

---

Archiv-Ex.:  
FZR-33

März 1994

*I. Stephan, D. Gawlik, W. Gatschke, M. Matthes*

**Bestimmung der Neutronenflüsse  
in der drehbaren Bestrahlungseinrichtung  
im BER II des HMI Berlin**



# **Bestimmung der Neutronenflüsse in der drehbaren Bestrahlungseinrichtung im BER II des HMI Berlin**

I. Stephan

Forschungszentrum Rossendorf,  
Institut für Sicherheitsforschung

D. Gawlik, W. Gatschke, M. Matthes  
Hahn-Meitner-Institut Berlin

## Einleitung

Nach der Rekonstruktion und Neuinstallierung von Bestrahlungseinrichtungen im BER II des HMI Berlin ist die Aktualisierung der Bestrahlungsparameter erforderlich.

Die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Elementbestimmung durch instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse wird wesentlich durch die Orts- und Zeitabhängigkeit der Neutronenflußdichte bei der Bestrahlung charakterisiert.

Im Forschungszentrum Rossendorf existiert ein Meßverfahren für gut thermalisierte Neutronensystem auf der Basis einer Mehrkomponentensonde [1]. Mit diesem System konnten in der Vergangenheit umfangreiche Erfahrungen bei der Diagnose der Neutronenflußverteilung im Rossendorfer Forschungsreaktor RFR und an Leistungsreaktoren gewonnen werden [2,3,4].

Dieses Verfahren wurde deshalb für die Bestimmung der Flußparameter innerhalb der drehbaren Bestrahlungseinrichtung (DBVK) gewählt. Das Experiment diente dem Nachweis axialer und azimuthaler Gradienten des Flusses, um Vergleiche zur Theorie zu erhalten, das vorgesehene Betriebsregime der DBVK zu optimieren und einen eindeutigen Bezug von Standard zur Probe zu garantieren.

## Experimentelle Einrichtung und Bestrahlung

Die DBVK befindet sich in der Position C 4 einer Standardkonfiguration des Kernbrennstoffes (Abb. 1), dessen aktueller Abbrandstatus in der Abb. 2 zu sehen ist. Außer den Bestrahlungseinrichtungen in den Positionen C 4 und E 3 sind in dieser Zeichnung die Regелеlemente durch das Symbol II markiert. Der wasserdurchströmte Bestrahlungseinsatz kann insgesamt neun ebenfalls wasserdurchströmte Kapseln (Durchmesser 25 mm, Höhe 50 mm) aufnehmen, die in drei verschiedenen Höhensektionen und jeweils zu drei azimuthalen Stellungen positioniert sind (Abb. 3).

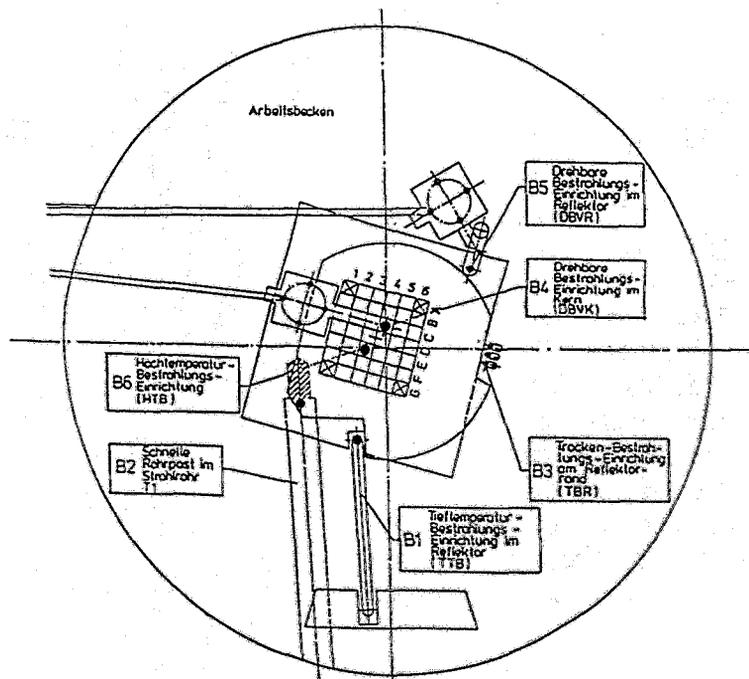
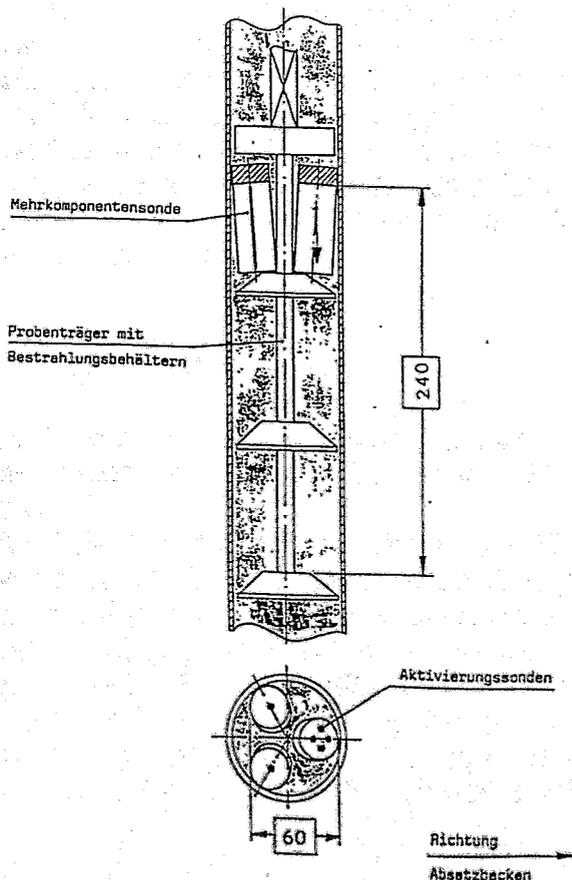


Abb. 1  
Position der Bestrahlungseinrichtungen

	1	2	3	4	5	6
A	X X I	I	I	I	I	X X X I
	X X I	12.0	17.5	32.7	17.2	X X I
	X X I	I	I	I	I	X X I
	X X I	I	I	I	I	X X I
	X X I	I	I	I	I	X X I
B	I	II	II	I	II	II
	0.0	17.8	40.2	45.5	9.8	0.0
	I	II	II	I	II	II
	I	II	II	I	II	II
	I	II	II	I	II	II
C	I	I	I	X	I	I
	27.3	39.8	46.5	X X X I	44.2	22.5
	I	I	I	X X X I	I	I
	I	I	I	X X X I	I	I
	I	I	I	X	I	I
D	I	II	II	I	II	II
	38.4	20.6	47.2	48.7	20.3	32.6
	I	II	II	I	II	II
	I	II	II	I	II	II
	I	II	II	I	II	II
E	I	I	I	X X I	I	I
	24.9	40.0	I	X X X I	46.8	36.6
	I	I	I	X X I	I	I
	I	I	I	X	I	I
	I	I	I	I	I	I
F	I	II	II	I	II	II
	6.8	8.5	39.1	41.1	19.2	3.5
	I	II	II	I	II	II
	I	II	II	I	II	II
	I	II	II	I	II	II
G	I X X I	I	I	I	I	I X X I
	X X I	I	I	I	I	X X I
	X I	16.7	30.7	25.3	16.2	X X I
	X X I	I	I	I	I	X X I
	X X I	I	I	I	I	X X I

Abb. 2  
Abbrandcharakteristik des Reaktorcores zum Meßzeitpunkt (Brennstoffabbrand in %)



Funktionsbedingt haben die Bestrahlungsbehälter eine Neigung von ca. 12° gegenüber der Rohrachse [5,6].

Der Probenträger soll zum Ausgleich der Flußunterschiede während des Bestrahlungsvorganges im Routinebetrieb um seine Mittelachse gedreht und in vertikaler Richtung relativ zur Kernmitte bewegt werden.

Durch diese zyklischen Bewegungen (Abb. 4) soll der Gradient in vertikaler Richtung verkleinert werden.

Abb. 3  
Anordnung der Aktivierungs sonden und des Bestrahlgutes

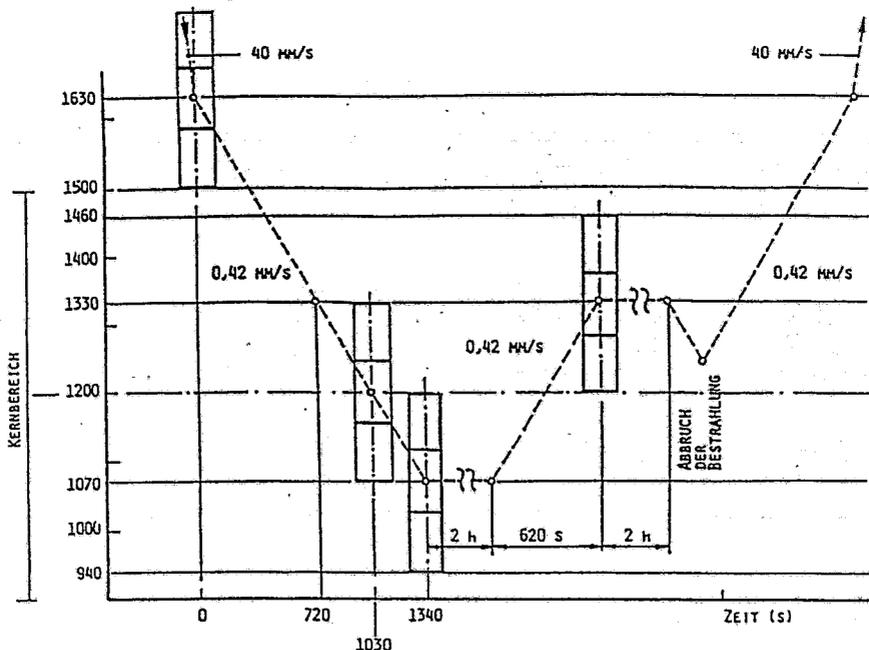


Abb. 4  
Translationsbewegung des Probenträgers

In ähnlicher Weise vermindert man den radialen Gradienten durch einen periodischen Schwenk zwischen zwei um  $180^\circ$  auseinanderliegenden Winkelstellungen. Die hier beschriebenen Experimente wurden ohne Dreh- und Translationsbewegungen ausgeführt; der Probenträger befand sich in vertikaler Richtung in Kernmitte. Die sicherheitstechnisch vorgeschriebene Maximalgeschwindigkeit von 0,42 mm/s bedingt eine relativ lange Einfahrzeit von 17 min zur Kernmitte (s. Abb. 4). Um größere Korrekturen bei der Berechnung der Monitoraktivitäten durch Ein- und Ausfahrvorgang zu vermeiden, sind kleine Reaktorleistung und längere Verweilzeit zweckmäßig. Als Bestrahlungszeit wurden 180 Minuten bei 50 kW gewählt.

### Meßprinzip und -ausführung

Für das Experiment wurden Drähte der Mehrkomponentensonde von 50 mm Länge und 0,9 mm Durchmesser verwendet. Die konkrete Positionierung der Drähte ist der Abb. 3 zu entnehmen.

Die chemische Zusammensetzung der MKS (Tabelle 1) ermöglichte den Nachweis der interessierenden Reaktionsprodukte mit nur einer gammaspektrometrischen Messung unter Verwendung eines großvolumigen Germaniumdetektors.

Abbildung 5 zeigt ein ausgewähltes Gammapektrum.

Die Ermittlung der Detektoreffektivität erfolgte sowohl mit kalibrierten Gammastandards, als auch durch interne Kalibrierung unter Verwendung der Gammaübergänge des  $^{187}\text{W}$ .

Zur Bestimmung der Aktivität ist jeder Draht in 10 nahezu äquidistante Stücke zerschnitten worden, deren Massen mit einer Unsicherheit  $\leq 1\%$  bestimmt werden konnten.

Tabelle 1  
Charakteristik der Mehrkomponentensonde

	Nachweisreaktion	Massenanteil (Massen %)	Gammaenergie (keV)
Mangan	$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	$0,34 \pm 0,015$	846,60
Gold	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	$0,30 \pm 0,015$	411,80
Wolfram	$^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$	$2,44 \pm 0,10$	479,57 / 685,74
Molybdän	$^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ $^{100}\text{Mo}(n,\gamma)^{101}\text{Mo}$	$14,68 \pm 0,15$	739,47
Nickel	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ $^{64}\text{Ni}(n,\gamma)^{65}\text{Ni}$	$81,96 \pm 0,20$	810,75 1481,84

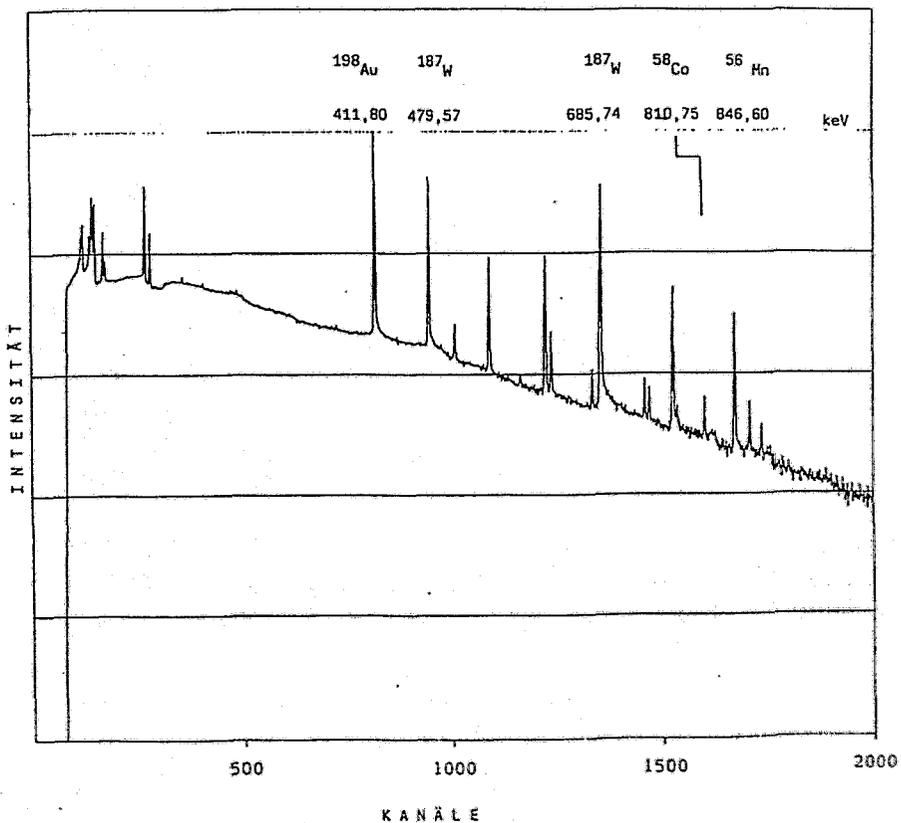


Abb. 5  
Gammapektrum der Mehrkomponentensonde aus der DBVK des BER II  
Reaktorleistung 50 kW,  $t_b = 180$  min,  $t_A = 240$  min

Die Meßzeit wurde so gewählt, daß die Unsicherheit der Photopeakzählraten nicht größer als 1 % war. Das ließ sich für den 810,75-keV-Übergang des  $^{58}\text{Co}$  zur Bestimmung der schnellen Neutronenflußdichte erst ca. 4 Wochen nach Abklingen benachbarter Linien kurzlebiger Nuklide realisieren.

## Auswertung

Zur Gewinnung der absoluten Neutronenflußdichten wurde ein Verfahren effektiver Querschnitte nach Grundgedanken des Westcott-Formalismus zugrunde gelegt. In /1/ ist die Vorgehensweise explizit dargelegt.

Die Reaktionsraten  $R_{ij}$  berechnen sich aus der Photopeakzählrate wie folgt:

$$R_{ij} = \frac{P_{ij}}{N_j \cdot \varepsilon_{abs} \cdot \varepsilon_{rel} \cdot S_i \cdot \gamma_{ij}} \cdot \frac{e^{\lambda_j t_a}}{(1 - e^{-\lambda_j t_b})} \cdot \frac{\lambda_j t_m}{(1 - e^{-\lambda_j t_m})}$$

Die Photopeakzählrate  $P_{ij}$  als Maß der induzierten Aktivität in der Sonde wird nach Standardverfahren bestimmt.

Außerdem bedeuten:

$N_j$	-	Anzahl der Atome des Indikators j in der Probe
$\varepsilon_{abs}$	-	absolute Detektoreffektivität
$\varepsilon_{rel}$	-	relative Detektoreffektivität
$\gamma_{ij}$	-	Quantenausbeute der Linie i des Nuklids j
$S_i$	-	Selbstabsorptionsfaktor der Gammastrahlung
$\lambda_j$	-	Zerfallskonstante
$t_a$	-	Abklingzeit
$t_b$	-	Bestrahlungszeit
$t_m$	-	Meßzeit (effektive Meßzeit + Totzeit)

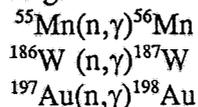
Aus den Verhältnissen der Reaktionsraten  $R_{Au}/R_{Mn}$  und  $R_w/R_{Mn}$  können Aussagen zur Härte des Neutronenspektrums getroffen werden. Die Spektrumshärte  $\alpha$  drückt das Verhältnis von epithermischen zu thermischem Fluß aus und bezieht sich auf ein Lethargieintervall

$$\alpha = \frac{\Phi_e}{\Phi_{th}} / \ln \frac{E_2}{E_1} = \varphi_E / \Phi_{th}$$

Dabei bedeuten:

$\Phi_e$	-	epithermische Neutronenflußdichte
$\Phi_{th}$	-	thermische Neutronenflußdichte
$E_2$	-	obere epithermische Grenze (100 eV)
$E_1$	-	untere epithermische Grenze (Cd-Abschneideenergie 0,5 eV)
$\varphi_E$	-	epithermische Neutronenflußdichte

Mit Hilfe der Spektrumshärte wird dann ein effektiver Wirkungsquerschnitt für die entsprechende Reaktion bestimmt, der die Grundlage zur Berechnung der thermischen Neutronenflußdichte aus der Reaktionsrate darstellt. Dabei wird eine Neutronentemperatur von 308 K zugrunde gelegt. Die so gewonnenen Ergebnisse für  $\Phi_{th}$  aus den Reaktionen



liegen in einem Fehlerbereich von  $\pm 3\%$  und werden gemittelt.

Die schnelle Neutronenflußdichte wird aus der Reaktion  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$  gewonnen. Diese Reaktion liefert aufgrund ihrer effektiven Schwelle von 2,8 MeV nur Informationen in diesem Energiegebiet, d.h.  $\Phi_s = \Phi_{E > 2,8 \text{ MeV}}$ .

Informationen über die spektrale Neutronenfluenzverteilung können durch eine Spektrumsjustierung erhalten werden. Sie fordert ein typenspezifisches theoretisches Eingangsspektrum, welches aber für den BER II z.Z. nicht vorliegt.

## Ergebnisse

In den Abbn. 6 und 7 sind die gemessenen thermischen und schnellen Neutronenflußdichten als ungewichtetes arithmetisches Mittel aus den sechs etwa in gleicher Höhe befindlichen Sondenabschnitten dargestellt. Die Fehlerbalken stellen die einfache Standardabweichung dar.

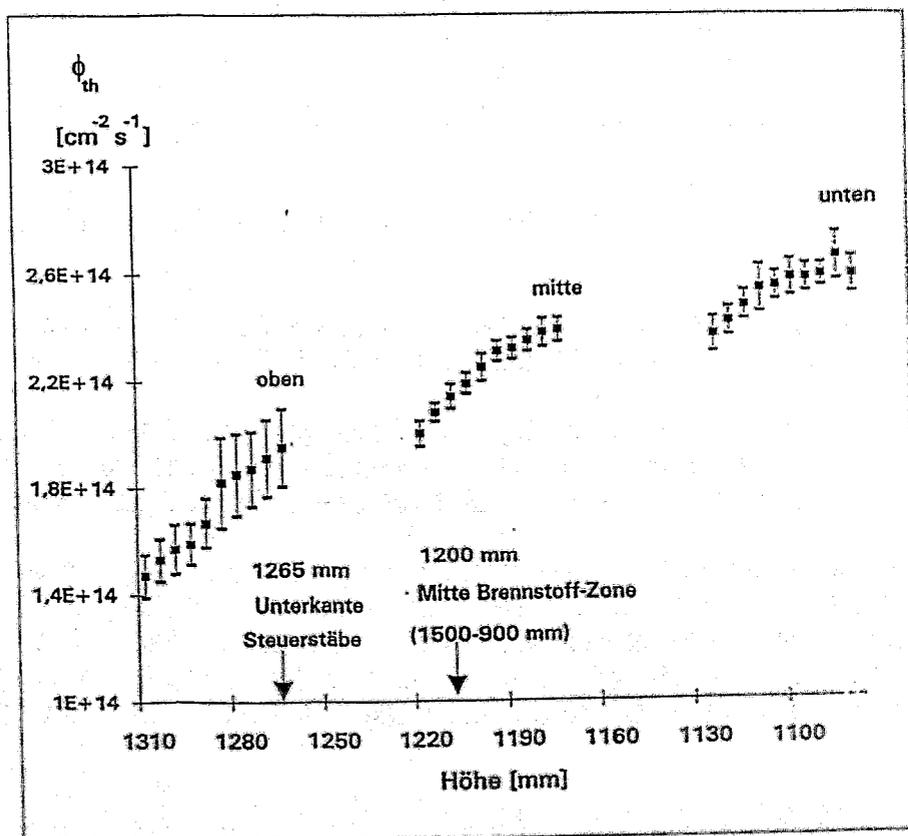


Abb. 6

Verlauf der thermischen Neutronenflußdichte in der DBVK

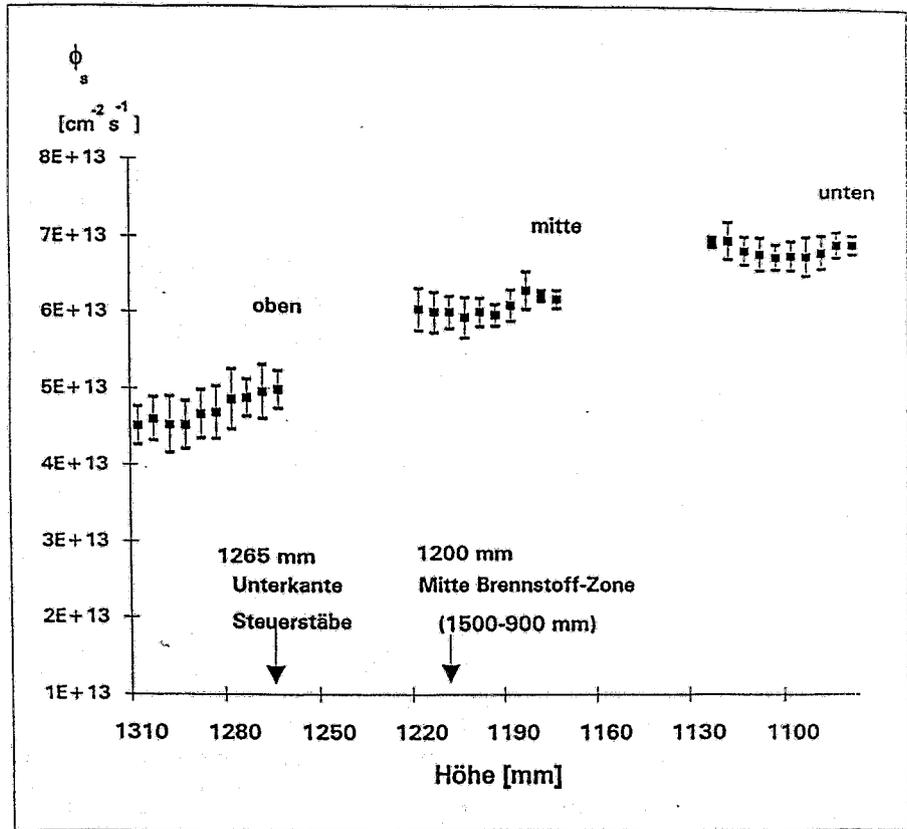


Abb. 7  
Verlauf der schnellen Neutronenflußdichte in der DBVK

Das Maximum des axialen Flußdichteverlaufes ist durch die Stellung der Regelstäbe um etwa 100 mm nach unten verschoben. Es befindet sich damit 165 mm unterhalb der Regelstabenden.

Für die Anordnung der Bestrahlungseinrichtung ergibt sich nach Rechnungen der Fa. INTERATOM für die thermische Neutronenflußdichte in der Mitte des wassergefüllten Mantelrohres ein um den Faktor 2 höherer Wert als im umgebenden Brennstoff.

Das Verhältnis von  $\Phi_{th}/\Phi_s$  über die Höhe einer Bestrahlungskapsel wird durch deren funktionsbedingte Neigung (Abb. 3) bestimmt. Ein in der Achse der Behälter angeordneter Sondendraht von 50 mm Länge hat deshalb oben einen Abstand von 13 mm zur inneren Rohrwandung; während der Abstand unten ca. 23 mm beträgt. Damit erklärt sich die aus Abb. 8 ersichtliche Abnahme des Verhältnisses  $\Phi_{th}/\Phi_s$  in der jeweiligen Schicht von unten nach oben.

Aussagen zur Spektrumshärte  $\alpha$  liefert Abb. 9. Dabei ist zu erkennen, daß  $\alpha$  über die Höhe einer Bestrahlungskapseln und zwischen den verschiedenen Höhensektionen der Kapseln innerhalb der Fehlergrenzen konstant bleibt.

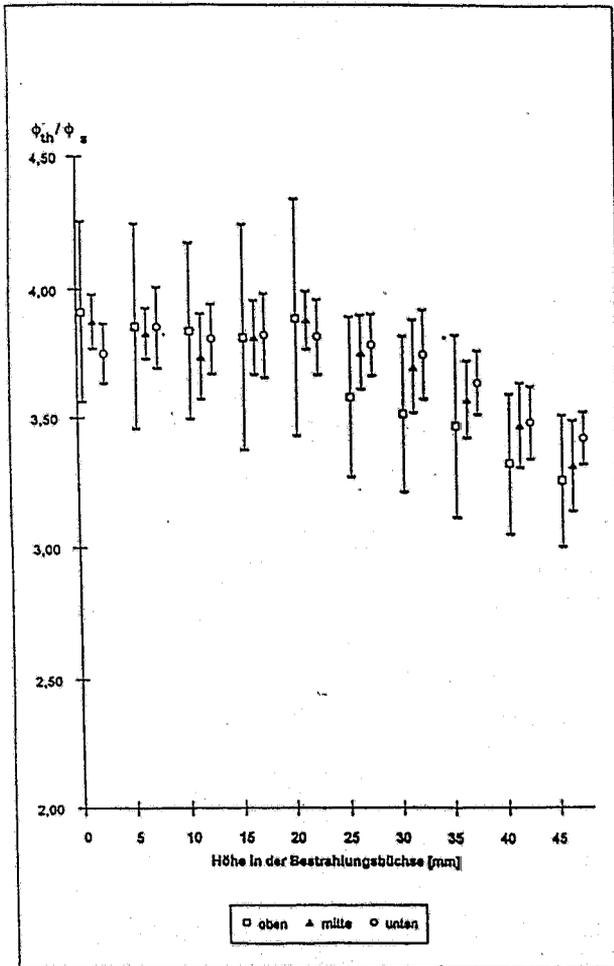


Abb. 8  
Verhältnis von thermischen zu  
schnellem Neutronenfluß über der  
Höhe einer Bestrahlungskapsel

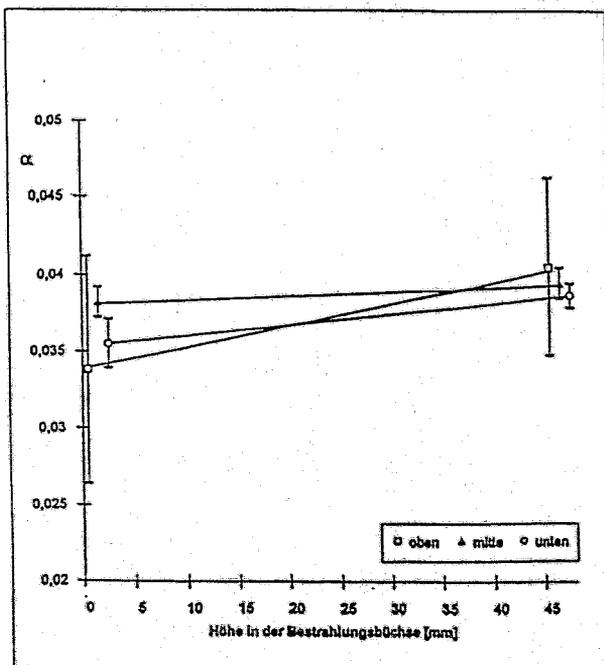


Abb. 9  
Spektrumshärte  $\alpha$  über der Höhe  
einer Bestrahlungskapsel

Die vorgesehenen Translationsbewegungen bringen nur bei einem cosinusförmigen axialen Flußverlauf die gewünschte Vergleichmäßigung. Im realen Reaktorbetriebsregime spielt aber die Regelstabstellung die dominante Rolle. Die mit diesen umfangreichen Flußmessungen gewonnenen Ergebnisse ermöglichen die Präzisierung der Bestrahlungsstrategie.

Gleichartige Experimente sind noch für die Bestahlungseinrichtungen DBVR und TBR am BER II (Abb. 1) in Vorbereitung.

## Literatur

- /1/ I. Stephan  
Entwicklung einer Mehrkomponentensonde zur Bestimmung spektraler Reaktorparameter, Dissertation TU Dresden, 1989
- /2/ I. Dennstädt, H.-C. Mehner  
Messung der Neutronenflußdichte mit einer Mehrkomponentensonde an Leistungsreaktoren des KKW "Bruno Leuschner" Greifswald, ZfK-449
- /3/ H.-C. Mehner, B. Böhmer, U. Hagemann, I. Stephan, N. Meyer  
Neutronendosimetrie an der WWER-440-Druckbehälteraußenwand, ZfK-623
- /4/ K. Böhme, B. Schneider, H.-C. Mehner, I. Stephan  
Experimentelle Bestimmung der Neutronenflußdichte am rekonstruierten Rossendorfer Forschungsreaktor, ZfK-738
- /5/ Projektierte Instrumentierung des Forschungsreaktors BER II  
Beiträge von HMI-Mitarbeitern, HMI-B 452
- /6/ D. Gawlik, O. Ehrich, W. Gatschke, G. Harm, M. Rose  
Sicherheitstechnischer Bericht DBVK (Drehbare Bestahlungsvorrichtung im Kern des BER II), HMI-B 481