

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

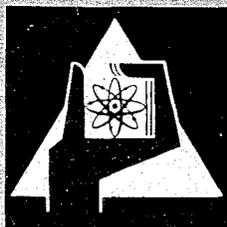
Oktober 1968

KFK 864
EUR 4155 d

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Nukleare Eigenschaften heliumgekühlter schneller Brutreaktoren

E. Eisemann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Oktober 1968

KFK-864
EUR-4155d

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Nukleare Eigenschaften
heliumgekühlter schneller Brutreaktoren^{*)}

E. Eisemann

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

^{*)} Diese Arbeit wurde im Rahmen der Assoziation zwischen der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe, auf dem Gebiet der schnellen Reaktoren durchgeführt.

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht enthält eine Zusammenfassung der nuklearen Eigenschaften von neun heliumgekühlten schnellen Brutreaktoren mit einer Coreleistung von 2500 MW_{th}, die im Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, untersucht wurden. Die Reaktoren unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der verwendeten Brennstoffhüllmaterialien. So wurden Reaktoren mit Brennstoffstäben aus Vanadinlegierungen, Reaktoren mit Chrom-Cermet-Core und Reaktoren mit Graphite-coated-particles betrachtet.

Den nuklearen Rechnungen wurde der russische ABN-Gruppensatz zugrunde gelegt, doch bleiben die Ergebnisse dieser vergleichenden Betrachtung auch beim Übergang auf andere, verbesserte Gruppensätze im wesentlichen gültig.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
I. Einleitung	1
II. Die verwendeten Rechenprogramme	2
III. Konstruktionsmerkmale der betrachteten Reaktoren	2
IV. Die nuklearen Daten	5
V. Diskussion der berechneten Größen	10
VI. Zusammenfassung	15
Literaturhinweise	16
Abbildungen	

I. Einleitung

Der vorliegende Bericht wurde im Rahmen der im Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik laufenden Untersuchungen über die Eigenschaften gasgekühlter schneller Brutreaktoren angefertigt. Derartige Reaktoren mit Helium als Kühlmittel haben mit fortschreitender Entwicklung von Reaktorkomponenten an Interesse gewonnen. In diesem Zusammenhang sind einmal neue Brennstoffhüllmaterialien aus Vanadinlegierungen zu nennen, die gegenüber den herkömmlichen Legierungen, wie z.B. Inconel 625, weniger Neutronen absorbieren und darüber hinaus höhere Kühlmitteltemperaturen zulassen. Diese Hüllmaterialien können, da sie korrosionsanfällig sind, nur im Zusammenhang mit einem inerten Gas, wie z.B. Helium, verwendet werden. Die gleichen Vorteile eines Edelgases als Kühlmittel ergeben sich auch bei schnellen Brutreaktoren mit Graphit-coated-particles. Weiter wird der Bau von Gasturbinen großer Leistung diskutiert. Diese erlauben eine kostensparende Verwendung im direkten Kühlkreislauf. Und schließlich läßt sich im Hinblick auf Druckgefäße aus Spannbeton, die ein großes Entwicklungspotential besitzen, die Wärmeisolation des Betons bei gasgekühlten Reaktoren leichter durchführen als etwa bei Reaktoren mit Dampfkühlung, da das Problem des Abführens der Kondensationswärme entfällt. Eine ausführliche Beschreibung dieser Punkte findet sich in [1].

Die angeführten Vorteile, zusammen mit den relativ guten thermodynamischen und nuklearen Eigenschaften eines Reaktors mit Heliumkühlung, haben die vorliegende Untersuchung veranlaßt.

II. Die verwendeten Rechenprogramme

Die nuklearen Rechnungen wurden mit Hilfe des Karlsruher NUSYS-Programmsystems durchgeführt. Der Programmablauf war im wesentlichen immer derselbe. Ausgegangen wurde von nulldimensionalen Rechnungen (fundamental mode calculations). Sie dienten einmal zur näherungsweise Bestimmung der kritischen Spaltstoffmasse (Iteration der Brennstoffanreicherung), zum anderen zur Untersuchung von Reaktivitätsänderungen bei Variation der Kühlmitteldichte. Außerdem ergaben sich daraus noch die Wanderfläche M^2 und die Neutronengenerationszeit ℓ . Die sich anschließenden eindimensionalen Rechnungen (Diffusionsnäherung) in axialer und radialer Richtung - die Coregeometrie war immer zylindrisch - lieferten Brutraten, Dopplerkoeffizienten usw. Gleichzeitig wurde durch Vergleich von nulldimensionaler und eindimensionaler, axialer Rechnung die energieunabhängige Reflektorsparnis (Savings) bestimmt. Aus den eindimensionalen Daten ließen sich dann die eigentlich interessierenden Größen für die reale (zweidimensionale) Konfiguration des vorgegebenen Reaktors mit genügender Genauigkeit gewinnen. Dadurch wurde im allgemeinen eine zeitraubende zweidimensionale Rechnung vermieden.

III. Konstruktionsmerkmale der betrachteten Reaktoren

Im Laufe der Untersuchungen wurden insgesamt neun Reaktoren betrachtet. Diese unterscheiden sich im Hüllmaterial (Inconel 625, Vanadinlegierung usw.), im Kühlmitteldruck (100 bzw. 175 atm), in der Art des Brennstoffs (Dicarbid bzw. Oxid) und im Coreaufbau (Brennstoffstäbe, Coated Particles). Dadurch sollte ein Überblick über die nuklearen Eigenschaften dieser recht verschiedenartigen Reaktoren gewonnen werden, um das vom wirtschaftlichen Standpunkt aus interessanteste Konzept zu ermitteln.

Den erwähnten Unterschieden entsprechend sind die Konstruktionsmerkmale der betrachteten Reaktoren in drei Tabellen zusammengefaßt. Tabellen I und II enthalten die Daten der Reaktoren mit oxidischem Brennstoff.

In Tabelle I sind die Reaktoren angeführt, bei denen der Brennstoff in Brennstoffstäben enthalten ist.

Kurzbez. d.Reaktors	V_c [l]	p_c [at]	H_c [cm]	D_c [cm]	$\frac{H_c}{D_c}$	α [%]	Hüll- material	β_1 [%]	ω [%]
G 11	<u>12830</u>	100	160,0	320,0	0,5	<u>47,27</u>	Inconel 625	<u>14,70</u>	30,94
G 33	<u>11283</u>	100	131,6	330,4	0,4	<u>54,89</u>	Inconel 625	<u>7,78</u>	30,33
G 22	11283	<u>100</u>	131,6	<u>330,4</u>	0,4	54,89	≡	7,78	30,33
G 66	<u>7160</u>	<u>175</u>	131,6	<u>263,2</u>	0,5	54,89	≡	7,78	30,33

≡ Vanadinlegierung der Dichte $5,869 \text{ g/cm}^3$. Die Gewichtsanteile der Materialien sind Nb 10%, V 86%, Si 1%, Ti 3%.

Tabelle I: Konstruktionsmerkmale der Reaktoren mit oxidischem Brennstoff in Brennstoffstäben.

Die wesentlichen Unterschiede in den Daten der Reaktoren sind durch Unterstreichen hervorgehoben. In dieser und den folgenden Tabellen bedeutet: V_c das Corevolumen, p_c den Kühlmitteldruck beim Eintritt in den Reaktor, H_c , D_c die Corehöhe bzw. den Coredurchmesser, α den Volumenanteil des Kühlmittels (gegebenenfalls mit Followeranteil), β_1 den Volumenanteil des Hüllmaterials und ω den Volumenanteil des Brennstoffs.

Tabelle II zeigt die Konstruktionsmerkmale der Reaktoren mit (Metall-) Cermet-Core (in Stabform gepreßte Metall-coated-particles von ca. 0,1 mm Durchmesser).

Kurzbez. d.Reaktors	V_c [l]	p_c [at]	H_c [cm]	D_c [cm]	$\frac{H_c}{D_c}$	α [%]	Hüll- mat.	β_1 [%]	ω [%]
G 44	11283	100	131,6	330,4	0,4	54,89	<u>Zr</u>	<u>20,58</u>	<u>17,53</u>
G 88	<u>11283</u>	<u>100</u>	131,6	<u>330,4</u>	0,4	54,89	<u>Cr</u>	<u>7,62</u>	<u>30,49</u>
G 99	<u>7160</u>	<u>175</u>	131,6	<u>263,2</u>	0,5	54,89	Cr	7,62	30,49

Tabelle II: Konstruktionsmerkmale der Reaktoren mit oxidischem Brennstoff und Cermet-Core.

Die wesentlichen Unterschiede in den Daten der Reaktoren sind durch Unterstreichen hervorgehoben.

Das Strukturmaterial der Reaktoren in den Tabellen I und II besteht aus 16/13 Stahl. Sein Volumenanteil (β_0) beträgt 7%. Der Brennstoff besitzt eine Dichte von $9,57 \text{ g/cm}^3$, das sind 87% der theoretischen Dichte.

In Tabelle III sind schließlich die Konstruktionsmerkmale der Reaktoren mit carbidischem Brennstoff aufgeführt. Der Brennstoff liegt hier ebenfalls in Form von coated-particles von ca. 1,4 mm Durchmesser vor, die

Kurzbez. d. Reakt.	V_c [l]	D_c [at]	H_c [cm]	D_c [cm]	$\frac{H_c}{D_c}$	α [%]	Hüll- und Strukt.-Mat.	$\beta_0 + \beta_1$ [%]	ω [%]
G 55	<u>11283</u>	<u>100</u>	131,6	<u>330,4</u>	0,4	55,0	C,Si (=)	24,28	20,72
G 77	<u>7160</u>	<u>175</u>	131,6	<u>236,2</u>	0,5	55,0	C,Si (=)	24,28	20,72

** Dichte des Struktur- und Hüllmaterials: $2,08 \text{ g/cm}^3$,
Gewichtsanteile der Elemente: C 87,1%, Si 12,9%.

Tabelle III: Konstruktionsmerkmale der Reaktoren mit carbidischem Brennstoff (Dicarbid) und coated particles.

Die wesentlichen Unterschiede in den Daten der Reaktoren sind durch Unterstreichen hervorgehoben.

in eine Matrix aus Graphit eingelagert sind. Die mehrschichtige Umhüllung der Partikel besteht aus Graphit und Siliziumcarbid. Es handelt sich hier um dieselbe Art von Brennstoffpartikel, wie sie schon in thermischen Reaktoren erfolgreich erprobt wurden, jedoch mit wesentlich größerem Durchmesser. Die Brennstoffdichte beträgt $12,25 \text{ g/cm}^3$, das sind 90% der theoretischen Dichte. Der Volumenanteil des carbidischen Brennstoffs am Brennstoff-Kohlenstoff-Gemisch im Core beläuft sich auf ca. 50%.

Bei allen Reaktoren aus Tab. I-III besitzen die Blankets eine Dicke von 40 cm. Die Verhältnisse in den axialen Blankets entsprechen bis auf die Brennstoffzusammensetzung denen des Cores. Das radiale Blanket enthält immer oxidischen Brennstoff (Dichte $9,57 \text{ g/cm}^3$) mit einem Volumenanteil von 57,6%. Das Hüll- und Strukturmaterial (Vol.-Anteil 18,3%) besteht aus Incoloy 800. Der Volumenanteil des Kühlmittels beträgt 24,1%, seine Dichte $0,5674 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^3$.

IV. Die nuklearen Daten

Für die Rechnungen, über die hier berichtet wird, war das Core in axialer Richtung in fünf, in radialer Richtung in zwei volumenmäßig gleiche Zonen unterteilt. Die 5 Zonen in axialer Richtung unterschieden sich lediglich in der Teilchenzahldichte des Kühlmittels (Berücksichtigung der Aufheizung und des Druckabfalls). Bei der Rechnung in radialer Richtung wurde, um eine günstige Leistungsverteilung zu erreichen, die Spaltstoffmasse auf beide Zonen derart aufgeteilt, daß das Verhältnis der maximalen Leistungsdichte in Zone 1 und Zone 2 gleich eins war. Weiter wurde als Gruppenkonstantensatz der russische ABN-Satz verwendet. Da es sich hier um vergleichende Betrachtungen handelt, bleiben die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung jedoch auch beim Übergang auf andere, verbesserte Gruppensätze im wesentlichen gültig. Der Brennstoff im Core bestand aus U^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} und Pu^{242} . Das Verhältnis der Teilchenzahlen der Plutoniumisotope war fest vorgegeben ($Pu^{239}:Pu^{240}:Pu^{241}:Pu^{242} = 0,74:0,227:0,023:0,01$) und entsprach dem in der Dampfstudie D1 [2] verwendeten. Dies trifft auch auf den in den Rechnungen verwendeten mittleren Abbrand von 27.500 MWd/t zu. Die Blankets enthielten nur U^{238} , Pu^{239} und U^{235} , letzteres mit einem Anteil von 0,4% des gesamten Uraneinsatzes. Das Verhältnis von Brutstoff zu Spaltstoff betrug 45. Auch diese Werte stimmen mit den in der Dampfstudie D1 angenommenen überein.

Der Gliederung des vorangegangenen Abschnitts entsprechend enthalten die Tabellen IV-VI die berechneten nuklearen Größen. Sie sind nach der Art der Rechnung eingeteilt, aus der sie gewonnen wurden. Für die Untersuchung von Reaktivitätsänderungen bei Kühlmitteldichtevariation, Neutronengenerationszeit und Wanderfläche genügt die Genauigkeit einer nulldimensionalen Rechnung. Die eindimensionale Rechnung in radialer Richtung liefert die wirkliche Spaltstoffmasse, da diese mit der einer zweidimensionalen Rechnung nahezu übereinstimmt. Dies gilt auch für die Konversionsrate des Cores. Ferner liefert sie die Dopplerkonstante $-Tdk/dT$ (für $T=900^{\circ}K$). Die angegebenen zweidimensionalen Daten wurden aus den eindimensionalen ermittelt, und zwar wie folgt:

Die Brutrate BR nach einer Näherungsformel von E. Kiefhaber [3]. Die Gesamtleistung L als Summe der Leistungsanteile der axialen Blankets (aus axialer Rechnung), des radialen Blankets (aus radialer Rechnung) und des Cores. Die Coreleistung war dabei vorgegeben.

Die Spaltstoffbelastung R in den radialen Corezonen 1 und 2 mit Hilfe der Leistungsanteile und Spaltstoffmassen dieser Zonen, wie sie sich aus der eindimensionalen Rechnung in radialer Richtung ergaben.

Schließlich wurde die Verdopplungszeit D.T. nach folgender Formel berechnet [4]:

$$D.T. = \frac{0,69 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,95}{1+\alpha}}{(BR-1) \cdot b_0 \cdot K} \left(1 + BR \frac{t_w}{t_{st}}\right) \quad (1)$$

Wobei b_0 die Spaltstoffbelastung in MW_{th}/kg Spaltstoff, K den Lastfaktor (0,8) und t_{st} , t_w die Stand- bzw. Wartezeit des Brennstoffs in und außerhalb des Reaktors bedeutet ($t_w/t_{st} = 1/3$). $\frac{1}{1+\alpha}$ ist das Verhältnis von Verbrauch von Spaltstoff durch Spaltung zu Verbrauch von Spaltstoff durch Spaltung und Einfang.

	Größen aus nulldim. Rechnungen					Größen aus eindimensionalen Rechnungen								
	$\Delta K_F \cdot 10^2$	$\Delta K_L \cdot 10^2$	$\frac{dK/K}{dp/\rho} \cdot 10^2$	ℓ [μsec]	M^2 [cm^2]	Axial		Radial					m [kg]	
						$\bar{\rho}_{ax}$	$-\frac{dT}{dT} \cdot 10^{+2}$	$\bar{\rho}_{rad}$	A [%]	CR _{core}	ρ_1/ρ_2	Zone 1	Zone 2	Core
G11	-2,47	+0,32	-0,31	0,42	343	0,768	0,679	0,833	11,6	0,955	1,006	1780	2187	3967
G33	+2,13	+0,33	-0,33	0,41	439	0,799	0,614	0,828	11,5	0,940	1,02	1488	1884	3372
G22	+3,92	+0,32	-0,32	0,42	442	0,794	0,699	0,841	11,2	0,961	1,00	1451	1858	3309
G66	+3,96	+0,50	-0,49	0,40	435	0,798	0,678	0,841	11,9	0,905	1,002	947	1259	2206

	L_{core} [MW _{th}]	L_{ges} [MW _{th}]	B.R. core	B.R. Bl.ax	B.R. Bl.rad	B.R. ges	R [MWth/kg]			D.T. [a]
							Zone 1	Zone 2	Core	
G11	2700	2932	0,900	0,125	0,224	1,249	0,84	0,55	0,68	15,3
G33	2500	2759	0,881	0,182	0,237	1,300	0,92	0,60	0,74	12,0
G22	2500	2787	0,896	0,185	0,243	1,324	0,93	0,62	0,76	10,9
G66	2500	2829	0,836	0,171	0,311	1,318	1,41	0,93	1,13	7,4

Tabelle IV: Nukleare Daten der Reaktoren mit oxidischem Brennstoff in Brennstoffstäben

Die Erklärung der verwendeten Symbole ist auf Seite 10 angegeben.

Die in den Tabellen IV-VI angeführten Daten können geringfügig von früher veröffentlichten Werten abweichen. Soweit dies der Fall ist, sind die hier angegebenen als genauer zu betrachten.

	Größen aus nulldimensionalen Rechnungen					Größen aus eindimensionalen Rechnungen									
	$\Delta K_F \cdot 10^2$	$\Delta K_L \cdot 10^2$	$\frac{dK/K}{d\rho/\rho} \cdot 10^2$	$\ell [\mu\text{sec}]$	M^2 [cm ²]	Axial		Radial					m [kg]		
						$\bar{\rho}_{ax}$	$-\frac{dT}{dT} \cdot 10^{-2}$	$\bar{\rho}_{rad}$	A [%]	CR _{core}	ρ_1/ρ_2	Zone 1	Zone 2	Core	
G44	+9,84	+0,175	-0,17	0,56	701	0,813	0,455	0,821	16,0	0,668	1,02	1175	1555	2730	
G88	+4,15	+0,31	-0,31	0,42	493	0,805	0,675	0,840	10,9	0,986	1,005	1402	1801	3203	
G99	+4,53	+0,46	-0,45	0,40	484	0,803	0,650	0,844	11,6	0,922	1,00	927	1236	2163	

	L_{core} [MW _{th}]	L_{ges} [MW _{th}]	B.R. core	B.R. Bl. ax	B.R. Bl. rad	B.R. ges	R [MWth/kg]			D.T. [a]
							Zone 1	Zone 2	Core	
G44	2500	2690	0,622	0,147	0,300	1,069	1,14	0,74	0,92	40,7
G88	2500	2797	0,916	0,196	0,256	1,368	0,96	0,64	0,78	9,4
G99	2500	2840	0,849	0,180	0,326	1,355	1,43	0,95	1,16	6,6

Tabelle V: Reaktoren mit Metal-Cermet-Core und oxidischem Brennstoff.

Die Erklärung der verwendeten Symbole ist auf Seite 10 angegeben.

	Größen aus nulldimensionalen Rechnungen					Größen aus eindimensionalen Rechnungen									
	$\Delta K_F \cdot 10^2$	$\Delta K_L \cdot 10^2$	$\frac{dK/K}{d\rho/\rho} \cdot 10^2$	λ [μsec]	M^2 [cm^2]	Axial	Radial						m [kg]		
						$\bar{\rho}_{\text{ax}}$	$-\lambda \frac{dK}{dT} \cdot 10^{-2}$	$\bar{\rho}_{\text{rad}}$	A [%]	CR _{core}	ρ_1/ρ_2	Zone 1	Zone 2	Core	
G55	+8,08	+0,31	-0,31	0,73	401	0,801	2,00	0,834	11,5	0,964	0,989	1328	1728	3056	
G77	+8,22	+0,44	-0,43	0,68	392	0,799	1,90	0,834	12,3	0,911	0,985	875	1190	2065	

	L_{core} [MW_{th}]	L_{ges} [MW_{th}]	B.R. _{core}	B.R. _{Bl.ax}	B.R. _{Bl.rad}	B.R. _{ges}	R [MWth/kg]			D.T. [a]
							Zone 1	Zone 2	Core	
G55	2500	2801	0,898	0,178	0,209	1,285	1,02	0,66	0,82	10,4
G77	2500	2842	0,842	0,165	0,269	1,276	1,52	0,98	1,21	7,7

Tabelle VI: Reaktoren mit carbidischem Brennstoff.

Die Erklärung der verwendeten Symbole ist auf Seite 10 angegeben.

Anmerkung: In den Tabellen IV-VI bedeutet:

ΔK_F	die Reaktivitätsänderung beim Fluten des Reaktors mit Wasser
ΔK_L	die Reaktivitätsänderung beim Übergang von normalem Kühlmitteldruck zu totalem Kühlmittelverlust
$\frac{\Delta K/K}{\Delta \rho/\rho}$	die relative Reaktivitätsänderung bei Kühlmitteldichtevariation
l	die Neutronengenerationszeit
$-T \Delta K / \Delta T$	die Dopplerkonstante des Reaktors (für $T=900^\circ \text{K}$)
M^2	die Wanderfläche
$\varphi_{ax,rad}$	den axialen bzw. radialen Formfaktor
A	die mittlere Volumenanreicherung des Spaltstoffs
CR	die Konversionsrate
ρ_1/ρ_2	das Verhältnis der Leistungsdichtemaxima in den beiden radialen Corezonen
m	die Spaltstoffmasse (Metall)
L	die Leistung
BR	die Brutrate
R	die Spaltstoffbelastung (Rating)
D.T.	die Verdopplungszeit

V. Diskussion der berechneten Größen

Viele Unterschiede in den nuklearen Eigenschaften der Reaktoren lassen sich mit Hilfe des Spektrums

$$\phi_{\text{norm}}(u) = \frac{\phi(u)}{\int_0^{\infty} \phi(u) du} \quad \begin{array}{l} u \text{ Lethargie} \\ \phi \text{ skalarer Fluß} \end{array} \quad (2)$$

in einfacher Weise erklären. Deshalb sind in den Abbildungen 1-4 die aus nulldimensionalen Rechnungen gewonnenen Spektren der untersuchten Reaktoren G11-G99 dargestellt. Die Abb. 5 zeigt den Einfluß von Änderungen des Corevolumens und der Kühlmitteldichte auf das Spektrum. Man erkennt, daß dieser Einfluß, selbst bei Volumenverminderung um ca. 30%, verhältnismäßig gering ist. Dies entspricht den Erwartungen, da in den Multigruppengleichungen der Term $D^2 B^2$ (D Diffusionskonstante, B^2 geometrische Flußwölbung oder Buckling) zumindest für die betrachteten Ver-

hältnisse klein ist im Vergleich zu den anderen Größen, wie z.B. Absorptions- oder Streuquerschnitt Σ_a^i bzw. Σ_s^i . Der Einfluß der Kühlmitteldichte auf das Spektrum ist noch geringer als der des Corevolumens auf Grund der kleinen Wirkungsquerschnitte des Heliums und seiner geringen Teilchenzahldichte im Reaktor.

Da sich die Reaktorpaare G22 und G66, G55 und G77 bzw. G88 und G99 lediglich im Corevolumen und im Kühlmitteldruck unterscheiden, weichen ihre Spektren nur geringfügig voneinander ab. Außerdem ist beim Reaktor mit dem kleineren Corevolumen der Anteil an niederenergetischen Neutronen im Spektrum kleiner, d.h. sein Spektrum ist härter. Dies ist einmal bedingt durch den größeren Wert des Bucklings B^2 , zum anderen durch die höhere Anreicherung im kleineren Core auf Grund der größeren Neutronenverluste durch Leakage. Dieser Sachverhalt kommt in den Abb. 1-4 deutlich zum Ausdruck. Von den untersuchten Reaktoren besitzen diejenigen mit carbidischem Brennstoff (G55 und G77) ein verhältnismäßig weiches Spektrum als Folge der hohen Teilchenzahldichte von gut moderierendem Kohlenstoff. Die Spektren der übrigen Reaktoren sind wesentlich härter. Unter ihnen ist das des Reaktors G44 wegen der hohen Anreicherung und des großen Anteils an wenig moderierendem Zirkonium am härtesten. Das im Vergleich zum Reaktor G33 deutlich weichere Spektrum des Reaktors G11 (Abb. 1) ist hauptsächlich bedingt durch den größeren Anteil an Hüllmaterial (der Streuquerschnitt der Mischung wird stärker erhöht als der Absorptionsquerschnitt). Der Volumenanteil des Hüllmaterials beim Reaktor G11 ist nahezu doppelt so hoch wie beim Reaktor G33. Zum Ausgleich dafür differieren die Kühlmittelvolumenanteile um den entsprechenden Betrag.

Wie aus den Tabellen IV-VI hervorgeht, sind alle Reaktoren nach dem Verlust des Kühlmittels (Lossfall) etwas überkritisch

$$\Delta K_L = K_{eff}(\text{Loss}) - K_{eff}(\text{Normal}) > 0 ,$$

denn durch den Kühlmittelverlust wird das Spektrum etwas härter (Abb. 5). Dies hat einerseits einen höheren Ausfluß von Neutronen aus dem Core und, wegen der Energieabhängigkeit der Wirkungsquerschnitte, eine geringere Zahl von Spaltungen im Spaltstoff zur Folge. Andererseits vergrößert sich jedoch die mittlere Zahl der Spaltneutronen sowie die Zahl der Schnell-

spaltungen im Uran, und die Neutronenverluste durch Einfangprozesse werden geringer. Die letzten drei Effekte überwiegen und bewirken den Anstieg der Reaktivität. Verglichen mit den für dampf- bzw. natriumgekühlten Brütern gültigen ΔK_L -Werten sind die hier angegebenen jedoch sehr klein wegen des, wie schon erwähnt, geringen Einflusses des Heliums auf die nuklearen Vorgänge im Reaktor. Da die Spektrumsänderung bei Kühlmittelverlust mit dem Normaldruck des Kühlmittels zunimmt, wirken sich im Falle einander entsprechender Reaktoren die beschriebenen Vorgänge beim Reaktor mit höherem Kühlmitteldruck stärker aus, und damit besitzt dieser auch einen höheren ΔK_L -Wert. Das im ersten Augenblick überraschend kleine ΔK_L des Reaktors G44 hat im wesentlichen zwei Ursachen. Einmal die geringe Teilchenzahldichte des Urans im Core, von der die Zahl der Schnellspaltungen abhängt, und zum anderen den im Vergleich mit den übrigen Reaktoren relativ großen Unterschied der Leckagen im Normal- und Lossfall.

Der Reaktivitätsunterschied zwischen Normalzustand und (mit Wasser) geflutetem Zustand

$$\Delta K_F = K_{\text{eff}}(\text{Flut}) - K_{\text{eff}}(\text{Normal})$$

ist bei allen Reaktoren mit Ausnahme von G11 positiv. Dies liegt daran, daß der Gewinn an Neutronen durch Verminderung der Leckage im gefluteten Zustand auf nahezu 0 den Verlust an Neutronen durch erhöhte Absorption überwiegt. Nur beim Reaktor G11 sind die Verhältnisse umgekehrt. Im Gegensatz zu dampfgekühlten schnellen Brütern wäre daher, selbst bei Struktur- und Hüllmaterialien, die gegen Korrosion widerstandsfähig sind, ein Be- und Entladen unter Wasser nicht möglich. Zu beachten ist allerdings, daß die angegebenen ΔK_F -Werte nur für einen Abbrand von 27.500 MWd/t gültig sind. Bei höheren Abbränden wird, ähnlich wie bei dampfgekühlten schnellen Brütern, ΔK_F negativ. Bei einander entsprechenden Reaktoren ist ΔK_F beim Reaktor mit dem größeren Core kleiner. Denn wegen der vernachlässigbar kleinen Leckage im gefluteten Zustand ist

$$\Delta K_F \approx K_{\infty}(\text{Flut}) - 1$$

und K_{∞} ist für das kleinere Core wegen der höheren Anreicherung größer. Die hohe Anreicherung im Core des Reaktors G44 bedingt den hohen Wert für K_{∞} und ΔK_F .

Der Absolutbetrag des Heliumdichtekoeffizienten $\frac{dK/K}{d\rho/\rho}$ ist bei allen Reaktoren praktisch gleich ΔK_L . Daraus folgt, daß im Bereich zwischen normalem Kühlmitteldruck und Kühlmitteldruck gleich 0 mit abnehmender Kühlmitteldichte K_{eff} linear zunimmt.

Die Neutronengenerationszeit ist definiert als

$$\ell = \frac{\int_0^{\infty} \phi^+ \frac{1}{v} \phi \, du}{\int_0^{\infty} (v\Sigma_f) \phi \, du} \quad (3)$$

Es bedeutet: v die Geschwindigkeit der Neutronen, Σ_f den makroskopischen Spaltquerschnitt, ν die mittlere Zahl der Spaltneutronen. (Normierung des Flusses und adjungierten Flusses: $\int_0^{\infty} (v\Sigma_f) \phi \, du = \int_0^{\infty} \phi^+ \chi \, du = K_{\text{eff}} = 1$, χ Spaltspektrum.)

und zeigt ebenfalls systematische Änderungen beim Übergang vom größeren zum kleineren Reaktor. Sie ist im Falle des kleineren Cores, wegen der höheren Anreicherung und dem damit verbundenen größeren Verhältnis von makroskopischem Spaltquerschnitt zu totalem Querschnitt kleiner. Beim Reaktor G44 ist trotz hoher Anreicherung wegen der kleinen Teilchendichte des Spaltstoffs im Core der makroskopische Spaltquerschnitt kleiner als z.B. beim Reaktor G88, und daher erklärt sich seine größere Neutronengenerationszeit. Der große Wert für ℓ bei den Reaktoren mit carbidischem Brennstoff rührt zusätzlich noch von dem hohen Anteil an niederenergetischen Neutronen im Spektrum her (geringere mittlere Neutronengeschwindigkeit).

Für die Wanderfläche gilt:

$$M^2 = \frac{\int_0^{\infty} \phi_0^+ D \phi_0 \, du}{\int_0^{\infty} (v\Sigma_f) \phi_0 \, du} \quad (4)$$

Es bedeutet: ϕ_0 , ϕ_0^+ Fluß bzw. adjungierter Fluß im unendlich ausgedehnten Reaktor (Normierung:

$$\int_0^{\infty} (v\Sigma_f)\phi_0 \, du = \int_0^{\infty} \phi_0^+ \chi \, du = k_{\infty}).$$

Auch hier wird beim Übergang vom größeren zum entsprechend kleineren Reaktor der Wert von M^2 kleiner. Das große M^2 des Reaktors G44 ist im wesentlichen eine Folge der großen Diffusionskonstanten (kleine Teilchenzahldichte des Brennstoffs und Struktur- bzw. Hüllmaterials).

Weiter nimmt im allgemeinen die Dopplerkonstante $-TdK/dT$ mit höherer Anreicherung bzw. härterem Spektrum ab. Auch dieser Effekt ist bei den Reaktorpaaren G22, G66 usw. vorhanden, wie aus den Tabellen hervorgeht. Außerdem besitzt der Reaktor G44 mit der höchsten Anreicherung auch die kleinste Dopplerkonstante. Umgekehrt ist die Dopplerkonstante bei Reaktoren mit carbidischem Brennstoff auf Grund des weichen Spektrums am größten.

Auch die Brut- und Konversionsraten des Cores werden beim Übergang vom größeren zum kleineren Core und damit von der geringeren zur höheren Anreicherung kleiner. Dafür nimmt die Leckage aus dem Core (in radialer Richtung) zu, wodurch sich eine wesentlich größere Brutrate im (radialen) Blanket ergibt. Dieser Anstieg der Blanketbrutrate kann den Rückgang der Corebrutrate unter Umständen sogar überkompensieren, z.B. bei Verwendung eines dickeren Blankets. Vergleicht man die Brutrate in den axialen Blankets der Reaktoren G44 und G88, so ist die des Reaktors G44 trotz höheren Ausflusses von Neutronen aus dem Core kleiner als die des Reaktors G88. Dies liegt an der im ersten Fall größeren Transparenz der axialen Blankets (großes M^2). Hier könnte durch ein dickeres Blanket die Brutrate noch wesentlich gesteigert werden.

VI. Zusammenfassung

Für die in diesem Bericht betrachteten gasgekühlten schnellen Brutreaktoren von 1000 MW_e Leistung ergeben sich die folgenden wesentlichen Kennzahlen¹⁾:

Das Core enthält bei einem Volumen von ca. 11300 (7200) Litern etwa 3100 (2100) kg Spaltstoff (Pu239 und Pu241). Die Spaltstoffbelastung beträgt ungefähr 0,79 (1,15) MW_{th}/kg.

Die Konversionsraten des Cores liegen zwischen 0,9 und 1. Dies hat eine geringe Reaktivitätsänderung mit der Zeit bzw. lange und damit ökonomisch günstige Verweilzeiten des Brennstoffs im Core zur Folge.

Die Brutrate beträgt im Mittel 1,3. Auf Grund des harten Spektrums und der dadurch bedingten großen Leckage könnte sie mit dickeren Blankets noch wesentlich - bis auf ca. 1,5 - erhöht werden.

Die (exponentiellen) Verdopplungszeiten sind relativ kurz und liegen zwischen 7 und 12 Jahren.

Die Reaktivitätsänderung bei Kühlmittelverlust beläuft sich auf ungefähr 0,4 % $\hat{=}$ 1%. Sie ist somit wesentlich kleiner als bei dampf- bzw. natriumgekühlten schnellen Brüttern.

Die Dopplerkonstante beträgt bei Reaktoren mit oxidischem Brennstoff etwa $0,66 \cdot 10^{-2}$ und bei Reaktoren mit carbidischem Brennstoff $2,0 \cdot 10^{-2}$.

Der Verfasser möchte den Herren Dr. M. Dalle-Donne und Dr. E. Kiefhaber für hilfreiche Diskussionen und Hinweise danken.

1) Die Daten der Reaktoren G11 und G44 sind in dieser Zusammenfassung nicht berücksichtigt, da sie für einen gasgekühlten schnellen Brüter nicht charakteristisch sind.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Dalle-Donne, E. Eisemann, K. Wirtz, Some Considerations on Gas-Cooling for Fast Breeders, KFK-595, Mai 1967.
sowie:
M. Dalle-Donne, K. Wirtz, Gas Cooling for Fast Breeders, KFK-689, November 1967.
und:
M. Dalle-Donne, E. Eisemann, F. Thümmeler, K. Wirtz, High Temperature Gas Cooling for Fast Breeders, KFK-841, Oktober 1968.
- [2] A. Müller et al., Referenzstudie für den 1000 MW_e dampfgekühlten schnellen Brutreaktor (D1), KFK-392, 1966.
- [3] E. Kiefhaber, Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, private Mitteilung.
- [4] W. Häfele, Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe, Institut für angewandte Reaktorphysik, private Mitteilung.

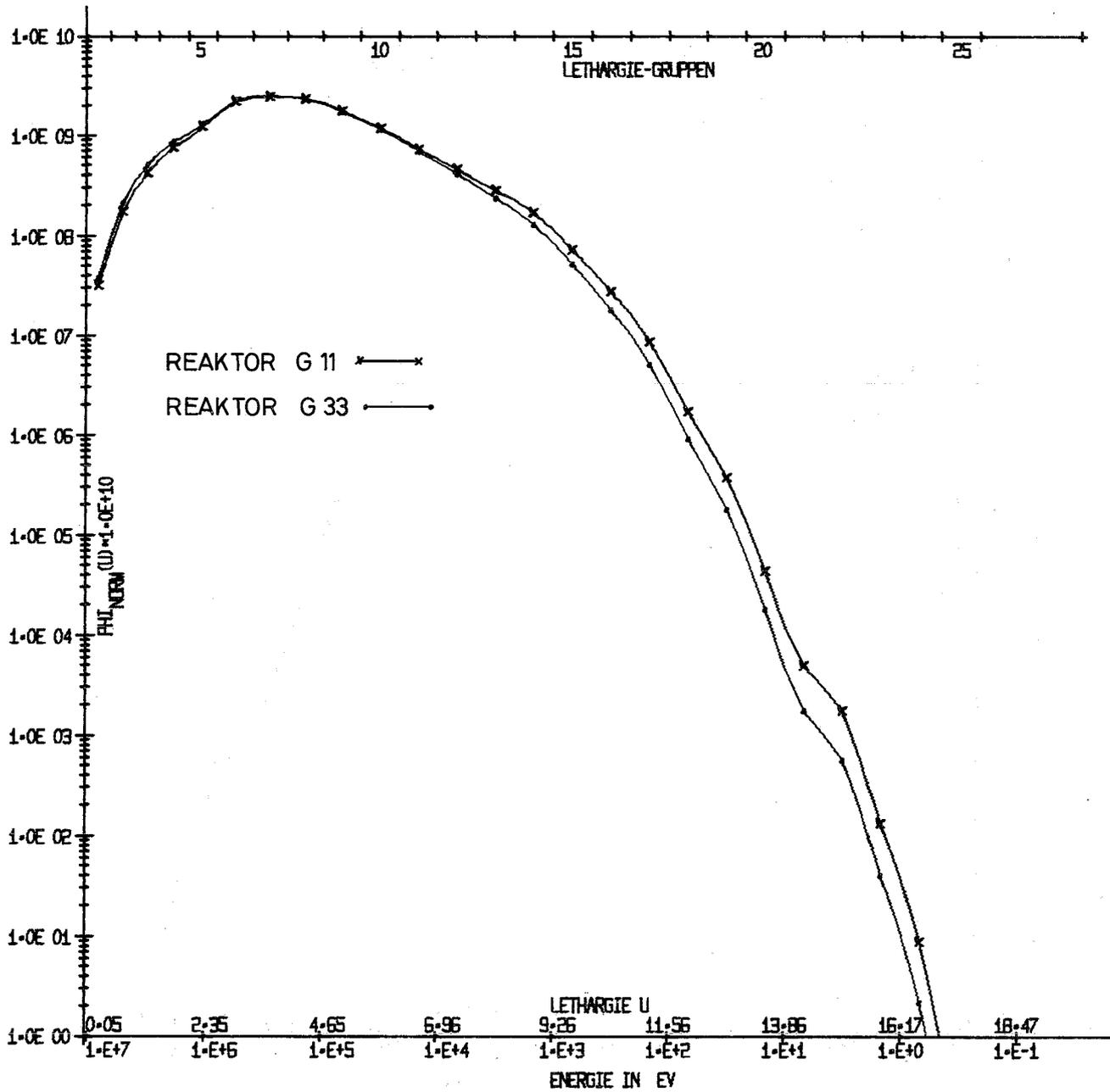


ABB- 0001 SPEKTREN DER REAKTOREN G 11 UND G 33

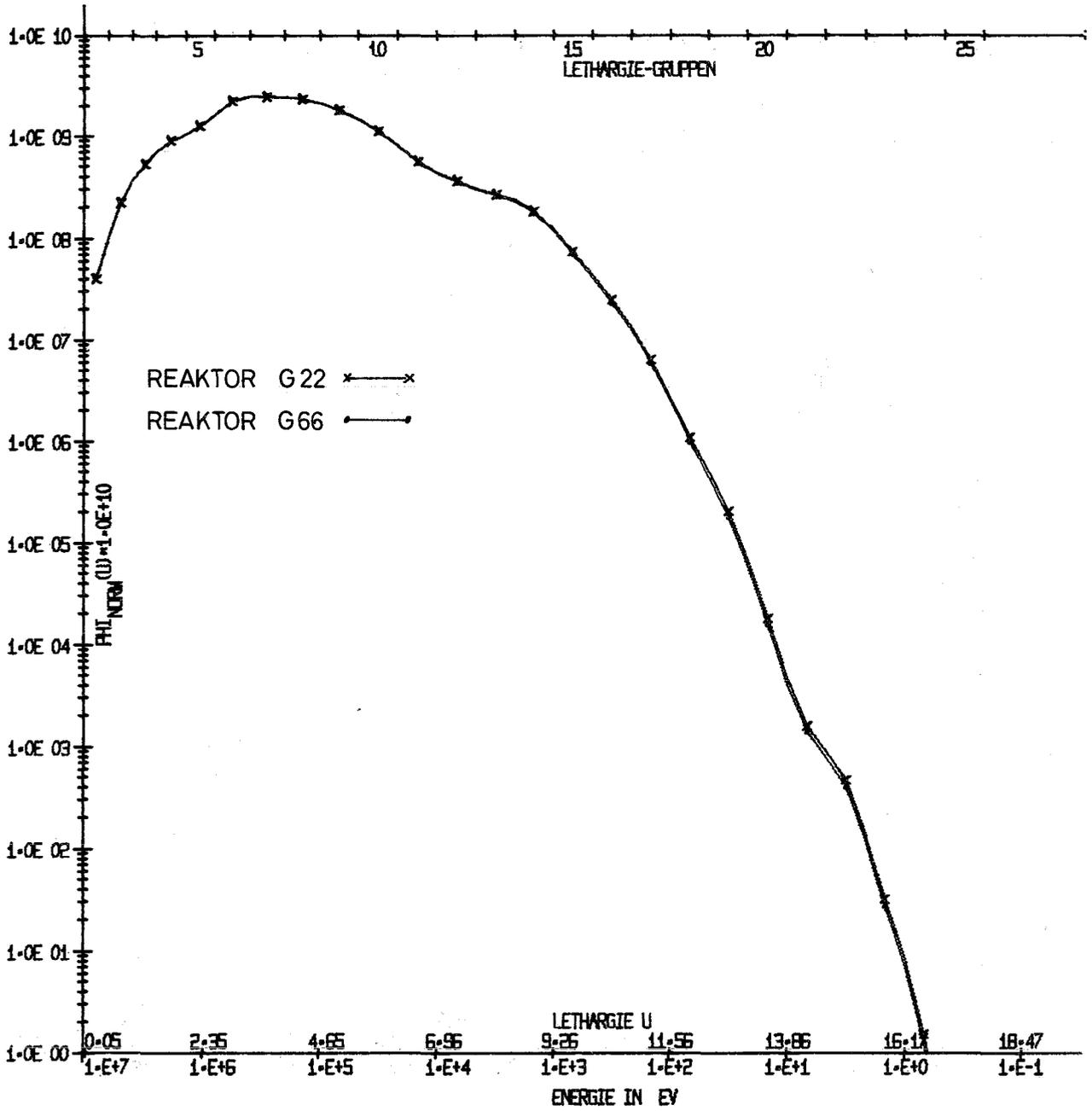


ABB- 0002 SPEKTREN DER REAKTOREN G22 UND G66

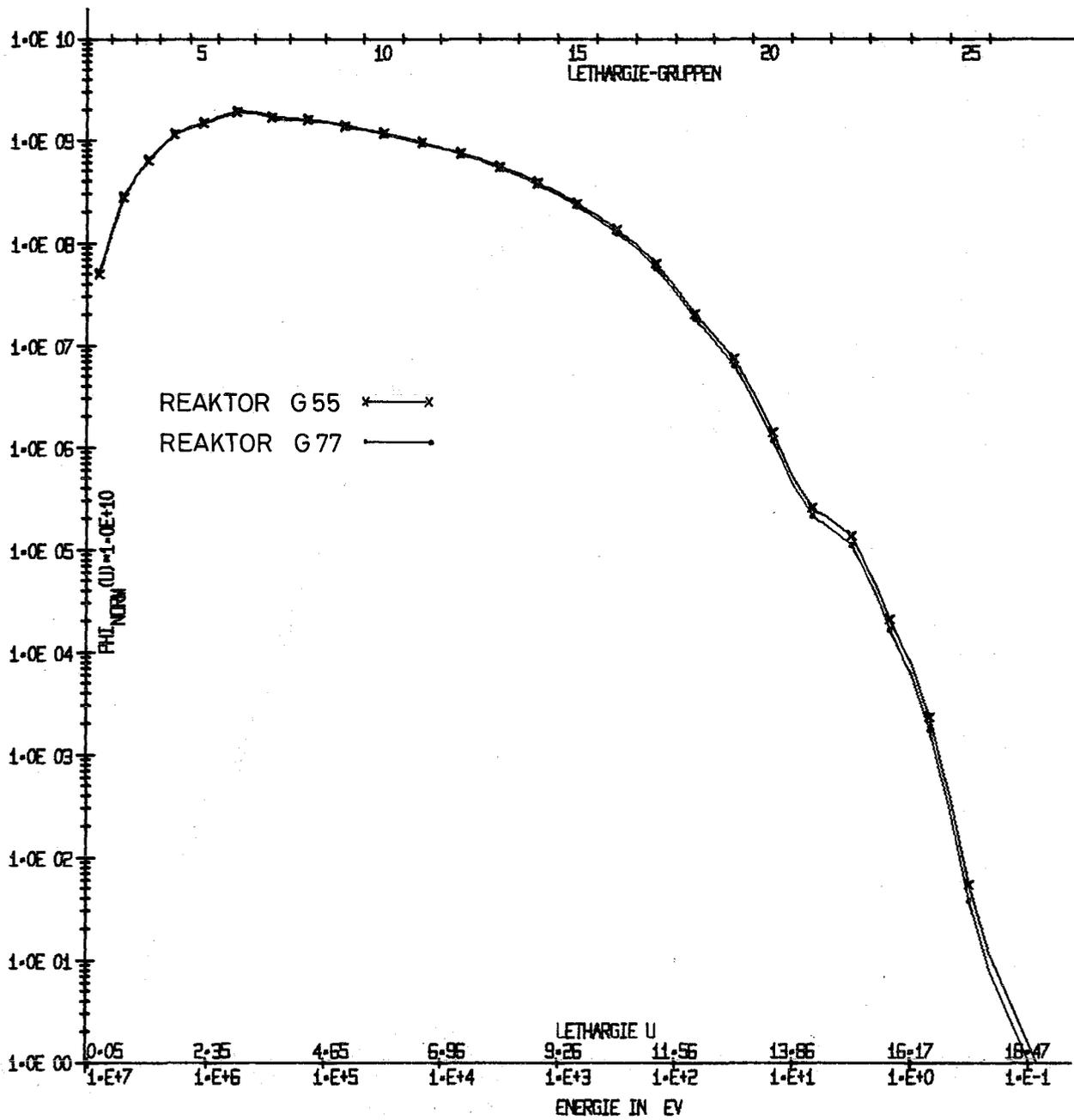


ABB. 0003 SPEKTREN DER REAKTOREN G55 UND G77

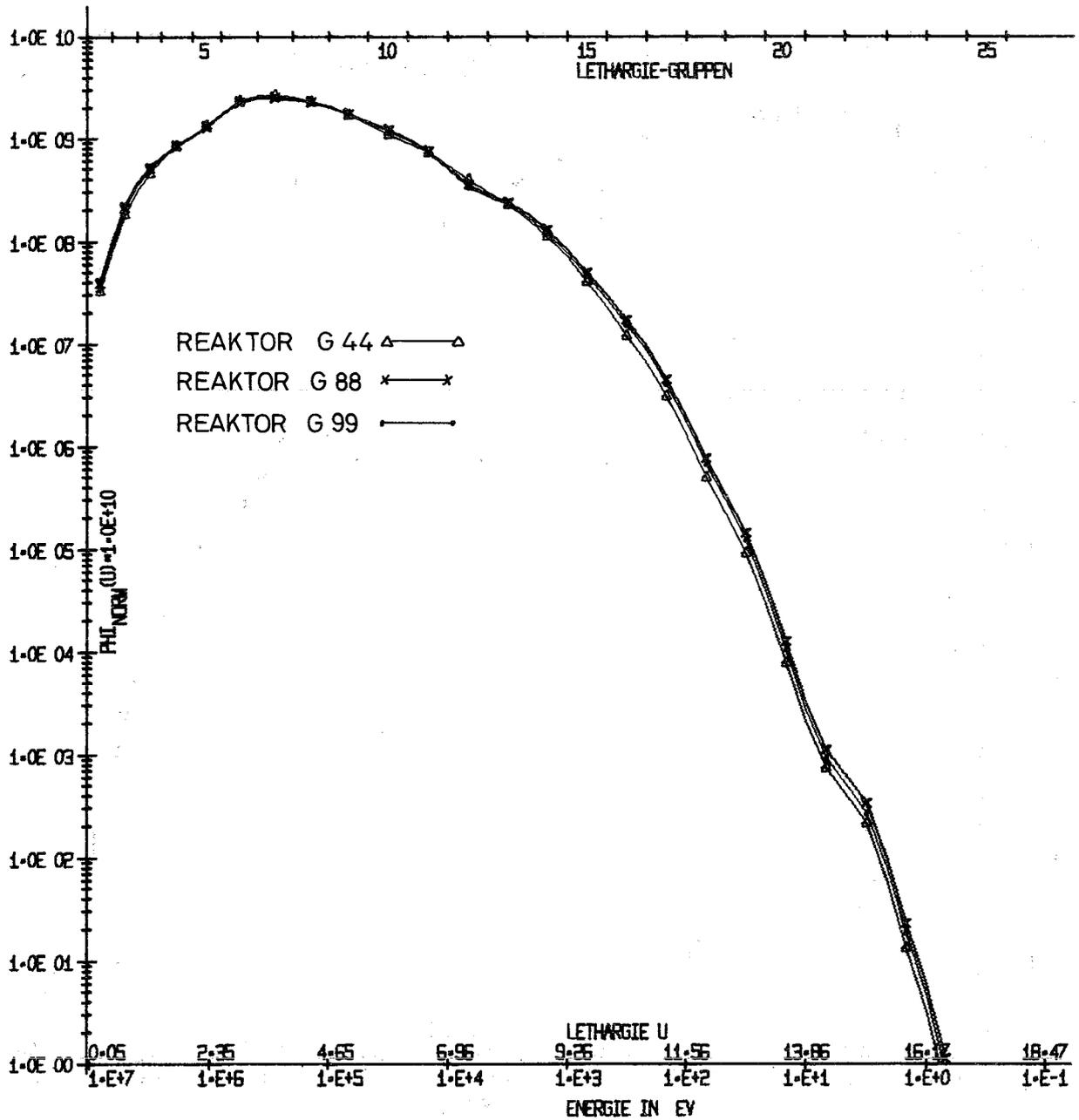


ABB- 0004 SPEKTREN DER REAKTOREN G44 , G88 UND G99

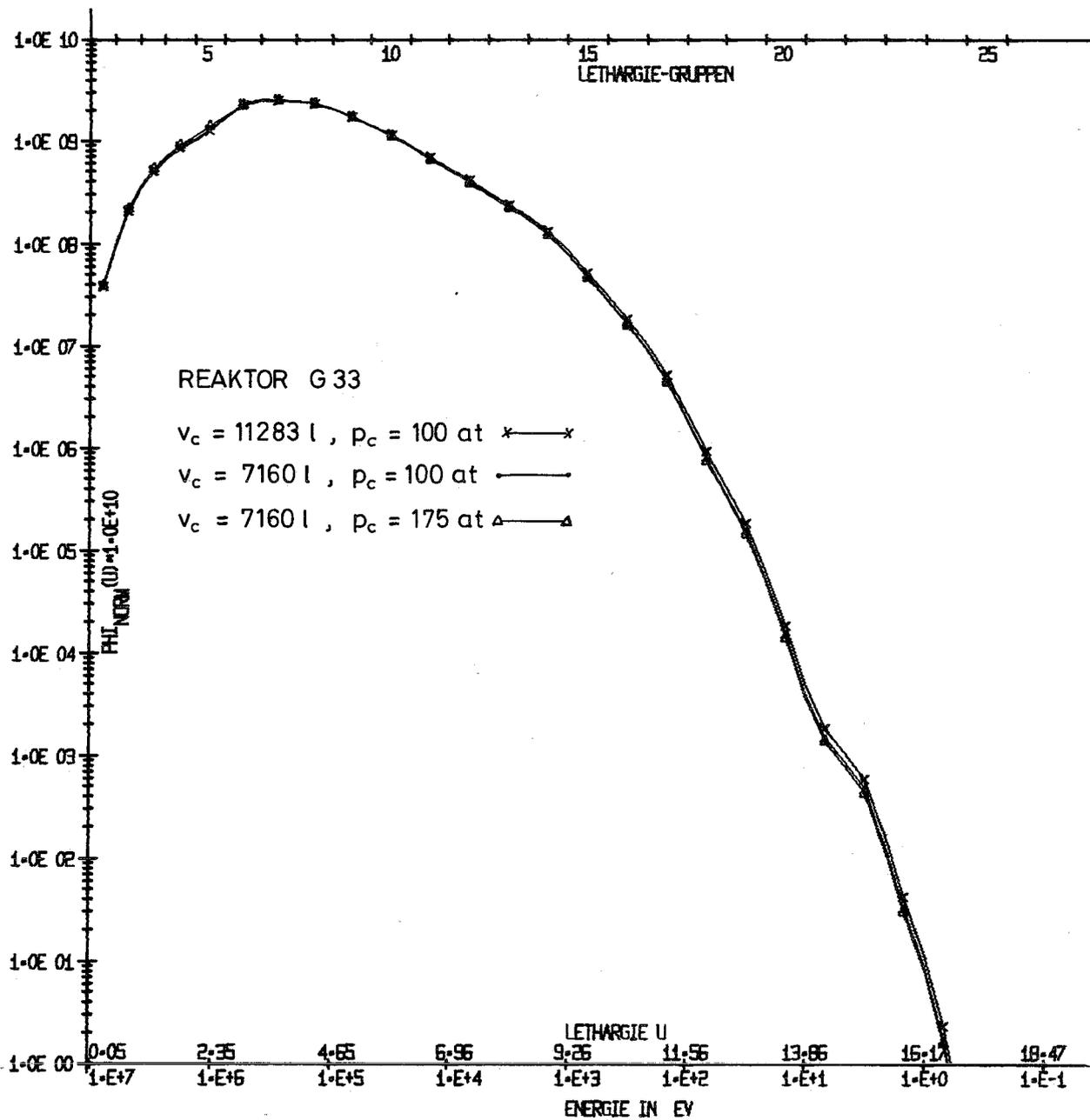


ABB- 0005 SPEKTREN DES REAKTORS G 33 FÜR VERSCH. KÜHLMITTELDICHTEN U. COREVOLUMINA