

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

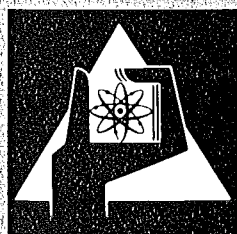
September 1976

KFK 2355

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**UO₂-PuO₂-Brennstab-Kapselbestrahlungen
der Versuchsgruppe Mol 8B und C.
Auswertung von Meß- und
Nachuntersuchungsergebnissen.**

W. Dienst, H. Zimmermann



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

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

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

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2355

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

UO₂-PuO₂-Brennstab-Kapselbestrahlungen der Versuchsgruppe Mol 8B und C.
Auswertung von Meß- und Nachuntersuchungsergebnissen

W.Dienst, H.Zimmermann

unter Mitarbeit von

J.Burbach, G.Gausmann

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Dieser Bericht beruht auf Bestrahlungsdaten und Meßergebnissen vom BR2 sowie auf Untersuchungsergebnissen aus den Heißen Zellen, für deren Zusammenstellung und Aufbereitung bzw. Erarbeitung und Vorauswertung wir allen beteiligten Mitarbeitern der AG Mol, des IMF und der Abteilung RBT danken.

Als Manuskript eingereicht am 23. August 1976

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Bestrahlungsversuchsdaten	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Brennstabauslegung, Bestrahlungsbedingungen	1
Literatur, Tabellen, Bilder	3 - 9
2. Spaltgasverhalten (H.Zimmermann)	11
2.1 Meßergebnisse	12
2.2 Diskussion	12
Literatur, Tabelle, Bilder	13 - 19
3. Mechanische Wechselwirkung und chemische Reaktion zwischen Brennstoff und Hülle (W.Dienst)	20
3.1 Gemessene plastische Hülldehnung	21
3.2 Diskussion der Hülldehnung	22
3.2.1 Untere Grenze für Stableistung und Hülltemperatur	22
3.2.2 Abhängigkeit von Brennstoffdichte und Stableistung	24
3.3 Hüllschäden	26
3.4 Chemische Reaktion zwischen Brennstoff und Hülle	28
Literatur, Tabelle, Bilder	29 - 42

Zusammenfassung

In den Bestrahlungsversuchen Mol 8B und C wurden 12 ziemlich lange UO_2 -20% PuO_2 -Brennstäbe (Brennstofflänge etwa 50 cm) einzeln in NaK-gefüllten Kapseln mit Kadmium-Schirm im BR2 (Mol) bestrahlt. Die Brennstoffschmierdichte war zwischen 79 und 90% TD variiert. Der maximale Abbrand erreichte etwa 9-12%. Die Stableistungen betrugten etwa 300, 400 und 480 W/cm (im Maximum). Die Hüllinnenwandtemperatur lag meistens zwischen 550 und 640°C (im Maximum).

Die Bestrahlungskapseln waren mit Meßvorrichtungen zur kontinuierlichen Messung der Spaltgasfreigabe aus dem Brennstoff versehen. Die gemessenen Freisetzungskurven zeigen zwischen 1 und 6% Abbrand einen relativ starken Anstieg und dann einen ziemlich flachen Verlauf bei höherem Abbrand. Die (differentielle) Freigabegeschwindigkeit zeigt im Bereich des starken Anstieges der Freigabe den Spaltgas-breakaway-Effekt an.

Die Brennstäbe zeigten plastische Hülldehnungen bis zu 1,7%, die auf mechanische Wechselwirkung mit dem Brennstoff bei Leistungsänderungen zurückgeführt wurden. Bei niedrigen Stableistungen (ca. 300 W/cm) ergab sich ein Anstieg der Hülldehnung mit der Brennstoffdichte, bei hohen Stableistungen dagegen nicht. Einige Brennstäbe erlitten Hüllrisse; die Bruchdehnungen lagen zwischen 0,4 und 1,5%.

Die Messung der Hüllinnenkorrosionstiefe schien zu bestätigen, daß sich ihr stärkster Anstieg mit der Temperatur bei hohem Abbrand zu tieferen Temperaturen verschiebt.

Abstract

UO_2 - PuO_2 fuel pin capsule irradiation Mol 8B and C. Evaluation of measuring and post-irradiation examination results

In the irradiation tests Mol 8B and C, 12 single, rather long UO_2 -20% PuO_2 fuel pins (about 50 cm fuel length) were irradiated in NaK-filled capsules with a cadmium screen in the BR2 (Mol). The fuel smear density was varied between 79 and 90% TD. The maximum burnup amounted to 9-12%. The rod powers were about 300, 400 and 480 W/cm (at the maximum). The cladding i.d. temperature was between 550 and 640°C (at the maximum) in most cases.

The irradiation capsules were equipped with a measuring device to make a continuous measurement of the fission gas release from the fuel. The release curves measured show a relatively steep increase between 1 and 6% burnup, followed by a rather flat slope at higher burnup. The differential release rate indicates fission gas breakaway release in the burn-up range of steeply increasing release.

The fuel pins showed cladding plastic strain up to 1,7%, which was attributed to mechanical interaction with the fuel on rod power changes. At low rod power (about 300 W/cm), an increase of cladding strain with fuel density was observed, but not so for high rod power. Some fuel pins sustained cladding cracks; the rupture elongation was between 0,4 and 1,5%.

The inner cladding corrosion penetration depths measured seemed to confirm that the steepest increase of penetration with the cladding temperature will shift to lower temperatures at high burnups.

1. Bestrahlungsversuchsdaten

1.1 Allgemeines

Bei den Bestrahlungsversuchen Mol 8B und C des Projektes Schneller Brüter handelt es sich um die Bestrahlung von einzelnen, ziemlich langen UO_2 -20% PuO_2 -Brennstäben (Brennstofflänge etwa 50 cm) in NaK-gefüllten Kapseln im BR2 (Mol). Zur Annäherung der radialen Brennstoffleistungsverteilung an die Verhältnisse in schnellen Reaktoren waren die Kapseln mit einem Kadmium-Schirm zur Absorption der thermischen Neutronen versehen, so daß die Kernspaltung nur durch epithermische Neutronen ausgelöst wurde.

Die Mol 8B/C-Bestrahlungsversuche hatten die folgenden Ziele:

- 1) Bewährung von Brennstäben bis zu hohem Abbrand $\geq 10\%$.
- 2) Untersuchung der Abhängigkeit des Brennstabverhaltens, im besonderen der plastischen Hüldehnung und evtl. der Hüllrißbildung, von der Brennstoffdichte und von der spezifischen Stabileistung.
- 3) Kontinuierliche Verfolgung der Spaltgasfreigabe bis zu hohem Abbrand.

Zu Punkt 2 waren besonders kritische Bedingungen gegeben, weil im BR2 im Vergleich zu schnellen Reaktoren viel häufiger Stabileistungsänderungen auftreten, und weil die u.U. entlastende Schwellung der Brennstabhülle entfällt. Zu Punkt 3 bot der BR2 viel bessere Meßmöglichkeiten als die vorhandenen schnellen Versuchsreaktoren.

Insgesamt 12 Brennstäbe wurden bestrahlt und zwar unter der Bezeichnung Mol 8B-1 und 2 sowie Mol 8C-1 bis 10. Die beiden Mol 8B-Stäbe dienten der Konzepterprobung, im besonderen für die kontinuierliche Messung des Spaltgasdruckes in den Brennstäben während der Bestrahlung.

1.2 Brennstabauslegung, Bestrahlungsbedingungen

Es wurden bereits drei Berichte über die Mol 8B und C-Bestrahlungsversuche sowie über die Nachuntersuchung der Brennstäbe veröffentlicht, aus denen auch Angaben über die Brennstabauslegung und über die Bestrahlungsbedingungen entnommen werden können /1.1 bis 1.3/. Im folgenden sind solche Angaben für alle Mol 8B und C-Proben zusammengestellt.

Abb.1.1 zeigt den Aufbau und die Abmessungen des Mol 8C-Brennstabes. Der Außendurchmesser beträgt 6,00 mm, die Hüllwanddicke 0,38 mm. Der obere Endstopfen enthält eine eingelötete Kapillare aus nichtrostendem Stahl, die zum Meßaufnehmer für die Spaltgasdruckmessung führt. An den oberen Endstopfen schließt sich der Spaltgasraum an. Die Feder im Spaltgasraum verhindert eine dauernde Verschiebung der Brennstoff-Brutstoff-Säule durch Handhabung und Transport des Brennstabes. In einigen Brennstäben ist in den Spaltgasraum auch ein starres Stützrohr eingesetzt, das eine feste axiale Einspannung der Brennstoff-Brutstoff-Säule bewirkt. Auf den Spaltgasraum folgen die Brutstoffzone und die Brennstoffzone. Der untere Endstopfen ist vom Brennstoff durch Tabletten aus natürlichem UO_2 thermisch isoliert. Die beiden Mol 8B-Stäbe waren ähnlich aufgebaut, nur etwas kürzer: Spaltgasraum 165 mm lang, Brutstoff 120 mm, Brennstoff 500 mm, Isoliertabletten 10 mm.

Die Hüllrohre bestanden alle aus dem austenitischen Cr-Ni-Stahl 1.4988 (etwa 0,05% C, 16,5% Cr, 13,5% Ni, 1,4% Mo, 0,7% Nb, 0,7% V, 0,1% N).

Die Brennstofftabletten bestanden aus 20 Gew.% PuO_2 und 80 Gew.% UO_2 . PuO_2 und UO_2 wurden vor dem Sintern der Tabletten als Pulver mechanisch gemischt. Das Uran enthielt 93% U-235, das Plutonium 90,7% Pu-239, 8,3% Pu-240 und 1,0% Pu-241. Das Sauerstoff/Metall-Verhältnis wurde mit $O/M = 1,99$ angegeben (Spezifikation $1,98 \pm 0,02$).

Die Brutstofftabletten bestanden aus natürlichem UO_2 mit einer Sinterdichte von etwa 96% TD (d.h. der theoretischen Dichte).

Die Sinterdichte der Brennstofftabletten in den verschiedenen Brennstäben ist in Tab.1.1 angegeben. Die Tabelle enthält auch die radiale Spaltbreite zwischen Brennstoff und Hülle (im kalten Zustand). In den Brennstäben C-9 und C-10 sind je 5 Brennstofftabletten von 3 verschiedenen Sinterdichten übereinander gestapelt. Diese Stapelfolge wiederholt sich in der ganzen Brennstoffsäule 5-mal. Die Spaltbreite wechselt mit der Sinterdichte der Tabletten, und zwar so, daß die Brennstoff-Schmierdichte im Brennstab konstant bleibt. Schließlich enthält Tab.1.1 noch eine Angabe über die evtl. bestehende axiale Einspannung der Brennstoff-Brutstoff-Säule. Da bei der Nachuntersuchung der Brennstäbe keine eindeutige Auswirkung der axialen Einspannung auf das Brennstabverhalten zu erkennen war, wird auf dieses Auslegungsmerkmal in den folgenden Abschnitten gar nicht mehr Bezug genommen.

Angaben über die Bestrahlungsbedingungen der Brennstäbe sind in Tab.1.2 und in Abb.1.2 bis 1.4 enthalten. In Tab.1.2 sind die maximalen Werte der spezifischen Stableistung, der Hüllinnenwandtemperatur und des Abbrandes (im axialen Stableistungsmaximum, etwa in der Mitte des Brennstoffabschnittes) zusammengestellt. Bei der Stableistung und der Hülltemperatur handelt es sich um Mittelwerte der Maxima je BR2-Zyklus für die gesamte Bestrahlungsdauer. Abb.1.2 bis 1.4 geben den axialen Verlauf der spezifischen Stableistung, der Hüllinnenwandtemperatur und des lokalen Abbrandes für diejenigen Stäbe wieder, für die eine entsprechende Auswertung erfolgte. Die Form der axialen Profile wurde dabei durch Mittelung aller Stableistungsprofile gewonnen, die in den Experiment-Berichten für den Beginn und das Ende jedes BR2-Betriebszyklus während der gesamten Bestrahlungsdauer angegeben waren. Diese Profilform wurde dann auch für die Darstellung der Hülltemperatur und des Abbrandes übernommen. Die Höhenlage der Profile wurde durch die (für alle BR2-Zyklen während der Bestrahlungsdauer) gemittelten Maximalwerte in Tab.1.2 bestimmt. Diese wurden, auch für die Stableistung aus entsprechenden Zahlenwerten in den Experiment-Berichten ermittelt.

Literatur

- /1.1/ Weimar P., Sebering H.: Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung des UO_2/PuO_2 -Brennstab-Bestrahlungsexperimentes Mol 8-B KFK 2106 (1975)
- /1.2/ Zafar Ullah M., Geithoff D., Weimar P.: The Specifications, Design, Irradiation and Post-Irradiation Examination of a Mixed Oxide Pin of the Mol-8C-Series (Pin No.5) KFK 2221 (1975)
- /1.3/ Weimar P., Steiner H., van den Born H.: BR2-Kapsel-Versuchsgruppe Mol-8C. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung, KFK 2306 (1976)

Tab.1.1: Auslegung der Mol 8B/C-Brennstäbe

Bezeichnung	Tabl.-Sinterdichte [% TD]	rad.Spalt [μm]	axiale Einspannung
8B-1	85,0 \pm 1,5	85	nein
8B-2	85,0 \pm 1,5	80	nein
8C-1	95,0 \pm 1,1	70	ja
8C-2	95,1 \pm 1,1	70	ja
8C-3	95,2 \pm 1,1	70	nein
8C-4	95,2 \pm 1,1	70	nein
8C-5	86,7 \pm 1,5	70	ja
8C-6	87,1 \pm 1,5	70	ja
8C-7	87,0 \pm 1,5	70	nein
8C-8	87,2 \pm 1,5	70	nein
8C-9	88,4/91,1/95,2	25/70/125	ja
8C-10	87,7/90,6/94,5	25/70/125	ja

Tab.1.2: Bestrahlungsbedingungen der Mol 8B/C-Brennstäbe im axialen
Stableistungmaximum

Bezeichnung	Stableistg. [W/cm]	Hüllinnenwand- temp. [°C]	Abbrand [% U+Pu]	Bestr.-Dauer [d]
8B-1	410	590	11,6	506
8B-2	390	640	9,4	414
8C-1	480	640	9,8	438
8C-2	280	615	11,5	761
8C-3	480	555	10,5	448
8C-4	300	585	11,8	726
8C-5	490	610	11,3	428
8C-6	295	505	11,3	679
8C-7	480	575	10,7	429
8C-8	295	580	11,7	666
8C-9	430	600	8,6	395
8C-10	480	585	10,8	444

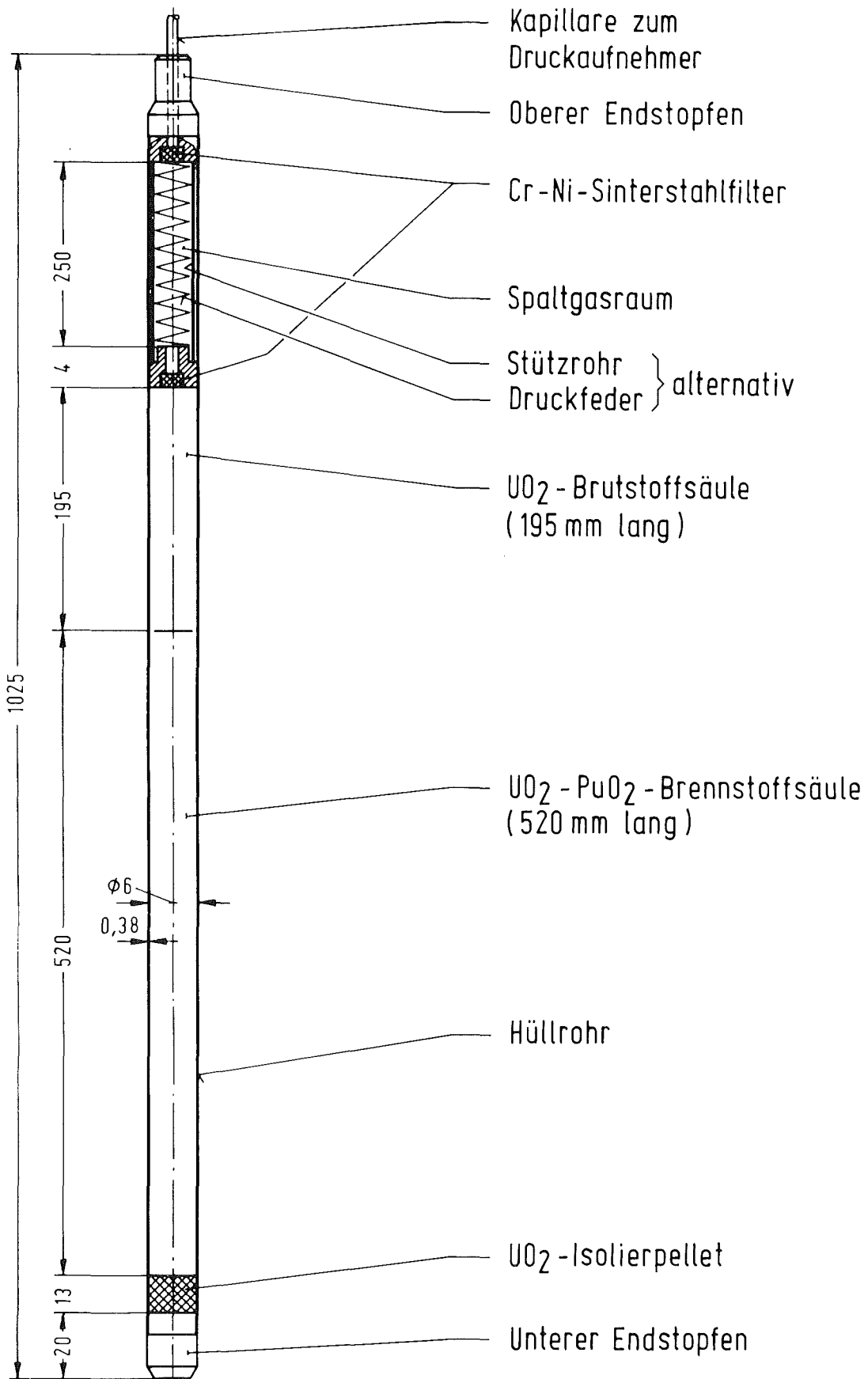


Abb. 1.1
Brennstab für die Kapsel - Bestrahlungsgruppe Mol 8C

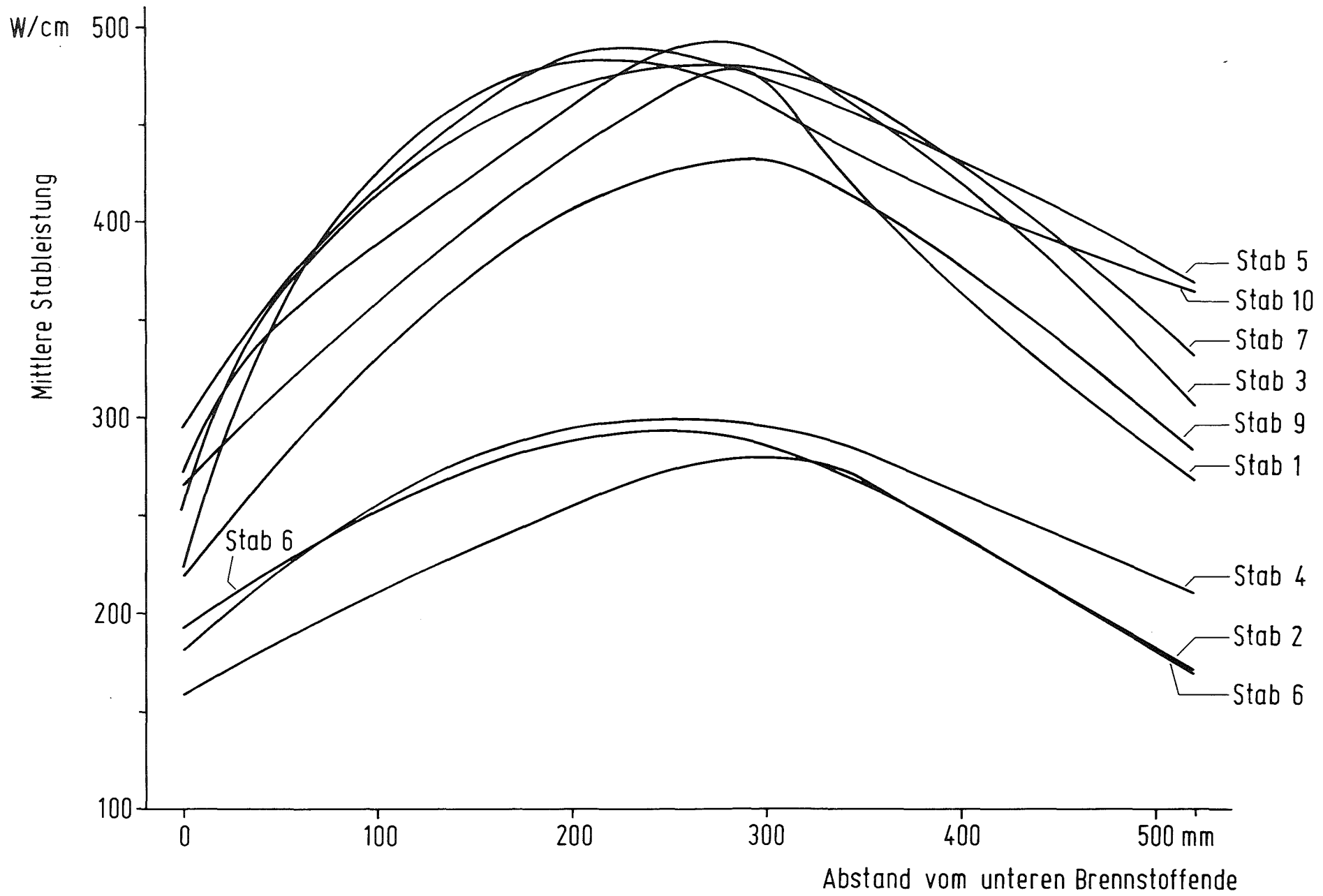


Abb. 1.2
 Axialer Verlauf der spezifischen Stableistung in Mol 8C-Brennstäben.

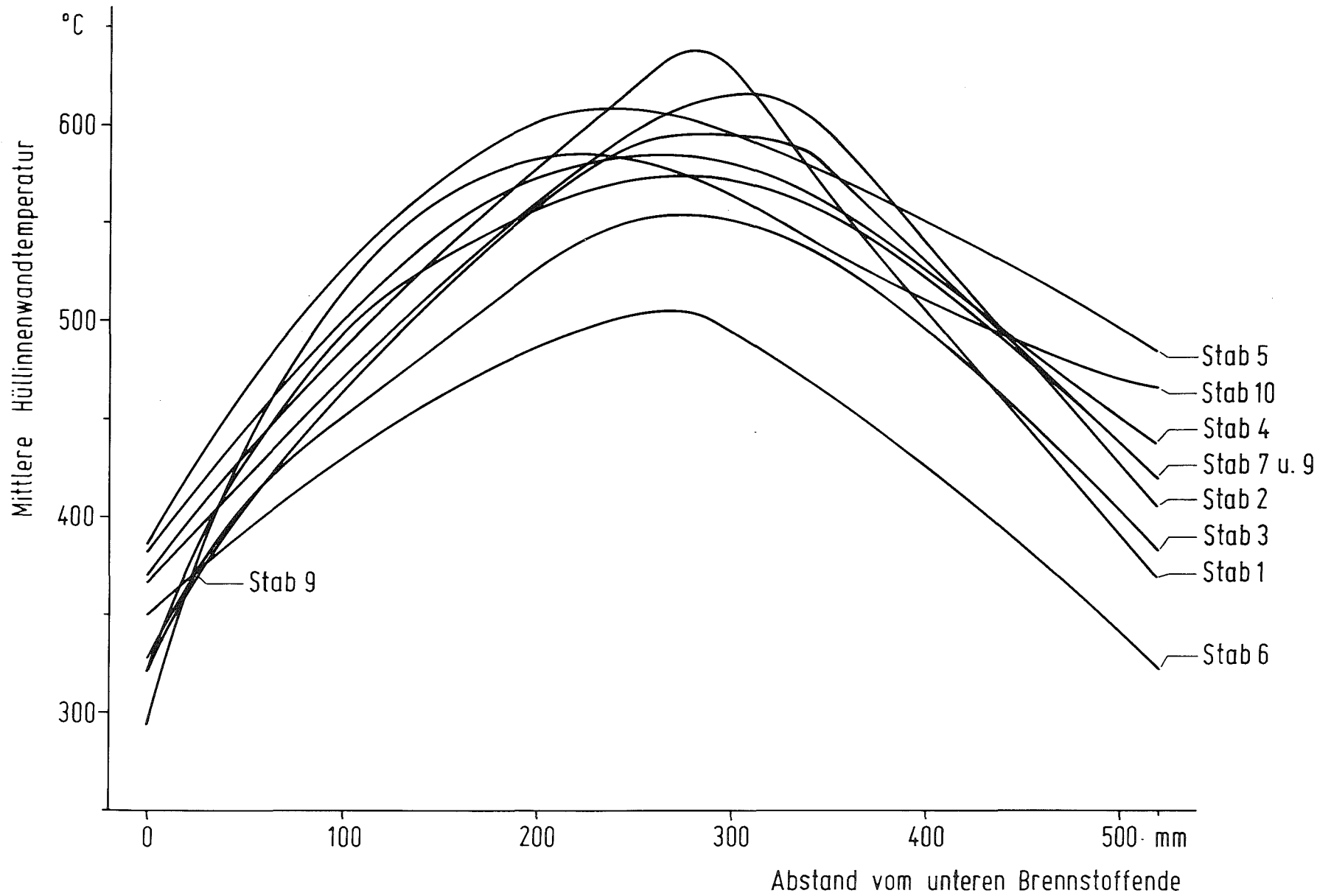


Abb. 1.3
Axialer Verlauf der Hüllinnenwandtemperatur in Mol8C-Brennstäben.

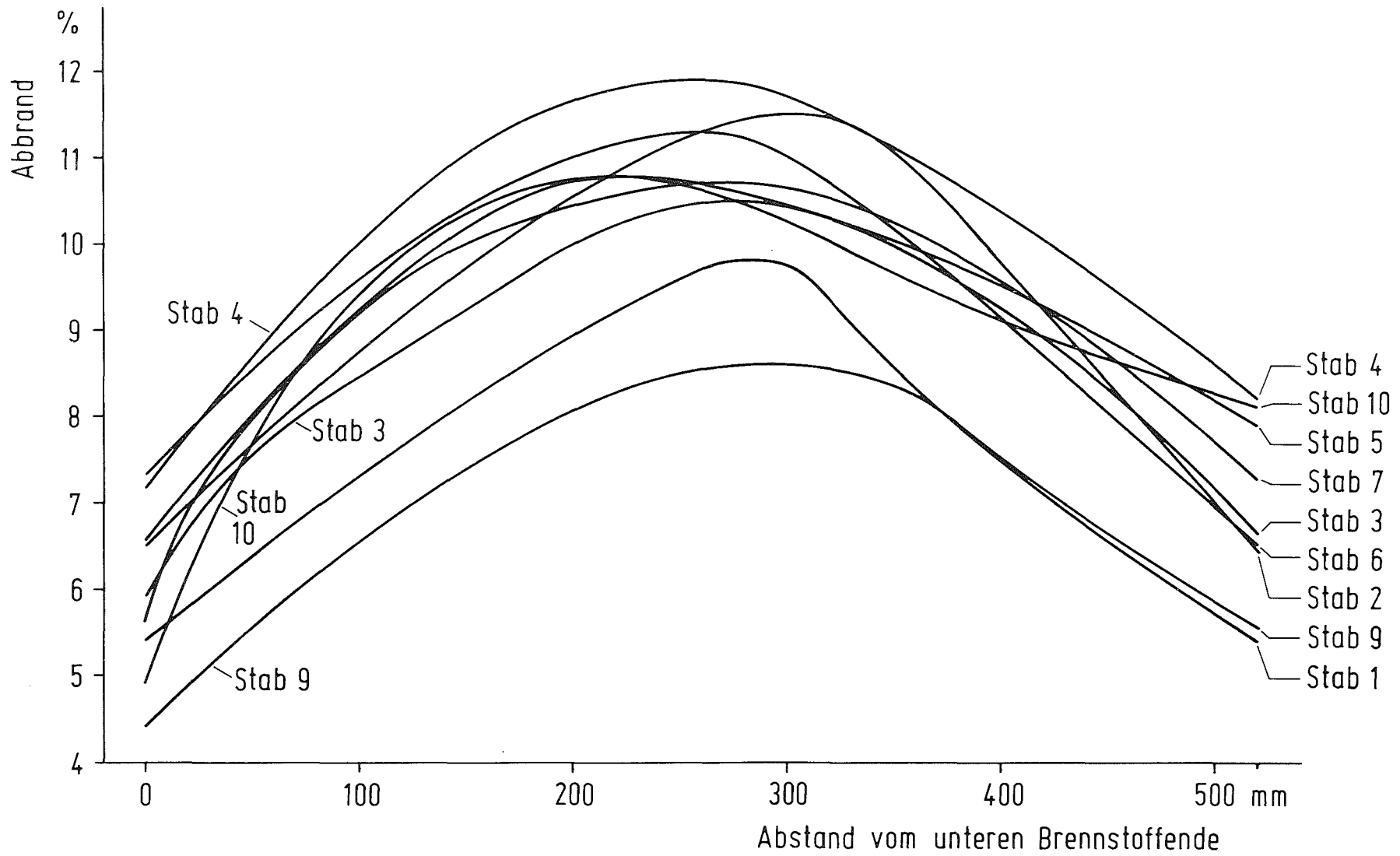


Abb. 1.4
 Axialer Verlauf des Abbrandes in Mol 8C-Brennstäben.

2. Spaltgasverhalten

H.Zimmermann

2.1 Meßergebnisse

Die Untersuchung des Spaltgasverhaltens erstreckte sich auf die Bestimmung des freigesetzten Spaltgases und des im Brennstoff zurückgehaltenen Spaltgases. Sämtliche Stäbe der Experimente Mol 8B und C waren mit Druckgebern zur kontinuierlichen Messung des Gasdruckes in den Stäben ausgerüstet. Die auf Grund der Druckmessungen errechneten Spaltgasfreisetzungen sind in den Abbildungen 2.1 bis 2.4 in Abhängigkeit vom Abbrand dargestellt. Die Bestimmung der freigesetzten Spaltgasmen gen nach Bestrahlung war nicht möglich, da bei der Demontage und Gasentnahme, evtl. über die Druckleitungen, offenbar unkontrollierte Gasverluste eintraten. Die gesammelten Spaltgasmengen lagen stets unter den zu erwartenden.

Bei den meisten Stäben wurden in der Nähe der Stableistungsmaxima die Konzentrationen des gebundenen Spaltgases ermittelt. Dazu wurden Brennstoffproben entnommen und gemahlen und die während des Mahlprozesses freigesetzten Spaltgasmengen gaschromatographisch bestimmt (Porensplattgas). Beim Mahlen wurde der Brennstoff bis auf Teilchengrößen unter $1\ \mu\text{m}$ zerkleinert. Dadurch wurde sämtliches an Korngrenzen und in Poren und Blasen mit Durchmessern über ca. $0,5\ \mu\text{m}$ befindliches Spaltgas freigesetzt. Die gemahlten Proben wurden anschließend in Salpetersäure aufgelöst, wobei das restliche Spaltgas freigesetzt wurde, das sich im Brennstoff in bestrahlungsbedingter Lösung oder in sehr kleinen Blasen innerhalb der Körner befand (Gittersplattgas). Die gefundenen Konzentrationen des Poren- und Gittersplattgases sind in der Tab.2.1 aufgeführt.

2.2 Diskussion

Die Berechnung der Spaltgasfreisetzung aus den in den Brennelementen gemessenen Gasdrücken ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Mögliche Fehlerquellen sind Vortäuschung von Druckänderungen durch Temperaturänderungen im Gasraum, Freisetzung von Fremdgasen aus dem Brennstoff, sowie Änderungen des Volumens des Gasraumes infolge Volumenänderungen des Brennstoffes oder infolge von Hüllaufweitungen. In keinem Fall wurden zu Beginn der Bestrahlung sinnvolle Spaltgasfreisetzungsraten erhalten. Vor diesem Hintergrund sind auch die recht niedrigen prozentualen Freisetzungswerte von 62 bis 66% der Stäbe C3, C5 und C7 mit den

hohen Stableistungen zu sehen, die mit den Erfahrungen, die bei Experimenten mit ähnlichen Bestrahlungsbedingungen gewonnen wurden und auch mit den gemessenen Konzentrationen des gebundenen Spaltgases nicht ganz in Einklang zu bringen sind. Es wären Freisetzungswerte zwischen 80 und 90% zu erwarten. Wenn auch die absoluten Werte nicht in jedem Fall zuverlässig erscheinen, so sollte doch der relative zeitliche Verlauf für mehr oder weniger große Abbrandintervalle richtig wiedergegeben werden.

Die gemessenen Freisetzungskurven weisen im allgemeinen im Abbrandbereich zwischen 10 und 60 MWd/kg M einen relativ starken Anstieg der prozentualen Freisetzung auf, während bei Abbränden über 60 MWd/kg M meist nur noch ein sehr flacher Anstieg zu verzeichnen ist. Der steile Anstieg bei mittleren Abbränden wird durch die plötzliche Freigabe größerer Spaltgasmengen beim Aufreißen von dicht mit Spaltgasblasen belegten Korngrenzen hervorgerufen (break-away-Mechanismus). Deutlicher kommt dieser Effekt noch zum Ausdruck, wenn man die Zyklusfreisetzungsraten (im Bestrahlungszyklus freigesetzte Spaltgasmenge bezogen auf die im Zyklus erzeugte) über den Abbrand aufträgt. Das wurde in Abb.2.5 für den Stab C5 durchgeführt. Gleichzeitig wurde in diese Abbildung der Verlauf der über die Brennstofflänge gemittelten Stableistung eingezeichnet. Bei einem Abbrand zwischen 30 und 35 MWd/kg M wird erstmals eine Freisetzungsrates über eins gefunden. Danach fällt die Freisetzungsrates wieder unter eins. Derartige Maxima der Freisetzungsrates treten bei diesem Stab mehrfach auf. Teilweise werden sie offenbar von einem Anstieg der Stableistung hervorgerufen.

Über die Gesamtmenge des im Brennstoff gebundenen Spaltgases können keine Aussagen gemacht werden. Bei allen untersuchten Stäben ist die Konzentration des gebundenen Spaltgases am Ort der Probennahme entsprechend der hohen Stableistung, die dort herrschte, gering. Sie entspricht den zu erwartenden Werten. Zu den Brennstoffenden hin ist mit einem Anstieg der Konzentration zu rechnen.

Die Ergebnisse zum Spaltgasverhalten in den Versuchsgruppen Mol 8B und C wurden bereits in einem früheren Bericht im größeren Zusammenhang mit anderen Experimenten diskutiert /2.1/.

Tab.2.1: Gebundenes Spaltgas an den Stellen maximaler Stableistung
in den Mol 8B- und C-Stäben

Stab/ Probe	Porensplattgas		Gittersplattgas		geb. Spaltgas	
	$\frac{\text{Gasatome}}{(\text{U+Pu})\text{-Atom}}$	$\frac{\text{P}}{\text{Xe}} \frac{\text{Kr}}$	$\frac{\text{Gasatome}}{(\text{U+Pu})\text{-Atom}}$	$\frac{\text{G}}{\text{Xe}} \frac{\text{Kr}}$	$\frac{\text{Gasatome}}{(\text{U+Pu})\text{-Atom}}$	$\frac{\text{P+G}}{\text{Xe}} \frac{\text{Kr}}$
B1/12	$7,01 \cdot 10^{-4}$	6,2	-	-	-	-
/15	$7,46 \cdot 10^{-4}$	7,6	$1,29 \cdot 10^{-4}$	9	$8,75 \cdot 10^{-4}$	7,8
B2/18	$7,64 \cdot 10^{-4}$	6,6	-	-	-	-
C1/19	$1,07 \cdot 10^{-3}$	9,2	$7,63 \cdot 10^{-4}$	11,9	$1,84 \cdot 10^{-3}$	10,3
C2/ 7	-	-	$2,46 \cdot 10^{-4}$	11,7	-	-
C3/ 7	$6,17 \cdot 10^{-4}$	5,1	$7,16 \cdot 10^{-4}$	10,1	$1,33 \cdot 10^{-3}$	7,8
C5/ 4	$1,20 \cdot 10^{-3}$	7,2	$3,50 \cdot 10^{-4}$	8,5	$1,55 \cdot 10^{-3}$	7,5
C7/ 3	$5,92 \cdot 10^{-4}$	6,3	$2,44 \cdot 10^{-4}$	9,3	$8,35 \cdot 10^{-4}$	7,2
C9/ 4	$5,98 \cdot 10^{-4}$	6,9	$2,10 \cdot 10^{-4}$	7,7	$8,08 \cdot 10^{-4}$	7,1
C10/4	$4,21 \cdot 10^{-4}$	5,3	$1,40 \cdot 10^{-4}$	7,0	$5,60 \cdot 10^{-4}$	5,7

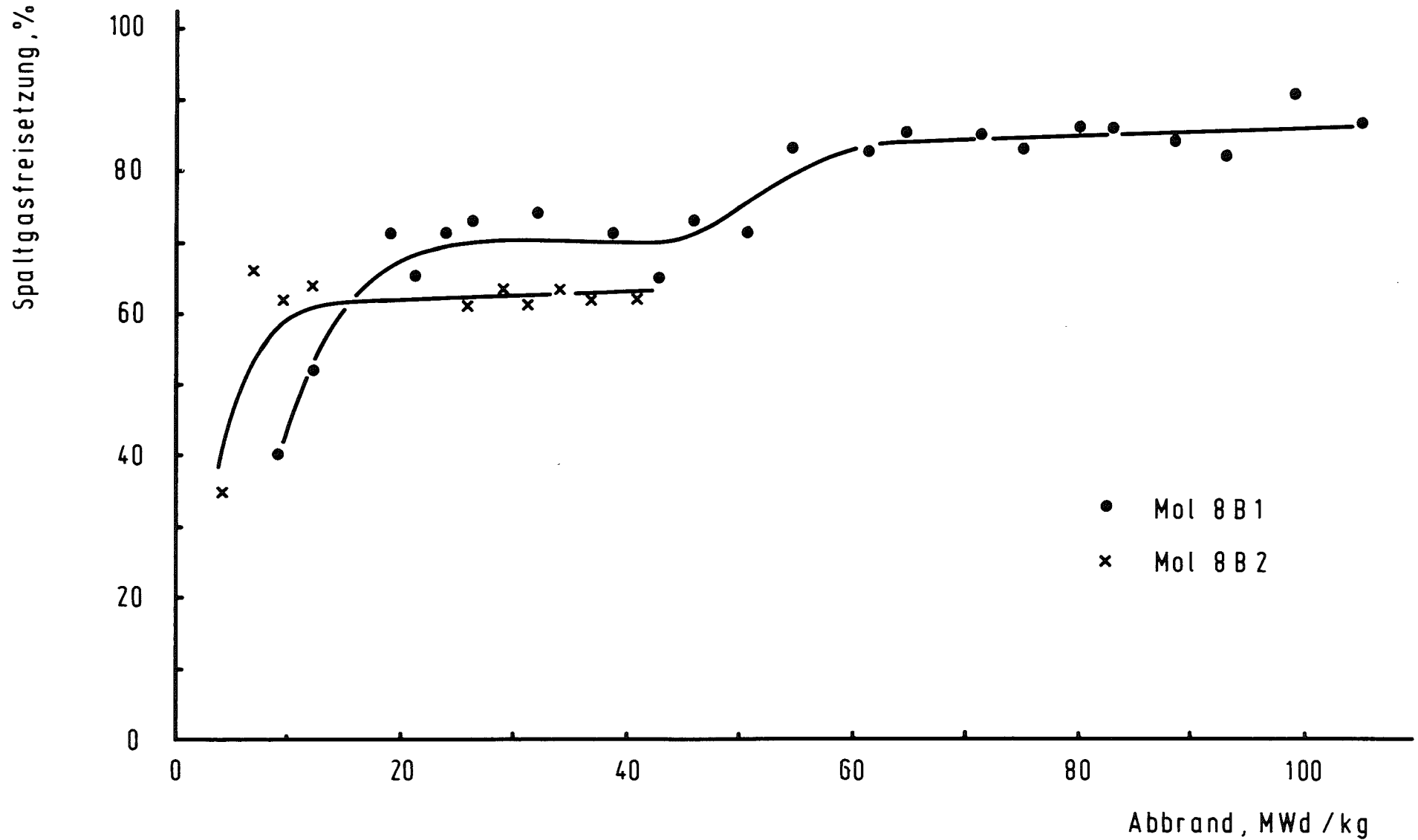


Abb. 2.1: Spaltgasfreisetzung der Mol 8B-Stäbe in Abhängigkeit vom Abbrand

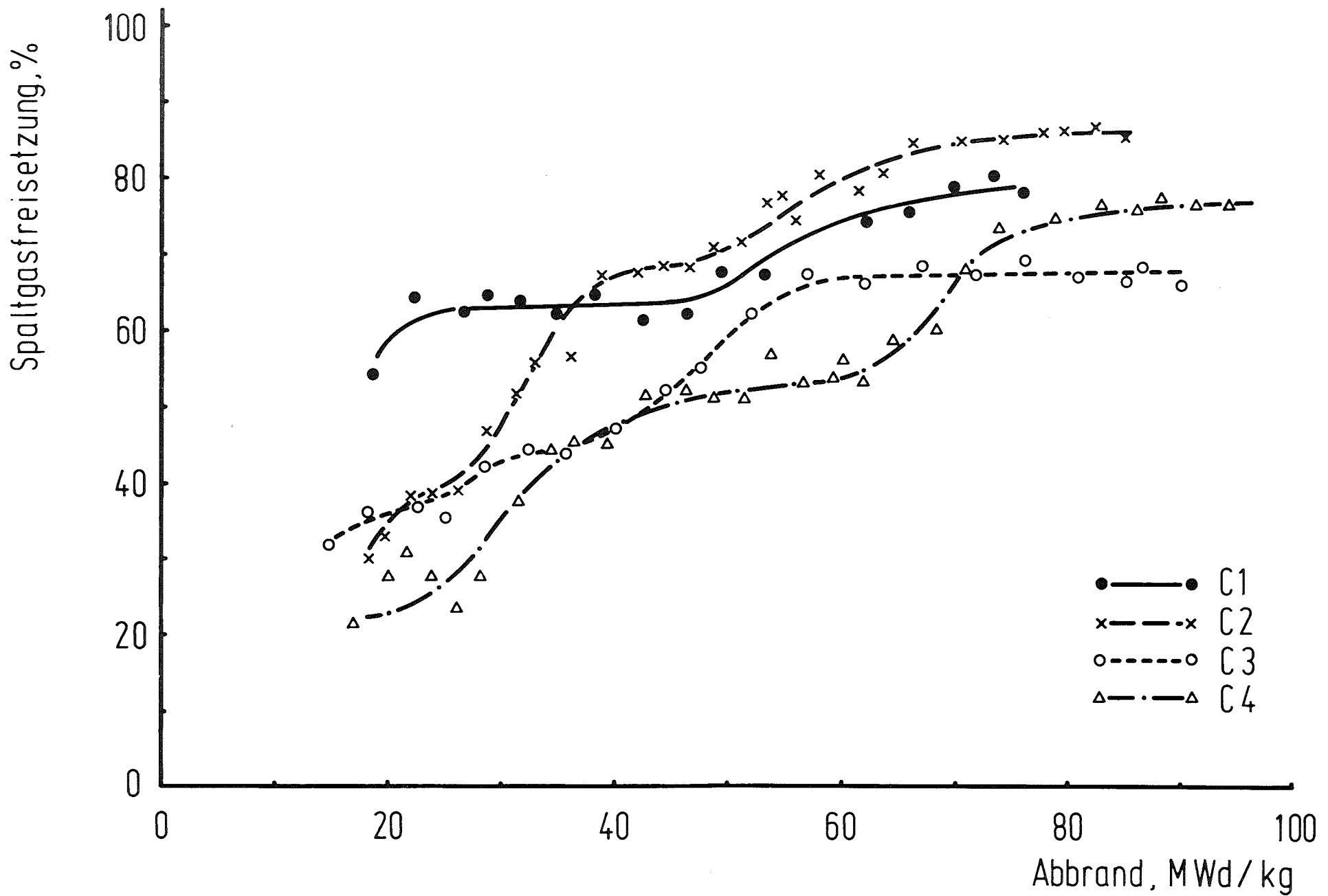


Abb. 2.2: Spaltgasfreisetzung der Stäbe Mol 8C1-4 in Abhängigkeit vom Abbrand

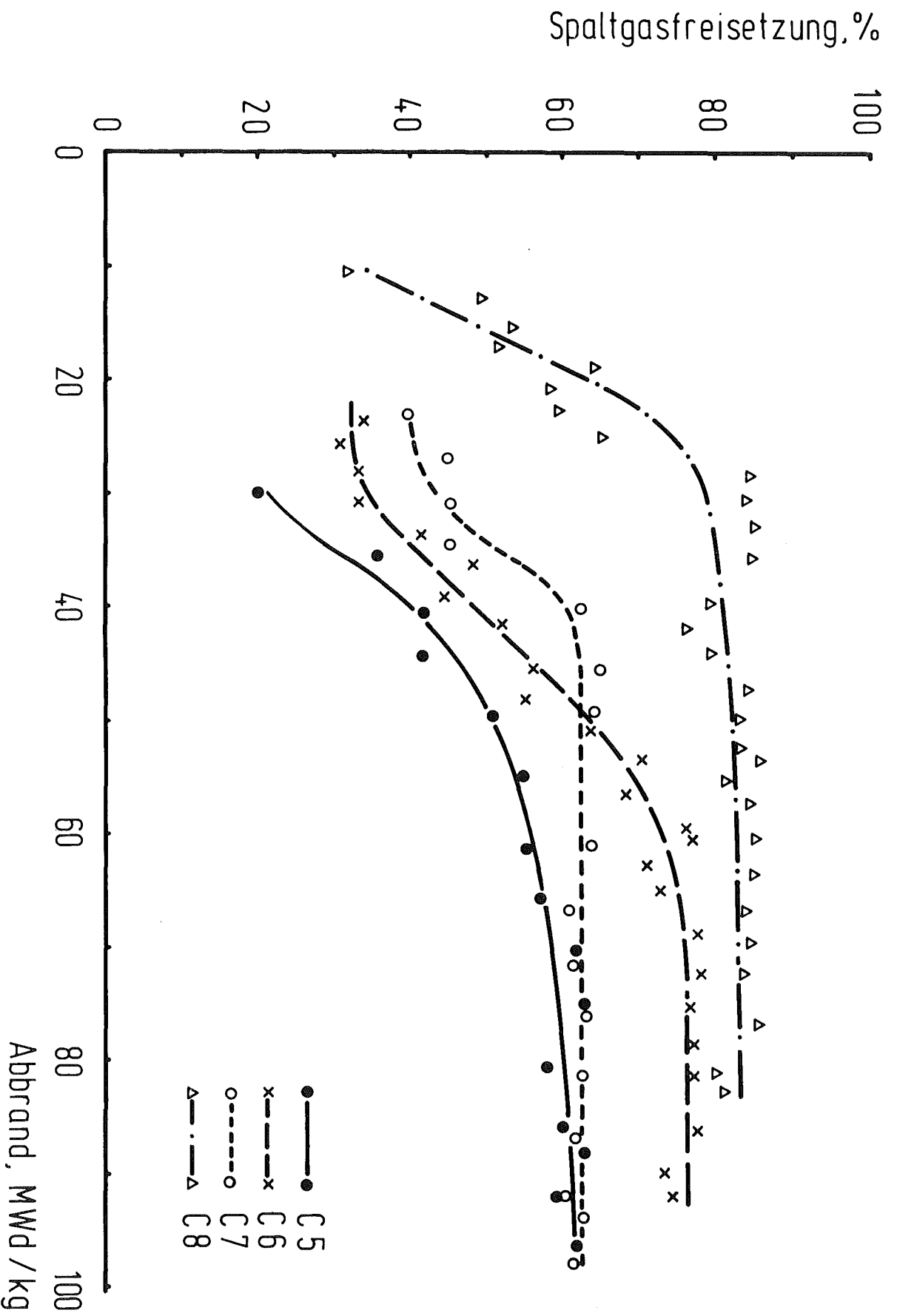


Abb. 2.3: Spaltgasfreisetzung der Stäbe Mol 8C5-8 in Abhängigkeit vom Abbrand

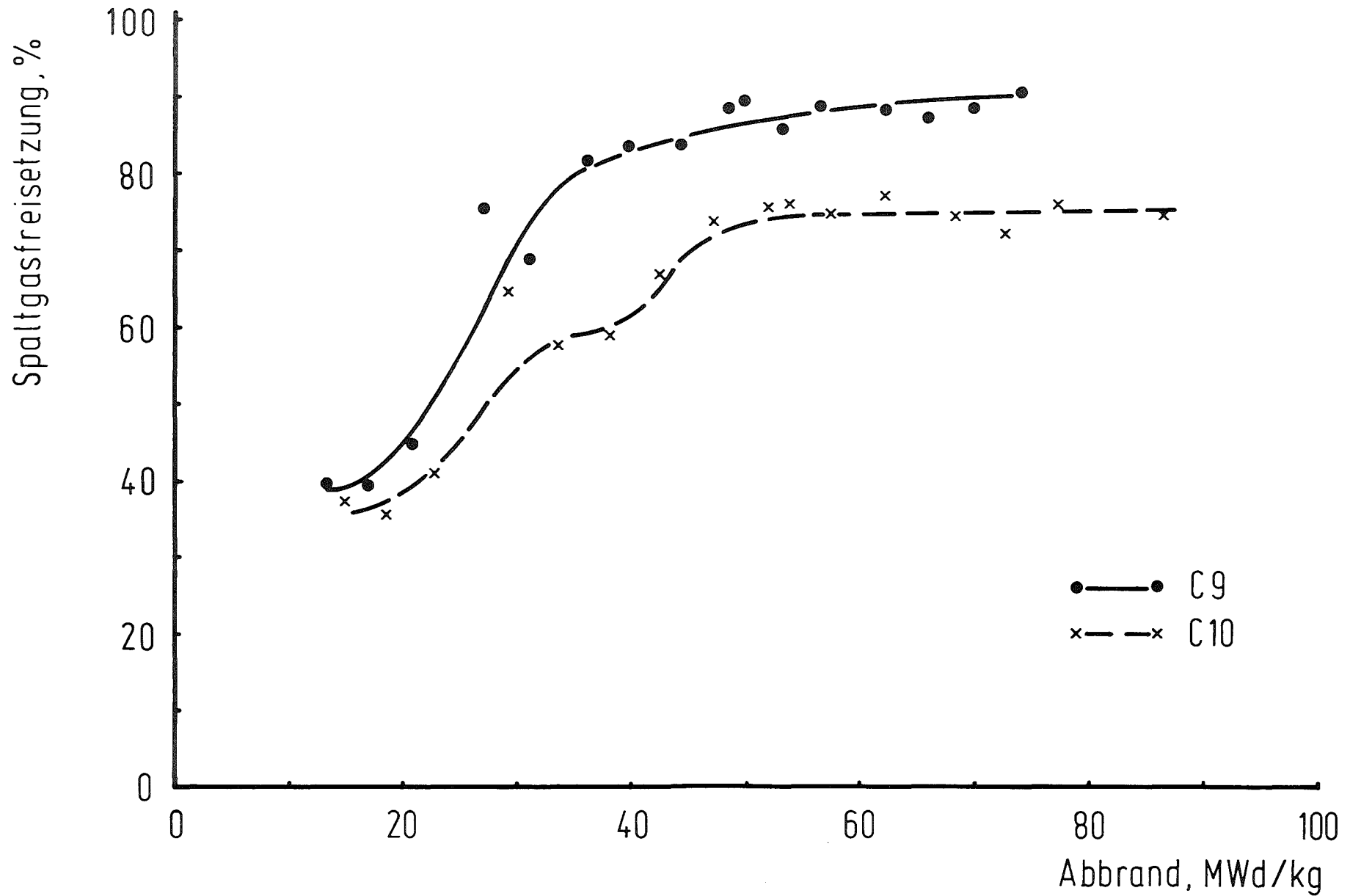


Abb. 2.4: Spaltgasfreisetzung der Stäbe Mol 8C9 und 10 in Abhängigkeit vom Abbrand

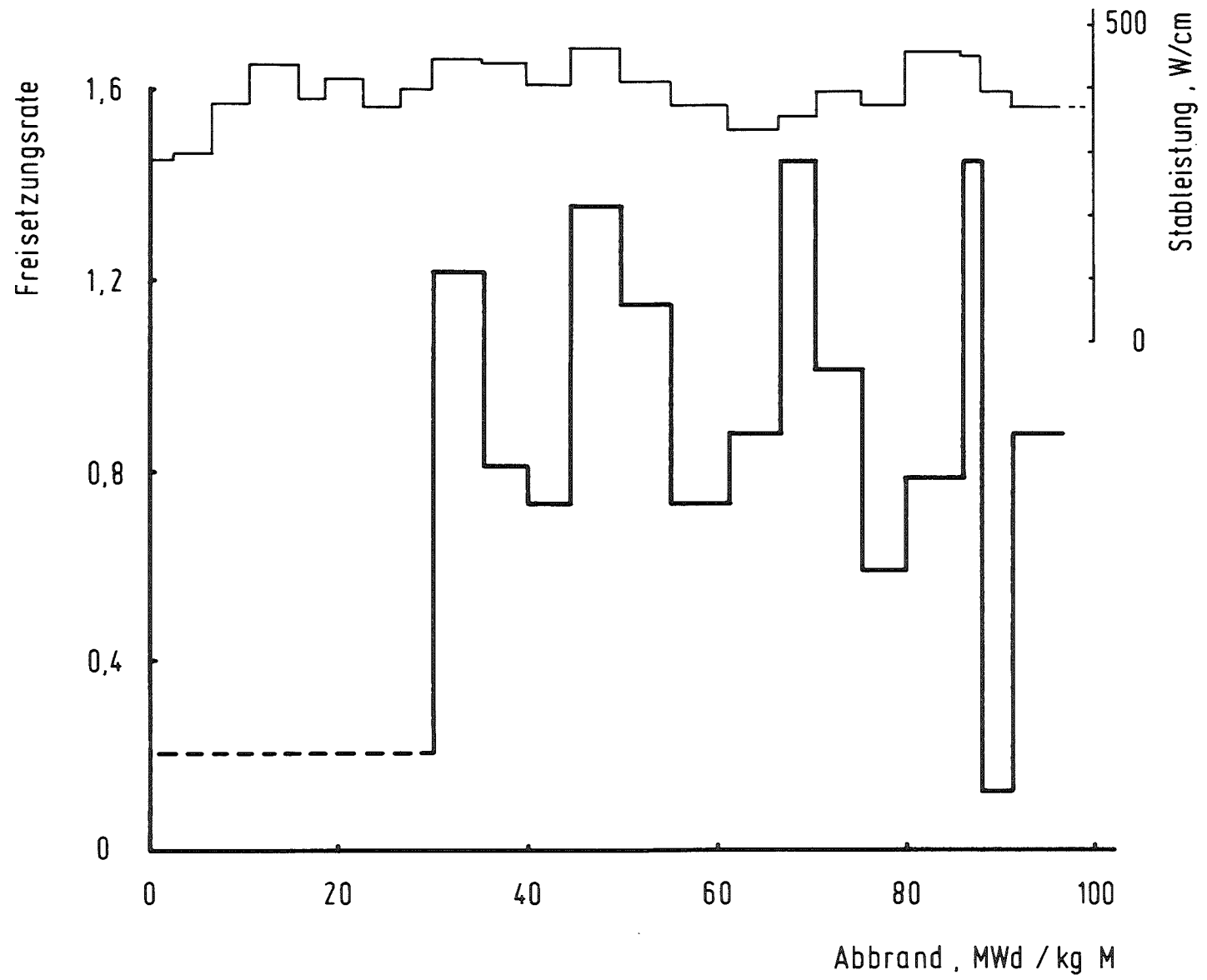


Abb. 2.5 : Spaltgasfreisetzungsrage und Stableistung des Stabes Mol 8C5 in Abhangigkeit vom Abbrand

3. Mechanische Wechselwirkung und chemische
Reaktion zwischen Brennstoff und Hülle

W.Dienst

3.1 Gemessene plastische Hülldehnung

Die Bestrahlungsversuchsgruppe Mol 8B/C war vorzugsweise geeignet, an Brennstäben hohen Abbrandes die Abhängigkeit der plastischen Hülldehnung von der Brennstoffdichte und von der spezifischen Stableistung zu untersuchen. Da die Bestrahlung im epithermischen Fluß des BR2 erfolgte, enthielt die nach Bestrahlung gemessene Hülldehnung keine nennenswerte Hüllschwellung durch Porenbildung. Bei vorangegangenen Bestrahlungsversuchen im thermischen Fluß des FR2 (Karlsruhe) wurden zwar UO_2 - PuO_2 -Brennstäbe mit verschiedenen Brennstoffdichten eingesetzt. Diese konnten aber nicht bei hinreichend ähnlichen Bestrahlungsbedingungen verglichen werden, im besonderen nicht bei einheitlich hohem Abbrand, wie er im Bestrahlungsversuch Mol 8B/C erreicht wurde. Die spezifische Stableistung wurde bei den FR2-Versuchen überhaupt nicht systematisch variiert. Meistens ergab sich dort für hohe Abbrände zwangsläufig ein beträchtliches Absinken der Stableistung im Verlauf der Bestrahlung.

Abb.3.1 gibt ein Beispiel für den axialen Verlauf der nach Bestrahlung gemessenen Hülldurchmesseränderung über dem Brennstoffabschnitt eines Mol 8C-Brennstabes. Da die Spaltgasdrücke in den Mol 8B/C-Brennstäben bis zum Ende der Bestrahlung ziemlich niedrig blieben (< 4 MP), ist eine nennenswerte Hülldehnung durch Kriechen unter dem inneren Gasdruck ausgeschlossen. Die gemessene Hülldurchmesservergrößerung ist daher allein auf mechanische Wechselwirkung mit dem Brennstoff zurückzuführen. In Tab.3.1 sind für alle Mol 8B/C-Brennstäbe die mittlere prozentuale Durchmesservergrößerung $\overline{\delta D}$ im ganzen Brennstoffabschnitt sowie die maximale Durchmesservergrößerung δD_{\max} angegeben, die im allgemeinen etwa in der Mitte des Brennstoffabschnittes, im Bereich der höchsten spezifischen Stableistung gemessen wurde. Die Tabelle enthält außerdem die wichtigsten Auslegungs- und Bestrahlungsdaten sowie Angaben über evtl. Hüllrißbildung.

Der große Unterschied zwischen den δD_{\max} - und $\overline{\delta D}$ -Werten zeigt, daß die Hülldehnung im allgemeinen ungleichmäßig über den Brennstoffabschnitt der Brennstäbe verteilt ist. Wie in Abb.3.1 als Beispiel zu erkennen ist, sinkt die Hülldurchmesservergrößerung zu den Brennstoffenden hin ab. Der Grund für dieses Absinken läßt sich nicht eindeutig angeben. Er kann durch die axialen Stableistungs- oder Hülltemperaturprofile gegeben sein (s.Abb.1.2 und 1.3), von denen verschiedene Vorgänge und Eigen-

schaften im Brennstab beeinflusst werden: thermische Ausdehnungs-Differenzen bei Stableistungsänderungen, Materialtransportvorgänge im Brennstoff, Hüllfestigkeit und Bestrahlungshärtung der Hülle. Eine quantitative Behandlung dieser Einflüsse für den Brennstab Mol 8C-5 ist in einem anderen Bericht enthalten /3.1/.

Bei Brennstäben niedriger Stableistung zeigt sich eine besonders ausgeprägte Tendenz zur schwellenartigen Begrenzung der stärkeren Hülldehnung (über einem geringfügigen Grundniveau) auf den mittleren Teil des Brennstoffabschnittes beiderseits des Stableistungsmaximums (Abb.3.2). Damit deutet sich eine untere Grenze für den Bereich lokaler spezifischer Stableistungen an, in dem der Mechanismus zur plastischen Hülldehnung unter den gegebenen Bestrahlungsbedingungen wirksam war. Diese untere Grenze scheint demnach bei etwa 270 W/cm zu liegen. Brennstäbe hoher Stableistung zeigen gelegentlich eine ähnliche, allerdings weniger ausgeprägte Tendenz zur Begrenzung der Hülldehnung auf den mittleren Teil des Brennstoffabschnittes, wie in Abb.3.1 zu erkennen ist. Dabei spielt die erwähnte Stableistungsgrenze sicher keine Rolle. Es scheint vielmehr noch eine Grenze für die Hülltemperatur zu geben, unterhalb deren keine beträchtliche plastische Hülldehnung mehr erfolgte. Sie würde dann bei einer Hüllinnenwandtemperatur von etwa 530°C liegen.

3.2 Diskussion der Hülldehnung

3.2.1 Untere Grenzen für Stableistung und Hülltemperatur

Zuerst sollen hier die im vorangegangenen Abschnitt festgestellten Stableistungs- und Hülltemperaturgrenzen für das Auftreten beträchtlicher plastischer Hülldehnung diskutiert werden, ehe dann auf die Änderung der plastischen Hülldehnung mit der Brennstoffdichte und der Stableistung eingegangen wird. Beide Grenzen müssen im Zusammenhang mit dem Mechanismus gesehen werden, der für die Hülldehnung von Oxidbrennstäben vorgeschlagen worden ist /3.2, 3.3, 3.4/. Danach wird die Hülldehnung meistens nicht durch die stationäre Brennstoffschwellung verursacht, die durch Kriechvorgänge im Brennstabinneren aufgefangen wird, sondern durch Brennstoff/Hülle-Ausdehnungsdifferenzen bei Stableistungserhöhungen nach längerem Betrieb bei gleichbleibender oder auch langsam sinkender Stableistung. Dieser Mechanismus erfordert einen festen, mechanisch hinreichend stabilen Kontakt zwischen Brennstoff und Hülle bei Beginn

der Stableistungsänderung.

Bei der relativ schnellen Aufeinanderfolge wirksamer Stableistungsänderungen im BR2 ergibt sich dieser Brennstoff/Hülle-Kontakt nur dann, wenn eine hinreichend große, heiße Innenzone des Brennstoffes vorliegt, in der schnelle Materialverschiebungen stattfinden, etwa durch schnelle Spaltgasschwellung, Porenwanderung, Brennstoff- und Spaltproduktverdampfung. Das heißt aber im wesentlichen, daß eine hinreichend große Stableistung erforderlich ist. Die oben festgestellte Stableistungsgrenze von 270 W/cm erscheint in dieser Hinsicht sinnvoll, weil sie schon deutlich innerhalb des Stableistungsbereiches liegt, in dem eine starke Restrukturierung des Brennstoffes unter beträchtlicher Materialverschiebung stattfindet. Dieser Stableistungsbereich ist durch die Bildung eines Zentralkanals im Brennstoff gekennzeichnet, die je nach Brennstabauslegung etwa zwischen 190 und 230 W/cm beginnt. Daneben kann aber das Auftreten einer unteren Stableistungsgrenze für die plastische Hülldehnung auch dadurch mit begründet sein, daß bei Stableistungserhöhungen eine hinreichend große thermische Ausdehnungsdifferenz zwischen Brennstoff und Hülle erforderlich ist, damit die Streckgrenze des Hüllmaterials überschritten wird /3.1/. In jedem Fall ist eine bestimmte Stableistungsgrenze für die plastische Hülldehnung nicht allgemein gültig sondern spezifisch für die vorliegenden Versuchsbedingungen.

Was die oben festgestellte untere Grenze der Hülltemperatur für eine beträchtliche plastische Hülldehnung (Hüllinnenwandtemperatur etwa 530°C) betrifft, so ist diese Grenze wahrscheinlich nicht auf die Hüllfestigkeit zurückzuführen. Denn die Temperaturabhängigkeit der Streckgrenze der Hülle, die der entscheidende Hüllmaterialkennwert für den oben erwähnten Hülldehnungs-Mechanismus ist, ist in der Umgebung von 530°C nur gering, und die Bestrahlungshärtung der Hülle verschwindet schon weitgehend bei beträchtlich niedrigeren Temperaturen. Die festgestellte Hülltemperatur-Grenze läßt sich besser mit der chemischen Reaktion zwischen Brennstoff und Hülle in Zusammenhang bringen, die gerade bei einer Hüllinnenwandtemperatur von 530°C stark anzusteigen beginnt (s.a. Abschnitt 3.4). Durch diese Reaktion kann es zu einer festen Haftung zwischen Brennstoff und Hülle kommen, die die Ausbildung einer mechanisch

tragfähigen Brennstoffstruktur bei engem Kontakt mit der Hülle vor der nächstfolgenden Stableistungserhöhung entscheidend begünstigt. Auf diesen Zusammenhang wurde schon früher hingewiesen /3.2, 3.5/.

3.2.2 Abhängigkeit von Brennstoffdichte und Stableistung

In einem Tagungsbeitrag /3.6/ wurde bereits mit dem in Abb.3.3 gezeigten Diagramm ein Überblick über den Zusammenhang zwischen der maximalen Hülldehnung der Mol 8C-Brennstäbe und der Brennstoffdichte sowie den Bestrahlungsbedingungen der Stäbe gegeben. In Abb.3.3 sind noch Meßpunkte für die beiden Mol 8B-Stäbe hinzugefügt. Von dieser Darstellung ausgehend soll hier eine Diskussion der Parameterabhängigkeit der Hülldehnung versucht werden.

Dazu erscheint es zunächst geboten, Brennstäbe aus der Betrachtung auszuschließen, bei denen die gemessene Hülldehnung stark durch Hüllrisse beeinflusst sein könnte, im besonderen wegen der Reaktion von eingedrun- genem NaK mit dem Brennstoff. Das sind jedenfalls diejenigen Brennstäbe, die zwei Schadensstellen, jeweils in der Mitte und am oberen Ende des Brennstoffabschnittes, aufweisen. Es handelt sich um die Stäbe Mol 8B-1, C-9, C-10. Die Stäbe C-1 und C-2 haben jeweils nur eine Schaden- stelle, in der Mitte bzw. am oberen Ende des Brennstoffabschnittes, und weichen mit ihrer Hülldehnung nur wenig von unbeschädigten vergleichba- ren Stäben (C-3 bzw. C-4) ab. Sie sollen daher in die Betrachtung einbe- zogen bleiben.

Abb.3.4 enthält den reduzierten Meßpunkt-Bestand. Die maximale Hüll- dehnung ist in Abhängigkeit von der Brennstoffdichte aufgetragen. Da- mit auch die Schwankungen des Abbrandes innerhalb der Versuchsgruppe sinngemäß berücksichtigt werden, ist hier im Gegensatz zu Abb.3.3 die Hülldehnung je % Abbrand angegeben. Dabei wurde aber nur das Abbrand- Intervall oberhalb 3% Abbrand zugrundegelegt, weil nach allgemeiner Übereinstimmung in Schnellbrüter-Oxidbrennstäben erst ab etwa 3% Ab- brand mit einer nennenswerten Hülldehnung durch mechanische Wechsel- wirkung mit dem Brennstoff zu rechnen ist (s.a./3.1/). Die Meßpunkte in Abb.3.4 sind für hohe und niedrige Stableistung (jeweils im axialen Stableistungsmaximum der Brennstäbe) verschieden gekennzeichnet.

Das Diagramm zeigt, daß bei hoher Stableistung keine Abhängigkeit der Hülldehnung von der Brennstoffdichte erkennbar ist. In Abb.3.5 und Abb.3.6 ist das Gefügebild von Brennstabquerschnitten im Bereich des axialen Stableistungsmaximums für hohe Brennstoffdichte bzw. für niedrige Brennstoffdichte wiedergegeben, wie schon an den verschiedenen Zentralkanaldurchmessern erkennbar ist. In beiden Fällen zeigen sich in der äußeren Brennstoffzone ähnliche Erscheinungen, die für eine starke mechanische Wechselwirkung mit der Hülle charakteristisch sind: Eine innige Haftung zwischen Brennstoff und Hülle über eine Reaktionsproduktschicht, fast keine zur Brennstoffoberfläche durchgehenden Radialrisse, zahlreiche Risse in Umfangsrichtung, eine neue Poren-Population, die wahrscheinlich durch Ausheilung von Rissen erzeugt wird.

Für die Brennstäbe mit niedriger Stableistung zeigt Abb.3.4 dagegen einen starken Anstieg der Hülldehnung mit der Brennstoffdichte. Auch der in Abb.3.3 eingetragene, ähnliche Verlauf früherer Ergebnisse kam mit niedriger Stableistung in Zusammenhang gebracht werden, weil die betreffenden UO_2 - PuO_2 -Brennstäbe im FR2 bei hohem Abbrand stark absinkende Stableistung zeigten /3.7/. Die bei niedriger Brennstoffdichte beobachtete, geringe, unterhalb 80% TD schließlich sogar verschwindende Hülldehnung ist wahrscheinlich auf die lange Verzögerung bzw. Unterbindung des Brennstoff/Hülle-Kontaktes durch starke bestrahlungsbedingte Nachsinterung des Brennstoffes zurückzuführen. Bei hoher Stableistung kann die entsprechende Brennstoffdurchmessererminderung dagegen durch stärkere Spaltgasschwellung und radiale Porenwanderung schnell kompensiert werden.

Schwieriger erscheint die Deutung der recht hohen Hülldehnungen, die nach Abb.3.4 bei niedriger Stableistung und hoher Brennstoffdichte beobachtet wurden. Man könnte hier ausnahmsweise an eine Hülldehnung durch die stationäre Brennstoffschwellung denken, die nach Erschöpfung des Leervolumens in den Brennstäben (10,5 Vol.% für 11,5 und 11,8% Abbrand) einsetzt. Diese Betrachtung würde jedoch eine für das hohe Abbrandniveau (> 10% Abbrand) überraschend große Schwellrate des Brennstoffes ergeben ($\approx 1,3$ Vol.% je % Abbrand). Gegen diese Betrachtung sprechen aber vor allem Gefügebilder von Brennstabquerschnitten wie in Abb.3.7. Abb.3.7 zeigt einen Querschnitt in der Nähe des Stableistungsmaximum an der Position maximaler Hülldehnung. Hier liegt noch viel Leervolumen im

Zentralkanal, in breiten Rissen sowie in zahlreichen großen Poren des Brennstoffes vor, das zur Aufnahme der Brennstoffschwellung zur Verfügung steht. Dabei scheint es sich sogar um einen höheren Leervolumen-Anteil zu handeln, als in Abb.3.5 bei gleicher ursprünglicher Brennstoffdichte und beträchtlich niedrigerem Abbrand (9,8% Abbrand), aber hoher Stableistung.

Ein höherer Leervolumen-Anteil würde mit der höheren Hülldehnung der Brennstäbe niedriger Stableistung zusammenpassen, wenn die Hülldehnung nicht durch Brennstoffschwellung sondern durch partielle Rißausheilung entstanden ist. Dabei wird Leervolumen, das im Brennstab durch thermische Schrumpfungsdifferenzen bei sinkender Stableistung entsteht, zum Teil in das Brennstoffgefüge aufgenommen, so daß bei Wiedererhöhung der Stableistung eine Hülldehnung erfolgen muß. Dieser Hülldehnungsmechanismus wird als der allgemein wahrscheinlichste angesehen, wie schon in Abschnitt 3.2.1 erwähnt wurde. Der Mechanismus scheint in Brennstäben mit etwa 300 W/cm Stableistung (und hinreichend hoher Hülltemperatur) bei hoher Brennstoffdichte besonders wirksam zu sein. Die Ursache dafür dürfte sein, daß in diesem Fall eine besonders breite Brennstoffringzone bei Stableistungserhöhungen mit der Hülle in mechanische Wechselwirkung treten kann.

Ein Vergleich ist dabei jedoch nur mit den Brennstäben ähnlicher Stableistung, aber niedrigerer Brennstoffdichte gegeben. Ein direkter Vergleich mit den Brennstäben gleicher Brennstoffdichte, aber hoher Stableistung ist nicht möglich, weil diese Stäbe bei etwa gleichem Abbrand eine viel geringere Anzahl von Stableistungsänderungen aufweisen, die hier als Ursache für die Hülldehnung angesehen werden. Es kann also nicht gefolgert werden, daß bei hoher Brennstoffdichte im allgemeinen mit größeren Hülldehnungen bei mittleren als bei hohen Stableistungen zu rechnen ist.

3.3 Hüllschäden

Wie schon aus Abb.3.3 zu entnehmen war, zeigten 5 Stäbe von den 12 Mol 8B/C-Brennstäben Hüllschäden. Für diese Stäbe sind Angaben über die Positionen der Hüllschäden in Tab.3.1 mit aufgeführt. Der Überblick über diese Tabelle, wie auch früher schon der Überblick über Abb.3.3 /3.6/

vermittelt den Eindruck, daß bei Hülltemperaturen $> 580^{\circ}\text{C}$ und plastischen Hülldehnungen $\gtrsim 0,5\%$ mit der Bildung von Hüllrissen gerechnet werden muß.

Damit wird allerdings unterstellt, daß der primäre Hüllschaden jeweils im Bereich höchster Hülltemperatur und größter Hülldehnung aufgetreten ist, d.h. etwa in der Mitte des Brennstoffabschnittes der Brennstäbe. Alle 5 beschädigten Stäbe weisen dort tatsächlich einen Hüllschaden auf. Beim Stab C-2 war zwar zunächst nur ein Hüllschaden am oberen Brennstoffende zu erkennen, die mikroskopische Untersuchung des Brennstabquerschnittes in der Position höchster spezifischer Stabileistung zeigte dann aber doch einen Hüllriß (Abb.3.8). Es ist anzunehmen, daß dieser Riß in der Nachbarschaft der Schliffebene die Hülle vollständig durchdringt, so daß Spaltgas aus dem Brennstab austreten konnte. 4 der 5 beschädigten Stäbe wiesen noch einen zweiten Hüllschaden am oberen Ende des Brennstoffabschnittes auf. Hier besteht der Verdacht, daß dieser Schaden jeweils auf einer starken Überhitzung der Hülle beruhte, die durch einen lokalen Stau der Spaltgasblasen verursacht wurde, die in der NaK-Füllung der Bestrahlungskapsel aus dem weiter unten liegenden primären Hüllschaden aufstiegen (s.a./1.3/).

Die Schliffbilder von Brennstabschnitten im Bereich der Hüllschäden geben wenig Auskunft über Ursache und Typ der Hüllrisse, weil die Bilder stark durch Sekundäreffekte bestimmt sind, zu denen im besonderen das lokale Abschmelzen der Hülle gehörte. Es ist zu vermuten, daß die Hüllrißbildung entscheidend durch die Innenkorrosion der Hülle (s.Abschnitt 3.4) und durch die Hochtemperatur-Versprödung des Hüllmaterials unter Bestrahlung gefördert wird. Beide Erscheinungen zeigen in dem hier in Betracht kommenden Hülltemperaturbereich von $585-640^{\circ}\text{C}$ (max. Hüllinnenwandtemperatur der beschädigten Brennstäbe) stark ansteigende Wirkung. Daher kann die besonders niedrige Hüllbruchdehnung des Stabes C-1 (0,4%) auf seine hohe Hülltemperatur zurückgeführt werden. Die hohe Hüllbruchdehnung des Stabes C-2 (1,45%) zeigt die Streubreite der zu erwartenden Werte.

Die maximalen Hülldehnungen der Stäbe B-1, C-9 und C-10 können, wie schon früher erwähnt, nicht als Hülldehnungen bis zum Bruch diskutiert werden, weil an diesen Stäben ein starker Einfluß der Reaktion des ein-

gedrungenen NaK mit dem Brennstoff erkennbar war. Bei den Stäben C-9 und C-10 könnte die Beladung mit Brennstofftabletten verschiedener Sinterdichte bei verschiedener Spaltbreite zwischen Brennstoff und Hülle (s. Abschnitt 1) zur frühen Auslösung eines Hüllrisses beigetragen haben, wenn sich dadurch lokal besonders komplizierte Spannungsverhältnisse in der Hülle ergaben.

Der Hüllschaden am Stab B-1 erscheint im Zusammenhang der Mol 8B/C-Ergebnisse schwer erklärlich und ist möglicherweise nur auf eine lokale Überhitzung der Brennstabhülle zurückzuführen, die durch schlechte Wärmeabführung von der Brennstaboberfläche verursacht wurde.

3.4 Chemische Reaktion zwischen Brennstoff und Hülle

Die Stärke der chemischen Reaktion zwischen Brennstoff und Hülle wurde hier wie üblich durch die größte Eindringtiefe von Reaktionsprodukten in der Hülle beschrieben, die jeweils am polierten Schliff eines Brennstabquerschnittes mikroskopisch erkennbar war. Abb.3.9 zeigt eine Stelle mit starkem, 100 µm tiefem Hüllangriff. In Abb.3.10 sind die Meßergebnisse von allen verfügbaren Brennstabquerschnitten der Versuchsgruppe Mol 8C über der Hüllinnenwandtemperatur aufgetragen.

Zum Vergleich ist eine strichpunktierte Linie eingetragen, die früher zur Verwendung als obere Grenze der zu erwartenden Angriffstiefe empfohlen wurde /3.8/. Es zeigt sich, daß die Meßwerte beträchtlich über diese Linie hinausstreuen; sie wären besser durch die durchgezogene, leicht S-förmige Kurve zu begrenzen. Diese ähnelt in ihrer Form der 95%-Zuverlässigkeitsgrenze, die für einen größeren Meßwerte-Bestand von Brennstäben mittleren Abbrandes ermittelt wurde (Abb.3.11); sie ist in Abb.3.10 gestrichelt eingetragen. Die obere Meßwertgrenze für die hier untersuchten Brennstäbe hohen Abbrandes ist aber zu niedrigeren Temperaturen verschoben. Damit erscheint die bestehende Vermutung gestützt, daß sich der Anstieg des Hüllangriffes mit der Hülltemperatur zu desto niedrigeren Temperaturen verschiebt, je höher der Abbrand der Brennstäbe wird. Es läßt sich jedoch nicht ganz ausschließen, daß die Temperaturverschiebung einfach durch das Verfahren der Hülltemperaturermittlung aus den schwankenden Bestrahlungsbedingungen im BR2 bedingt ist.

Was die Abhängigkeit des Hüllangriffs von anderen Parametern als der Hülltemperatur betrifft, so wurde das sehr einflußreiche O/M-Verhältnis des Brennstoffes in dieser Versuchsgruppe nicht gezielt variiert (O/M=1,98-2,00), und Unterschiede durch verschiedene Brennstoffdichte waren nicht erkennbar. Eine Brennstoffdichte-Abhängigkeit wurde in anderen Versuchen auch höchstens im Bereich niedriger Abbrände gefunden. Zur Struktur der Reaktionszone zwischen Brennstoff und Hülle ist zu vermerken, daß sie oft schichtartig und weniger stark gegliedert erscheint als in anderen Brennstabbestrahlungsgruppen. Typische Angriffsbilder zeigen Abb.3.5, 3.6 und 3.12. Die Schichtstruktur dürfte jedoch nicht auf Besonderheiten der chemischen Reaktion in den Mol 8B/C-Brennstäben beruhen. Sie kann vielmehr auf die feste Haftung bei starker mechanischer Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle zurückgeführt werden, durch die bei Stabileistungswechseln immer wieder Hüllschichten, die durch Korngrenzenangriff gelockert worden sind, von der Hüllinnen-seite gelöst und in die Reaktionsproduktzone zwischen Brennstoff und Hülle aufgenommen werden.

Literatur

- /3.1/ Müller I.: Untersuchungen zur mechanischen Wechselwirkung zwischen Oxidbrennstoff und Hülle bei Leistungswechseln in Schnellbrüter-Brennstäben. KFK-Bericht, in Vorbereitung
- /3.2/ Brucklacher D., Dienst W.: Experimental Results on the Mechanical Interaction between Oxide Fuel and Cladding, in: Fuel and Fuel Elements for Fast Reactors, Vol.I, IAEA, Vienna: 1974, S.147-61
- /3.3/ Gerken A.: Modelltheoretische Analyse der Brennstoffbelastungen durch zyklischen Leistungsbetrieb anhand des experimentellen Datenmaterials der KVE Vg.4a, 4b, 5b und Mol 8B. KFK 1913 (1974)
- /3.4/ Brucklacher D., Dienst W., Zimmermann H.: Die mechanische Belastung der Hülle durch den Brennstoff. KFK 1999 (1974) S.59-80
- /3.5/ Dienst W., Götzmann O., Ondracek G., Zimmermann H.: Auswertung von Untersuchungsergebnissen an bestrahlten UO_2 - PuO_2 -Brennstäben in: Reaktortagung, Karlsruhe, 10.-13.April 1973. Leopoldshafen 1973: ZAED. S.295-98
- /3.6/ Dienst W., Müller I.: Mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle in Schnellbrüter-Brennstäben, in Reaktortagung, Düsseldorf, 30.März-2.April 1976. Leopoldshafen 1976: ZAED. S.470-73

- /3.7/ Weimar P., Dippel Th., Freund D.: Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO_2/PuO_2 -Brennstab-Bestrahlungsexperimente der FR2-Kapsel-Versuchsgruppe 4b. KFK 1952 (1974)
- /3.8/ Dienst W.: Folgerungen für die Brennstoff- und Brennstabauslegung. KFK 1999 (1974) S.111-17
- /3.9/ Götzmann O.: A Contribution to the Specialist Meeting on Fuel Failure Mechanisms (1975) unveröffentlicht

Tab.3.1: Hüldehnung (δD) und Hüllrisse ("m" in der Mitte, "o" am oberen Ende des Brennstoffabschnittes) an den Mol 8B/C-Brennstäben, sowie Brennstoff-Schmierdichte (ρ_{sm}), Stableistung (χ), Hüllinnenwandtemperatur (T_{Hi}) und Abbrand (A) nach Tab.1.2

Stab	ρ_{sm} [% TD]	χ [W/cm]	T_{Hi} [°C]	A [% U+Pu]	$\bar{\delta D}$ [%]	δD_{max} [%]	Hüll- risse
8B-1	ca.	410	590	11,6	0,28	0,6	m, o
8B-2	79,0	390	640	9,4	0	0	
8C-1	ca. 81,6	480	640	9,8	0,22	0,4	m
8C-2		280	615	11,5	0,48	1,45	(m?) o
8C-3		480	555	10,5	0,15	0,3	
8C-4		300	585	11,8	0,67	1,7	
8C-5	ca. 89,7	490	610	11,3	0,15	0,6	
8C-6		295	505	11,3	0,04	0,15	
8C-7		480	575	10,7	0,15	0,4	
8C-8		295	580	11,7	0,04	0,25	
8C-9	ca.	430	600	8,6	0,3	0,75	m, o
8C-10	85,6	480	585	10,8	0,42	0,95	m, o

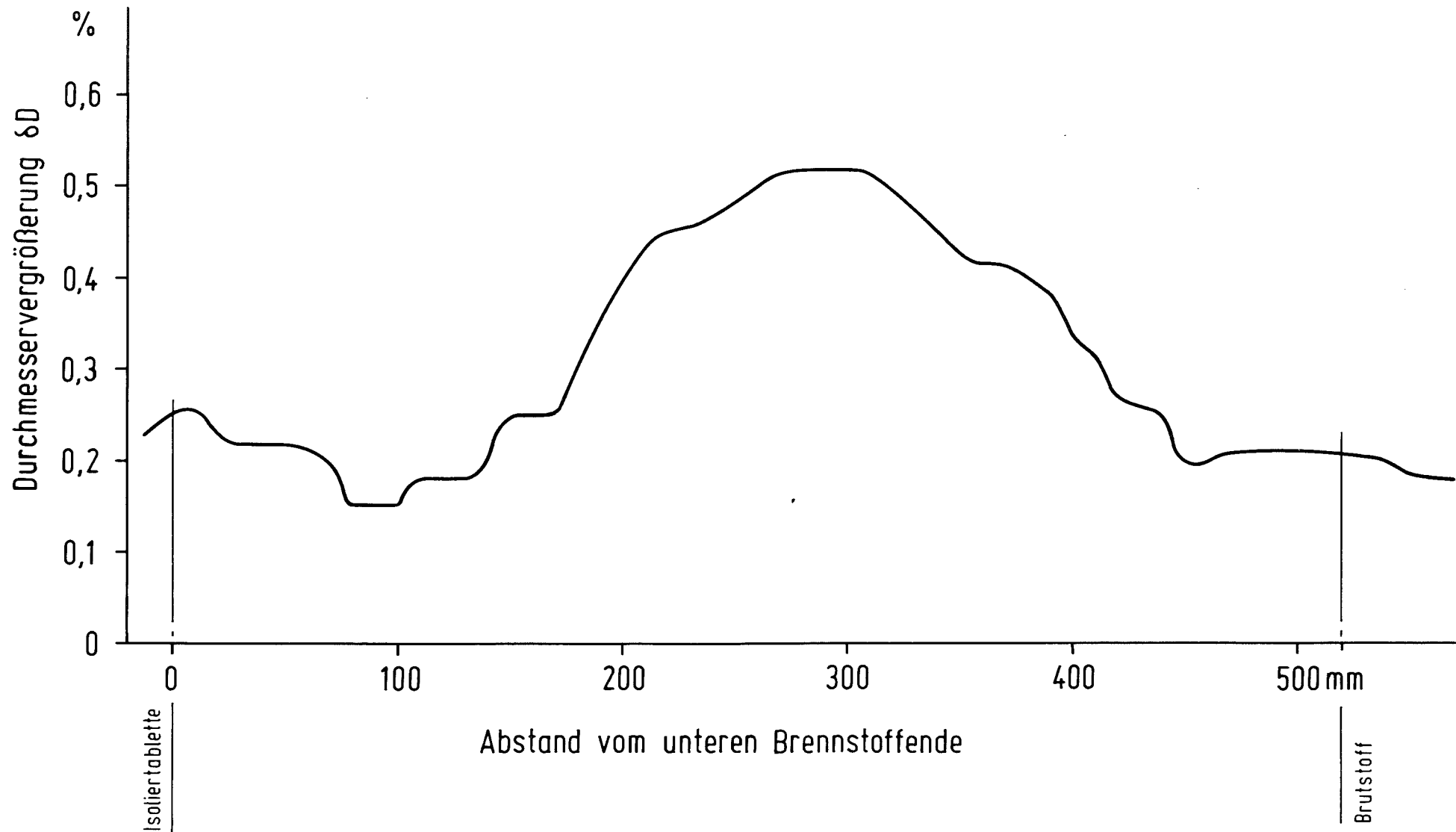


Abb. 3.1

Prozentuale Durchmesservergrößerung über dem Brennstoffabschnitt des Brennstabes Mol 8C-5.

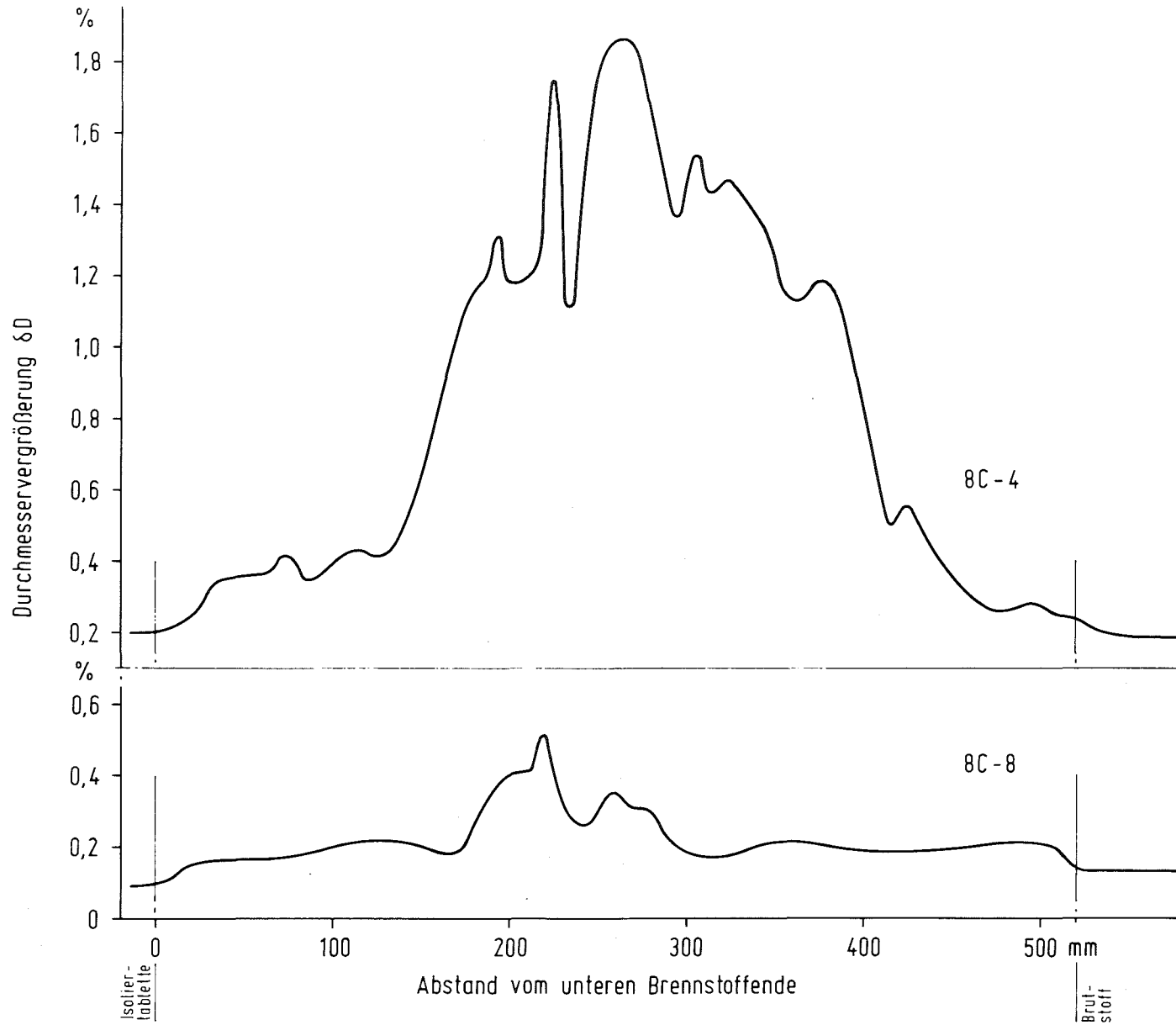


Abb. 3.2
Prozentuale Durchmessergrößerung über dem Brennstoffabschnitt der Brennstäbe Mol 8C-8 und Mol 8C-4.

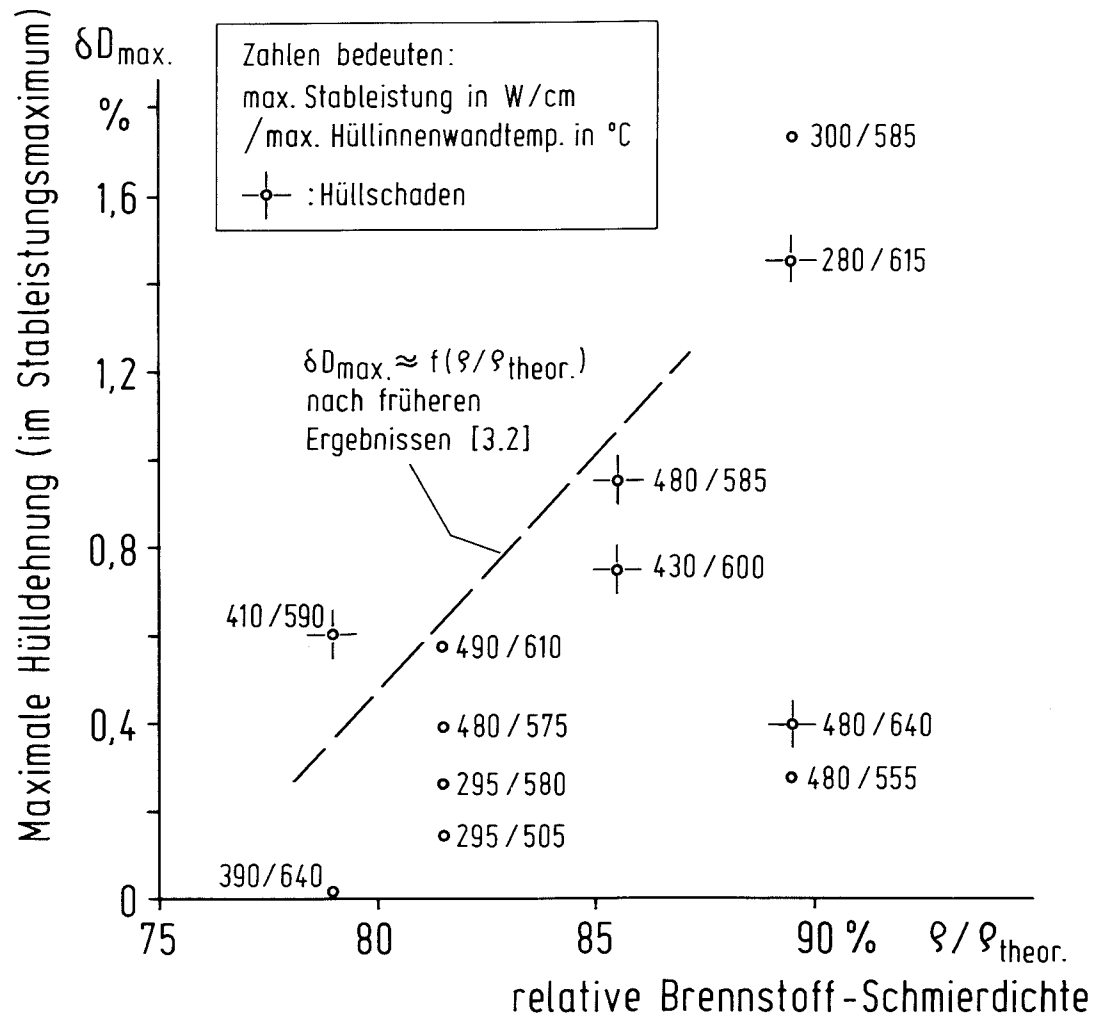


Abb. 3.3

Maximale Hülldurchmesservergrößerung in der Brennstab-Kapselbestrahlung Mol 8B/C (im BR2). Auftragung über der Brennstoff-Schmierdichte.
 Parameter: Für alle Bestrahlungszyklen gemittelte max. Stableistungen und max. Hüllinnentemperaturen. Maximaler Abbrand jeweils 9-12%.

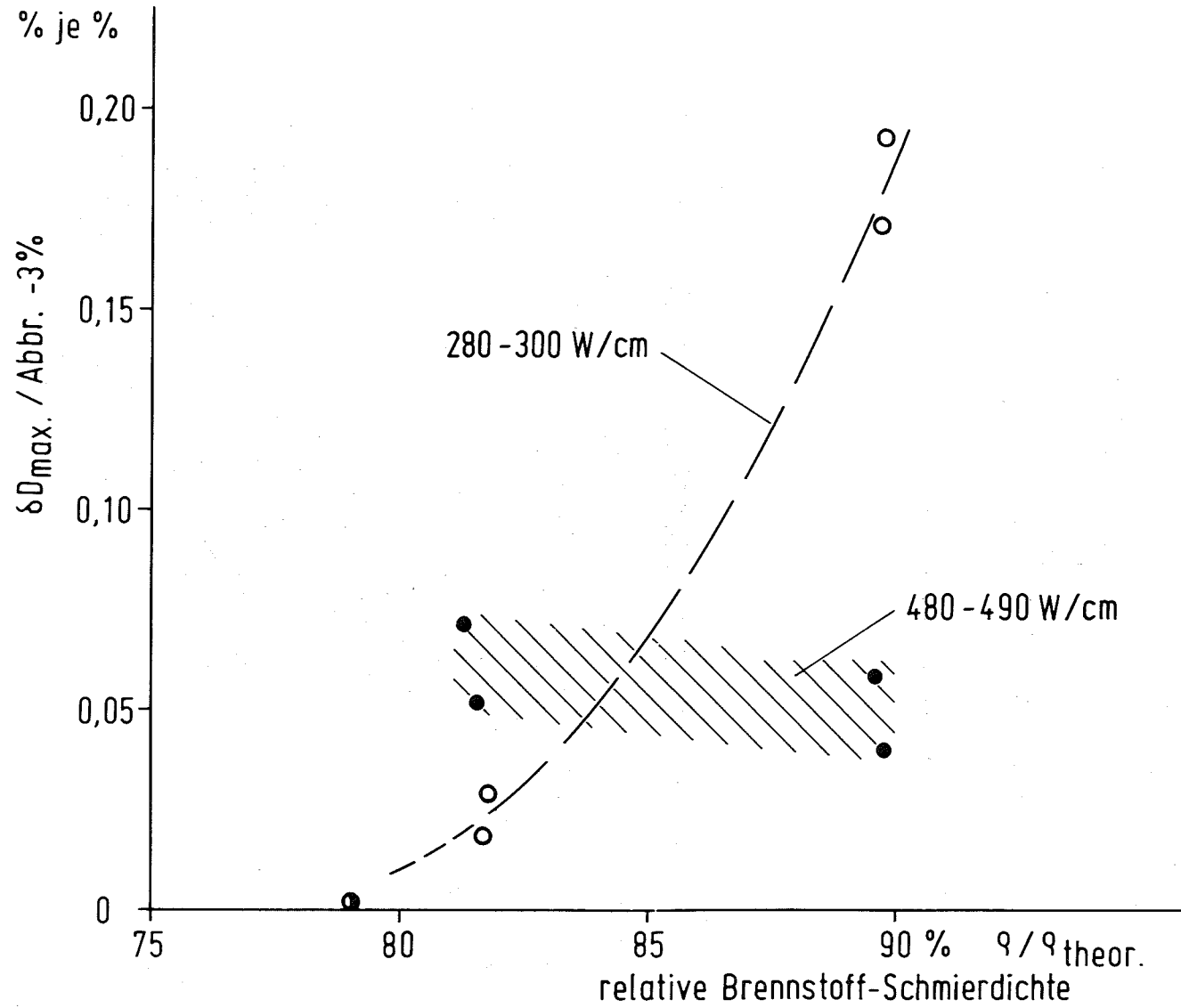


Abb. 3.4

Hülldehnungsrate, bezogen auf den reduzierten Abbrand, über der Brennstoff-Schmierdichte. Parameter: Stableistung.

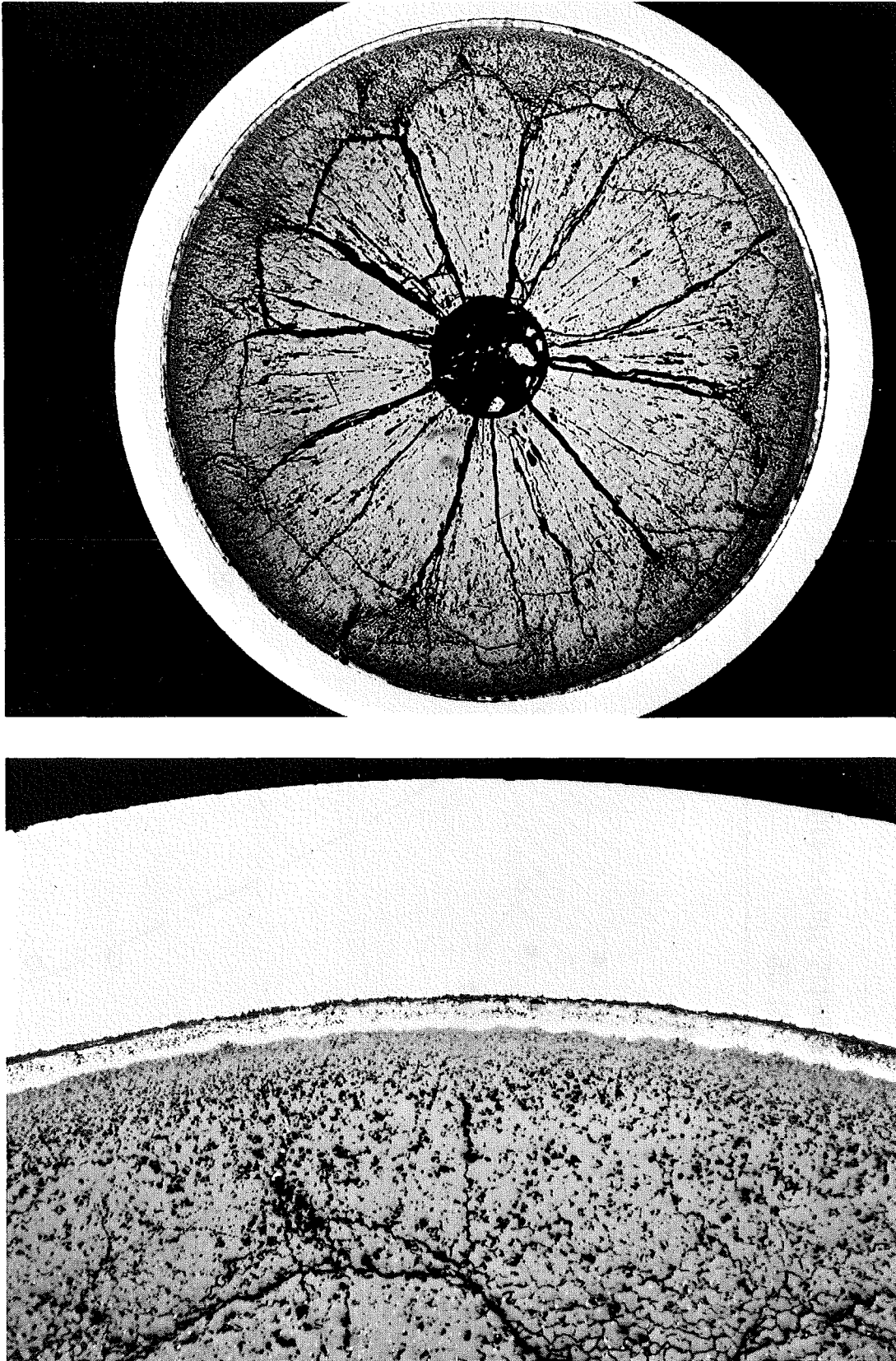


Abb.3.5: Brennstabquerschnitt (oben, Vergr.20x) und Kontaktzone Brennstoff/Hülle (unten, Vergr.100x) im Brennstab Mol 8C-1, 34 cm oberhalb des unteren Brennstoffendes

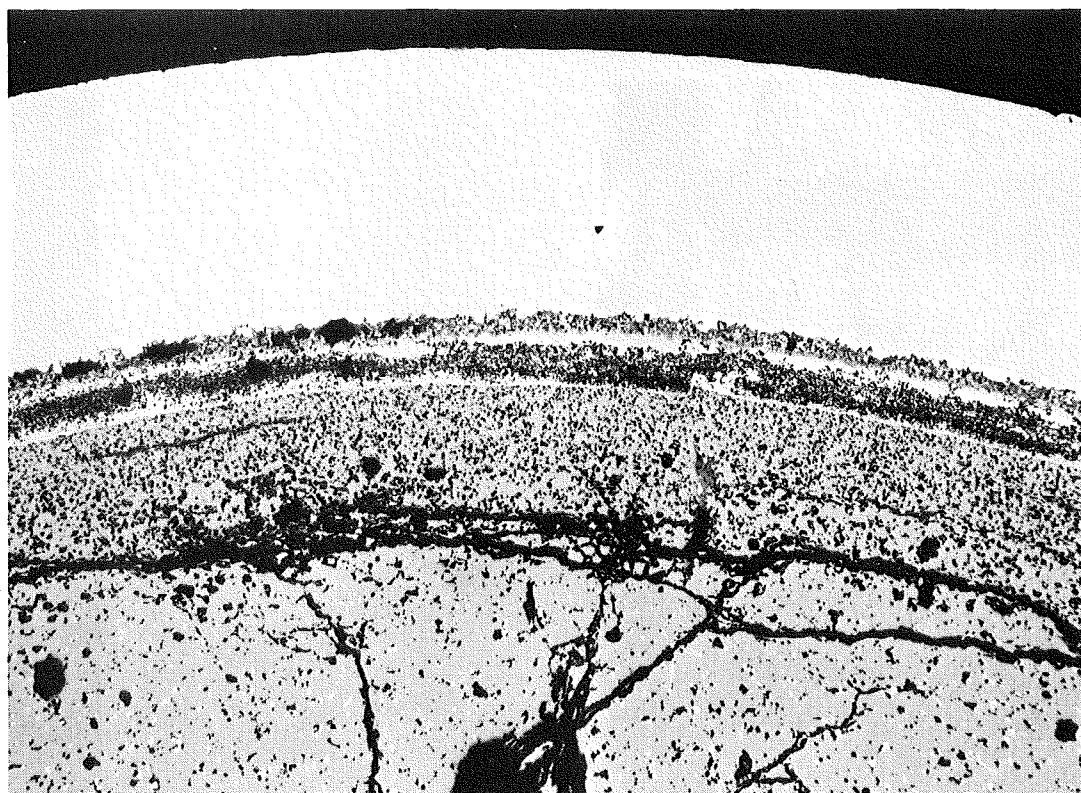
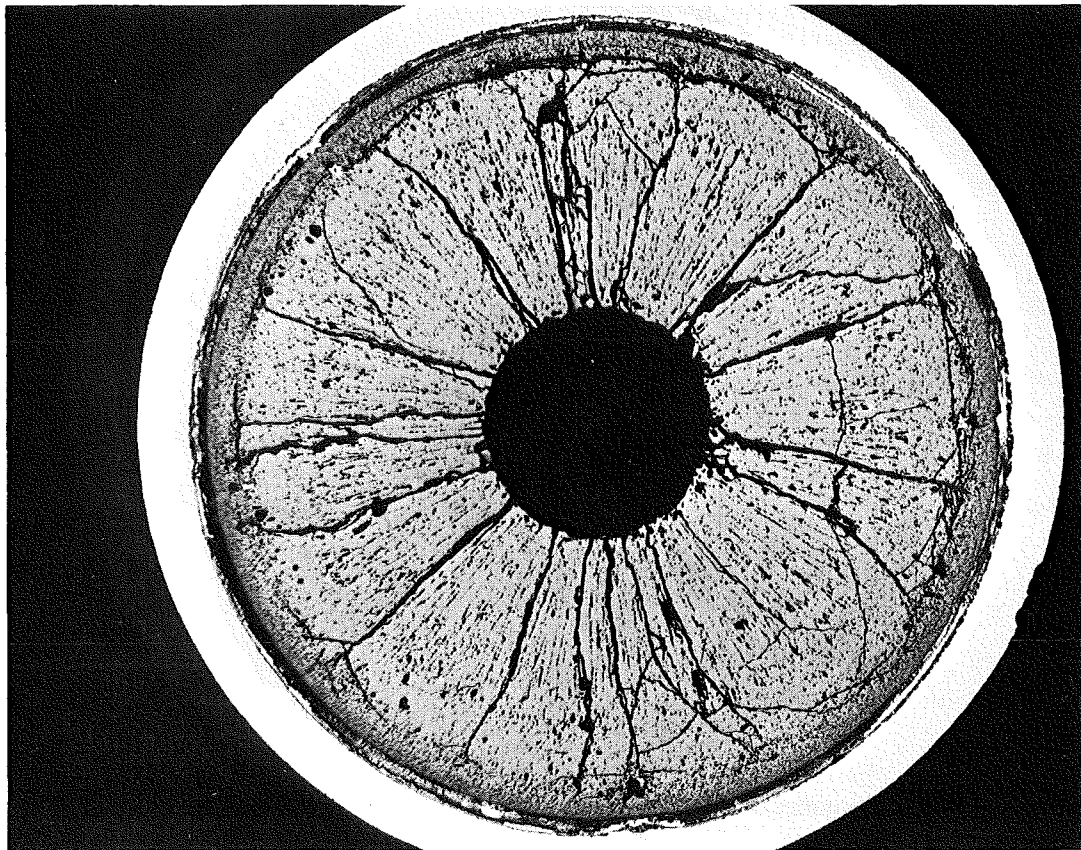


Abb.3.6: Brennstabquerschnitt (oben, Vergr.20x) und Kontaktzone Brennstoff/Hülle (unten, Vergr.100x) im Brennstab Mol 8C-5, 22 cm oberhalb des unteren Brennstoffendes

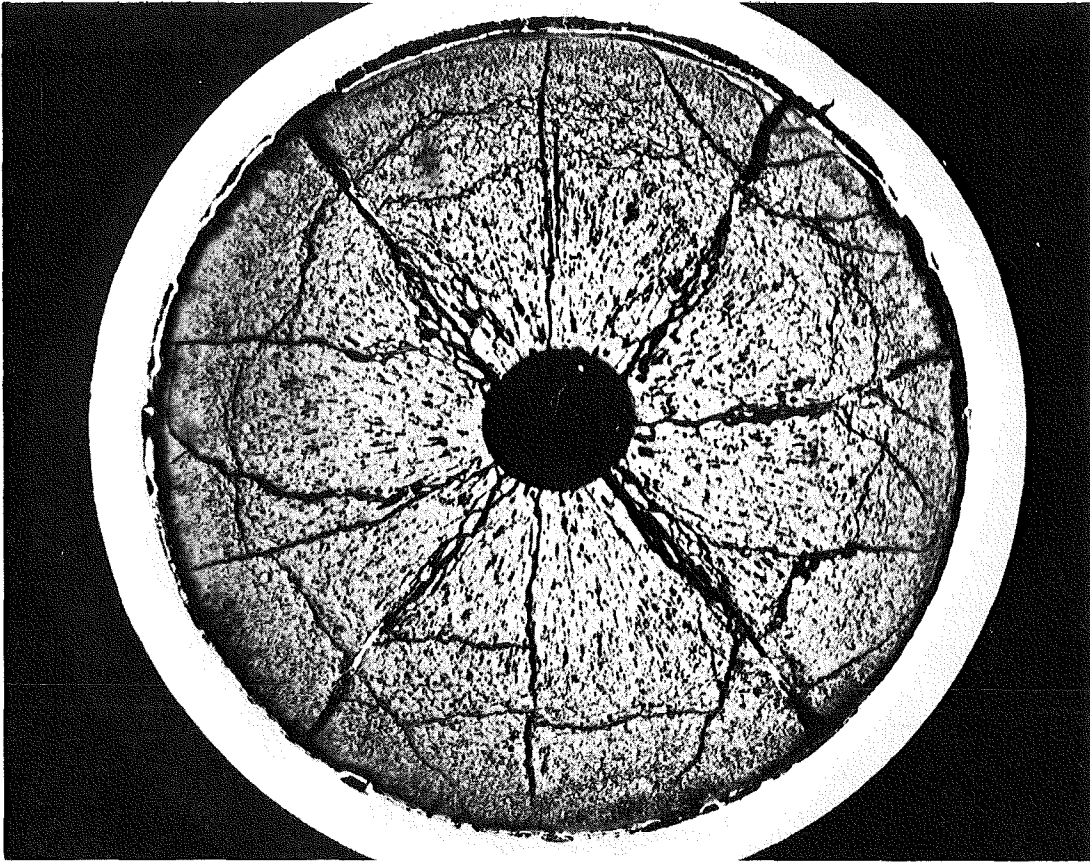


Abb.3.7: Querschnitt des Brennstabes Mol 8C-2 28 cm oberhalb des unteren Brennstoffendes, Vergr.20x

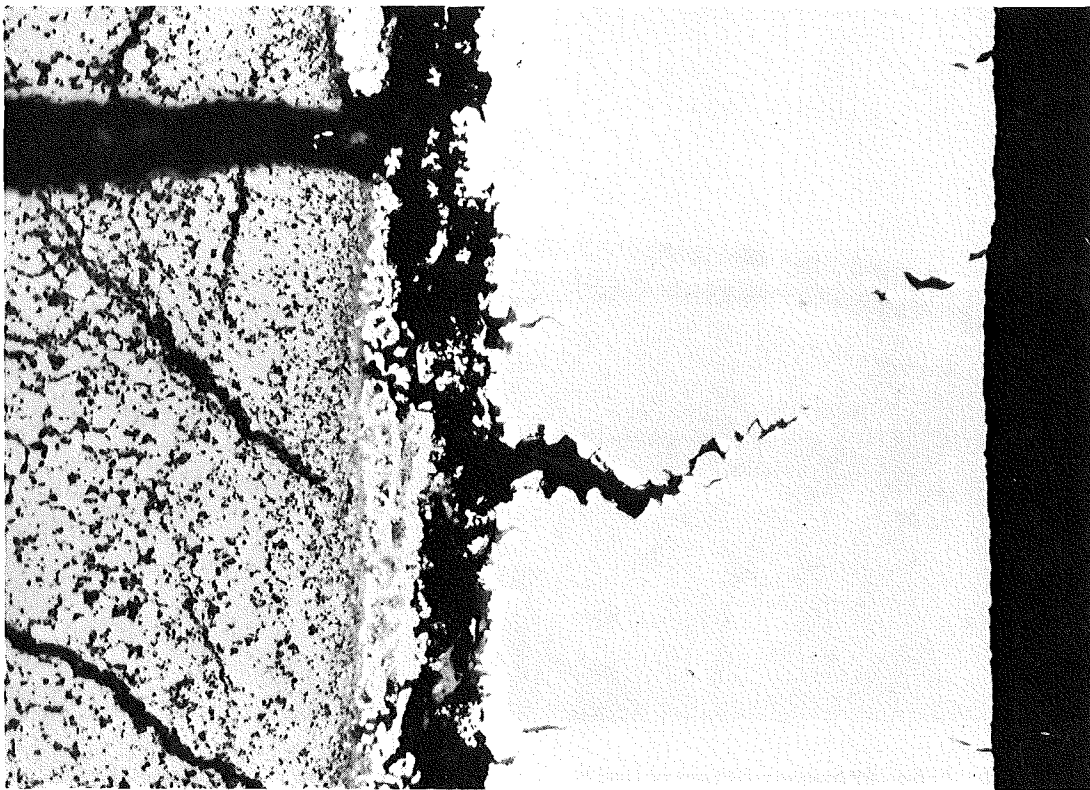


Abb.3.8: Hüllriß im Brennstabquerschnitt in Abb.3.7, Vergr. 200x

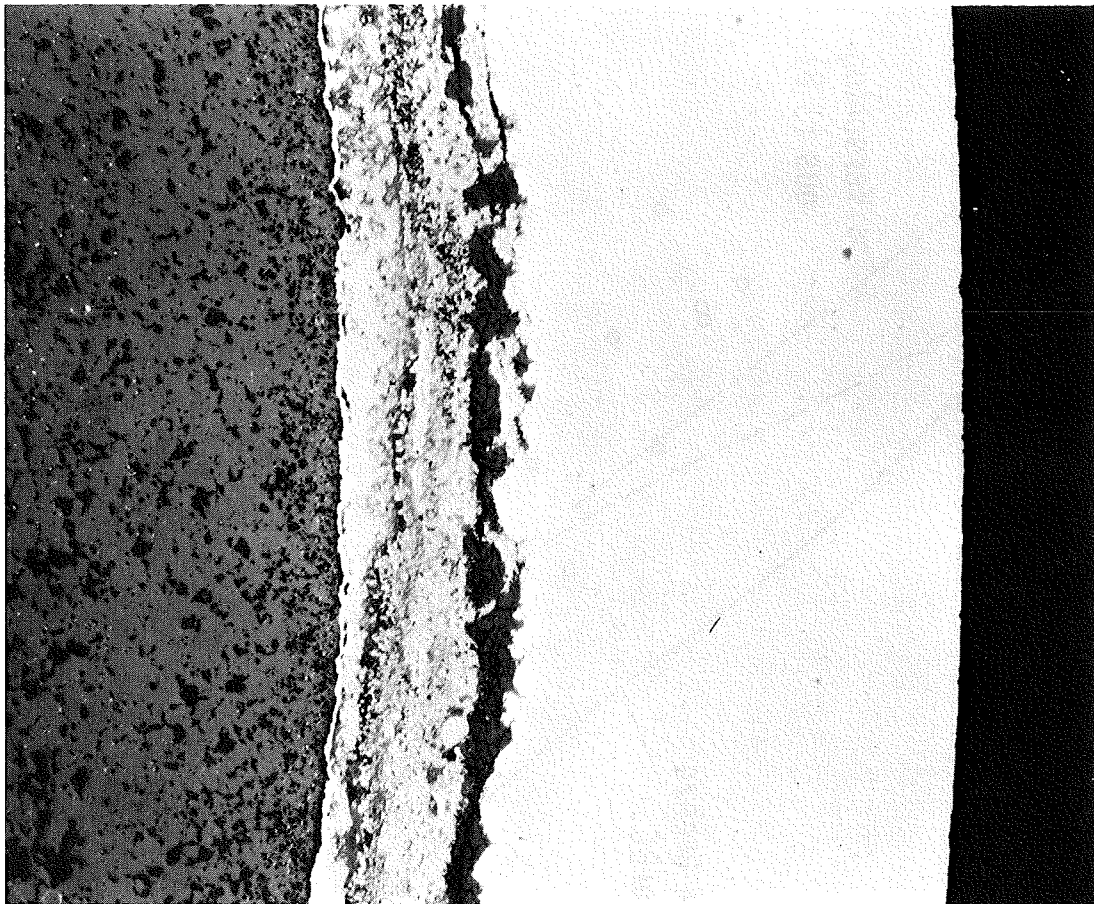


Abb.3.9: Starker, etwa 100 µm tiefer Hüllangriff im Brennstab
Mo1 8C-9, 28 cm oberhalb des unteren Brennstoffendes.
Vergr. 200x

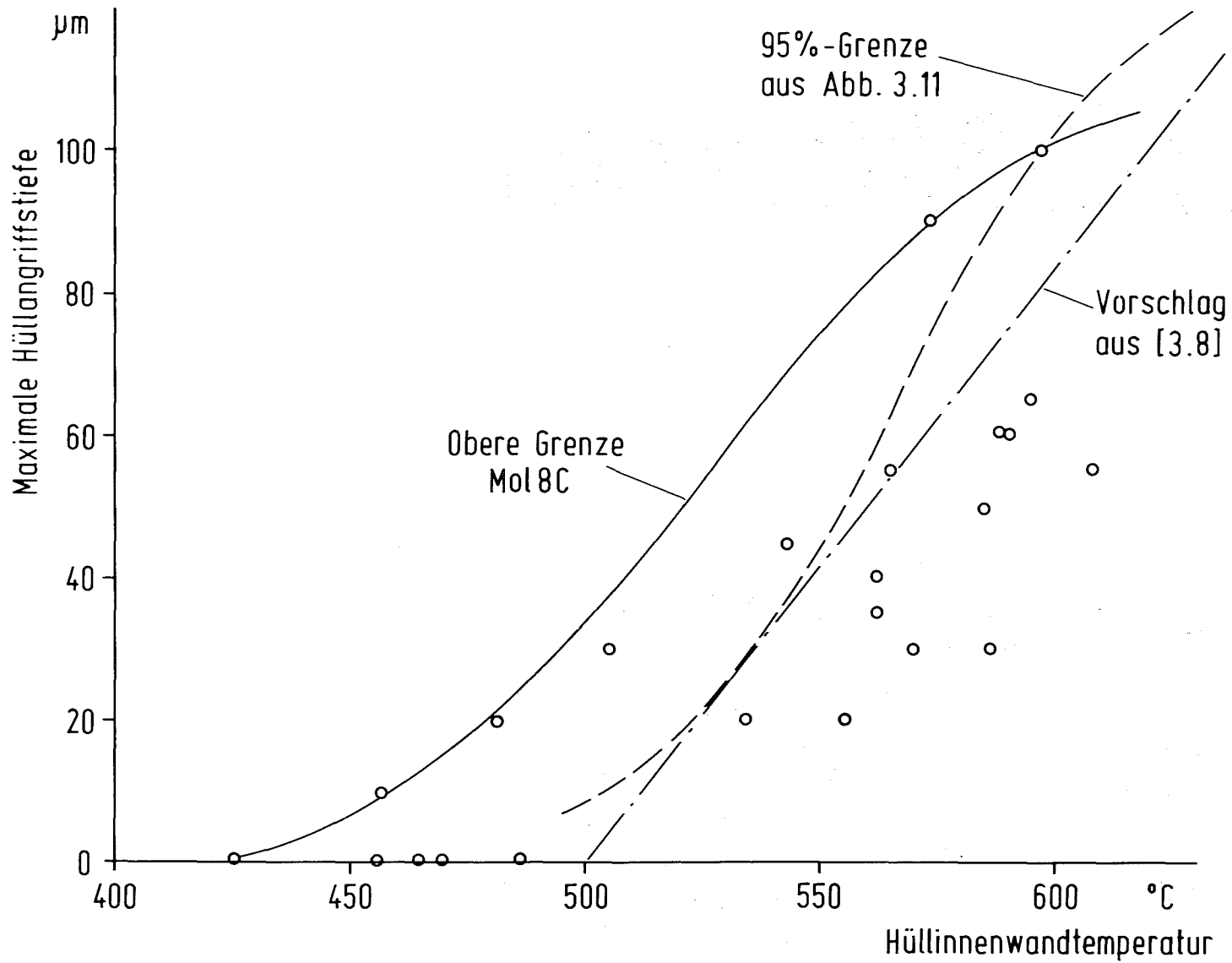


Abb. 3.10

Maximale Angriffstiefe der Hüllinnenkorrosion in den Brennstabquerschnitten der Versuchsgruppe Mol 8C in Abhängigkeit von der Hüllinnenwandtemperatur.

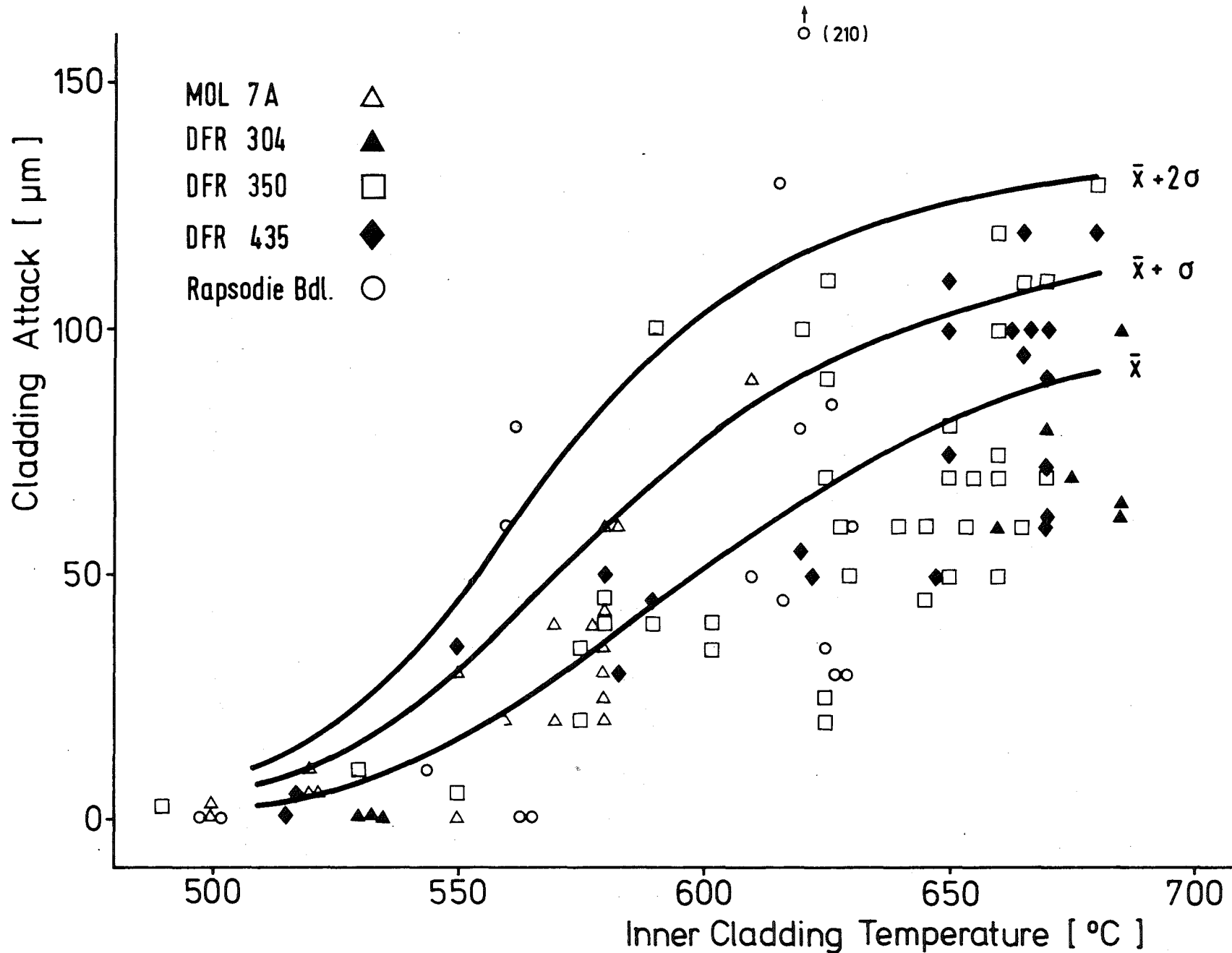


Abb. 3.11 Statistische Auswertung der maximalen Hüllangriffstiefe nach [3.9].

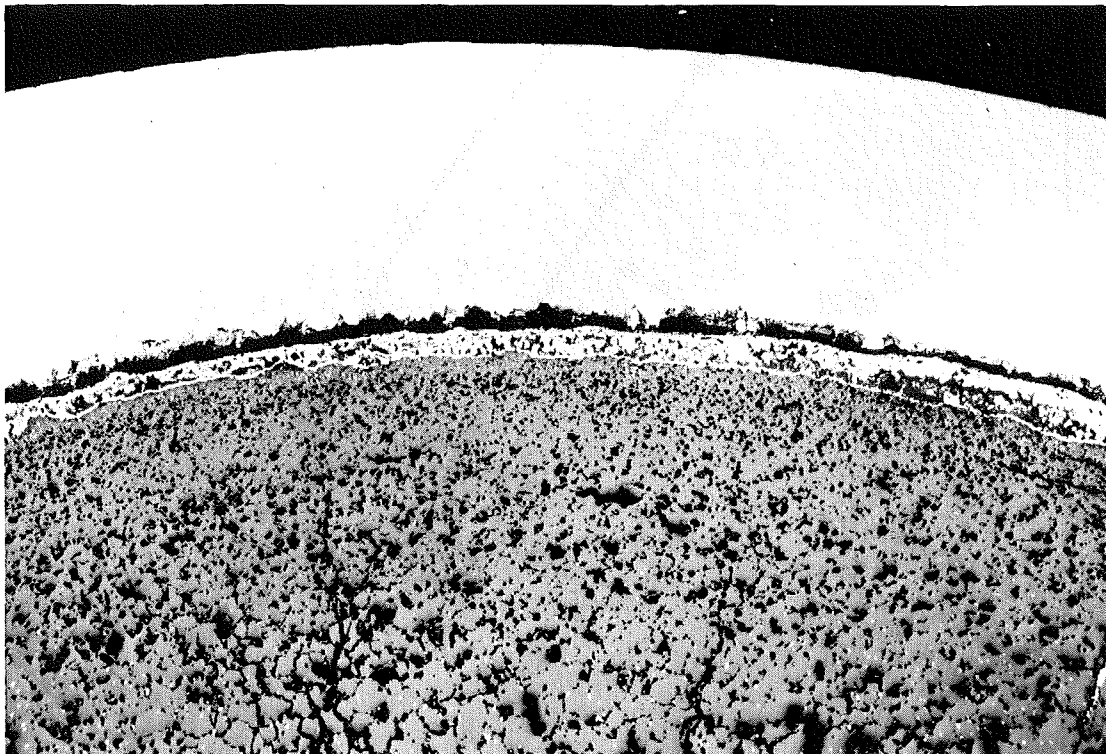
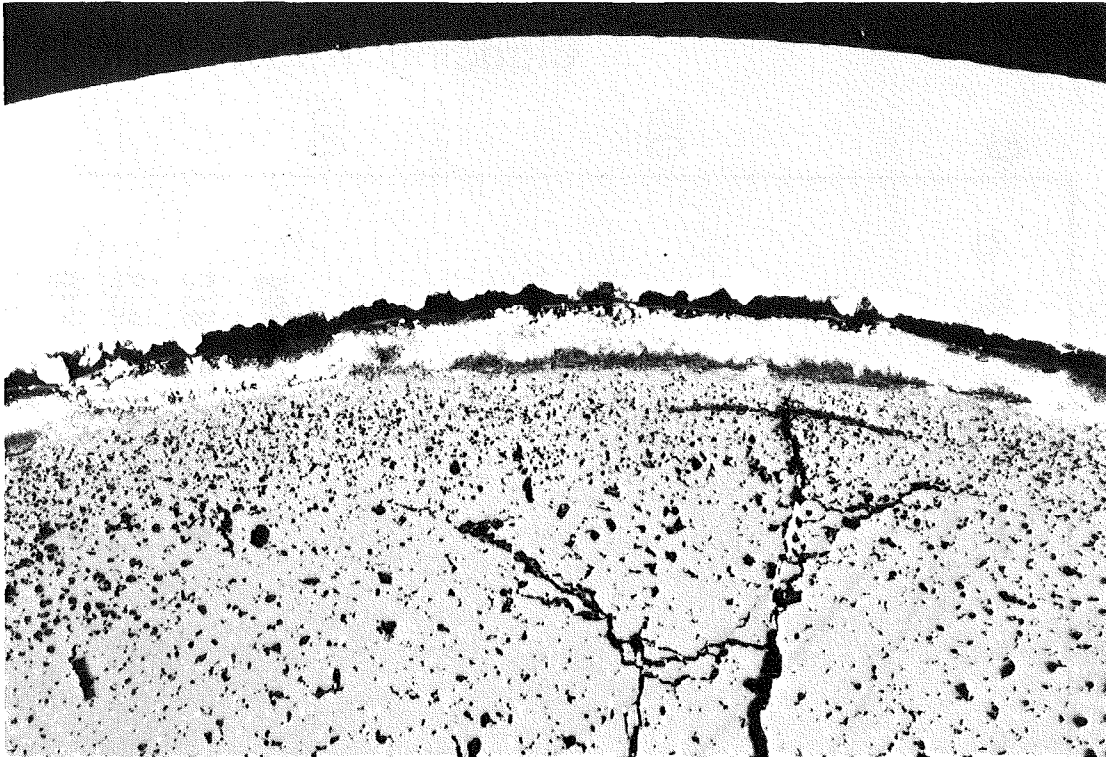


Abb.3.12: Brennstoff/Hülle-Reaktionszonen in den Brennstäben Mol 8C-7 (oben, 41 cm oberhalb des unteren Brennstoffendes) und Mol 8C-10 (unten, 27 cm oberhalb des unteren Brennstoffendes). Vergr. 100x