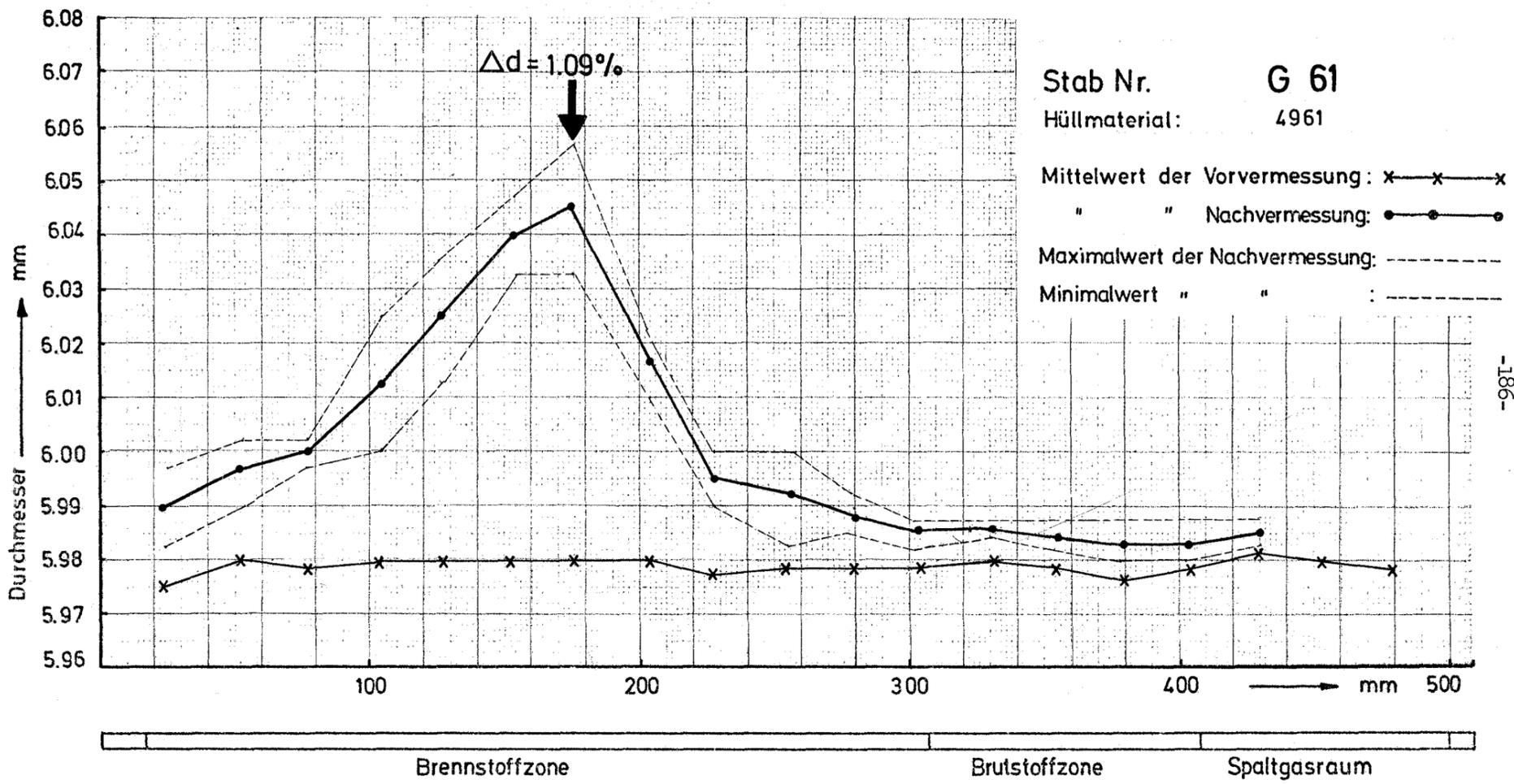
Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



-185-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers



-186-

GfK Karlsruhe
IMF/LB

Dounreay-Bündel DFR - 350
1. Vermessung des Stabdurchmessers