

KFK-177

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Juli 1963

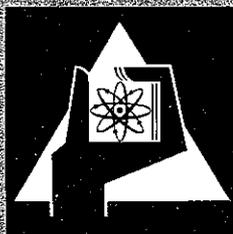
Abteilung Reaktorbetrieb

KFK 177

Messungen am Reaktor FR 2 nach der Wiederinbetriebnahme

H. W. Glauner S. Hagen

M. Diederichs



KERNREAKTOR

BAU- UND BETRIEBS-GESELLSCHAFT M. B. H.

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Juli 1963

KFK 177

Abteilung Reaktorbetrieb

Messungen am Reaktor FR2 nach der Wiederinbetriebnahme

H. W. Glauner S. Hagen

M. Diederichs

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H.
Zentralbücherei

8. Jan 1963

Kernreaktor Bau- und Betriebs-Gesellschaft m.b.H.

Karlsruhe

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
0. Einleitung	1
1. Das Anfahren des Reaktors nach dem Tankwechsel	1
2. Flußmessungen mit Zählrohren im abgeschalteten Reaktor (spontane Spaltneutronen, Photoneutronen)	2
3. Reaktivitätsmessungen (void-Effekt, Absorberwichtungen)	4
4. Betrieb eines Pile-Oszillators	5
5. Leistungsbestimmung von Brennelementen	8
6. Flußmessungen mit Aktivierungssonden (Symmetriemessungen, Fluß am Tankrand und in Kanälen)	10
7. Flußmessungen mit einem Betastrahl-Rhodiumdetektor	17

Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.
Zentralsbücherei

0. Einleitung

Im November 1962 ist der FR2 mit einem neuen Al-Tank und einem neuen Stahl-tank wieder in Betrieb genommen worden.

Nach der Wiederinbetriebnahme wurde bei Leistungen bis zu 1 kW eine Reihe von Messungen durchgeführt, die die im Jahre 1961 gemachten Nullenergiemessungen [1], [2] ergänzen sollen.

Weiterhin wurden zur Kontrolle einige Messungen aus dem Programm für 1961 wiederholt, die mit den alten Tanks gemacht worden waren. Dabei zeigten sich praktisch keine Abweichungen, sodaß die angeführten Berichte ihre Gültigkeit auch für den neuen Aufbau behalten.

Die Corebeladung bei den im folgenden beschriebenen Messungen zeigt Abb. 1. Es waren 158 Brennelemente^x in fast symmetrischer Anordnung, 1 Zentralloop 130 Ø und ein Isotopenkanal-Tauchrohr eingesetzt. Die Experimentierkanäle waren unbeladen und nach außen mit Stahlstopfen verschlossen.

1. Das erste Anfahren des Reaktors

Beim Wiederanfahren war der Reaktor nach Abb. 1 beladen, Core und Hauptkreislauf mit D₂O-gefüllt und die TA-Stäbe eingefahren. Im Zentralloop war eine Po-Be-Quelle (ca. 10⁷ n/sec.) eingebaut. Durch die Instrumente der Meßsäule und ein zusätzliches Zählrohr im Horizontal-Kanal C3 konnte der Neutronenfluß gemessen werden.

Die Annäherung an den kritischen Zustand wurde durch schrittweises Ziehen der TA-Stäbe und Aufnahme einer $\frac{1}{M}$ -Kurve vorgenommen. Nach den Messungen von 1961 mit einem Core von 153 BE war für die jetzige Beladung eine kritische Stabstellung von TA/FR = 1240/600 zu erwarten, dabei sind die angegebenen Stabstellungen gleich der Einfahrtiefe der Absorberstäbe in mm. Erreicht wurde der kritische Zustand bei einer Stabstellung TA/FR = 1235/600 und einer D₂O-Temperatur von 25 °C.

Die Abweichung liegt innerhalb der Rechengenauigkeit.

^xim weiteren Textverlauf werden folgende Kurzbezeichnungen verwendet:
BE = Brennelement, TA = Trimmabschaltstab, FR = Feinregelstab

Damit ergibt sich, daß durch den Tankumbau und die Deuterierung des D_2O -Kreislaufs reaktivitätsmäßig keine merkbare Veränderung aufgetreten ist, d.h. es ist weder ein Einfluß des veränderten Verteilerbodens noch eine Abreicherung des D_2O nachweisbar.

2. Flußmessungen mit Zählrohren im abgeschalteten Reaktor

Der bis ins Core reichende Horizontal-Kanal C3 war nach außen mit einem Holzstopfen verschlossen. Durch eine Bohrung im Holzstopfen konnten die Zählrohre längs der Kanalachse bis ins Core gefahren und der Neutronenfluß gemessen werden. Diese Meßstelle diente beim ersten Anfahren zur Aufnahme der $\frac{1}{M}$ -Kurve und später zu Periodenmessungen sowie zu den im folgenden beschriebenen Messungen.

2.1 Verteilung prompter Spaltneutronen

Vor dem ersten Anfahren wurde im jungfräulichen Reaktor die durch prompte Spaltneutronen entstehende Flußverteilung gemessen. Dazu diente ein BF_3 -Zählrohr mit einer Empfindlichkeit von 0,73 Imp/F, das im Kanal C3 verschoben wurde^x. Abb. zeigt den gemessenen Flußverlauf im Bereich $45 \text{ cm} < r < 150 \text{ cm}$, der Flußverlauf im Bereich $0 < r < 45 \text{ cm}$ ist nach einer heterogenen Rechnung [3] ergänzt, die für einen kritischen Reaktor mit 164 BE und eingefahrenen TA-Stäben gemacht wurde. Dieser für einen kritischen Reaktor berechnete Flußverlauf gilt mit guter Näherung auch für den unterkritischen Reaktor, da sowohl der Verlauf der anregenden Quellfunktion dem Neutronenflußverlauf in erster Näherung ähnlich ist, als auch der abgeschaltete Reaktor eine genügend hohe unterkritische Multiplikation besitzt so daß Oberwellen vernachlässigt werden können.

Für die Coremitte ergibt sich ein Fluß $\phi_0 = 19 \text{ n/cm}^2 \text{ sec.}$

Mit dem Mittelungsfaktor 2,1 ist der dann über das Core gemittelte Fluß $\phi = 9,05 \text{ n/cm}^2 \text{ sec.}$

^xDie Zählrohrempfindlichkeit wurde zu einem späteren Zeitpunkt durch eine Goldsondeneichung in der Thermischen Säule bestimmt.

Die Unterkritikalität ρ des abgeschalteten Reaktors läßt sich näherungsweise aus obiger Flußmessung bestimmen, wenn die Quellstärke S aus spontanen Spaltungen bekannt ist.

Der mittlere Neutronenfluß in einem durch spontane Spaltungen angeregten Core ist [4]

$$\phi = \frac{S}{\bar{\Sigma}_a (1 - k_{\text{eff}})} \cdot \frac{k_{\text{eff}}}{k_{\infty}} \quad (1)$$

Mit $\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$ läßt sich dann schreiben (2)

$$\rho = - \frac{S}{\phi \bar{\Sigma}_a k}$$

Die Quellstärke aus spontanen Spaltungen ist für nat. Uran $q = 1,59 \cdot 10^{-2}$ n/g Uran. sec [5]
Die auf 1 cm^3 bezogene Quellstärke ist dann $S = q \frac{G_u}{V}$ mit G_u = Urangewicht in der Wignerzelle

V = Volumen der Wignerzelle

Für das Core des FRZ ist $G_u/V = 0,535 \text{ [g cm}^{-3}\text{]}$

$$\bar{\Sigma}_a = 0,445 \cdot 10^{-2} \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

$$k_{\infty} = 1,226$$

Mit diesen Werten ergibt sich aus Gleichung (2)

$$\rho = - 172 \text{ mk}$$

Als Unterkritikalität des abgeschalteten Reaktors. Der später aus der Stabstellung im kritischen Reaktor bestimmte genaue Wert ist $\rho = - 135 \text{ mk}$

Den Flußverlauf im Kanal C3 beim Einbau einer Po-Be-Quelle im Zentrum des abgeschalteten Reaktors zeigt Abb. 2

Anmerkung: Die Reaktivität $\rho = \frac{\Delta k}{k}$ wird in mk angegeben, dabei ist $\text{mk} = 10^{-3} \frac{\Delta k}{k}$

2.3 Den Abfall verzögerter Neutronen nach dem Abschalten des Reaktors zeigt Abb. 3. Es sind Kurven für verschieden lange Betriebszeiten vor dem Abschalten aufgetragen. Die bei D_2O -Reaktoren auftretenden verzögerten Photoneutronen bestimmen fast ausschließlich den Verlauf der Abfallkurven nach einigen Minuten nach dem Abschalten, da diese im Vergleich zu den verzögerten Spaltneutronen mit überwiegend langer Halbwertszeit auftreten.

Der Abfall des Neutronenflusses nach dem Abschalten des Reaktors läßt sich aus

$$(3) \quad \phi / \phi_0 = \frac{\beta_i (1 - e^{-\lambda_i t_1}) e^{-\lambda_i t_2}}{\frac{1}{k_{\text{eff}}} - 1 + \beta} \quad \begin{array}{l} \beta_i = \text{Ausbeute verzögerter Neutronen} \\ \text{der Gruppe } i \\ t_1 = \text{Betriebszeit} \\ t_2 = \text{Abschaltzeit} \end{array}$$

bestimmen. Diese Beziehung gilt für einen genügend unterkritischen Reaktor ($|\rho| \ll \beta$), bei dem die einzelnen Gruppen der verzögerten Neutronen 'entkoppelt' sind und damit beim Abfall dieser Neutronengruppen mit den ihnen zugehörigen Zerfallskonstanten λ_i gerechnet werden kann. Für die Ausbeute β_i verzögerter Spaltneutronen werden die für den FR2 modifizierte Werte aus ANL 5800 benutzt [6]. Die Ausbeute an verzögerten Photoneutronen im D_2O sind von Bernstein angegeben. Wegen der Selbstabsorption der auslösenden γ -Strahlung im Uran wird nur ein Teil dieser von Bernstein angegebenen Ausbeute erreicht; für den FR2 ist dieser Anteil mit 33 % berechnet worden [6].

In Abb. 3 sind neben den gemessenen Abfallkurven auch gestrichelt einige gerechnete Abfallkurven eingezeichnet. Es ist dabei für die verzögerten Photoneutronen einmal mit 33 %, einmal mit 40 % der Bernstein-Daten gerechnet. Bei den Reaktivitätsbestimmungen mit Hilfe von Periodenmessungen ist in der inhour-Gleichg. mit 33 % der Bernstein-Daten gerechnet. Daß dieses berechtigt ist, wird hier durch die befriedigende Übereinstimmung der gerechneten und gemessenen Abfallkurven gezeigt.

Reaktivitätsmessungen

1 Simulierung eines void-Effektes.

Es sollte der Reaktivitätseffekt bestimmt werden, der auftritt, wenn die 4 mm breiten Ringspalte der BE kein D_2O mehr führen. Dazu wurden an den 12 das Zentralloop umgebenden BE die Kühlwasseraustrittsöffnungen durch Gummimanschetten verschlossen und über die Canschädenleitungen am BE-Kopf Helium eingeblasen. Dadurch konnte das D_2O aus dem Kühlschlitz in den Verteilerboden des A1-Tanks zurückgedrückt werden. Um ein Hochperlen von Helium aus dem Verteilerboden zu vermeiden, wurde der Heliumdruck mit Hilfe eines Manometers so eingestellt, daß die Kühlschlitze nicht ganz leergeblasen wurden, sondern daß noch etwa 10 cm D_2O verblieb. Die kritische TA-Stabstellung war 1250 mm (s. auch Abb. 4).

Ergebnisse:

Bei leerem Zentralloop ist der Reaktivitätseffekt durch Leerblasen von 12 BE positiv.

Meßwert: $\rho = 0,195 \pm 0,02$ mk

Man ermittelt hieraus für sämtliche BE $\rho = 1,24$ mk

Bei einem mit D_2O (99,69 %) gefüllten Zentralloop ist der Reaktivitätseffekt durch Leerblasen von 12 BE positiv.

Meßwert: $\rho = 0,22$ mk

Man ermittelt hieraus für sämtliche BE $\rho = 1,44$ mk

2 Eichung des Regelstabes

Die Reaktivitätseichung des Regelstabes durch Periodenmessungen zeigt Abb. 4 bei leerem und bei beladenem Zentralloop.

Die kritischen Stabstellungen bei 35 °C D_2O -Temperatur und unvergiftetem Core zeigt folgende Tabelle:

FR-Stellung	TA-Stellung	
	leeres Zentralloop	mit Fe-Rohr beladenes Zentralloop
1200	1155	1010
1000	1171	1030
800	1192	1054
600	1211	1079
400	1225	1098
0		1116

3.3 Beim Einfüllen von 99,69 %igem D₂O ins Zentralloop wurden folgende kritischen Stabstellungen bestimmt:

	TA	FR
leeres Zentralloop	1250	508
mit D ₂ O im Zentralloop	1250	648

Der Reaktivitätswert durch Einfüllen des D₂O wird aus dem Unterschied der Regelstabstellung nach Abb. 4

$$\text{zu } \underline{\rho = 1,05 \pm 0,05 \text{ mk}} \quad \text{bestimmt.}$$

3.4 Absorberwichtungen

Im Zentralloop und im Isotopenkanal 53/11 durchgeführte Reaktivitätswichtungen von Al, Fe, Cd Absorbern ergaben die gleichen Werte wie sie im Bereich [2] aufgeführt sind.

4. Betrieb eines Pile-Oszillators und Aufnahme der Übertragungsfunktion des kalten Reaktors

Die Übertragungsfunktion F_o eines Systems ist ein Maß für den Verlauf der Ausgangsgröße bei vorgegebener Eingangsgröße, gemäß

$$(4) \quad L(A) = F_o \cdot L(E) \quad L(A), L(E) = \text{L-Transformierte Ausgangs- bzw. Eingangsgröße}$$

Beim Reaktor ist die Reaktivität die Eingangsgröße, der Neutronenfluß die Ausgangsgröße. Für die Übertragungsfunktion kann man dann schreiben

$$(5) \quad F_o(s) = \frac{\beta}{\phi_o} \frac{L(N)}{L(R)}$$

mit β = Anteil der verzögerten Neutronen
 ϕ_o = mittlerer Neutronenfluß
 $L(N)$ = L-Transformierte des Neutronenflusses
 $L(R)$ = L-Transformierte der Reaktivität
 $s = j\omega$

Der Faktor $\frac{\beta}{\phi_o}$ dient zur Normierung.

F_o kann für kleine sin-förmige q -Amplituden berechnet werden, wenn man Linearität zwischen Ausgangsgröße (Fluß) und Eingangsgröße (Reaktivität) annimmt.

Die linearisierten reaktorkinetischen Gleichungen ergeben dann

$$(6) \quad F_o(s) = \beta \frac{1 - s \sum \frac{\beta_i}{s + \lambda_i}}{s \left(1 + \sum \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} \right)}$$

$F_o(s)$ ist mit den am FR2 benutzten Werten für β_i und λ_i berechnet und in Abb. 5 aufgetragen.

Die Übertragungsfunktion des kalten Reaktors wurde aufgenommen. Dazu wurde ein Reaktivitätssoszillator im Zentralloop eingebaut und die Zusatzinstrumentierung im Kanal C3 zur Registrierung des Neutronenflusses benutzt.

Der mechanische Oszillator bestand aus einem Holzstopfen mit angebautem Cd-Rohr, das bis zum Flußmaximum ins Core reichte. Ein aus Borkarbid und Araldit gegossener stabförmiger Absorber von 30 cm Länge steckte im unteren Ende des Cd-Rohres und konnte durch einen Antrieb auf und ab bewegt werden. Als Antrieb diente ein Getriebemotor mit Exzenter, der auf dem im Zentralloop eingesetzten Stopfen befestigt war. Eine Perlonschnur lief vom Exzenter durch den durchbohrten Holzstopfen und das Cd-Rohr zum Borabsorber.

Der Reaktivitätshub war durch Verstellung des Exzenters veränderlich, die Oszillatorfrequenz war durch Umschalten des Getriebemotors einstellbar. Die Reaktivitätsanregung durch den oszillierenden Borstab ist durch die Auslegung möglichst sin-förmig gemacht, um die Verhältnisse beim Auswerten einfach zu gestalten.

Zur Registrierung des Neutronenflusses diente das im Kanal C3 eingebaute Zählrohr, das über ein Ratemeter an einen Schnellschreiber angeschlossen war. Wegen der begrenzten zeitlichen und personellen Möglichkeiten wurde auf eine günstigere Instrumentierung, z. B. mit Ionisationskammern, verzichtet.

Die Auswertung der Meßergebnisse wurde direkt nach dem Schrieb des Schnellschreibers gemacht. Wegen der vorausgesetzten Linearität zwischen Ausgangsgröße (Fluß) und Eingangsgröße (Reaktivität) wird

$$\frac{L(N)}{L(R)} = \frac{d \phi(s)}{d \rho(s)} \quad \text{und damit kann man für} \quad F_o(s) = \frac{\beta}{\phi_o} \cdot \frac{d \phi(s)}{d \rho(s)} \quad \text{schreiben.}$$

$d \phi(s)$ wird dem Schnellschreiber entnommen, $d \rho(s)$ ist in vorausgehenden Messungen durch Vergleich mit dem geeichten FR-Stab bestimmt worden.

Ergebnisse:

ω	dq(s)	d ϕ (s)	ϕ_0	F_0 (s)	
				gemessen	theoretisch
0,0052	+ - 0,12 mk	28	130	14,0	14,9
0,0105	+ 0,26	42	74	8,17	8,3
	+ - 0,12	17,5	133,5	8,55	
0,021	+ 0,65	50	62	4,65	4,97
	+ 0,26	33	95	5,00	
	+ - 0,12	15	113	5,05	
0,052	+ 0,65	46	96	2,78	2,9
	+ - 0,26	12	55,5	3,12	
0,105	+ 0,65	29	78	2,13	2,1
	+ - 0,26	14,5	95	2,20	
0,21	+ 0,65	22	91	1,40	1,6
	+ - 0,26	10,5	93	1,62	
0,52	+ - 0,65	15	77	1,12	1,23

Anmerkung: für ϕ_0 und d ϕ (s) sind Relativwerte angegeben, nämlich der Ausschlag des Schnellschreibers in mm

Die bei verschiedenen Reaktivitätsamplituden gemessenen Werte von F_0 sind in Abb. eingetragen. Der Phasengang konnte aus zeitlichen Gründen nicht mehr gemessen werden.

Die Messungen sollten Aufschluß über die zu erreichenden Genauigkeiten geben. Vom mathematisch-physikalischen Ansatz her sollten zur Erhaltung der Linearität zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße möglichst kleine Flußamplituden gefahren werden, vom meßtechnischen Standpunkt sind zur Erzielung einer genügenden Genauigkeit größere Amplituden gewünscht. Für den ausgemessenen Frequenzbereich wird man beiden Wünschen gerecht, wenn

$$0,2 \frac{d\phi}{\phi_0} \quad 0,5 \quad \text{gemacht wird.}$$

Diese Messungen sollen bei Nennlast fortgesetzt werden, um den Einfluß der Temperatureffekte von Uran und Moderator zu bestimmen.

5. Leistungsbestimmung von Brennelementen

Von jedem BE kann im Leistungsbereich durch die eingebauten Temperatur- und Durchflußmengenmesser die abgeführte Leistung bestimmt werden. Bei bekannter Neutronenflußverteilung längs der BE läßt sich dann die spezifische Leistung -z. B. in W/cm- an jeder Stelle ermitteln. Die Grenzleistung eines BE wird hauptsächlich durch die Leistung an der heißesten Stelle bestimmt, deren Kenntnis deshalb von Bedeutung ist.

Bei den Überlegungen hierzu wird im allgemeinen von einem ungestörten Reaktor ausgegangen, bei dem die TA-Stäbe ganz ausgefahren sind. Die Flußverteilung und damit die Leistungsdichte längs der BE sind dabei relativ einfach zu berechnen. In praxi sind jedoch die TA-Stäbe meistens teilweise eingefahren, vor allem in der Anfangsphase des Leistungsbetriebs, um für Temperatureffekt, Spaltproduktvergiftung usw. noch Reaktivitätsreserve zu haben. Hierfür sind beim FR2 etwa 30 mk erforderlich, entsprechend einer TA-Einfahrtiefe von 1000 mm (!). Durch die damit verbundene Flußverschiebung in den unteren Corebereich wird die spezifische Leistung der BE -gemessen in W/cm- bei vorgegebener Gesamtleistung in gewissen Bereichen höhere Werte annehmen als im ungestörten Reaktor, bei dem die TA-Stäbe ganz ausgefahren sind.

Es wurden deshalb Messungen zur Bestimmung der spezifischen Leistung bei teilweise eingefahrenen TA-Stäben und beladenem Zentralloop durchgeführt. Dazu wurde ein Segment von 22 BE ausgewählt, das infolge der Symmetrie des Cores als repräsentativ für sämtliche BE gelten kann, d. h. jedes beliebige der eingebauten 158 BE kann durch eines der 22 ausgemessenen BE dargestellt werden (s. Abb. 1). Am Wasserführungsrohr dieser BE wurden Cu-Bänder befestigt und 30 min. bei 300 W bestrahlt. Die erhaltenen Flußverteilungen stellen zugleich die Verteilung der Leistung an den einzelnen BE dar. Die Werte sind auf eine Reaktorleistung von 12 MW umgerechnet und in Abb. 7 dargestellt. Die in Abb. 7 aufgetragenen spezifischen Leistungen beziehen sich auf den Anteil der Spaltenergie, der durch Wärmeleitung vom Uranstab an das Kühlwasser abgegeben wird, dieser Anteil wird mit 94 % der Gesamtleistung angesetzt, während die restlichen 6 % durch γ -Strahlung und schnelle Neutronen an den Moderator abgegeben werden und damit nicht primär zur Erwärmung des BE beitragen. Die Integration der in Abb. 7 aufgetragenen spezifischen BE-Leistungen über das ganze Core ergibt also $0,94 \cdot 12 = 11,3$ MW.

Bei den BE, die in der Nähe von TA-Stäben oder Experimentierkanälen stehen, treten kleine Flußverbeulungen auf. Diese Stellen sind in Abb. 7 durch entsprechende Pfeile gekennzeichnet.

Die spezifische Leistung bei ausgefahrenen TA-Stäben und beladenem Zentralloop ist nach einer heterogenen Rechnung [3] ermittelt und zum Vergleich in Abb. 7 dünn eingezeichnet. Wie man sieht, ist bei einigen BE die spezifische Leistung bei teilweise eingefahrenen TA-Stäben bis zu 30 % höher.

Die folgende Tabelle gibt für die in Abb. 7 dargestellten BE die Gesamtleistung und die max. spezifische Leistung an, und zwar für ein- und ausgefahrene TA-Stäbe. Es ist zu sehen, daß bei verschiedener TA-Stellung neben einer Veränderung der max. spezifischen Leistung auch eine Veränderung der Gesamtleistung einzelner BE auftritt. Bei den eingeklammerten Werten ist durch den Horizontal-Kanal D2 das Flußmaximum verzerrt, es liegt also bei den entsprechenden ungestörten symmetrischen Positionen etwas höher.

BE-Pos.	rechnerisch TA ausgefahren		gemessen TA auf 1080 mm eingefahren	
	Gesamtleistg.	max. W/cm	Gesamtleistg.	max. W/cm
50/20	96,8 kW	601	97,6 kW	718
52/20	97,2	603	90,6	(702)
54/20	92,1	572	86,2	721
56/20	81,2	504	78,6	650
58/20	66,0	409	63,4	537
60/20	49,4	306	52,8	408
50/22	97,8	606	93,2	(709)
52/22	96,1	596	92,6	(697)
54/22	89,8	556	85,3	684
56/22	78,2	485	78,1	621
58/22	63,0	390	60,7	498
60/22	46,7	289	49,3	374
52/24	92,1	572	88,8	(658)
54/24	84,2	523	84,1	644
56/24	72,4	448	74,5	566
58/24	57,3	355	62,8	465
60/24	41,7	259	45,9	349
54/26	75,4	467	77,3	568
56/26	63,3	392	68,3	496
58/26	49,4	306	55,1	400
56/28	51,4	319	57,8	412
58/28	39,0	242	41,7	306

Abb. 8 (aus Abb. 7 ermittelt) zeigt die max. Leistungsdichte an den BE in radialer Richtung, in Abhängigkeit von der Ta-Stellung.

Die Messungen sollen zu einem späteren Zeitpunkt durch Messungen der Temperatur im Uran ergänzt werden.

6. Flußmessungen mit Aktivierungssonden

6.1 Einleitung

Bei den Flußmessungen nach Wiederinbetriebnahme des Reaktors wurden die gleichen Sonden, Meßapparaturen und Auswertmethoden benutzt, wie sie in den Inter-
nen Arbeitsberichten 61/124 und 61/125 beschrieben wurden, d.h. Au/Cu Sonden für die absoluten Messungen des thermischen und epithermischen Flusses, Cu-Bänder für den relativen thermischen Fluß und Calciummetaphosphatgläser für den schnellen Fluß.

Als Maß für die thermischen Neutronen benutzen wir den sogenannten 'konventionellen Fluß', der sich aus der thermischen Reaktionsrate (bis zur Abschneidegrenze des Cadmiums = 0,4 eV) durch Teilen mit dem Aktivierungsquerschnitt bei 2200 m/sec ergibt. Als epithermischen Fluß geben wir den Fluß pro Lethargieintervall an. Die epithermische Reaktionsrate (für $E > 0,4$ eV) ergibt sich also als Produkt aus dem epithermischen Fluß, multipliziert mit dem Resonanzintegral. Der angegebene schnelle Fluß gibt die Neutronen mit einer Energie $E > 2,5$ MeV unter der Annahme, daß das Reaktorspektrum für diese Energien am Meßort einem Spaltspektrum gleicht.

Bestrahlt wurde 1/2 Stunde bei 300 Watt. Da in den obengenannten Berichten die Flüsse für 300 Watt angegeben sind, wurden auch hier wieder alle Flußwerte für die gleiche Leistung angegeben. Nur die Meßkurven für die Leistungsverteilung auf die Brennelemente beziehen sich auf 12 MW (Abb. 7).

6.1 Symmetriemessungen

6.1.1 Bei früheren Messungen [1] hatten sich Abweichungen von der radialsymmetrischen Flußverteilung gezeigt. Da damals zusätzlich zum Zentralloop ein 130 mm Nebenloop eingebaut und außerdem die Brennelemente nicht ganz symmetrisch eingesetzt waren, sollte jetzt die Flußverteilung bei möglichst symmetrischem Reaktor gemessen werden. Hierzu wurde der vertikale Flußverlauf an je 4 geometrisch

äquivalenten Isotopenkanalpositionen in 3 verschiedenen Abständen vom Zentrum gemessen (Bestrahlung 1).

Die Lage dieser Isotopenkanalpositionen ist in Abb. 1 dargestellt. Der Verlauf des thermischen Flusses an diesen Positionen ist dann in den Abb. 9a, 9b und 9c wiedergegeben. Der Feinregelstab und die Trimmabschaltstäbe ragten hierbei um 135 cm bzw. 125,5 cm in den Tank hinein.

Beim Betrachten der Kurven sieht man eine deutliche Bevorzugung der westlichen Hälfte in allen 3 Abständen vom Zentrum. Die Unterschiede zwischen der Beladung der westlichen und östlichen Hälfte, die diese Unsymmetrie hervorgerufen haben können, sind folgende:

- 1.) Feinregelstab im nordöstlichen Quadranten;
- 2.) Fehlen der zwei Brennelemente 34/22 und 34/24 im Vergleich zu 34/14 und 34/1
- 3.) R6 und R7 als Kanäle mit großem Durchmesser im Vergleich zur fehlenden Boralplatte vor der Meßsäule.

Den Einfluß der beiden Kanäle R6 und R7 sieht man auch in der Darstellung der vertikalen Flußverläufe, an den diesen Kanälen nächstliegenden Brennelementen (Abb. 7e, 7g).

Im nordwestlichen Quadranten bekommen wir etwas höhere Werte als im südwestlichen, was dem Einfluß der besseren Reflektorwirkung der thermischen Säule zugeschrieben werden kann.

Der im nordöstlichen Quadranten sich befindende Feinregelstab bewirkt, daß in diesem Quadranten die Flußwerte kleiner als im südöstlichen Quadranten werden.

Das gleiche Verhalten für die Leistungsverteilung und damit für die Flußverteilung erhalten wir aus den Messungen von Kühlwassertemperatur und Durchflußmenge an den einzelnen Brennelementen. Die Messungen wurden bei einer Leistung von 12 MW am gleichen Core durchgeführt. In Abb. 10 sind die Produkte aus Durchflußmenge des Kühlwassers und Temperaturanstieg an den einzelnen BE-Positionen dargestellt und ergeben damit ein Bild für die Verteilung des vertikal gemittelten Flusses (s. auch Abb. 14).

Da die Temperaturdifferenz nur mit einer Genauigkeit von 1 °C bei der automatisch verlaufenden Messung ausgedrückt wird, sind die Messungen mit einem Fehler von ~ 10 % behaftet. Trotzdem ist aber die oben angegebene Verschiebung des Neutronenflusses bzw. der Leistung auf der westlichen Seite des Cores deutlich zu er-

kennen.

6.1.2 Um festzustellen, ob die Symmetrie der Flußverteilung durch geringe Unterschiede in der Eintauchtiefe der Trimmabschaltstäbe oder durch das unterschiedliche Eintauchen des Feinregelstabes stärker beeinflußt wird, haben wir folgende 3 weiteren Bestrahlungen durchgeführt.

Bestrahlung 2:

Alle 16 Trimmabschaltstäbe werden gleich tief (128 cm) und der Feinregelstab möglichst wenig eingefahren (102 cm)

Bestrahlung 3:

Alle 16 Trimmabschaltstäbe werden gleich tief (123 cm) und der Feinregelstab möglichst weit (178 cm) eingefahren. Das Einfahren des FR-Stabes auf 55 cm unter die Eintauchtiefe der TA-Stäbe bringt den stärksten Einfluß auf den Flußverlauf im eigenen Quadranten und zwar ein Absinken um 28 % in 1 d Abstand^x vom Feinregelstab und um 23 % in 2,2 d Abstand. Die zu dem größeren Abstand äquivalenten Positionen in den direkt angrenzenden Nordwest- und Südostquadranten geben noch eine Absenkung von 4 % und 2 %, während im diagonal anliegenden Nordwestquadranten der Fluß um 3 % ansteigt.

Bestrahlung 4:

Die Trimmabschaltstäbe der westlichen Hälfte werden tiefer (133 cm) als die der östlichen (123 cm) eingefahren, wobei der Feinregelstab möglichst wenig (100 cm) eingefahren wurde. Das unterschiedliche Einfahren der Trimmabschaltstäbe um 10 cm bringt in der östlichen Hälfte eine Erhöhung des Flusses um 8 %, während die Flußwerte in der westlichen Hälfte praktisch gleich bleiben. Da die Leistung des Reaktors nach dem Fluß in den Kammern der Meßsäule am südwestlichen Quadranten eingestellt wird, ist dieses Gleichbleiben auch zu erwarten.

Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 11, 12 und 13 dargestellt. Zum bequemeren Vergleich sind in der folgenden Tabelle die Maximalwerte, die Mittelwerte und die Quotienten: Maximalwert/Mittelwert angegeben.

^x d = 16,8 cm ist die Gitterweite des FR2

$\phi_{max} [10^8 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}]$

Be- strah- lung	Posi- tion	37/27	57/27	57/11	37/11	41/23	53/23	53/15	41/15	41/29	53/29	53/09	41/09
	1		4,345	4,394	5,028	5,185	8,160	8,113	8,542	8,859	5,222	5,371	5,744
2		4,37	4,64	5,23	5,20	8,44							
3		3,35	4,55	5,38	5,04	6,78							
4		4,76	5,05	5,23	5,24	9,10							

$\bar{\phi} [10^8 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}]$

Be- strah- lung	Posi- tion	37/27	57/27	57/11	37/11	41/23	53/23	53/15	41/15	41/29	53/29	53/09	41/09
	1		2,568	2,733	3,178	3,297	4,27	4,690	4,934	5,057	2,969	3,236	3,593
2		2,616	2,850	3,250	3,281	4,531							
3		2,034	2,842	3,405	3,216	3,584							
4		2,883	3,144	3,288	3,283	4,932							

$\frac{\phi_{max}}{\bar{\phi}}$

Be- strah- lung	Posi- tion	37/27	57/27	57/11	37/11	41/23	53/23	53/15	41/15	41/29	53/29	53/09	41/09
	1		1,692	1,608	1,582	1,573	1,91	1,730	1,731	1,752	1,759	1,660	1,598
2		1,670	1,628	1,609	1,584	1,862							
3		1,647	1,600	1,580	1,567	1,891							
4		1,651	1,606	1,590	1,596	1,845							

Wie man aus den Meßwerten ersieht, bekommt man für geometrisch äquivalente Positionen Flußunterschiede bis zu 35 %.

Man muß also beim späteren Betrieb infolge der nicht zu vermeidenden einseitigen Beladungen—Loops, beladene Isotopenkanäle oder angereicherte BE—mit starken Flußverwerfungen rechnen.

6.2 Neutronenfluß nach nuklearer und thermischer Leistungsbestimmung.

Abb. 14 zeigt den Vergleich zweier Flußverteilungen bei 300 Watt. Die ausgezogene Kurve zeigt den Flußverlauf nach der Goldsondenmessung in der östlichen Reaktorhälfte von April 1961 [1, Abb. 13], für den eine Reaktorleistung von 300 Watt definiert wurde.

Die eingezeichneten nummerierten Meßpunkte zeigen den mit Goldsonden gemessenen Fluß bei einer durch thermische Messung bestimmten Reaktorleistung von 300 Watt. Diese thermische Bestimmung von 300 Watt ist natürlich nicht direkt möglich, sondern sie wurde unter der Annahme, daß die Anzeige der 'linearen Kamme r' dem Neutronenfluß im Bereich von 300 Watt bis 12 MW streng proportional ist, aus der bei 12 MW erfolgten thermischen Leistungsbestimmung abgeleitet. Da für eine bestimmte Position die Abweichungen der Flußwerte nach nuklearer und thermischer Leistungsbestimmung kleiner sind als die Abweichungen zwischen geometrisch äquivalenten Positionen (s. Abs. 6.1, Symmetriemessungen), hat es keinen Zweck Korrekturen für die alten Messungen [1] anzugeben.

Die Messungen von April 1961 sind in einem Core mit 157 BE ohne Zentralloop, die jetzigen mit 158 BE und 130 \emptyset Zentralloop gemacht worden. Der zum Zentrum flachere Verlauf des Flusses ist erkennbar.

6.3 Fluß am Tankrand und in Kanälen

An der Position 53/15 wurde der thermische Fluß mit Hilfe eines verlängerten Folien-trägers bis in den Doppelboden des Aluminiumtanks gemessen. Der vertikale Flußverlauf an dieser Position und die Lage der Meßpunkte in Bezug auf den Tankboden ist in Abb. 15 dargestellt.

Um den horizontalen Flußverlauf in der Nähe des Tankrandes zu bekommen, wurde der thermische Fluß in 5 verschiedenen Abständen von Festdeckelunterkante an den Positionen 41/30 bis 41/36 gemessen (s. Abb. 1). Erreicht wurden diese Positionen mit Hilfe eines Schwenkmechanismus (Meßbandträger), der durch den Isotopenkanal

41/35 in das Core eingefahren werden konnte. Der horizontale Flußverlauf in den 5 verschiedenen Höhen ist in Abb. 16 dargestellt. Das Verhältnis vom epithermisch zum thermischen Fluß fällt im gemessenen Bereich von 3×10^{-2} auf 3×10^{-3} ab.

Der vertikale thermische Flußverlauf wurde im 130 mm-Zentralloop und in einem Isotopentauchrohr an Position 53/11 gemessen.

Im Zentralloop wurden die Messungen mit einem Holzstopfen im Bereich des Festdeckels wiederholt. Hierbei befanden sich die Sonden im Holz zwischen den einzelnen Abschnitten des Stopfens. Abb. 17 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen.

7. Flußmessungen mit einem Betastrahlungs-Rhodiumdetektor

7.1 Das Meßprinzip

Die Beta-Strahlung einer durch Neutroneneinfang aktivierten Substanz kann man als den Transport einer elektrischen Ladung auffassen. Nach Erreichen der zu einem bestimmten Fluß gehörigen Sättigungsaktivität ist die Beta-Emission und damit die pro Zeiteinheit transportierte Ladungsmenge zeitlich konstant und dem aktivierenden Fluß proportional. Fängt man die Beta-Strahlung der aktivierten Substanz auf, indem man sie mit einem Schirm umgibt, und verbindet den Beta-Emitter und den Beta-Auffänger, die elektrisch leitend sein müssen, über ein empfindliches Strommeßinstrument, so kann der fließende Strom und damit der Neutronenfluß am Ort des Detektors gemessen werden. Damit der Strom nur über das Meßinstrument den elektrischen Kreislauf schließen kann, müssen Emitter und Auffänger gegen direkte Berührung isoliert werden.

Als Beta-Emitter sind Substanzen mit einer möglichst kurzen Halbwertszeit und mit einem großen Aktivierungsquerschnitt geeignet. Die Halbwertszeit soll klein sein, damit die Aktivität ihren Sättigungswert schnell erreicht und damit die Möglichkeit bietet, auch rasche Flußveränderungen am Ort des Detektors zu messen. Ein großer Aktivierungsquerschnitt erhöht die Empfindlichkeit des Detektors und vermindert den Einfluß der Störströme, die im Auffänger und im Kabel induziert werden können.

Rhodium-104 ist das Element, welches diese Forderungen am besten erfüllt. Es ist ein Monoisotop und emittiert eine Beta-Strahlung von 2,5 MeV mit einer Halbwertszeit von 42 sec. Der Aktivierungsquerschnitt für die direkte Anregung dieses Zustandes beträgt 140 b. Leider wird zusätzlich mit 12 barn ein metastabiler Zustand angeregt. Dieses Rh-104m geht mit einer Halbwertszeit von 4,4 min in Rh-104 über und zerfällt dann mit einer Halbwertszeit von 42 sec. Etwa 8,5 % des Sättigungswertes werden dadurch erst mit einer längeren Halbwertszeit von 4,4 min erreicht.

2 Die Form des Detektors

Der von uns benutzte Detektor hatte die Form eines Sandwichs, bei dem ein Rhodium-Rechteck mit den Abmessungen $10 \times 20 \times 0,2 \text{ mm}^3$ sich zwischen den Zirkonscheiben von 0,5 mm Dicke befindet. Zirkon wurde wegen des geringen Aktivierungs-

querschnittes gewählt. Isoliert sind die Zirkonplatten durch eine doppelte Lage des 6 mg/cm^2 starken Scotch-Tape 850, das sich als sehr strahlenbeständig erwiesen hat. Der Detektor ist durch das Amphenolkabel 421 - 096 mit dem Keithley-Elektrometer Modell 610 R verbunden.

Dieses relativ dünne Kabel von 2,5 mm Gesamtdurchmesser wurde gewählt, um möglichst wenig aktivierbares Störmaterial im Bereich der Strahlung zu haben. Auf der anderen Seite ist es wichtig, daß das Kabel einen ausreichenden Isolationswiderstand aufweist, damit der gesamte Strom über das Elektrometer fließt und nicht über den parallelen Isolationswiderstand des Kabels, der sich unter Umständen mit der Temperatur im Reaktor ändern kann. Der Eingangswiderstand im Keithley-Elektrometer beträgt auf dem empfindlichsten Meßbereich 10^{11} Ohm. Das Kabel wurde mit der Rhodium- und den Zirkonplatten durch Punktschweißen verbunden.

Die sandwichähnliche Form wurde bei der Erprobung des Detektors gewählt, um bei einer relativ dünnen Rh-Schicht die Selbstabschirmung der Neutronen und die Beta-Selbstabsorption klein zu halten. Bei der laufenden Kontrolle in Loop-Einsätzen usw. wird sich wahrscheinlich die Form eines Rhodium-Drahtes mit einer zylindrischen Hülle von ungefähr dem gleichen Umfang wie das Kabel als günstiger erweisen, so daß der Detektor in seiner äußeren Form sich von einem Thermoelement kaum unterscheidet und wie dieses behandelt werden kann.

7.3 Eichung und Linearität

Der Zusammenhang zwischen dem Sättigungsstrom und dem Neutronenfluß läßt sich prinzipiell leicht errechnen, nur fehlt für eine genaue Berechnung die Kenntnis des Selbstabsorptionkoeffizienten des Rhodiums und der Absorption im Isoliermaterial und im Zirkon für das kontinuierliche Beta-Spektrum des zerfallenden Rhodiums.

Einfacher und genauer erhält man die Empfindlichkeit, wenn man den Detektor an einen Ort mit bekanntem Neutronenfluß bringt und den fließenden Strom dort mißt. So ergab der Rh-Detektor mit den oben erwähnten Abmessungen ($20 \times 10 \times 0,2 \text{ mm}$) in einem Horizontalkanal des FR2 bei 120 Watt Leistung an einer Stelle mit dem thermischen Fluß $\phi = 3,16 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ und einem epithermischen Fluß $\phi_{ep} = 9,75 \times 10^6 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ einen Strom von $7,2 \times 10^{-12}$ Amp.

Der Anteil des Stromes, der durch den epithermischen Fluß hervorgerufen wird, beträgt 5 %, wie aus einer Messung des Detektors unter 1 mm Cd hervorging.

Wir erhalten damit nur 33 % des Stromes, den man erwarten sollte ($I = 6,54 \times 10^{-20} \phi$) wenn die Selbstabschirmung (25 % weniger), Beta-Selbstabsorption und Absorption in der isolierenden Folie und die nicht ganz 100 % Absorption im Zirkon vernachlässigt wird.

Da die Störströme bei unseren Erdungsverhältnissen keine genauere Strommessung als 1×10^{-13} Amp. zulassen, liegt die untere Grenze des Meßbereiches bei dem oben beschriebenen Detektor bei 10^8 n/cm² sec, wenn man einen Fehler von 5 % zuläßt. Nach höheren Flüssen zu ist der Meßbereich wahrscheinlich erst durch Strahlenschäden begrenzt.

Die Linearität des Zusammenhanges von Strom und Neutronenfluß wurde im Bereich von 10^8 bis 3×10^{12} n/cm² überprüft, indem die Reaktorleistung von 30 Watt auf 1 MW stufenweise gesteigert wurde.

4 Zeitliches Verhalten des Beta-Stromes bei veränderlichem Neutronenfluß

Der Erfassung zeitlicher Flußänderungen mit einem Betastrom-Detektor sind durch die endliche Halbwertszeit des Beta-Emitters Grenzen gesetzt.

Um das praktische Verhalten des Detektors bei starken Flußänderungen zu erproben, wurde der Stromverlauf im Detektor bei Periodenmessungen aufgenommen. Durch Ziehen des Feinregelstabes wurde der Reaktor überkritisch gemacht und dann durch Einfahren der Trimmabschaltstäbe auf die alte Leistung zurückgebracht. Die Verdoppelungszeit für die 5 Anstiegsflanken sind 147, 50, 33, 33,5 und 45 sec. In Abb. 18 ist der Strom I im Vergleich zur Leistung des Reaktors dargestellt.

Wie man sieht, hat die Anstiegsflanke des Stromes die gleiche Neigung wie der Anstieg des Flusses. Das ist auch zu erwarten, denn der Strom bleibt immer um den gleichen Faktor hinter dem Fluß zurück. Da beim Einfahren der Trimmstäbe der Fluß sofort wieder absinkt, erreicht der Strom auch nicht den vollen Wert, der dem maximalen Fluß entsprechen würde. Der Unterschied ist umso größer je schneller der Fluß ansteigt. Der Sättigungsstromwert hinkt dem Fluß zwar nach, zeigt eine Änderung vom steigenden zum fallenden Fluß aber sofort (~ 1 sec) an.

Bei abfallendem Fluß dauert es, wie erwartet, bedeutend länger, ehe sich der ungestörte neue Sättigungswert eingestellt hat. Am Ende der Stromabfallskurven macht sich dann die 4,4 min-Aktivität des Rh-104m bemerkbar.

Es wurde der max. mögliche Einfluß der 4,4 min-Aktivität kontrolliert. Dazu wurde der Reaktor 2,5 h bei 500 kW gefahren und anschließend die Leistung auf 200 Watt reduziert. Abb. 19 zeigt den relativen zeitlichen Flußverlauf während der Leistungs-erniedrigung sowie den gemessenen relativen Strom im Rhodium-Detektor.

Wie man aus dem Flußverlauf sieht, nahm die Reaktorleistung während der ersten beiden Dekaden mit einer Halbwertszeit von 30 sec ab. Der Abfall des Stromverlaufs erfolgte dagegen zuerst mit der Halbwertszeit von 60 sec um dann in eine 4,3 min-Komponente überzugehen. Die Extrapolation der langlebigen Komponente auf den Beginn der Flußverminderung ergibt den Anteil derselben zu 6,5 % (statt 8,5 %).

Die 60 sec der schnellen Stromkomponente resultiert aus dem Flußabfall von 30 sec Halbwertszeit und 42 sec Halbwertszeit des Rh-104. Abfallzeit und Anteil der langlebigen Komponente entsprechen innerhalb der Meßgenauigkeit den bekannten Daten des Rh-104m.

Abb. 20 zeigt ein Beispiel für die praktische Verwendung des Detektors. Um das Flußprofil im C2-Kanal zu messen, wurde der Detektor mit einem Vorschub von 0,63 cm/min aus dem Kanal herausgezogen. Das Rhodium-Rechteck des bei dieser Messung verwendeten Detektors hatte die Abmessungen $10 \times 9 \times 0,2 \text{ mm}^3$. Der gemessene Verlauf entspricht vollkommen den Erwartungen: In der Nähe der Brennelemente wird der Fluß etwas abgesenkt und im Bereich des Reflektors angehoben. Die Größe der Feinstruktur stimmt mit Messungen in analogen Kanälen überein, die mit Cu-Bändern durchgeführt wurden. Die Leistung des Reaktors während der Messung betrug 12 kW.

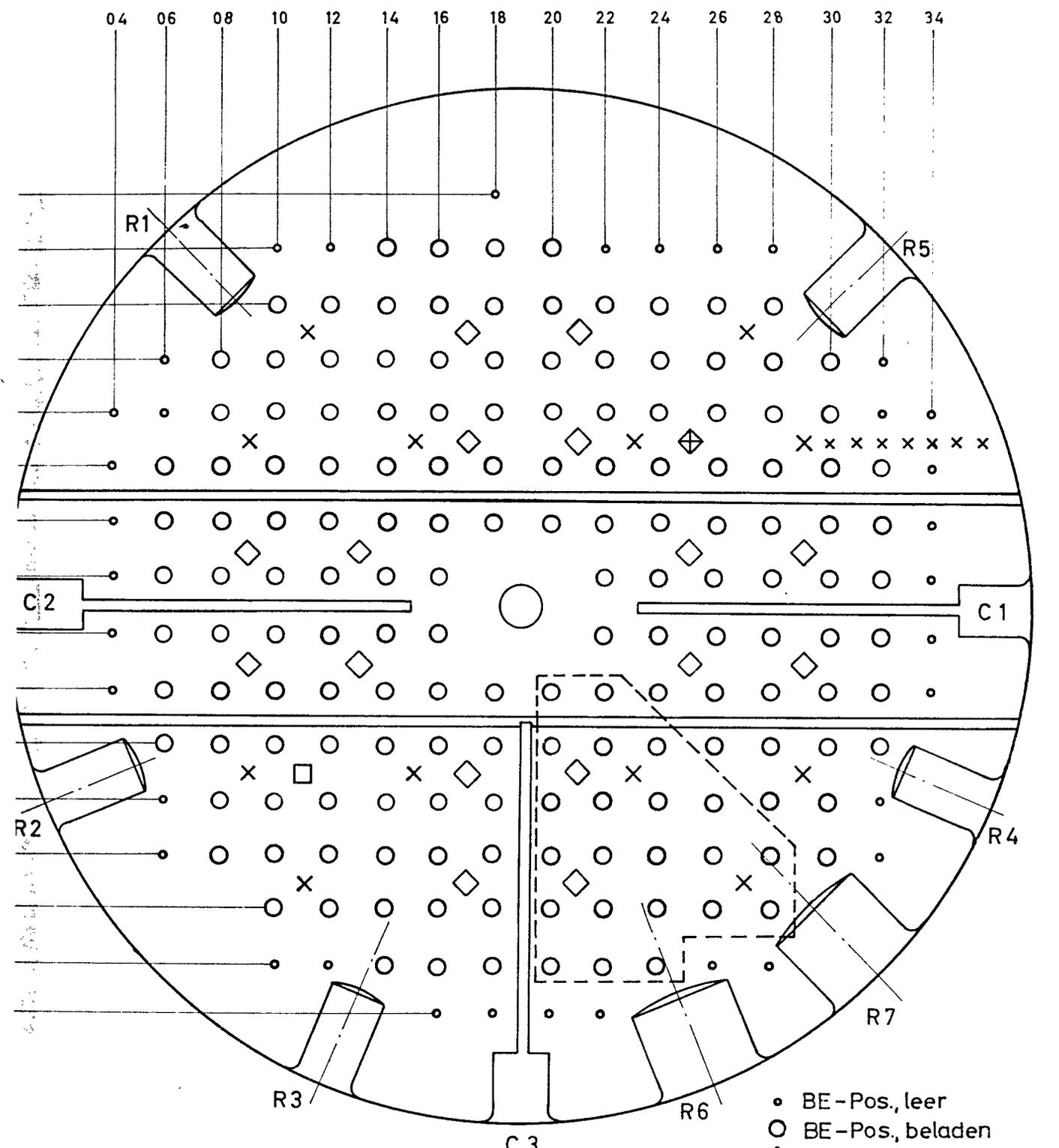
Zusammenfassend sei darauf hingewiesen, daß der Rhodium-Detektor innerhalb seiner Grenzen, d. h. bei genügend langsamer Flußänderung ein Neutronenmeßinstrument darstellt, das folgende günstige Eigenschaften hat:

1. Er ist einfach und schnell herzustellen,
2. seine Abmessungen können so klein gewählt werden, daß praktisch keine Rückwirkungen auf den Fluß auftreten und der Detektor an einem sehr gut definierten Ort mißt, sodaß Flußänderungen über sehr kleine Entfernungen gemessen werden können.
3. Der Detektor erfordert keinen großen Aufwand an Elektronik. Es ist nur ein empfindliches Meßinstrument notwendig.
4. Der Detektor hat eine über einen großen Meßbereich lineare Anzeige (empfindlich für Flüsse $\geq 10^8$ n/cm² sec).

Die Anregung zur Benutzung dieses Meßprinzips verdanken wir einer Unterhaltung mit Mr. Hilborn von der AECL in Chalk River/Canada.

Ref.:

- | | | |
|-----|--------------------------|--|
| [1] | Meister, Glauner, Hagen: | Flussmessungen am FR2
Interner Arbeitsbericht 61/124 und 61/125 |
| [2] | Glauner, Kühle: | Reaktivitätsmessungen am FR2
INR-Bericht 34/62 |
| [3] | Wintzer: | Ergebnisse heterogener Rechnungen für verschiedene Beladungszustände am FR2
(noch nicht veröffentlicht) |
| [4] | Littler: | Reactor Physics |
| [5] | Etherington: | Nuclear Engineering Handbook |
| [6] | Wintzer: | Berechnung des Anteils verzögerter Neutronen im FR2
RB-Bericht 12/61 |



- BE-Pos., leer
- BE-Pos., beladen
- ◇ TA
- ⊕ FR
- × starrer Folienträger
in leerer Isotopen-
kanal-Pos.
- × beweglicher Folienträger
im leeren Isotopen-
kanal-Pos. s. Kap. 6
- siehe Kap. 5
- Tauchrohr an Isotopen-
kanal-Pos.

Abb. 1

Corebeladung bei den Messungen

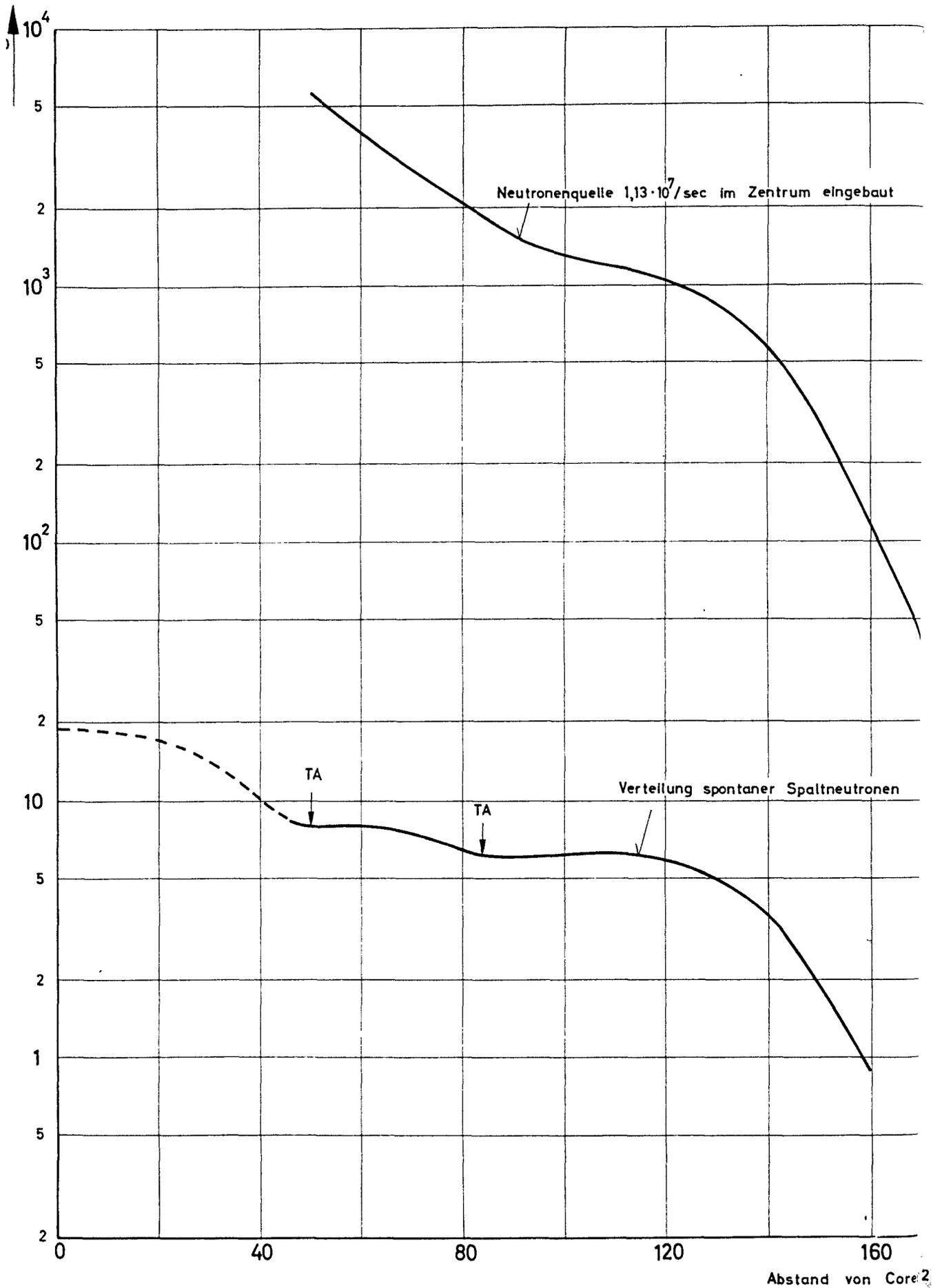


Abb. 2: Neutronenfluß im Kanal C3 bei abgeschaltetem Reaktor

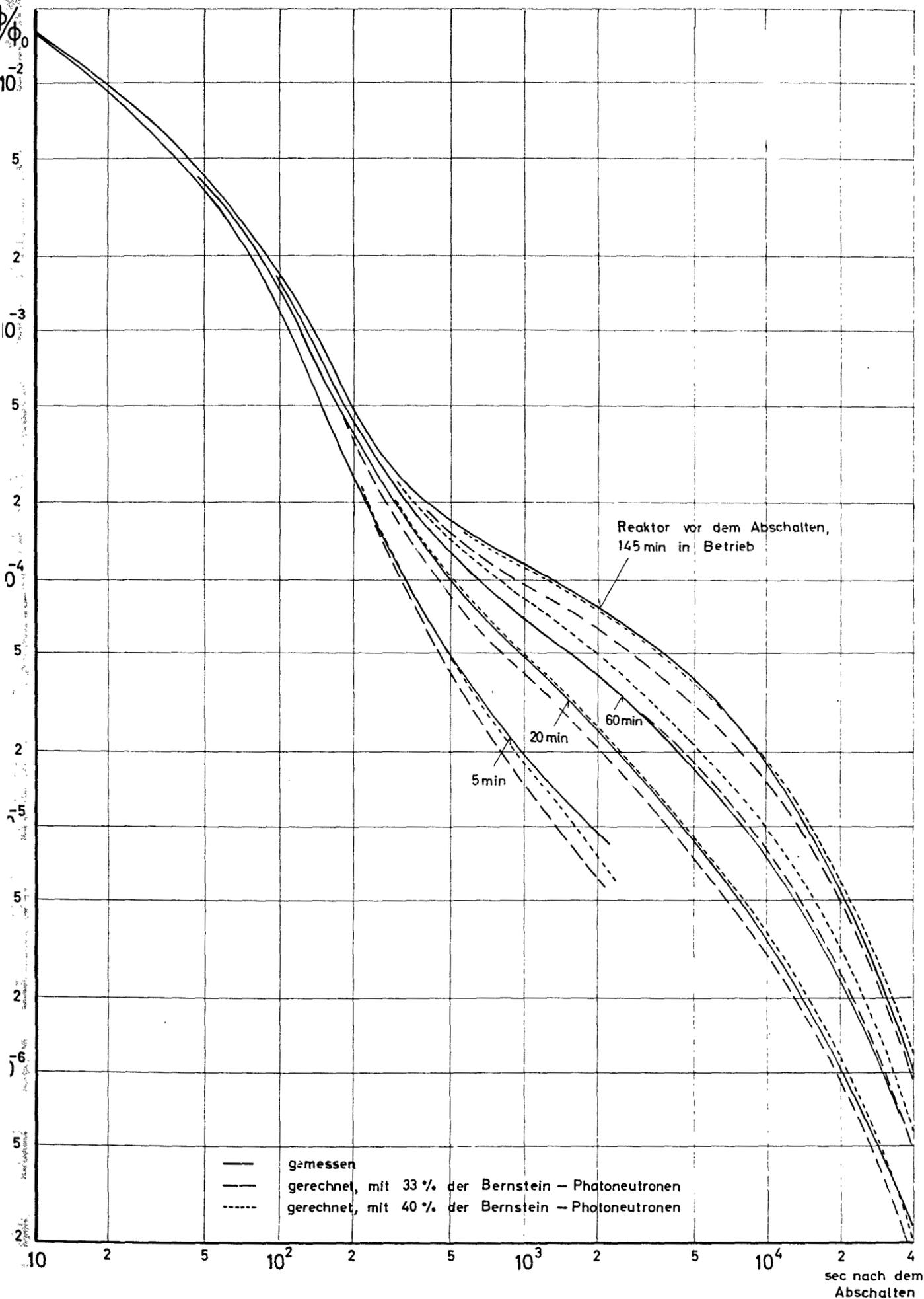


Abb. 3: Abfall der verzögerten Neutronen nach dem Abschalten des Reaktors.

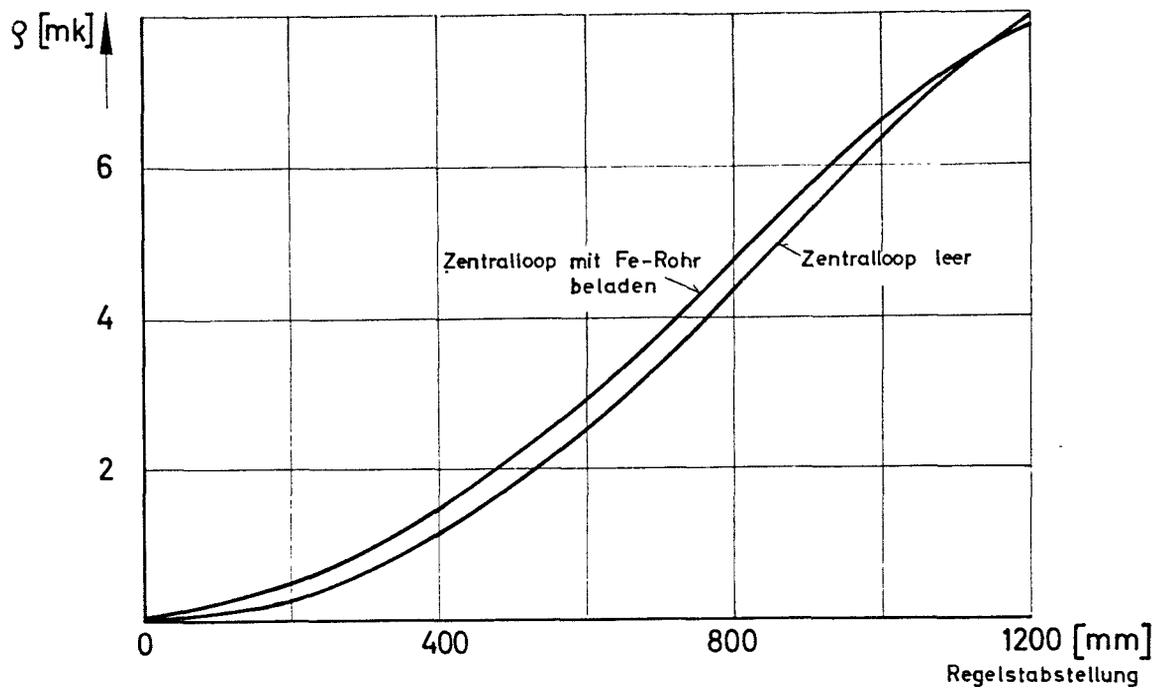


Abb. 4: Reaktivitätswirkung des Regelstabes

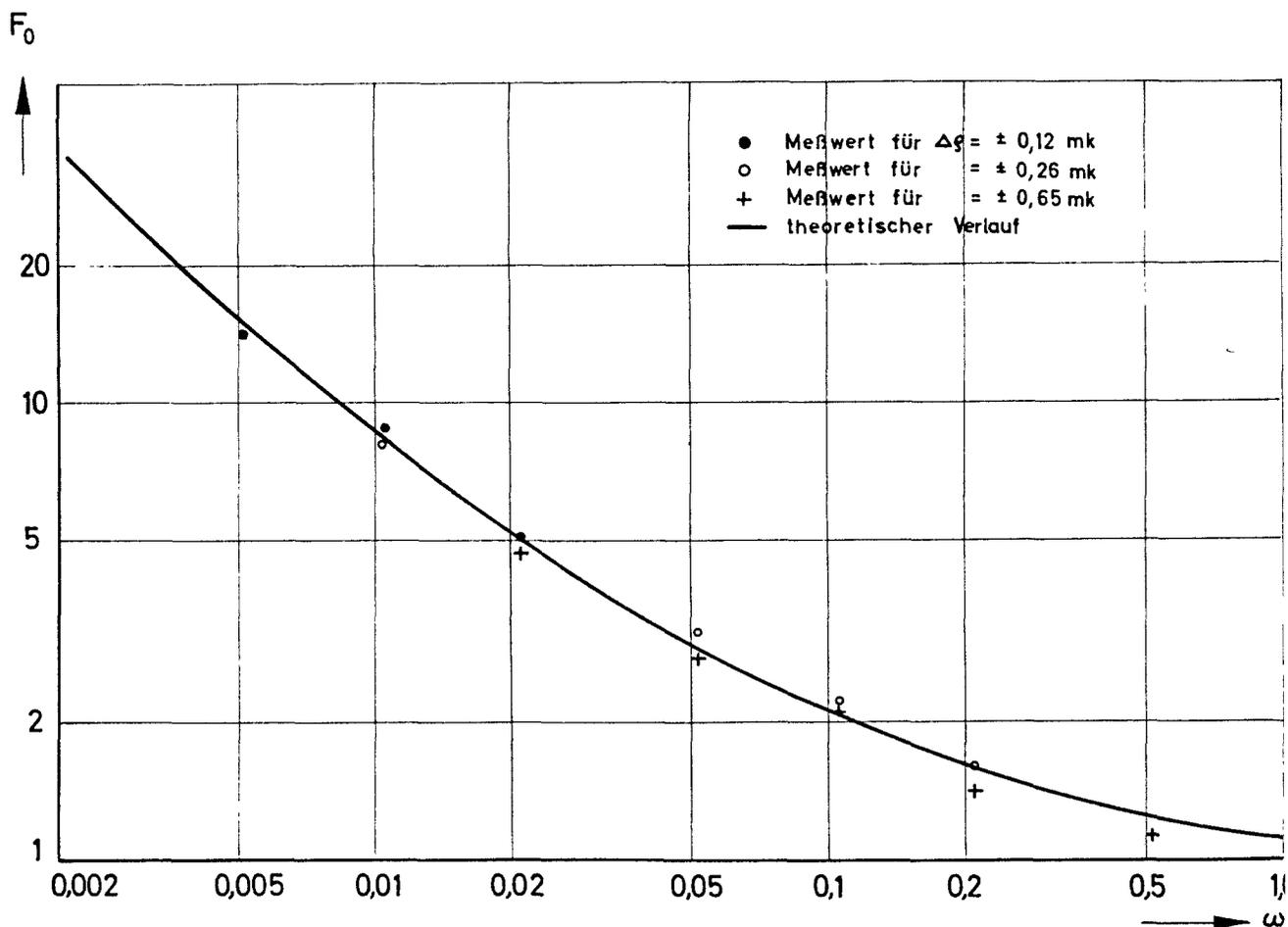


Abb. 5: Übertragungsfunktion des kalten Reaktors

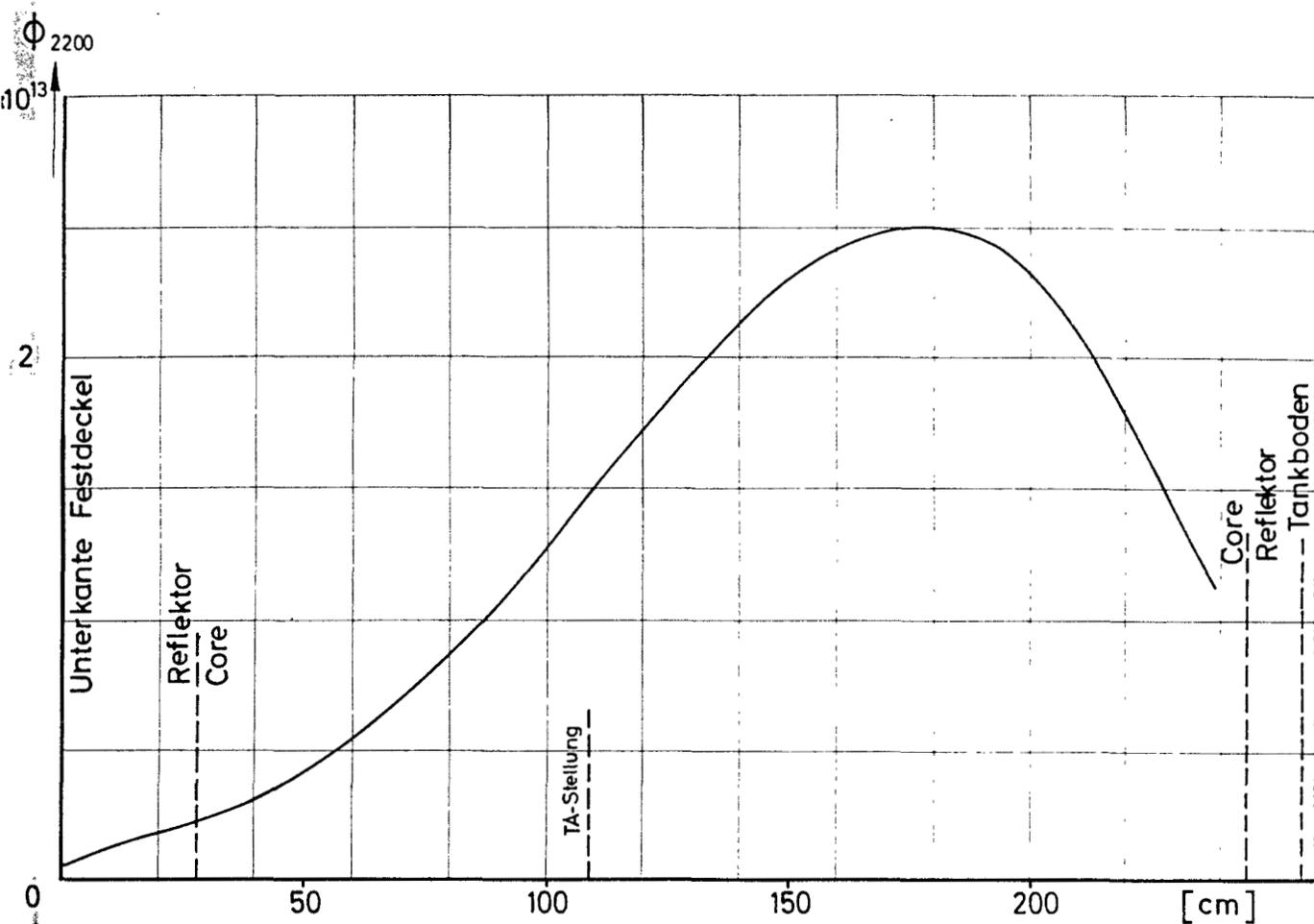


Abb. 6: Neutronenfluß auf der Achse des Zentralloops, das mit Fe-Rohr 121×3,5 mm belad ist

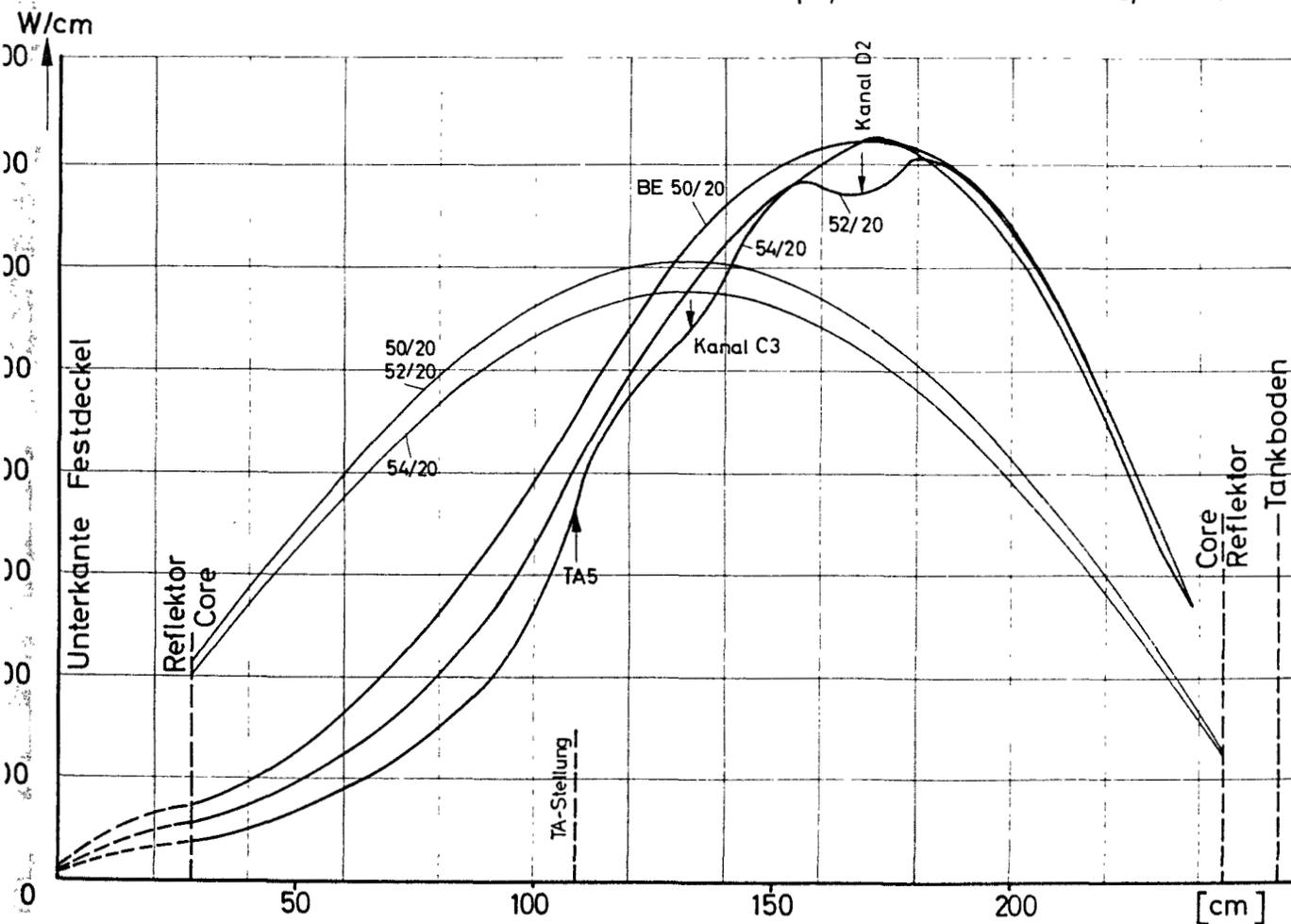


Abb. 7a: Spezifische Leistung der Brennelemente an verschiedenen Positionen bei 12MW; Zentralloop 130 ϕ mm mit Fe-Rohr 121×3,5 mm beladen.

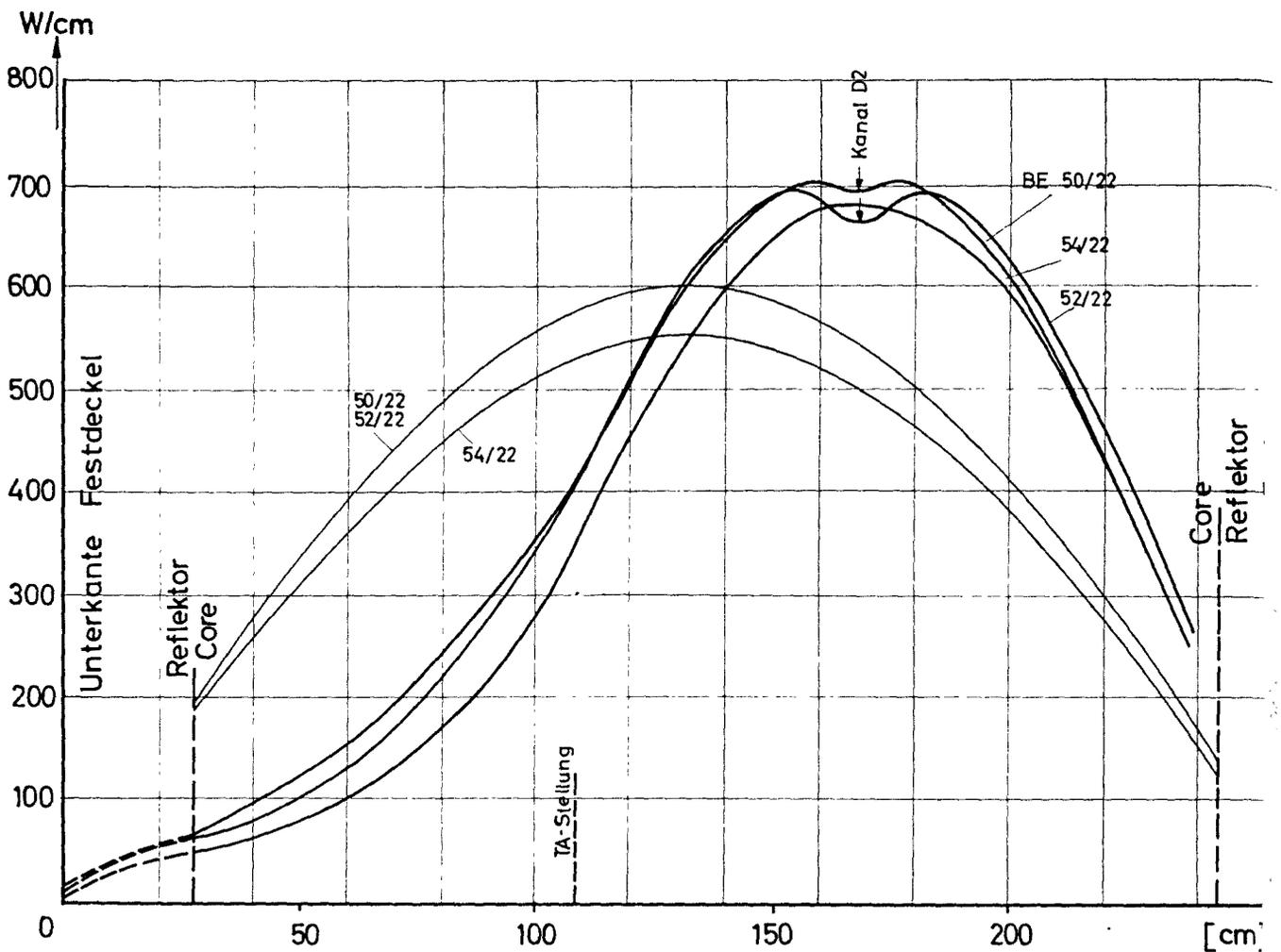


Abb. 7b:

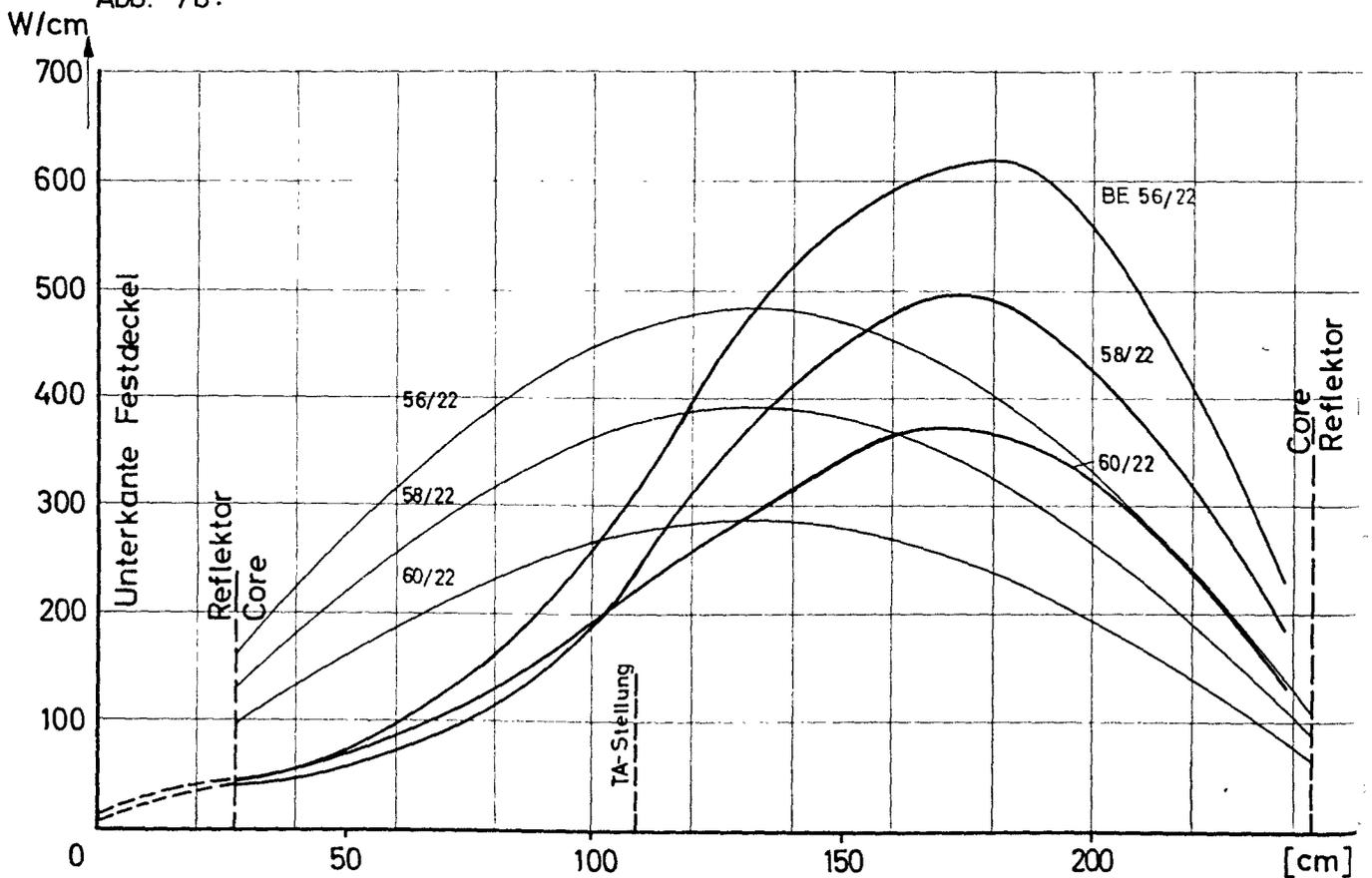


Abb. 7c: Spezifische Leistung der Brennelemente an verschiedenen Positionen bei 12 MW; Zentralloop 130 \varnothing mm mit Fe-Rohr 121 x 3,5 mm beladen.

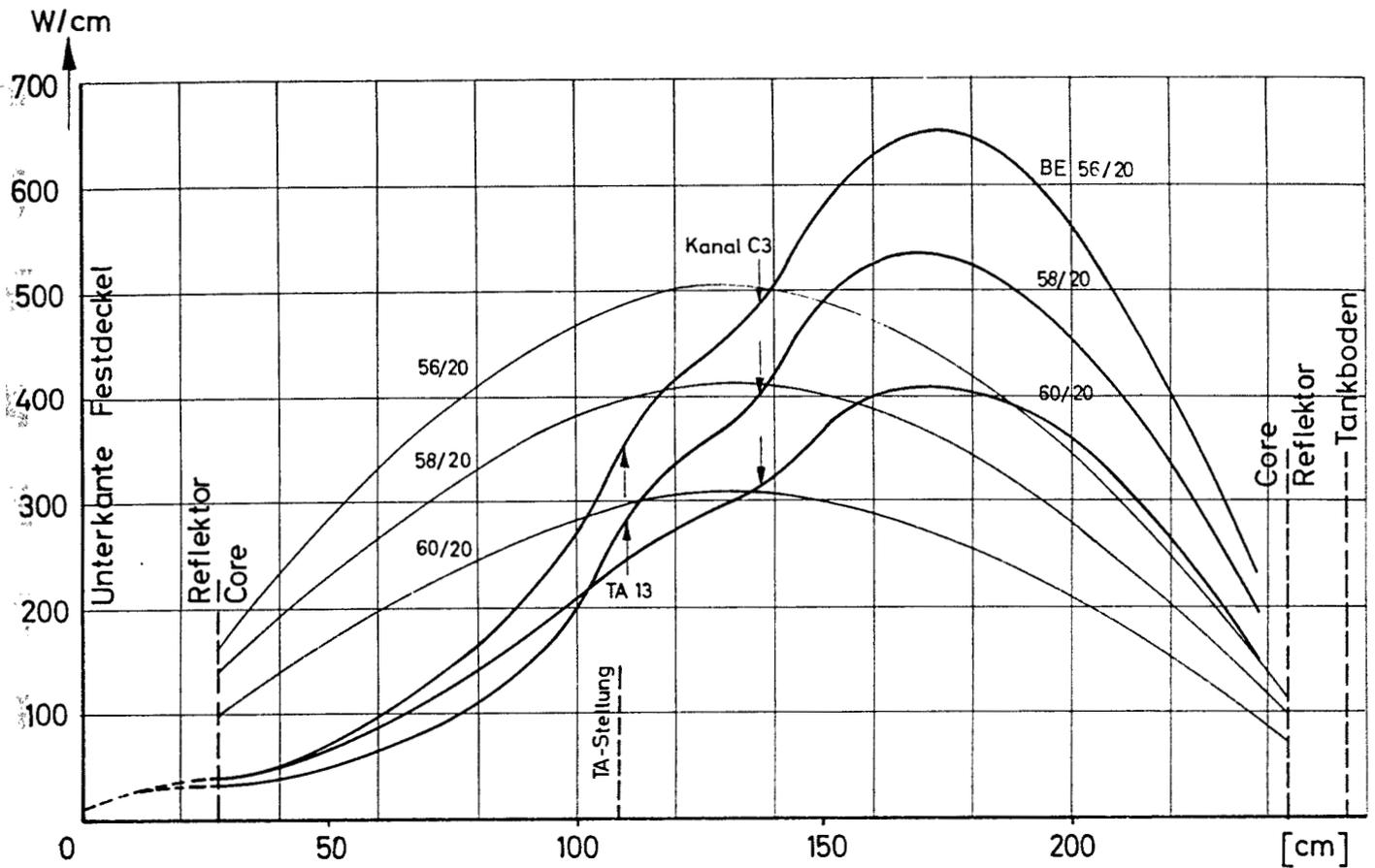


Abb. 7d:

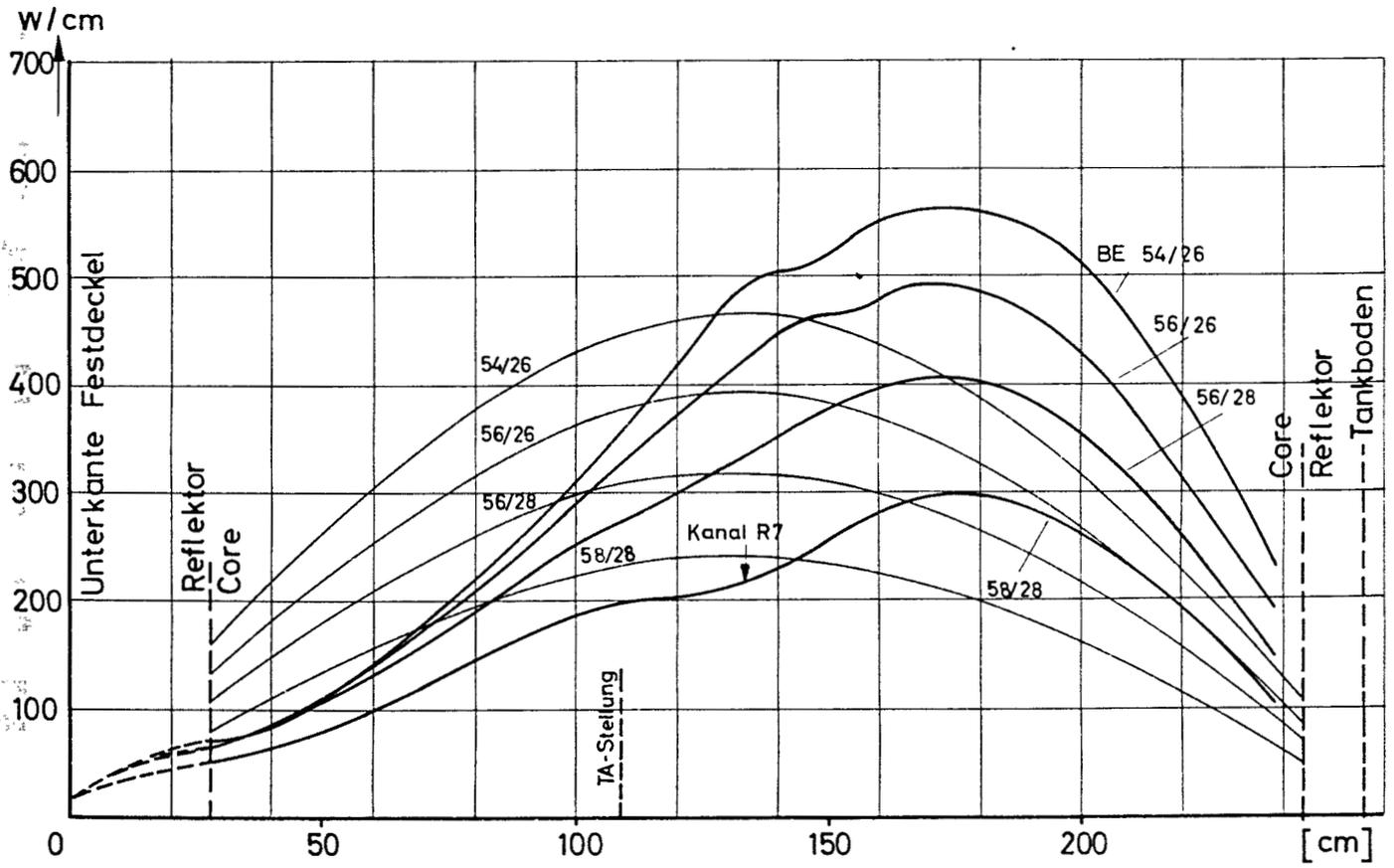


Abb. 7e: Spezifische Leistung der Brennelemente an den verschiedenen Positionen bei 12MW; Zentralloop 130 ϕ mm mit Fe-Rohr 121 x 3,5 mm beladen.

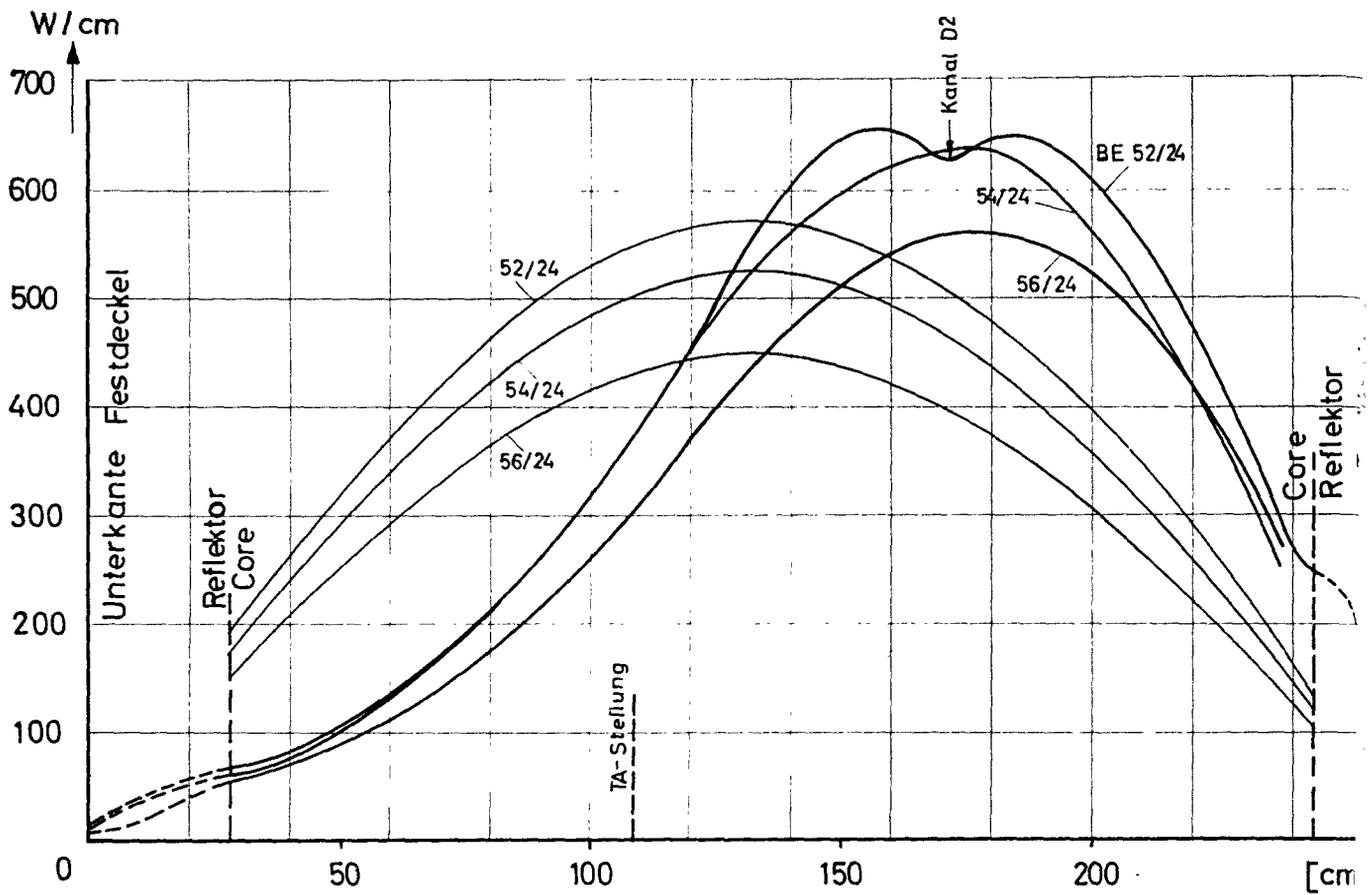


Abb. 7f:

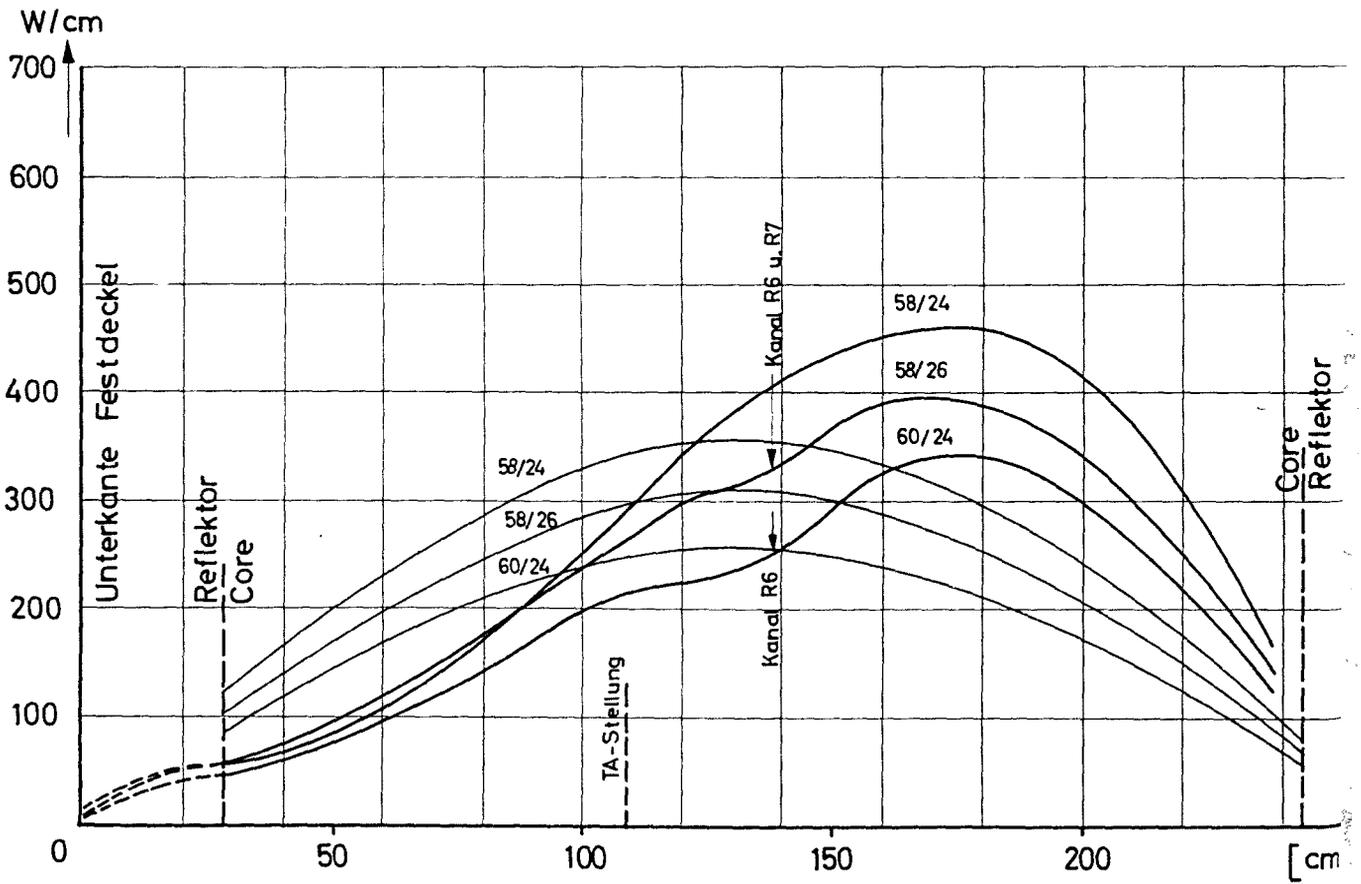
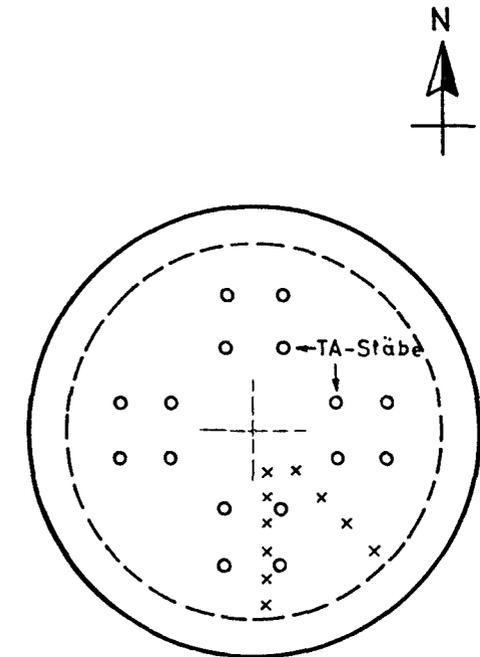
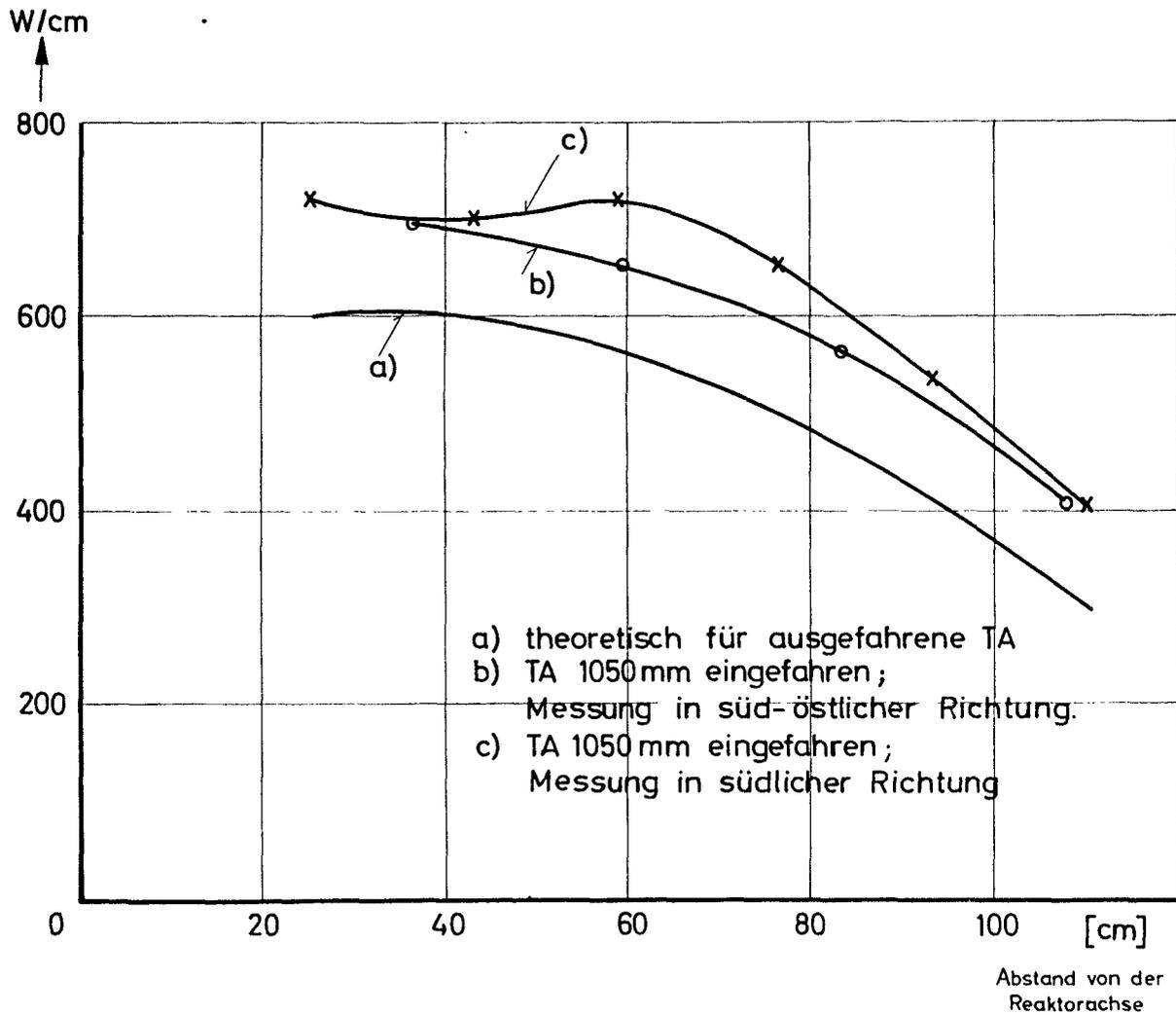


Abb. 7g: Spezifische Leistung der Brennelemente an verschiedenen Positionen bei 12 MW; Zentralloop 130 ϕ mm mit Fe-Rohr 121 x 3,5 mm beladen.



CORE - Draufsicht mit den ausgemessenen BE X

Abb. 8: Maximale spezifische Leistung an den BE bei 12 MW in Abhängigkeit von der TA-Stellung. Zentralloop mit einem Fe-Rohr beladen.

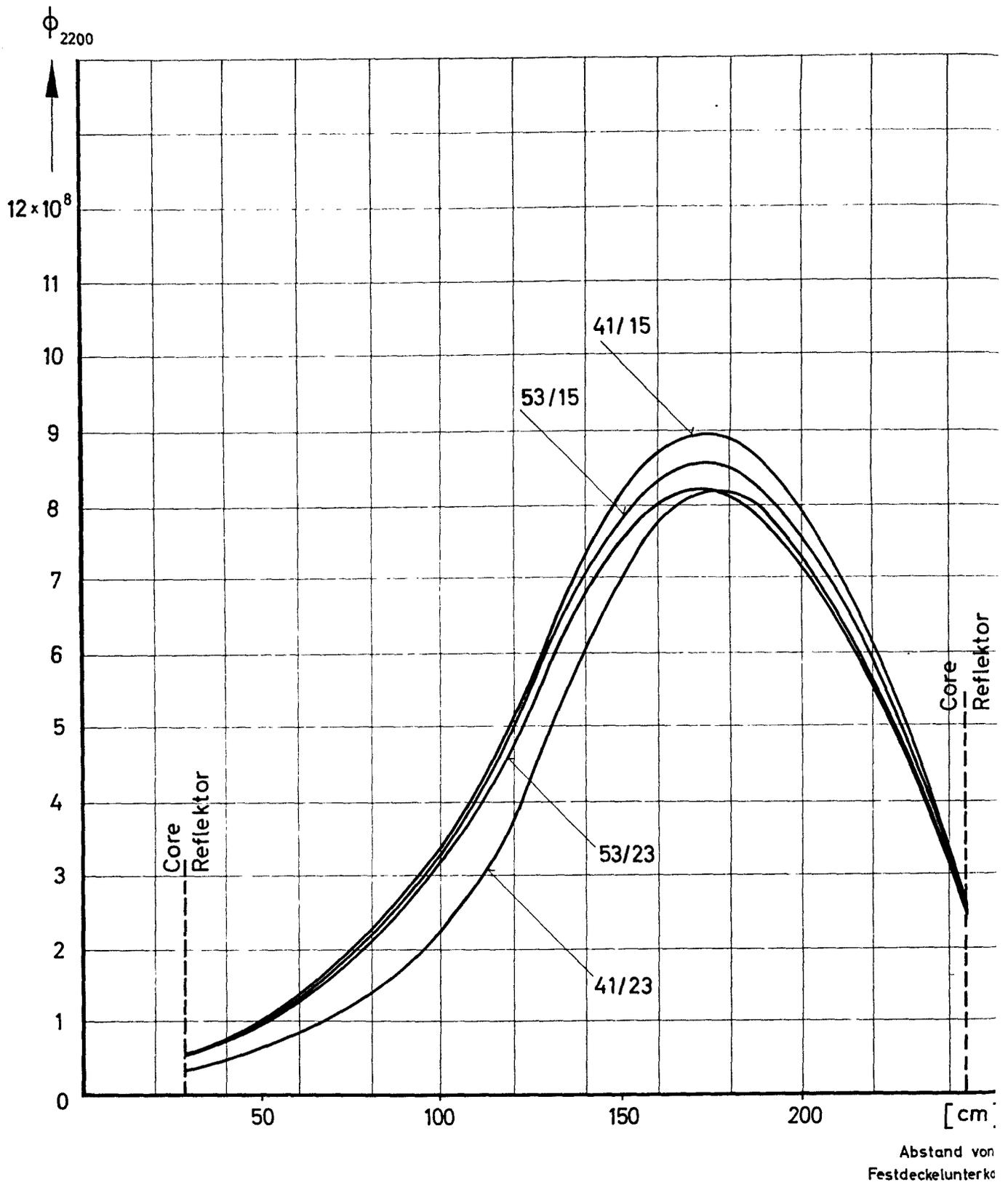


Abb. 9a Symmetriemessung :

Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses an den vier geometrisch äquivalenten Positionen 41/15 ; 41/23 ; 53/15 ; 53/23 im Abstand $6,40 d$ vom Zentrum. (Bestrahlung 1) Core mit 158 BE, leerem Zentral-Loop, ohne Isotopen-Kanäle.

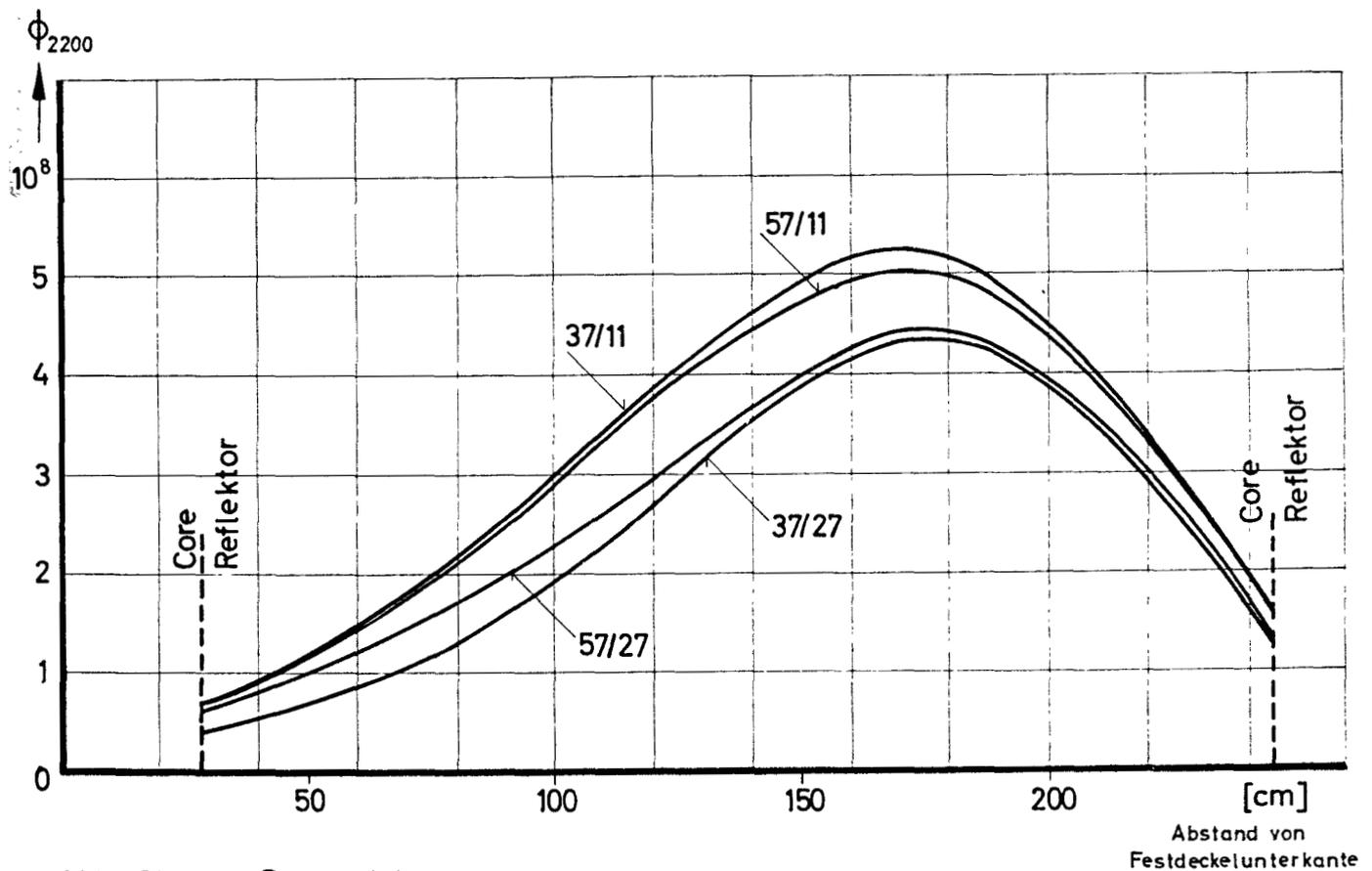
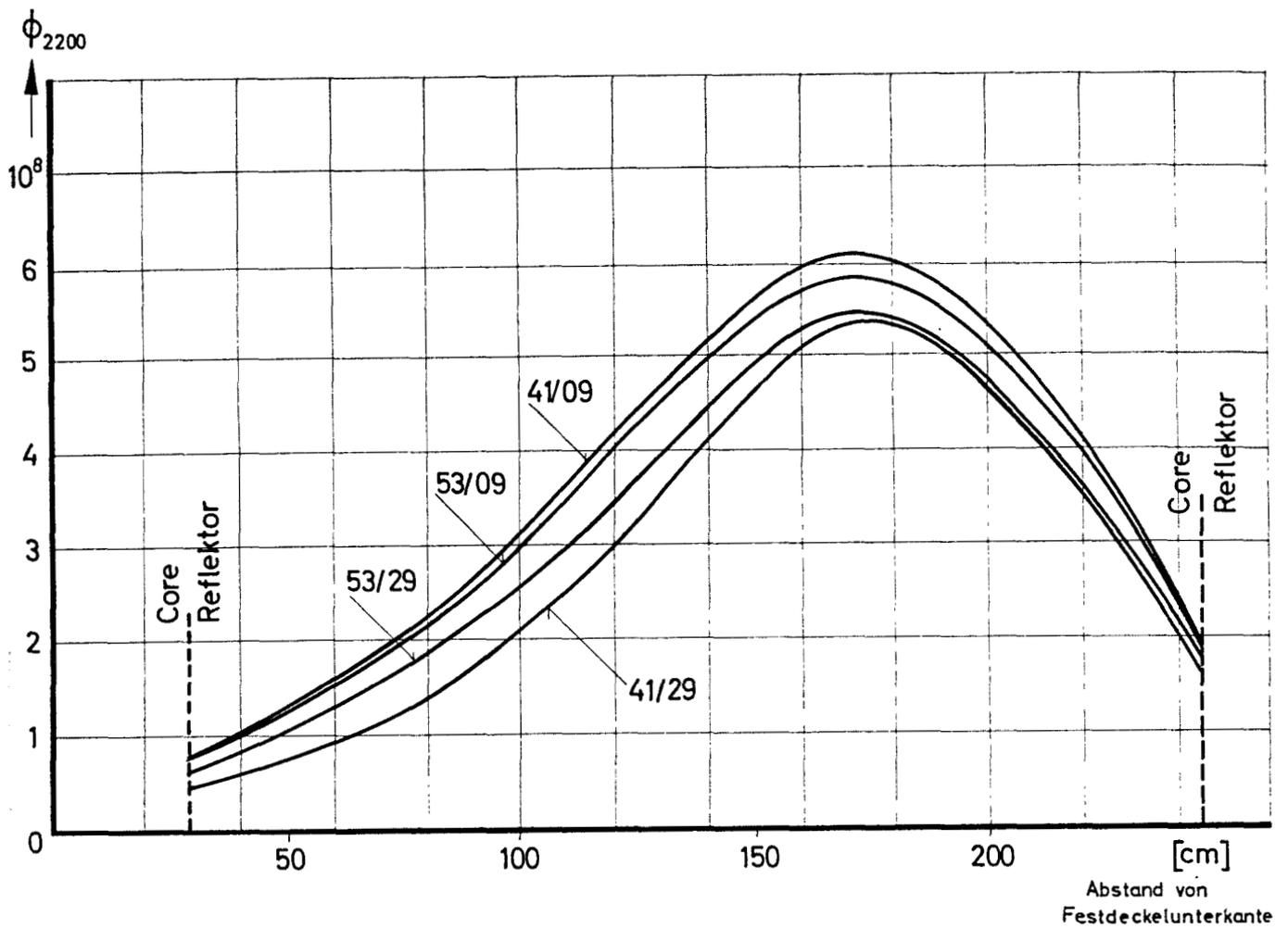


Abb. 9b,c Symmetriemessung:
 Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses an den vier äquivalenten Positionen 41/09; 41/29; 53/09; 53/29 bzw. 37/11; 37/27; 57/11; 57/27 im Abstand 5,83 d vom Zentrum. (Bestrahlung 1) Core mit 158 BE, leerem Zentral-Loop, ohne Isotopen-Kanäle.

Produkt aus °C·m³/h ergibt:

26,5 - 33,0	△	52,5 - 59,0	▨
33,0 - 39,5	□	59,0 - 65,5	●
39,5 - 46,0	⊙	65,5 - 72,0	▲
46,0 - 52,5	△	72,0 - 78,5	■

⊗ Diese BE sind auf das Sicherheitssystem geschaltet und daher nicht mit ausgemessen worden.

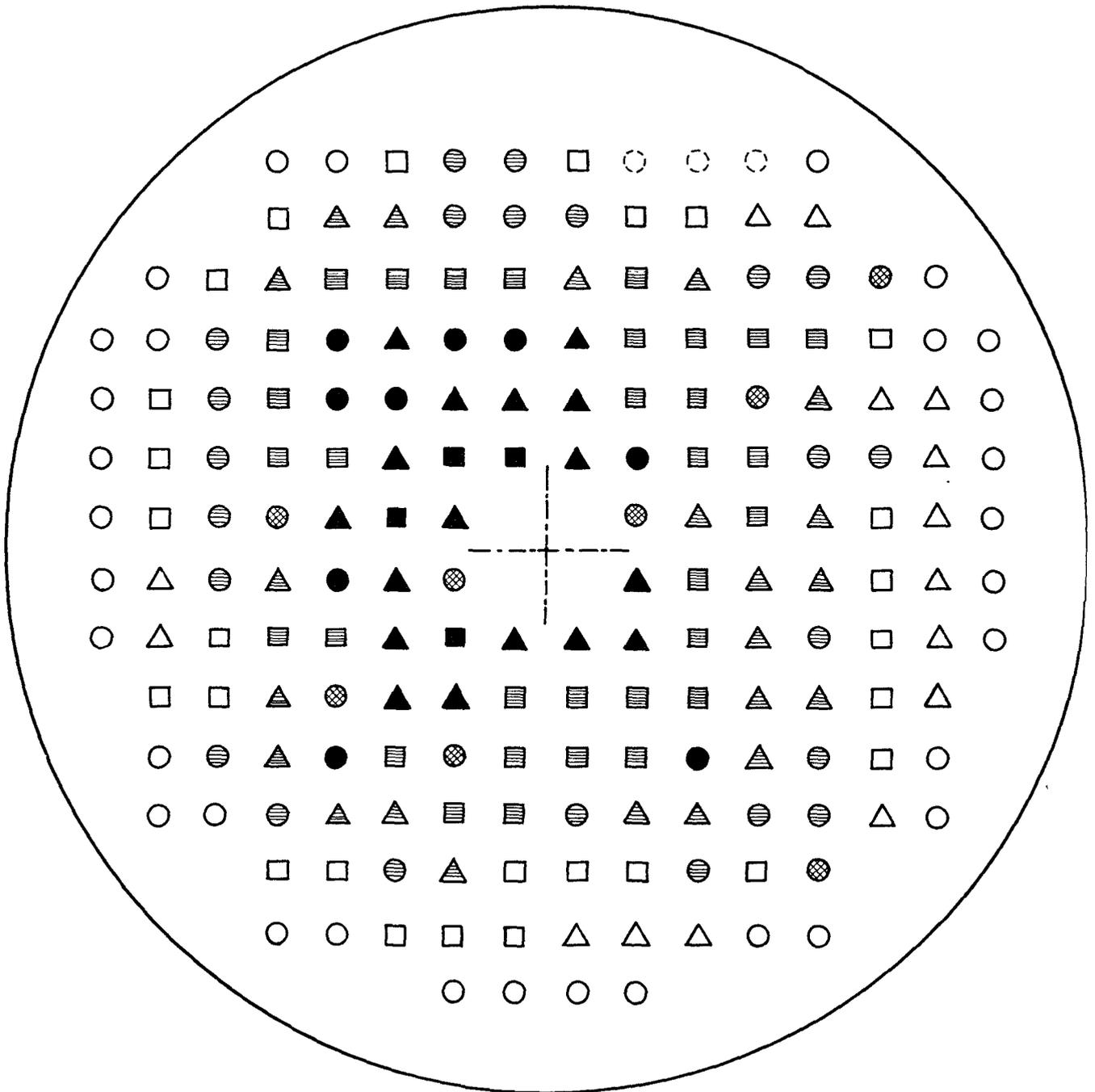


Abb. 10

Leistungsverteilung über die einzelnen Brennelemente, bestimmt aus Temperaturanstieg und Durchflußmenge. [°C·m³/h]

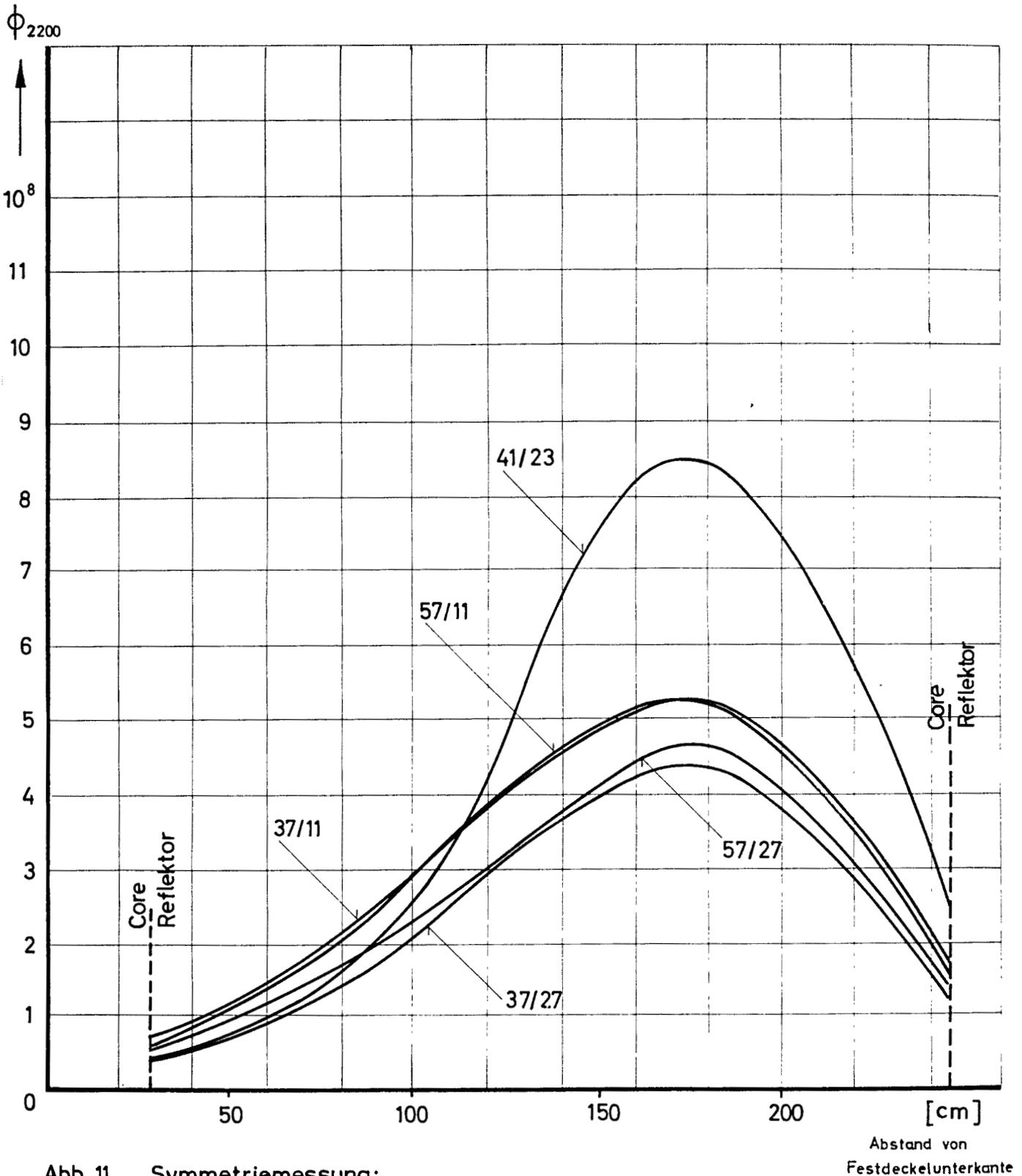


Abb. 11 Symmetriemessung:

Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses an den vier geometrisch äquivalenten Positionen 37/11; 37/27; 57/11; 57/27 und der dem Feinregelstab am nächsten gelegenen Isotopenkanalposition 41/23. Die Trimmabschaltstäbe waren alle gleich tief (128 cm) und den Feinregelstab möglichst wenig (102 cm) eingefahren. (Bestrahlung 2) Core mit 158 BE, leerem Zentral-Loop, ohne Isotopen-Kanäle.

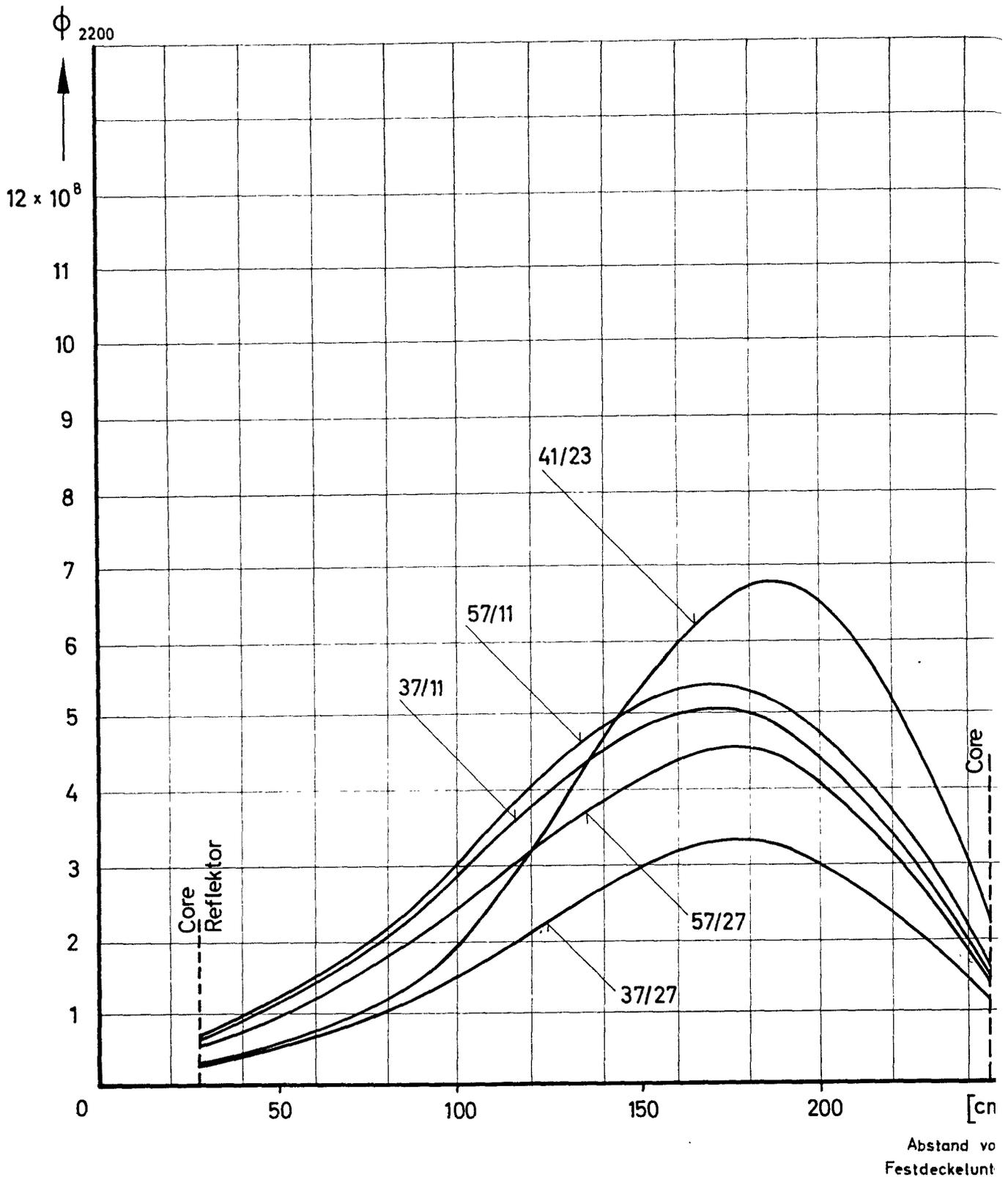


Abb. 12 Symmetriemessung:

Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses an den vier geometrisch äquivalenten Positionen 37/11; 37/27; 57/11; 57/27 und der dem Feinregelstab am nächsten gelegenen Isotopenkanalposition 4. Die Trimmabschaltstäbe waren alle gleich tief (123 cm) und der Feinregelstab möglichst weit (178 cm) eingefahren. (Bestrahlung Core mit 158 BE, leerem Zentral-Loop, ohne Isotopen-Kanäle.)

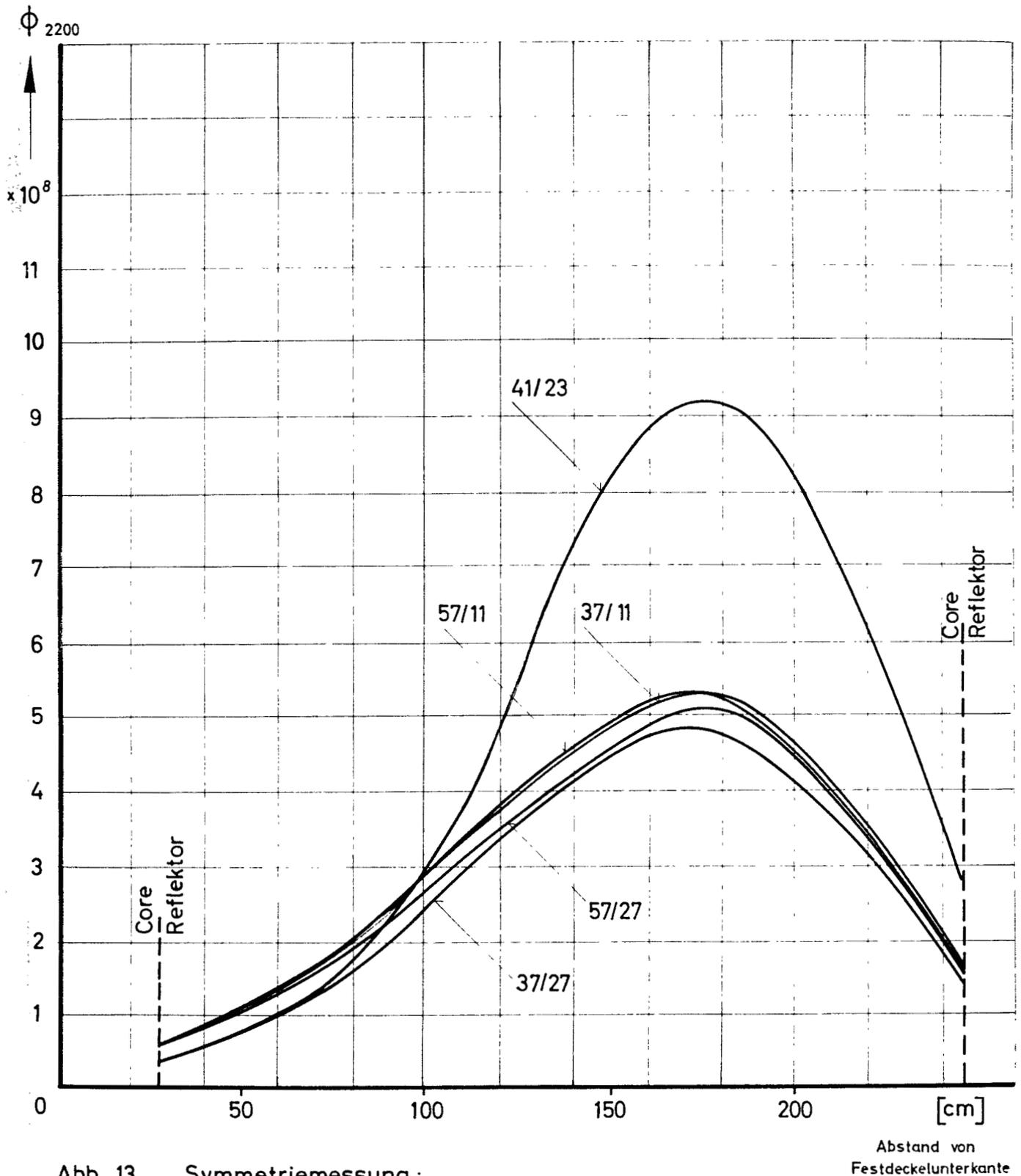


Abb. 13 Symmetriemessung :

Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses an den vier geometrisch äquivalenten Positionen 37/11; 37/27; 57/11; 57/27 und der dem Feinregelstab am nächsten gelegenen Isotopenkanalposition 41/23. Die 8 Trimmabschaltstäbe der westlichen Hälfte waren um 10 cm tiefer (133 cm) als die der östlichen Hälfte (123 cm) eingefahren, wobei der Feinregelstab möglichst wenig ins Core ragte. (100 cm) (Bestrahlung 4)

Core mit 158 BE, leerem Zentral-Loop, ohne Isotopen-Kanäle.

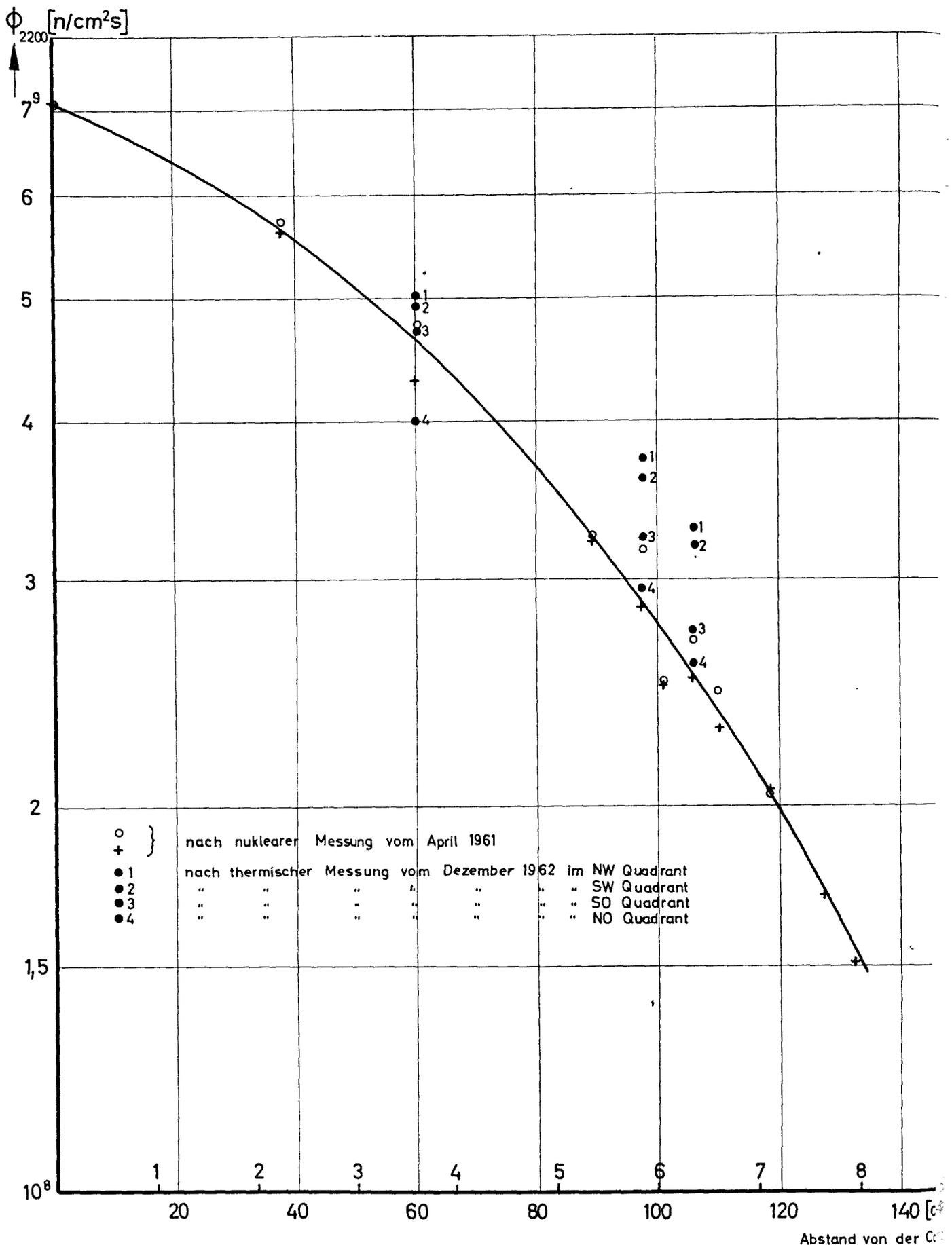
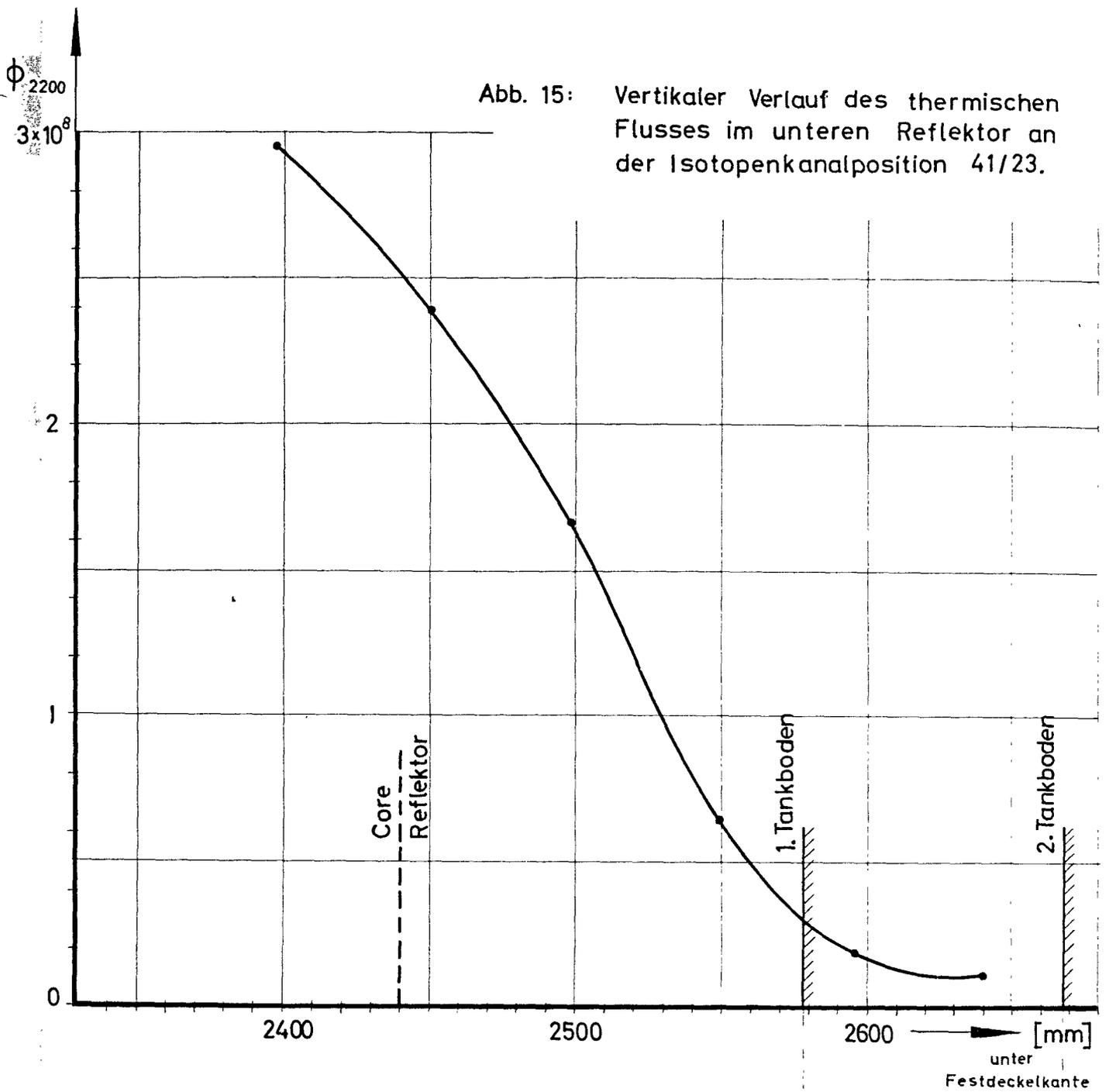


Abb. 14: Neutronenfluß im D₂O in radialer Richtung bei 300 W

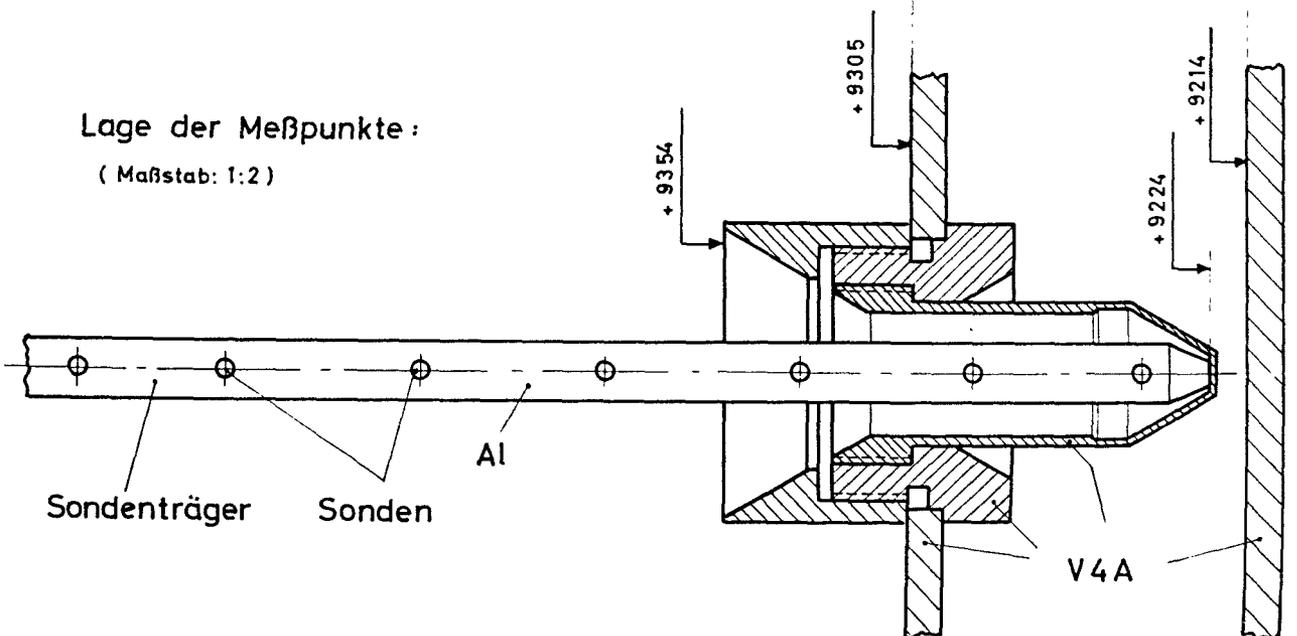
Ausgezogen: nach nuklearer Messung in der östlichen Reaktorhälfte vom April 1961 (157 BE, ohne Zentralloop).

Numerierte Punkte: aus der thermischen Leistungsmessung in den 4 Quadranten bei 12 MW vom Dezember 1962 umgerechnet auf 300W (158 BE, mit Zentralloop).

Abb. 15: Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses im unteren Reflektor an der Isotopenkanalposition 41/23.



Lage der Meßpunkte:
(Maßstab: 1:2)



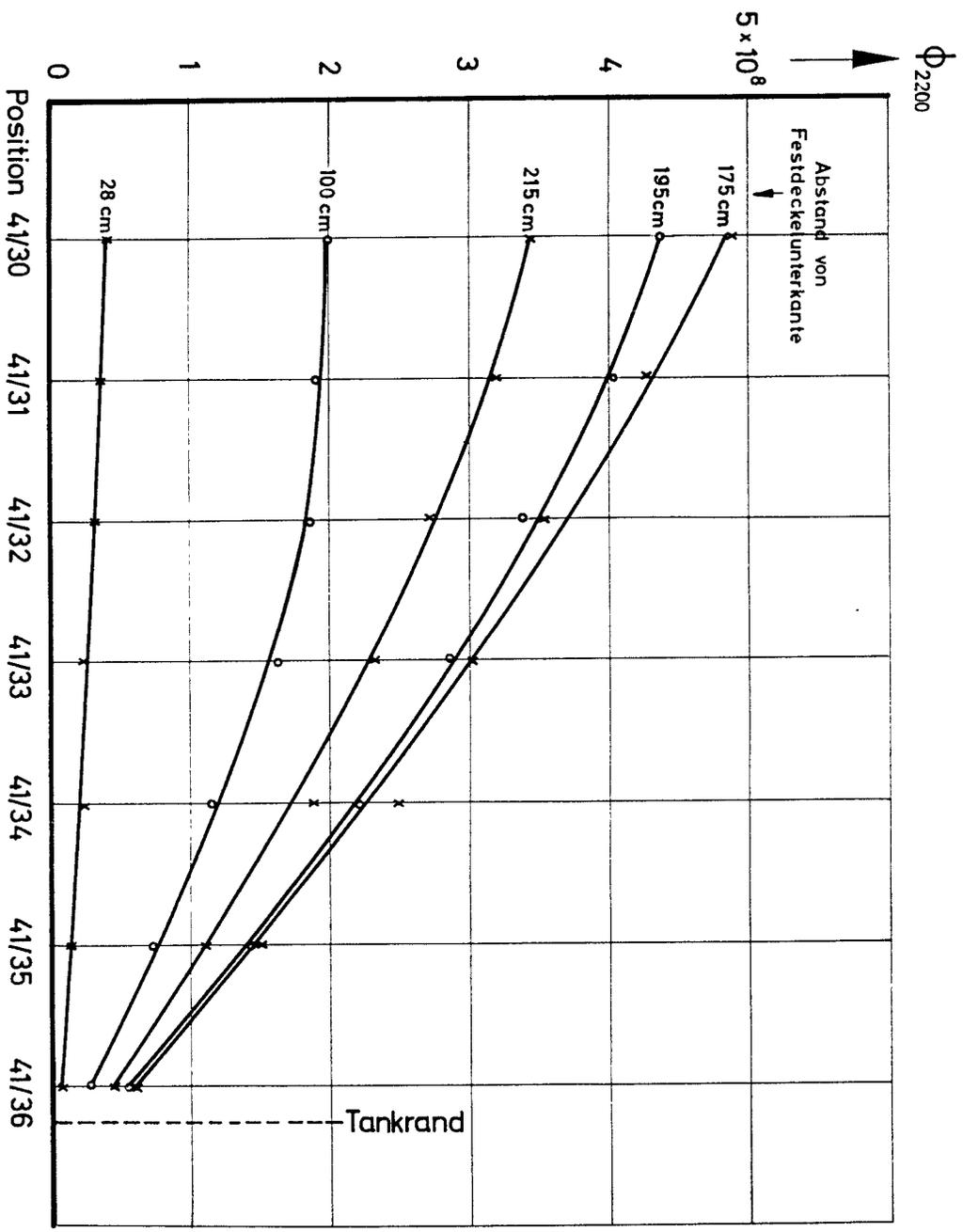
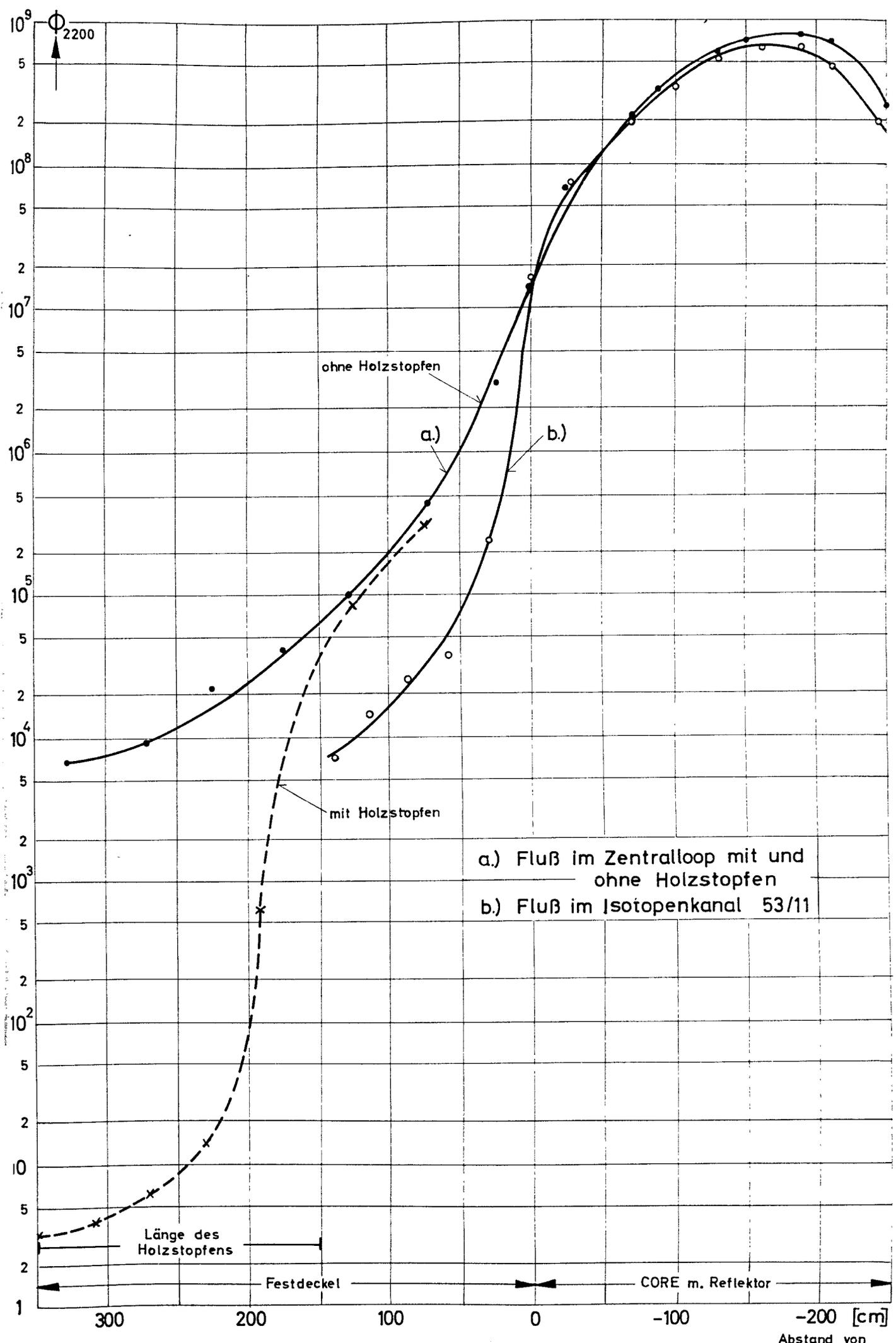


Abb. 16 Horizontaler Verlauf des thermischen Flusses in der Nähe des Tankrandes. (siehe auch Abb. 1)



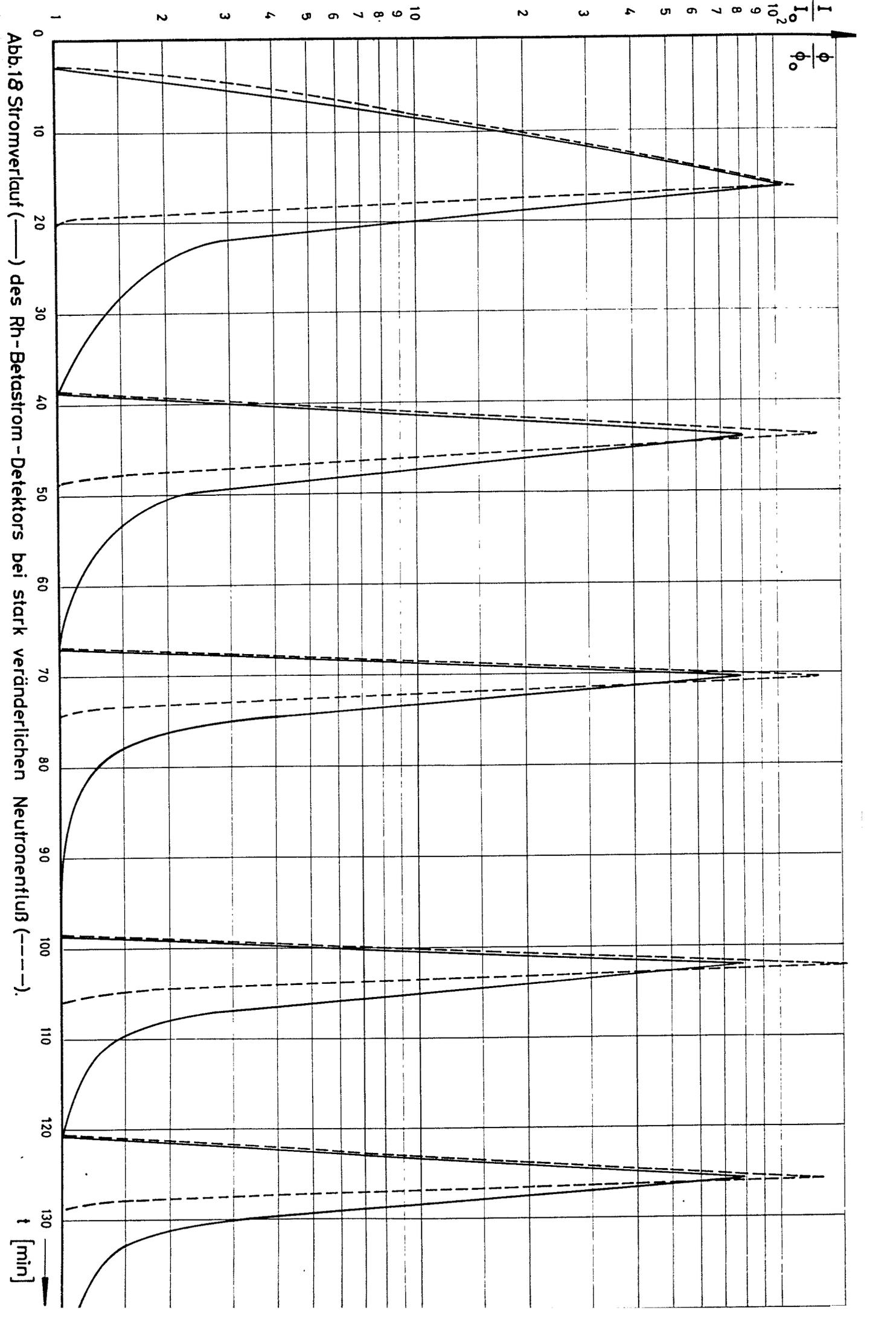


Abb. 18 Stromverlauf (—) des Rh-Betastrom-Detektors bei stark veränderlichen Neutronenfluß (---) .

t [min]

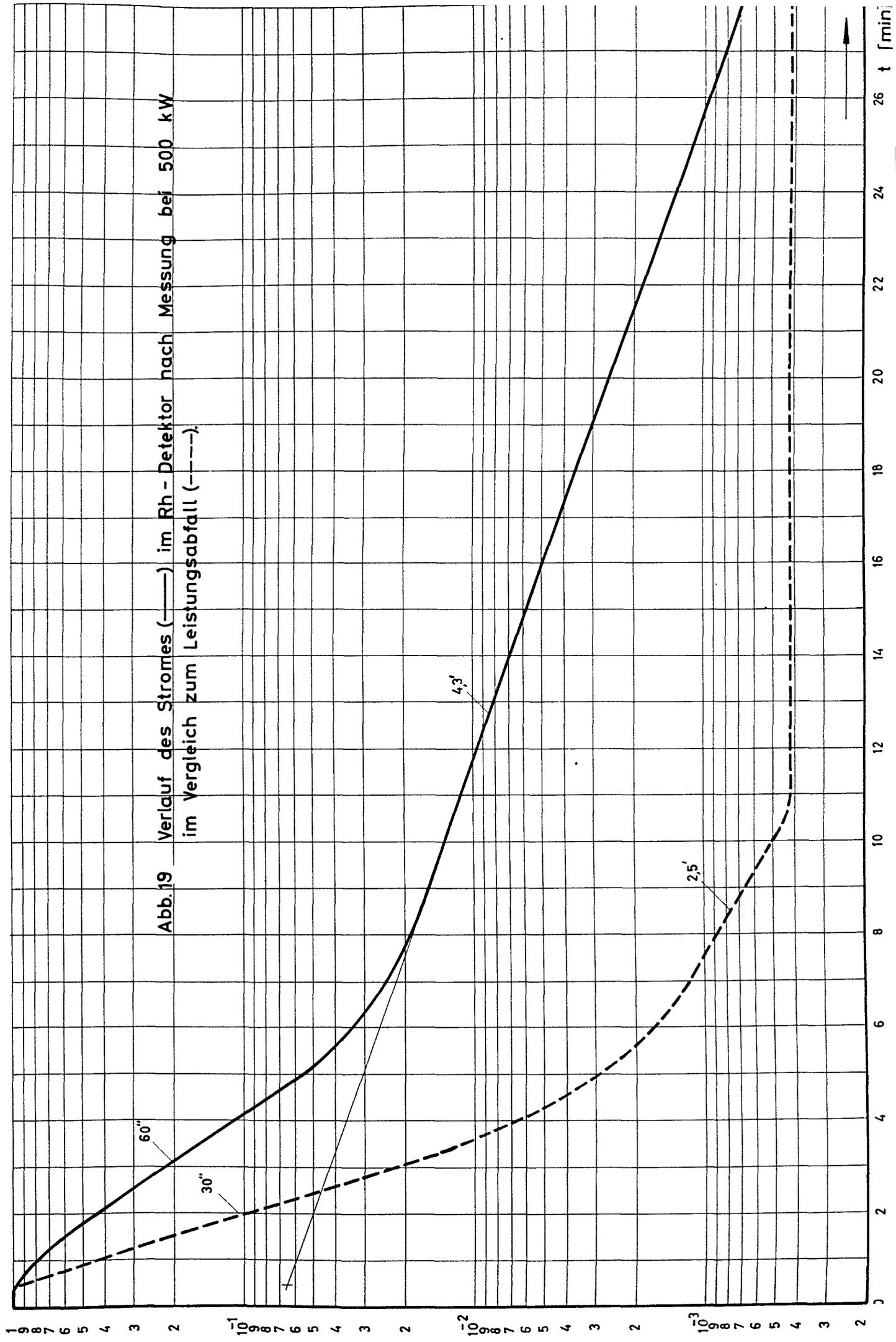


Abb.19 Verlauf des Stromes (—) im Rh - Detektor nach Messung bei 500 kW
im Vergleich zum Leistungsabfall (---).

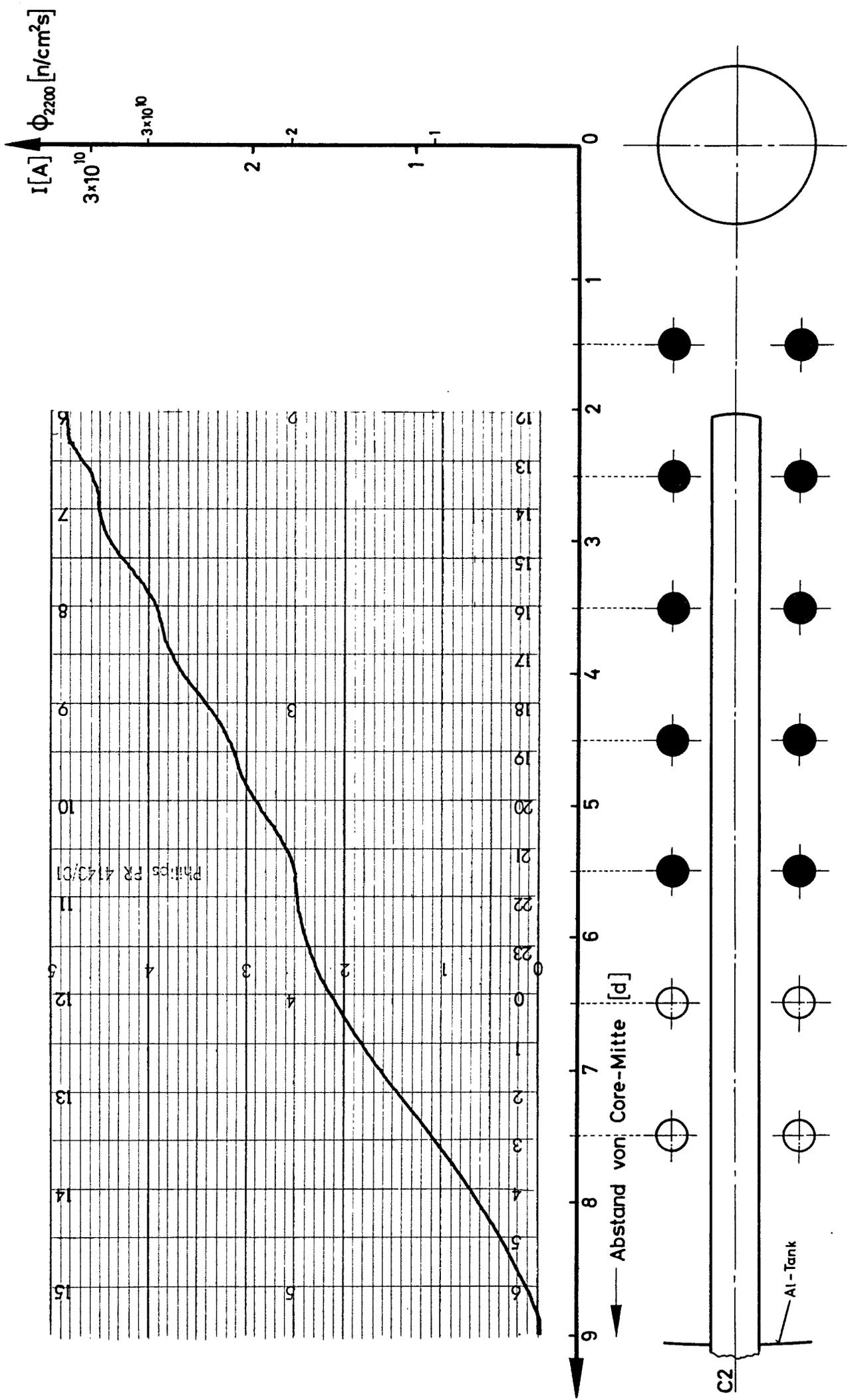


Abb.20: Flußverlauf im C2-Kanal, gemessen mit einem Rh-Detektor