

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

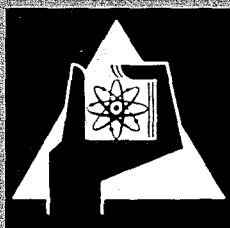
Juni 1971

KFK 1349

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Approximation der stationären,
dreidimensionalen Mehrgruppen-Neutronen-Diffusionsgleichung
durch ein Syntheseverfahren mit dem Karlsruher Synthese-Programm KASY

G. Buckel



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



Juni 1971

KFK 1349

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Schneller Brüter

Approximation der stationären, dreidimensionalen
Mehrgruppen-Neutronen-Diffusionsgleichung durch
ein Syntheseverfahren mit dem Karlsruher Synthese-
Programm KASY *

G. Buckel

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

* Dissertation, genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe



Zusammenfassung

Das Karlsruher Syntheseprogramm KASY, geschrieben in FORTRAN IV für IBM-Rechenanlagen der Serie 360 Modell 65 und größer, löst näherungsweise die energiegruppenabhängige dreidimensionale Neutronen-Diffusionsgleichung mit einer Synthesemethode. Dazu werden im voraus erstellte zweidimensionale Versuchsfunktionen verwendet.

Im ersten Teil dieses Berichts werden die mathematischen Grundlagen des der Synthesemethode zugrunde liegenden Variationsverfahrens kurz beschrieben. Im zweiten Teil sind Inhalt und Aufbau des Programms KASY dargestellt. Im dritten Teil werden Ergebnisse diskutiert. Dabei werden die mit der Synthesemethode durch KASY berechneten Ergebnisse denen aus zweidimensionalen Rechnungen und mit dreidimensionalen totalnumerischen Verfahren gewonnenen gegenübergestellt. Eine umfangreiche Untersuchungsreihe für den natriumgekühlten Reaktor Na2 im 5-, 12- und 26-Gruppenbild soll die Möglichkeiten und Grenzen in der Anwendung von KASY aufzeigen.

Die Arbeit ist an der Universität Karlsruhe als Dissertation angenommen. Referenten sind Prof. Dr. K. Wirtz und Prof. Dr. W. Kofink.

Summary

The Karlsruhe Synthesis Programme KASY written in FORTRAN IV for the IBM 360/65 and larger models approximately solves the energy-group dependent three-dimensional neutron diffusion equation by a synthesis method. Catalogued two-dimensional trial functions are used for the calculation.

In the first part of the report a short description of the mathematical background of the variational principle used in the synthesis method is given. The contents and the structure of the programme KASY are explained in the second part. In the third part some results are discussed. The results obtained by the programme KASY are compared with results from two-dimensional and three-dimensional fully numerical calculations. An extensive analysis of the sodium cooled reactor Na2 with 5-, 12- and 26 group representation shows the possibilities and the limits of KASY. This work has been accepted as thesis at the University of Karlsruhe. Referees are Prof. Dr. K. Wirtz and Prof. Dr. W. Kofink.

Inhaltsverzeichnis

- I Einleitung

- II Das Variationsprinzip
 - a) Das Verfahren von KAPLAN zur Berechnung der Überlagerungsfunktionen $Z_k^j(z)$
 - b) Auswahl der Versuchsfunktionen $H_k(x,y)$ und der Wichtigkeitsfunktionen $H_k^M(x,y)$

- III Beschreibung des Karlsruher-Flußsynthese-Programms KASY
 - a) Äußere Eingabe und deren Verarbeitung
 - b) Berechnung der Koeffizienten für das zu lösende Gleichungssystem (II.10)
 - c) Umordnung des Gleichungssystems in Block-Tridiagonalform
 - d) Durchführung der Quelliteration
 - e) Bildung der Linearkombinationen (II.1) als Näherungslösung für die drei-dimensionale Neutronendiffusionsgleichung (I.1)
 - f) Das Ausgabeprogramm AGABE

- IV Diskussion von Ergebnissen
 - a) 5-Gruppenrechnung für den dampfgekühlten Reaktor D1
 - b) Vergleichsrechnungen für KASY mit dem Differenzen-Approximations-Programm WHIRLAWAY zur Lösung der dreidimensionalen Neutronendiffusionsgleichung für eine 2-Gruppenrechnung einer modifizierten Form des natriumgekühlten Reaktors Na2
 - c) Vergleichsrechnungen für KASY mit dem Differenzen-Approximations-Programm TRITON zur Lösung der dreidimensionalen Neutronendiffusionsgleichung für eine 5-Gruppenrechnung des Reaktors ZPR III - Assembly 48.

d) 5-, 12- und 26-Gruppenrechnung für den natriumgekühlten
Reaktor Na2

α) 5-Gruppenrechnung

β) 12-Gruppenrechnung

γ) 26-Gruppenrechnung

δ) Zusammenstellung der Ergebnisse α) - γ)

V Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

VI Literaturverzeichnis

VII Abbildungen

I EINLEITUNG

Zur Ermittlung der Neutronenflußverteilung in großen Kernreaktoren ist die Diffusionsnäherung zur Lösung der Neutronen-Transportgleichung ausreichend. Es wurden deshalb in der Vergangenheit zur Berechnung von Kernreaktoren Rechenverfahren verwendet, die eine Lösung der energiegruppenabhängigen Neutronen-Diffusionsgleichung in null-, ein- und zwei Raumdimensionen ermöglichten. Versuche, diese Gleichung mit Separationsansätzen im Raum zu lösen, haben speziell bei Reaktoren mit stark heterogenem Aufbau zu völlig unbefriedigenden Ergebnissen geführt. Die physikalischen Verhältnisse in den nicht berücksichtigten Dimensionen wurden durch oft recht grobe Symmetriebetrachtungen in die gewonnenen Ergebnisse mit einbezogen. Solche Einschränkungen in der Dimensionszahl waren im Hinblick auf Rechenzeit- und Speicherplatzersparnis bei den zur Verfügung stehenden Rechenanlagen notwendig.

Seit jedoch die Rechenanlagen der sogenannten 3. Generation zur Verfügung stehen, wurden auch Versuche unternommen, die Mehrgruppen-Diffusionsgleichung mit der Matrizendarstellung

$$-\nabla D \nabla \phi + A \phi = \frac{1}{\lambda} M \phi \quad (I.1)$$

für drei Raumdimensionen zu lösen.

Die hierzu entwickelten Rechenprogramme, denen totalnumerische Differenzen-Approximations-Verfahren zugrunde liegen, erfordern jedoch auch auf den modernen Rechenanlagen sehr große Rechenzeiten und sehr viel Speicherplatz, speziell wenn die Berechnung in einem hinreichend feinen Koordinatengitter und für eine vernünftig große Anzahl von Energiegruppen durchgeführt werden soll. Aus diesem Grund sind auch die heute verfügbaren Rechenprogramme mit solchen totalnumerischen Verfahren recht einschneidenden Beschränkungen unterworfen. So sind im Programm WHIRLAWAY [16] nur zwei Energiegruppen und 12 000 Koordinatengitterpunkte und im Programm TRITON [21] nur 10 Energiegruppen und 8 000 Koordinatengitterpunkte zugelassen.

Außerdem kann festgestellt werden, daß für eine große Anzahl von Problemstellungen die dreidimensionalen, physikalischen Verhältnisse durch eine zweidimensionale Näherungsrechnung nur sehr unzureichend wiedergegeben werden. Dies gilt beispielsweise für Regelstab-Untersuchungen oder für die Untersuchung von Abschattungseffekten bei mehreren Regelstäben im Reaktor.

Aus diesen Gründen wurden schon häufig Versuche unternommen, den energieabhängigen, dreidimensionalen Neutronenfluß durch sogenannte synthetisierte Flüsse zu approximieren, die aus einer geeigneten Verbindung der Ergebnisse aus ein- und zweidimensionalen Rechnungen gewonnen werden.

Aus verschiedenen zur Diffusions-Synthese entwickelten Theorien wurde die von S. KAPLAN [8] vorgeschlagene Methode dem neu erstellten Karlsruher Synthese-Rechenprogramm KASY zugrunde gelegt. Dieses Rechenprogramm wurde modular angelegt, so daß weitere Vorschläge zur Diffusions-Synthese in neueren Arbeiten [9], [17], [18] ohne allzu großen Aufwand eingebaut und untersucht werden können. Die etwas ältere Methode von KAPLAN bietet den Vorteil, daß dieses Verfahren gut durchschaubar und damit für das Studium der durch Syntheserechnung dieser Art gewonnenen Ergebnisse gut geeignet ist.

Mit dem Rechenprogramm KASY sollte ein Hilfsmittel geschaffen werden, das Untersuchungen zur Diffusions-Synthese erlaubt. Für dieses Problem existiert im Augenblick keine abgeschlossene Theorie; speziell ist das Konvergenzverhalten des der Diffusions-Synthese zugrunde liegenden Variations-Verfahrens nicht in seiner vollen Allgemeinheit geklärt.

Mit KASY wurden erste Proberechnungen für den dampfgekühlten schnellen Brutreaktor D1 [10] durchgeführt, wobei die Ergebnisse mit zweidimensionalen Näherungsrechnungen verglichen wurden. Außerdem wurde eine Vergleichsrechnung mit dem Rechenprogramm WHIRLAWAY [16], dem ein dreidimensionales Differenzen-Approximations-Verfahren zugrunde liegt, für eine leicht abgewandelte Form des schnellen natriumgekühlten Reaktors Na2 [3] durchgeführt.

Eingehende Vergleichsrechnungen für den Reaktor ZPR III, Assembly 48 mit dem Rechenprogramm TRITON [19], dem ebenfalls ein dreidimensionales Differenzen-

Approximationsverfahren zugrunde liegt, sollten neben der Bestimmung von Abweichungen in der dreidimensionalen Neutronenfluß-Verteilung und im effektiven Multiplikationsfaktor k_{eff} für verschiedene Stellungen des zentralen Absorberstabs einen exakten Rechenzeitvergleich für die beiden verschiedenen Methoden ermöglichen.

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Rechenprogramms KASY wurde die Neutronen-Flußverteilung im schnellen, natriumgekühlten Reaktor Na2 [37] für jeweils 1 760 Ortspunkte im zweidimensionalen R θ -Koordinatengitter und 36 Punkten in der Z-Richtung, in der die Synthese durchgeführt wurde, jeweils in einer 5-, 12- und 26-Energiegruppen-Darstellung berechnet.

Ziel dieser Arbeiten war es, mit KASY ein Rechenprogramm zur Verfügung zu stellen, das für eine geringe Anzahl von Koordinatengitterpunkten und Energiegruppen bezüglich Rechenzeit und Genauigkeit mit bereits vorhandenen Rechenprogrammen, denen totalnumerische Verfahren zugrunde liegen, getestet werden kann und das daneben eine Anwendung für eine große Anzahl von Koordinatengitterpunkten und Energiegruppen erlaubt.

II DAS VARIATIONSPRINZIP

Mit einem sehr einfachen Bild kann demonstriert werden, wie ein synthetisierter, dreidimensionaler Neutronenfluß gewonnen werden kann. Man hat sich dazu einen in z-Richtung homogenen Kreiszyylinder-Reaktor vorzustellen, dessen Absorber- und Regelstäbe etwa zur Hälfte eingefahren sind. Dadurch wird der Reaktor in zwei axiale Zonen aufgeteilt. Für jede dieser beiden Zonen kann das nun zweidimensionale Problem unter Verwendung eines geeignet gewählten Bucklings gelöst werden. Diese beiden Lösungen sollen $H_1^j(R,\theta)$ für den Bereich der eingefahrenen Stäbe und $H_2^j(R,\theta)$ für den anderen Bereich lauten, wobei j der Index für die jeweilige Energiegruppe ist. Hiermit kann ein Ansatz zur Lösung des dreidimensionalen Problems in der folgenden Form gemacht werden:

$$\phi^j(R,\theta,Z) = Z^j(Z) \cdot \begin{cases} H_1^j(R,\theta) & \text{im Bereich der eingefahrenen Stäbe} \\ H_2^j(R,\theta) & \text{im anderen Bereich} \end{cases}$$

Damit erhält man ein eindimensionales Mehrgruppen-Diffusionsproblem, dessen Lösungen $Z^j(Z)$ durch Einsetzen dieses Ansatzes in die Diffusionsgleichung (I.1) gefunden werden können, wenn über die Variablen R und θ integriert wird. Diese einfache Methode liefert im allgemeinen recht gute Ergebnisse für randferne Bereiche, doch haben sie den Nachteil, daß die so gewonnenen synthetisierten Flüsse große Unstetigkeiten an den Grenzflächen axialer Zonen aufweisen. Diesen Nachteil vermeidet S. KAPLAN, wenn er in seiner Arbeit [8] bei der Beschreibung einer ganzen Klasse von Syntheseverfahren von einem Ansatz für die Näherungslösung der Gleichung (I.1) in der Form

$$\phi^j(R,\theta,Z) = \sum_{k=1}^K Z_k^j(Z) \cdot H_k^j(R,\theta) \quad (\text{II.1})$$

ausgeht. Dabei sind die $H_k^j(R,\theta)$ beliebige zweidimensionale, energieabhängige Versuchsfunktionen, die in der R, θ -Ebene den vorgegebenen Randbedingungen genügen und die so anzusetzen sind, daß eine gute Näherung für den wirklichen dreidimensionalen Neutronenfluß erwartet werden kann.

Die Koeffizienten $Z_k^j(Z)$ sind Überlagerungsfunktionen, die den Flußverlauf in der Variablen Z bestimmen sollen.

Durch einen solchen Ansatz kann ein glatter Übergang an den Grenzflächen axialer Zonen gewährleistet werden. Gewisse Schwierigkeiten bereitet die Anzahl und die Auswahl der K Versuchsfunktionen. Hat man aber einmal die Anzahl bestimmt und die Auswahl getroffen, so können die dazugehörigen Überlagerungsfunktionen $Z_k^j(Z)$ in gewissem Sinn optimal bestimmt werden.

Bei der anschließenden Beschreibung der von KAPLAN verwendeten Methode werden nur die wesentlichen Beziehungen angegeben; Beweise werden ganz weggelassen.

IIa) Das Verfahren von KAPLAN zur Berechnung der Überlagerungsfunktionen $Z_k^j(Z)$

Die Mehrgruppen-Diffusionsgleichung (I.1) soll für einen Zylinder-Reaktor vom Volumen V , der Oberfläche S und dem Querschnitt Q gelöst werden. Der Neutronenfluß und der Strom sollen über innere Trennflächen stetig verlaufen, die Randbedingungen an der Oberfläche S können wahlweise lauten:

- | | |
|---|--|
| a) $\phi(S) = 0$ | Verschwinden des Flusses auf S |
| b) $DV\phi(S) + \alpha\phi(S) = 0$ | Verschwinden des Flusses auf dem
(gruppenabhängigen) extrapolierten
Rand |
| c) $\frac{\partial \phi}{\partial N} = 0$ | Verschwinden des Stroms auf S |

Die folgenden Darstellungen setzen stets die Randbedingungen a) voraus, außerdem wird jeweils nur ein kartesisches XYZ-Koordinatensystem zugrunde gelegt. (Im Programm KASY sind jedoch auch Berechnungen mit den Randbedingungen b) und c), oder mit verschiedenen Randbedingungen für verschiedene Ränder möglich; außerdem können Berechnungen auch in RÖZ-Koordinatensystemen durchgeführt werden.)

In der Mehrgruppen-Diffusionsgleichung (I.1) bedeutet:

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi^1 \\ \phi^2 \\ \vdots \\ \phi^J \end{bmatrix} \quad \text{den Neutronenfluß}$$

$$D = \begin{bmatrix} D^1 & & 0 \\ & D^2 & \\ 0 & & D^J \end{bmatrix} \quad \text{den Diffusionskoeffizienten}$$

$$A = \begin{bmatrix} \sigma^{11} & & 0 \\ \sigma^{21} & \sigma^{22} & \\ & \cdot & \\ \sigma^{J1} & \sigma^{J2} & \sigma^{JJ} \end{bmatrix} \quad \text{die Streumatrix.}$$

$$M = \begin{bmatrix} \chi^1 \nu \sigma_f^1 & \chi^1 \nu \sigma_f^2 & \dots & \chi^1 \nu \sigma_f^J \\ \chi^2 \nu \sigma_f^1 & \chi^2 \nu \sigma_f^2 & \dots & \chi^2 \nu \sigma_f^J \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi^J \nu \sigma_f^1 & \chi^J \nu \sigma_f^2 & \dots & \chi^J \nu \sigma_f^J \end{bmatrix}$$

Dabei ist

- ϕ^j der Neutronenfluß in Gruppe j
- D^j die Diffusionskonstante in Gruppe j
- σ_f^j der Spaltquerschnitt in Gruppe j
- σ^{ij} mit $i \geq j$ der Streuquerschnitt aus Gruppe i in Gruppe j
- J Anzahl der zugrunde gelegten Energiegruppen

Mit Ausnahme von J sind alle diese Größen ortsabhängig. χ^j ist das gruppenabhängige Spaltspektrum, und ν ist die Anzahl der Spaltneutronen pro Spaltung.

Vorausgesetzt wird die Existenz von K linear unabhängigen Versuchsfunktionen als asymptotische Lösungen in K axialen Zonen. Jede dieser Lösungen soll energiegruppenabhängig sein und soll sich als Diagonalmatrix schreiben lassen:

$$H_k(X, Y) = \begin{bmatrix} H_k^1(X, Y) & & & 0 \\ & H_k^2(X, Y) & & \\ & & \ddots & \\ & & & H_k^J(X, Y) \\ 0 & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Die gruppenabhängigen Überlagerungsfunktionen $Z_k(Z)$ lassen sich als Vektoren darstellen:

$$Z_k(Z) = \begin{bmatrix} Z_k^1(Z) \\ Z_k^2(Z) \\ \vdots \\ Z_k^J(Z) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Für den adjungierten Fluß wird ein zu (II.1) analoger Synthese-Ansatz gemacht in der Form

$$\phi^M(X, Y, Z) = \sum_{k=1}^K Z_k^M(Z) \cdot H_k^M(X, Y) \quad (\text{II.4})$$

Zur Berechnung der Vektoren $Z_k(Z)$ untersucht KAPLAN das Funktional

$$F(X, G) = \frac{\langle \nabla X, DVG \rangle + \langle X, AG \rangle}{\langle X, MG \rangle} \quad (\text{II.5})$$

wobei die Skalarprodukte erklärt sind durch

$$\langle X, G \rangle = \int_V \sum_{i=1}^J X_i^T \cdot G_i \, dV$$

$$\langle \nabla X, \nabla G \rangle = \int_V \sum_{i=1}^J (\nabla X^T)_i \cdot (\nabla G)_i \, dV$$

T kennzeichnet transponierte Matrizen.

Hierbei gehören X und G zur Menge P aller stetigen, reellen Funktionen, die über V definiert sind, stückweise stetige erste und zweite partielle Ableitungen besitzen und auf dem Rand S verschwinden. U sei der Raum der $J \times 1$ Spaltmatrizen, deren Elemente zur Menge P gehören.

Das Funktional (II.5) liegt der Flußsynthese nach KAPLAN zugrunde und liefert ein Maß für die Güte der Approximation, und zwar in der Art, daß die Eigenwerte der Diffusionsgleichung für die zugehörigen Eigenfunktionen, zu denen die synthetisierten Lösungen gehören, seine Stationaritätsstellen sind.

Die von KAPLAN angewandte Variationsmethode unterscheidet sich in zweierlei Hinsicht von der üblichen: Einmal ist das Funktional (II.5) nicht quadratisch sondern bilinear in zwei Argumenten. Dies hat zur Folge, daß man als Ergebnis lediglich eine Stationaritäts- und keine Extremalbedingung erhält. Zum zweiten enthält der Lösungsansatz unbekannte Funktionen anstelle von unbekanntem skalaren Parametern. Dieses Verfahren wird als Variationsmethode von KANTOROWITSCH [7] bezeichnet. Danach gelten für das Funktional (II.5) für unabhängige Variationen von X und G die beiden Stationaritätsbedingungen.

$$\langle \delta X, DVG \rangle + \langle \delta X, (A - F / X, G) M \rangle G \rangle = 0 \quad (II.6)$$

und

$$\langle \delta G, DVX \rangle + \langle \delta G, (A^T - F / X, G) M^T \rangle X \rangle = 0 \quad (II.7)$$

die für alle zulässigen δX und δG erfüllt sein müssen, wenn diese die ersten Variationen eines Integrals nach LAGRANGE sind.

Wird die Bedingung (II.6) umgeformt, indem man auf den Ausdruck mit dem Gradienten den Gauß'schen Satz auf Unterregionen des Reaktors anwendet, so erhält man als Stationaritätsbedingung

$$\langle \delta X, \{-VDV + A - F / X, G\} M \rangle G \rangle + \int_{\text{innere Grenzflächen}} \delta X^T \{ (DVG)_{+e} - (DVG)_{-e} \} N ds = 0,$$

wobei in diesem Ausdruck jedes Element einer inneren Grenzfläche nur einmal gezählt wird und die Indizes $+\epsilon$ und $-\epsilon$ die Richtung angeben, von der aus das Grenzflächen-Element angenähert wird. Da δX beliebig sein soll, ist das Funktional nur dann stationär, wenn in V

$$\{-\nabla D V + A - F/\sqrt{X, G} / M\} G = 0$$

gilt und außerdem

$$D V G \cdot N$$

über innere Grenzflächen stetig ist, wobei mit N die Normale auf ein Flächenelement bezeichnet wird. Das heißt mit anderen Worten, die EULERSchen Gleichungen des Funktionals (II.5) sind gerade die Diffusionsgleichungen, und es kann gesetzt werden

$$G = \phi$$

Geht man von der Bedingung (II.7) aus, erhält man in derselben Weise, daß

$$X = \phi^M$$

gesetzt werden kann, um das Funktional (II.5) stationär zu machen.

Mit den Linearkombinationen (II.1) und (II.4) für ϕ und ϕ^M wird unter der Annahme der Zulässigkeit dieser Ansätze aus (II.6)

$$\sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^K \{ \langle \nabla (H_i^M \delta Z_i^M), D V (H_k Z_k) \rangle + \langle H_i^M \delta Z_i^M, (A - F/\sqrt{\phi^M, \phi} / M) H_k Z_k \rangle \} = 0 \quad (II.8)$$

In dieser Gleichung wird die Integration über X und Y ausgeführt, verschiedene Vereinfachungen und die folgenden Definitionen berücksichtigt:

$$A_{ik}(z) = \int_Q H_i^M A H_k \, dx dy$$

$$M_{ik}(z) = \int_Q H_i^M M H_k \, dx dy$$

$$(DB_r^2)_{ik}(z) = \int_Q \nabla H_i^* D \nabla H_k \, dx dy$$

$$D_{ik}(z) = \int_Q H_i^* D H_k \, dx dy$$

Werden außerdem mit L_n , $n=1,2,\dots,N$ die Werte der Variablen z bezeichnet, an denen D_{ik} oder ∇Z_k unstetig werden, mit $L_0=0$ und $L_{n+1}=L$, so ergibt sich aus (II.8) die Gleichung

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K \sum_{k=1}^K \int_0^L \{ (\delta Z_i^*)^T / -\nabla D_{ik} \nabla + A_{ik} + (DB_r^2)_{ik} - F / -\phi^* \phi - M_{ik} - Z_k \} dz \\ + \sum_{n=1}^N \int_{L_{n+\epsilon}}^{L_n} \delta Z_i^* (L_n) / -D_{ik} \nabla Z_k - \int_{L_{n+\epsilon}}^{L_n} = 0 \end{aligned} \quad (II.9)$$

Diese Gleichung soll nun für alle δZ_i^* gelten. Das Funktional ist deshalb nur dann stationär, wenn $Z_k(z)$ Eigenlösungen des folgenden Eigenwertproblems sind:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \{ -\nabla D_{ik}(z) \nabla Z_k(z) + A_{ik}(z) + (DB_r^2)_{ik}(z) - Z_k(z) \} = \\ \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^K M_{ik}(z) Z_k(z) \quad \text{für } i=1, \dots, K \end{aligned} \quad (II.10)$$

An inneren Grenzflächen gilt dann

$$Z_k \quad \text{stetig}$$

wegen der Beschränkung auf solche Versuchsfunktionen, die der Klasse P angehören. Außerdem muß gelten

$$\sum_{k=1}^K D_{ik} \nabla Z_k \quad \text{stetig}$$

an inneren Grenzflächen, damit neben Bedingung (II.10) auch die Gleichung (II.9) erfüllt ist.

Die für innere Grenzflächen geltenden Bedingungen können als die Stetigkeit des Flusses und die Stetigkeit der gewichteten Flußintegrale über horizontale Querschnitte physikalisch gedeutet werden.

IIb) Auswahl der Versuchsfunktionen $H_k(X,Y)$ und der Wichtungsfunktionen $H_k^*(X,Y)$

Grundsätzlich können die Versuchsfunktionen $H_k^i(X,Y)$ beliebige Funktionen sein, die nur den vorgegebenen Randbedingungen an den Rändern des Reaktors zu genügen haben. Es ist jedoch zu erwarten, daß Lösungen der zweidimensionalen Multigruppen-Diffusionsgleichung für jede axiale Reaktorzone eine gute Ausgangsbasis für eine befriedigende Näherung des wirklichen Neutronenflusses ergeben. Um den Grad der Approximation zu erhöhen, können jedoch weitere Funktionen hinzugefügt werden, die spezielle Gegebenheiten im Reaktor berücksichtigen. Es wird außerdem nicht gefordert, daß die Anzahl der Versuchsfunktionen für jede Energiegruppe gleich sein muß; dies kann durch Nullsetzen der betreffenden Diagonalelemente in der H_k Matrix (II.2) verifiziert werden.

Die Gleichung (II.10) sowie die beiden Randbedingungen für innere Grenzflächen erhält man auch formal durch Einsetzen des Ansatzes (II.1) in die Diffusionsgleichung (I.1), wenn dabei beide Seiten von (I.1) mit den Funktionen $H_k^*(X,Y)$ gewichtet und über den Querschnitt Q integriert werden.

Dieses Verfahren könnte auch mit einem anderen Satz von Wichtungsfunktionen durchgeführt werden wobei sich dann andere Überlagerungsfunktionen $Z_k(z)$ - das heißt aber auch eine andere Approximation für die Lösung der Diffusionsgleichung $\Phi(X,Y,Z)$ - ergeben würden, über deren Güte von vornherein nichts ausgesagt werden kann. Für den Fall, daß sich die exakte Lösung der Diffusionsgleichung (I.1) in der Form (II.1) darstellen läßt, wird diese exakte Lösung unabhängig von der Wahl der Wichtungsfunktionen approximiert. Für den anderen Fall, daß die exakte Lösung der Diffusionsgleichung sich nicht in

der Form (II.1) darstellen läßt, gibt es keine umfassende Theorie für eine optimale Wahl der Wichtungsfunktionen. Deshalb sind einige, von der Lösung der adjungierten zweidimensionalen Multigruppen-Diffusionsgleichung verschiedene Wichtungsfunktionen von besonderem Interesse, entweder weil sie zu wesentlichen numerischen Vereinfachungen und damit zu einem großen Gewinn an Rechenzeit führen, oder weil sie physikalisch plausibel sind.

Als "Methode nach GALERKIN" wird ein Verfahren bezeichnet, bei dem die einmal berechneten Versuchsfunktionen $H_k(X,Y)$ selbst als Wichtungsfunktionen verwendet werden. Dabei ist lediglich in den Definitionen der einzelnen Größen für Gleichung (II.10)

$$H_i^* = H_i$$

zu setzen.

Dieses Verfahren bietet den Vorteil, daß zu den als Versuchsfunktionen berechneten Lösungen der zweidimensionalen Multigruppen-Diffusionsgleichung nicht auch noch die Lösungen der zugehörigen adjungierten Gleichung zu berechnen sind.

Eine weitere Möglichkeit, Wichtungsfunktionen zu erhalten, besteht darin, den Reaktorquerschnitt Q in K sich nicht überschneidende Teilquerschnitte Q_i aufzuteilen, die zusammen nicht notwendig Q ergeben müssen. Dann können Wichtungsfunktionen wie folgt definiert werden:

$$W_i(X,Y) = \begin{cases} I & \text{für } X,Y \text{ in } Q_i \\ 0 & \text{für } X,Y \text{ nicht in } Q_i, \end{cases}$$

wobei I jeweils $J \times J$ Matrizen sind. Mit in dieser Art festgelegten Wichtungsfunktionen ergeben sich folgende vereinfachte Definitionsgleichungen für die Größen der Gleichung (II.10)

$$A_{ik}(z) = \int_{Q_i} AH_k \, dx dy$$

$$M_{ik}(z) = \int_{Q_i} MH_k \, dx dy$$

$$D_{ik}(z) = \int_{Q_i} DH_k \, dx dy$$

$$(DB_r^2)_{ik}(z) = \int_{\substack{\text{Grenzlinie} \\ \text{von } Q_i}} N_i DVH_k \, dS$$

Durch eine solche Wahl der Wichtungsfunktionen vereinfachen sich die durchzuführenden Integrationen also ganz erheblich. Die damit gewonnene Lösung des synthetisierten Neutronenflusses kann dann in der Weise physikalisch interpretiert werden, daß in jeder Reaktorhöhe z für jedes Teilgebiet Q_i ein Neutronengleichgewicht gegeben ist. Dieses Verfahren trägt deshalb auch die Bezeichnung "Region-balance".

Erfahrungsgemäß konvergiert das Auflösungsverfahren für das lineare Gleichungssystem (II.10) sehr schlecht, wenn die verwendeten Versuchsfunktionen nicht "in ausreichendem Maß" linear unabhängig sind. Eine wesentliche Konvergenzbeschleunigung kann durch eine Orthonormierung der Versuchsfunktionen erreicht werden. Diese Orthonormierung kann mit einem bei J.R. RICE [14] beschriebenen, modifizierten GRAM-SCHMIDT Verfahren durchgeführt werden. Damit sind bezüglich der dem Syntheseverfahren zugrunde gelegten Versuchsfunktionen zwei wesentliche Voraussetzungen geschaffen worden:

1. Die physikalischen und geometrischen Voraussetzungen im Reaktor gehen über die zweidimensionalen Versuchsfunktionen in das Verfahren ein.
2. Dem Lösungsverfahren liegt ein Orthonormalsystem von Versuchsfunktionen zugrunde.

Weichen zwei für das Syntheseverfahren vorgesehene Versuchsfunktionen nur geringfügig voneinander ab, scheitert eine Orthonormierung aus numerischen Gründen. Dieser Tatbestand kann im Rechenprogramm abgefragt werden. Dann enthält aber auch die zweite Versuchsfunktion gegenüber der ersten nur sehr wenig neue Information, so daß auf sie verzichtet werden kann.

III BESCHREIBUNG DES KARLSRUHER SYNTHESE-PROGRAMMS KASY

Aufgabe des Programms KASY ist es, mit Hilfe von im voraus berechneten zweidimensionalen Versuchsfunktionen nach dem im II. Kapitel beschriebenen Variationsverfahren eine Näherungslösung für die dreidimensionale Diffusionsgleichung (I.1) zu berechnen. Dazu ist im wesentlichen das Gleichungssystem (II.10) nach den Überlagerungsfunktionen $Z_k(Z)$ mit der sogenannten Power-Methode aufzulösen und dabei der größte Eigenwert $p = \frac{1}{\lambda}$ zu ermitteln. Außerdem sind dann noch die Linearkombinationen (II.1) zu bilden.

KASY ist mit Ausnahme eines kleinen Steuerprogramms mit der Bezeichnung DATAMAIN, das in ASSEMBLER-Sprache geschrieben ist, in FORTRAN IV für IBM-Rechenanlagen vom System 360 Modell 65 und größer programmiert und benützt die vom IBM Betriebssystem OS (operating system) zur Verfügung gestellten Hilfsmittel 5a, 5b, 5c, 5d.

In KASY wurde die Zielsetzung verwirklicht, jede Syntheserechnung, unabhängig von der Größenordnung des betreffenden Problems, möglichst optimal bezüglich Rechenzeit und des zur Verfügung stehenden Speicherplatzes durchzuführen. Dazu dient im wesentlichen ein großes, zusammenhängendes Datenfeld im Schnellspeicher, dessen Dimension das schon oben erwähnte Steuerprogramm aus der EXEC-Karte der IBM-Kontrollsprache für das System 360 als Inhalt einer Variablen in das Programm KASY überträgt. Damit ist es möglich, die Größe des Datenfeldes, gleichbedeutend mit äußerer Eingabe, für jede Rechnung dem speziellen Problem angepaßt, festzulegen. In dieses große Datenfeld werden alle im Verlauf der Rechnung anfallenden Zwischendaten gespeichert und mit Hilfe von Zeigern verwaltet. Ein Teil des Feldes wird vorübergehend auch als Arbeitsspeicher verwendet. Reicht dieser Speicher nicht aus, weicht KASY automatisch auf externe Speicher (nach Wahl Trommel, Platte oder Magnetband) aus.

Um einen rationellen Ablauf der Quelliteration zur Lösung des Gleichungssystems (II.10) zu gewährleisten, und um außerdem die Möglichkeit zur Archivierung von Zwischenergebnissen zu schaffen, die eventuell für eine spätere Syntheserechnung als Anfangsschätzung verwendet werden können, werden sowohl die Quelle als auch die damit ermittelten Werte der Überlagerungsfunktionen $Z_k(Z)$ in jedem Fall auf externe Datenspeicher mit

direktem Zugriff übertragen. Außerdem werden in jedem Fall sequentielle Datenfiles auf externen Speichern angelegt, die einerseits umgearbeitete Eingabedaten und andererseits die anfallenden dreidimensionalen synthetisierten Flüsse als Ergebnisse anzuschließenden Auswerteprogrammen zugänglich machen.

Da im Rahmen des IBM Betriebssystems jeder anzulegende Datenfile durch eine DD-Karte (data definition card) identifiziert werden muß, ergeben sich für den Benutzer von KASY zwei unangenehme Konsequenzen:

1. Er muß den für den Programmablauf für das spezielle Problem benötigten Speicherplatz ermitteln.
2. Er muß für den Fall, daß der ermittelte Speicherbedarf größer ist als der Speicherplatz, den er für die betreffende Rechnung zur Verfügung stellen kann, jeden extern anzulegenden Datenfile für das Betriebssystem durch eine DD-Karte identifizieren, wobei er zur Steigerung der Effektivität zweckmäßigerweise noch feste Regeln für Satz- und Blocklängen sowie Speicherplatzbedarf für den betreffenden File einhalten kann.

Im Hinblick auf die damit gewonnene Möglichkeit zur variablen Anwendung von KASY auf Probleme der unterschiedlichsten Größenordnung und auf eine gewisse Unabhängigkeit von der Größe des zur Verfügung stehenden Schnellspeichers erscheint der oben genannte zusätzliche Aufwand noch zumutbar. Er wäre nur durch ganz massive Eingriffe in das Betriebssystem der Rechenanlage zu vermeiden.

Die von KASY zu lösenden Teilaufgaben werden von verhältnismäßig kleinen FØRTRAN-Unterprogrammen von maximal 270 FØRTRAN-Anweisungen erledigt.

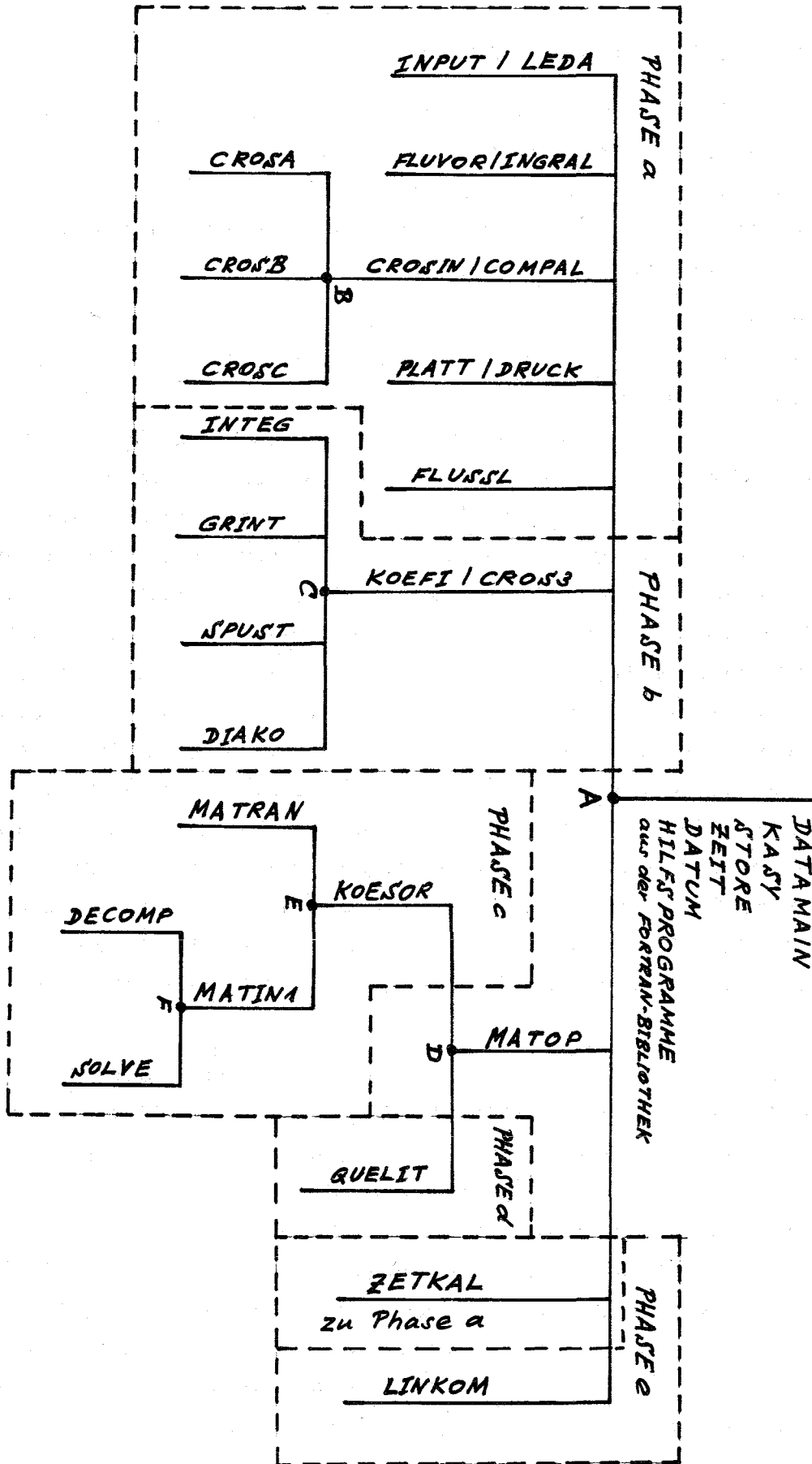
Dieses Konzept ermöglicht die Anlage einer weitverzweigten OVERLAY-Struktur, so daß der Gesamtbedarf an Schnellspeicherplatz rund 44 000 Bytes für das Programm beträgt, ohne das erwähnte Datenfeld und ohne die für externe Datenfiles anzulegende Pufferspeicher. Diese Maximalausdehnung wird sehr wahrscheinlich auch durch die Hinzunahme neuer Unterprogramme zur Erledigung weiterer Teilaufgaben nicht überschritten.

Im einzelnen werden in KASY folgende Teilaufgaben erledigt, die innerhalb der OVERLAY-Struktur in 5 parallele Zweige aufgegliedert sind:

- a) Äußere Eingabe
- b) Berechnung der Koeffizienten für das zu lösende Gleichungssystem

- c) Umordnung des Gleichungssystems in Block-Tridiagonalform
- d) Durchführung der Quelliteration
- e) Bildung der Linearkombinationen (II.1) als Näherungslösung für die dreidimensionale Neutronendiffusionsgleichung (I.1).

Die folgende Übersicht zeigt sämtliche in KASY verwendeten Unterprogramme (Stand vom 15.12.1969) und ihre Anordnung in der OVERLAY-Struktur.



IIIa) Äußere Eingabe und deren Verarbeitung

Die gesamte äußere Eingabe wird vom Unterprogramm LEDA eingelesen und zu Kontrollzwecken im Kartenformat ausgegeben. Gleichzeitig wird eine formale Überprüfung durchgeführt. Der Eingabefile wird anschließend wieder auf den Anfang gesetzt, wodurch die äußere Eingabe dem Unterprogramm INPUT zur Verarbeitung zur Verfügung steht.

Eingelesen wird eine Fallidentifikation, die für die KASY-Ausgabe als Überschrift verwendet wird, die gesamten Parameter zur Steuerung des Programmablaufs, Genauigkeitsschranken für den effektiven Multiplikationsfaktor und die zu berechnenden Überlagerungsfunktionen $Z_k(z)$, die Verteilung der Mischungen innerhalb des Reaktors und die Verteilung der Schrittweiten für 3 Raumdimensionen. Diese Größen werden in die von KASY intern benötigte Form umgewandelt und zur Kennzeichnung des betreffenden Problems ausgegeben. Das Unterprogramm PLATT stellt fest, wieviele "Platten" unterschiedlicher Mischungszusammensetzung in der zu synthetisierenden Richtung vorhanden sind und erstellt für jede dieser "Platten" ein Diagramm, in dem für jede Masche des dann zweidimensionalen Koordinatennetzes die Mischungskennzahl verzeichnet wird. Die Diagramme für alle "Platten" werden zunächst in das generelle Datenfeld gespeichert und nach ihrem Gebrauch in Phase IIIb in externe Speicher übertragen, damit sie später anzuschließenden Auswerteprogrammen zur Verfügung stehen. Das Unterprogramm DRUCK gibt die ganzen Diagramme als Kontrollskizzen aus. Durch dieses "Platten-Konzept" ist es möglich, die zur Berechnung der Koeffizienten notwendigen Integrale in der Phase IIIb effektiv auszuwerten.

Die im voraus berechneten zweidimensionalen Versuchsfunktionen $H_k^i(X,Y)$ sowie die Wichtungsfunktionen $H_k^{*i}(X,Y)$, die nach Abschnitt IIb mit den Versuchsfunktionen identisch sein können, werden als äußere Eingabe oder von einem archivierten Datenfile eingelesen. KASY ist speziell für größere Untersuchungsreihen geeignet, bei denen immer wieder dieselben Versuchsfunktionen in geänderter Anzahl und Reihenfolge verwendet werden können. Gedacht ist hierbei etwa an Untersuchungen über die Abhängigkeit des effektiven Multiplikationsfaktors und spezieller Flußtraversen von der Stellung der Absorber- und Regelstäbe oder von bestimmten, systematisch zu ändernden Materialzusammensetzungen. Möglich ist

beispielsweise auch eine Ähnlichkeitstransformation der Reaktorgeometrie. Aus diesem Grund ist durch das Unterprogramm FLUVOR die Möglichkeit gegeben, aus einem einmal erstellten Datenfile von mehreren Versuchsfunktionen ganz bestimmte für eine Syntheserechnung auszuwählen. Außerdem ist es in FLUVOR möglich, Versuchsfunktionen durch Flußaddition über vorzugebende Grenzen einer alten Energiegruppeneinteilung auf eine geringere Anzahl neuer Energiegruppen zu kondensieren. Die Kombination der beiden beschriebenen Möglichkeiten ist ebenfalls gegeben.

Außerdem wird in der Subroutine FLUVOR die Orthonormierung der eventuell bereits schon ausgewählten und energie-integrierten Versuchsfunktionen vorgenommen. Die hierfür notwendigen Integrale über horizontale Reaktorquerschnitte werden in der Subroutine INGRAL berechnet. Alle beschriebenen Möglichkeiten (Auswahl bestimmter Versuchsfunktionen eines Files, Energieintegration und Orthonormierung) können wahlweise über Eingabesteuerung angewandt werden.

Die in einer speziellen Syntheserechnung verwendeten und gegebenenfalls mit FLUVOR vorbereiteten Versuchsfunktionen werden mit dem Unterprogramm FLUSSL eingelesen und entweder in dem vorbereiteten generellen Datenfeld oder auf einem externen Datenfile mit direktem Zugriff gespeichert. Es besteht auch die Möglichkeit, Versuchsfunktionen direkt von Lochkarten als äußere Eingabe einzulesen.

Die für eine Syntheserechnung mit KASY notwendigen makroskopischen Wirkungsquerschnitte können ebenfalls entweder als äußere Eingabe oder von einem archivierten Datenfile eingelesen werden. Sie müssen in einer speziell vorgeschriebenen Form in einem Datenblock angeliefert werden. Das Einlesen und Abspeichern in dem bereits mehrfach erwähnten generellen Datenfeld wird von den Unterprogrammen CROSIN, CROSA, CROSB und CROSC im Zusammenhang mit dem Hilfsprogramm COMPAL vorgenommen. In der dabei verwendeten Anordnung können sie bei Gebrauch typ-, gruppen- und mischungsweise vom Unterprogramm CROS3 abgeholt werden. Verwendet werden die Querschnittstypen:

NUSF	makroskopischer Spaltquerschnitt mal Spaltneutronen pro Spaltung
------	---

SREM	makroskopischer Removalquerschnitt
STR	makroskopischer Transportquerschnitt
CHI	Spaltspektrum
SMTOT _{ij}	makroskopischer Streuquerschnitt aus der Energiegruppe i in die Gruppe j

Schließlich kann für das Quelliterationsverfahren wahlweise noch eine Anfangsschätzung entweder als äußere Eingabe oder von einem, in einer früheren Syntheserechnung erstellten, Datenfile eingelesen werden. Dies geschieht im Unterprogramm ZETKAL. Wird dies nicht gewünscht, nimmt KASY eine eigene grobe Quellschätzung vor.

Die gesamte Eingabe wird auf ihre Konsistenz geprüft. Sämtliche Eingabefehler und alle Warnungen werden aufgelistet und die Rechnung abgebrochen oder ordnungsgemäß abgeschlossen.

IIIb) Berechnung der Koeffizienten für das zu lösende Gleichungssystem

Zur Auflösung des Gleichungssystems (II.10) nach den Überlagerungsfunktionen $Z_k(z)$ wird zunächst das gesamte Gleichungssystem über z integriert. Damit erreicht man, daß nur Differenzgleichungen für erste und nicht auch für zweite Ableitungen aufgestellt werden müssen. Außerdem können auf diese Weise die verschiedenen Randbedingungen bequem eingebaut werden.

Unter der Voraussetzung, daß sämtliche zur Durchführung der Syntheserechnung vorgesehenen Versuchsfunktionen H , und soweit sie davon abweichen sollen, auch sämtliche Wichtungsfunktionen $H^{\#}$ für jeweils alle vorgesehenen G Energiegruppen entweder ganz oder teilweise in einem externen Datenfile mit direktem Zugriff oder entweder in ihrer Gesamtheit oder teilweise im Schnellspeicher geordnet sind, werden die Koeffizienten für das durch das Iterationsverfahren

$$(\varphi(z) + \gamma(z)) \mathcal{J}_{r+1}(z) = \frac{1}{\lambda} \mathcal{J}(z) \mathcal{J}_r(z) \quad (\text{III.1})$$

mit der Power-Methode für den größten Eigenwert $\frac{1}{\lambda}$ zu lösende Eigenwertproblem berechnet. Dabei setzen sich die einzelnen Koeffizienten wie folgt zusammen:

$$\mathcal{J}(z) = \sum_{k=1}^K \{-\nabla D_{ik}^g(z) \cdot \nabla + (DB_r^2)_{ik}^g + \text{diag. } A_{ik}^g(z)\}$$

für $i=1, \dots, K$

und $g=1, \dots, G$

$$\mathcal{J}(z) = \sum_{g'=1}^{g-1} \sum_{k=1}^K \mu_{\text{drei}} A_{ik}^{g'}(z) \quad \text{für } i=1, \dots, K$$

und $g=1, \dots, G$

wobei mit μ_{drei} die untere Dreiecksmatrix der Matrix $A_{ik}^g(z)$ bezeichnet wird.

$$\mathcal{J}(z) = \sum_{g'=1}^G \sum_{k=1}^K M_{ik}^{gg'}(z) \quad \text{für } i=1, \dots, K$$

und $g=1, \dots, G$

$D_{ik}(z)$, $(DB_r^2)_{ik}(z)$, $A_{ik}(z)$ und $M_{ik}(z)$ haben dabei die in IIa) angegebene Definition.

Bei der Berechnung dieser Koeffizienten für das zu lösende Gleichungssystem mußte nach einem optimalen Verfahren gesucht werden, da sich die ursprüngliche Vermutung, daß für diese Teilaufgabe ein großer Teil der Gesamtrechnenzeit anfällt, durch spätere Testrechnungen voll bestätigte.

Aus diesem Grund wurden die schon in IIIa) beschriebenen "Platten" eingeführt, also Teilgebiete des Reaktors mit gleicher Mischungszusammensetzung in der zu synthetisierenden Koordinatenrichtung, die ihrerseits wieder in verschiedene Intervalle unterteilt sind.

Die Berechnung der verschiedenen Koeffizienten erfolgt im Unterprogramm KOEFI, das den Programmablauf für diese Phase steuert. Das Unterprogramm INTEG wertet die Integrale

$$\int_Q H_i^{*g'} H_k^g \, dx dy \quad (\text{III.2})$$

in der Art aus, daß die für jede Masche des zweidimensionalen Koordinatengitters anfallenden Summenanteile getrennt für jede dort gegebene Mischung-

zusammensetzung und getrennt für jede Platte aufsummiert werden. Dies bietet den Vorteil, daß das Integral (III.2) nur einmal für den gesamten Reaktor ausgewertet werden muß. In derselben Weise wertet das Unterprogramm GRINT die Integrale

$$\int_Q \nabla H_i^{g'} \nabla H_k^g \, dx dy \quad \text{für } g'=g \quad (\text{III.3})$$

aus. Die Auswertung erfolgt numerisch nach der einfachen Trapezregel, wobei die Gradienten in (III.3) durch Differenzenbildungen approximiert werden.

In den Unterprogrammen SPUST und DIAKO werden mit den in INTEG und GRINT angelegten Summenfeldern in Abhängigkeit der Indizes g und g' die Koeffizienten der Spaltmatrix $F(z)$, der Streumatrix $K(z)$ und der Diagonal- und Nebendiagonalmatrix $D(z)$ durch Multiplikation mit den entsprechenden makroskopischen Wirkungsquerschnitten, die durch das Unterprogramm CROS3 bereitgestellt werden, und den zugehörigen Schrittweiten in der zu synthetisierenden Koordinatenrichtung berechnet.

Eine wesentliche Vereinfachung an diesem bezüglich aller Kombinationen von g und g' vollständigen Berechnungsschema ergibt sich, wenn man zwei Gesichtspunkte berücksichtigt.

α) Streugrenzen

Bei der Zusammenstellung des Blocks der makroskopischen Wirkungsquerschnitte im Unterprogramm CROSIN werden für jede Energiegruppe g Gruppengrenzen nach oben - g_o - und unten - g_u - festgestellt, innerhalb derer die Streuquerschnitte für eine Einstreuung aus der Gruppe g von 0 verschieden sind. Diese gruppenabhängigen Streugrenzen werden aufbewahrt und Koeffizienten $K(z)$ nur dann berechnet, wenn g' in einer vorliegenden Kombination $g-g'$ innerhalb der Streugrenzen g_o-g_u für die Gruppe g liegt.

β) Spaltspektrum

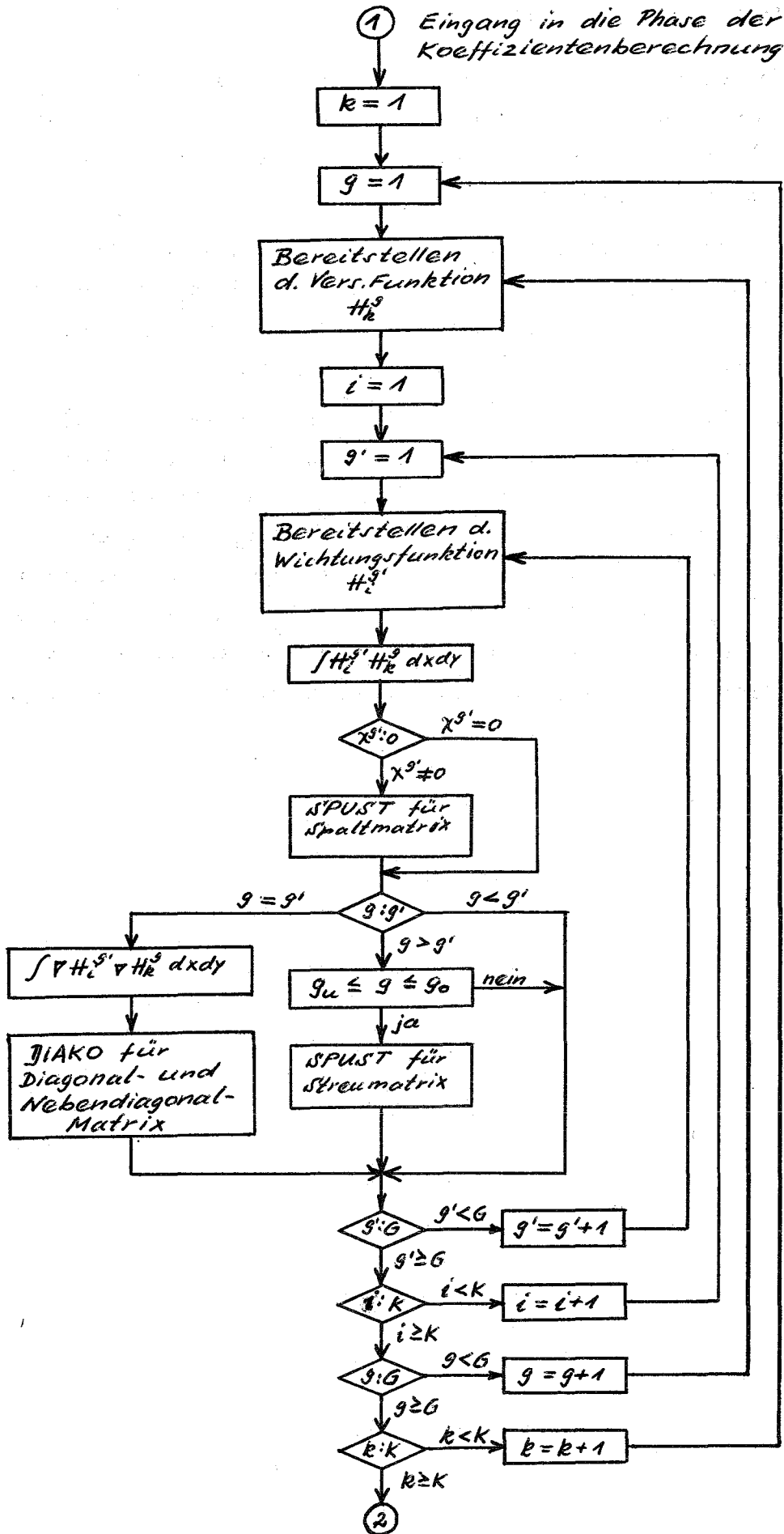
Koeffizienten für die Spaltmatrix $F(z)$ werden nur dann berechnet, wenn der für die betrachtete Energiegruppe zuständige

Faktor des Spaltspektrums $\chi^g \neq 0$ ist.

Diese beiden Vereinfachungen wirken sich besonders bei Syntheserechnungen mit einer großen Anzahl von Energiegruppen aus, wobei ein Gewinn an Rechenzeit bis zu einem Faktor $3/4$ gegenüber dem vollständigen Berechnungsschema erzielt werden kann.

Je nach Vorrat an Schnellspeicherplatz werden die so berechneten Koeffizienten $V(z)$, $X(z)$ und $F(z)$ im generellen Datenfeld nach den Versuchs- und gegebenenfalls den Wichtungsfunktionen abgespeichert oder getrennt auf externe Datenfiles übertragen.

Das folgende Flußdiagramm soll das Berechnungsschema erläutern, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Anordnung der Versuchsfunktionen H_k^g von $k=1, \dots, K$ für alle $g=1, \dots, G$ nur einmal durchlaufen wird und die jeweils zugehörige Wichtungsfunktion H_1^{*g} für die Integralberechnung bereitgestellt wird. (Dabei ist es für den Berechnungsablauf unerheblich, ob die Versuchs- und gegebenenfalls die Wichtungsfunktionen ganz oder teilweise im Schnellspeicher untergebracht sind oder zuerst von externen Datenspeichern eingelesen werden müssen.)



Der Aufbau der Koeffizienten-Matrizen, wie sie durch diese Art der Berechnung entstehen, soll im folgenden für ein Beispiel für 2 Versuchsfunktionen und 3 Energiegruppen für 3 Ortspunkte in der zu synthetisierenden z-Richtung dargestellt werden. Es ergibt sich dann für die linke Seite des Gleichungssystems (III.1) folgende Matrix:

$a_{11}^{11}(1) \ b_{11}^{11}(2)$ $b_{11}^{11}(2) \ a_{11}^{11}(2) \ b_{11}^{11}(3)$ $b_{11}^{11}(3) \ a_{11}^{11}(3)$	$a_{12}^{11}(1) \ b_{12}^{11}(2)$ $b_{12}^{11}(2) \ a_{12}^{11}(2) \ b_{12}^{11}(3)$ $b_{12}^{11}(3) \ a_{12}^{11}(3)$				
$a_{21}^{11}(1) \ b_{21}^{11}(2)$ $b_{21}^{11}(1) \ a_{21}^{11}(2) \ b_{21}^{11}(3)$ $b_{21}^{11}(3) \ a_{21}^{11}(3)$	$a_{22}^{11}(1) \ b_{22}^{11}(2)$ $b_{22}^{11}(2) \ a_{22}^{11}(2) \ b_{22}^{11}(3)$ $b_{22}^{11}(3) \ a_{22}^{11}(3)$				
$s_{11}^{21}(1)$ $s_{11}^{21}(2)$ $s_{11}^{21}(3)$	$s_{12}^{21}(1)$ $s_{12}^{21}(2)$ $s_{12}^{21}(3)$	$a_{11}^{22}(1) \ b_{11}^{22}(2)$ $b_{11}^{22}(2) \ a_{11}^{22}(2) \ b_{11}^{22}(3)$ $b_{11}^{22}(3) \ a_{11}^{22}(3)$	$a_{12}^{22}(1) \ b_{12}^{22}(2)$ $b_{12}^{22}(2) \ a_{12}^{22}(2) \ b_{12}^{22}(3)$ $b_{12}^{22}(3) \ a_{12}^{22}(3)$		
$s_{21}^{21}(1)$ $s_{21}^{21}(2)$ $s_{21}^{21}(3)$	$s_{22}^{21}(1)$ $s_{12}^{21}(2)$ $s_{12}^{21}(3)$	$a_{21}^{22}(1) \ b_{21}^{22}(2)$ $b_{21}^{22}(2) \ a_{21}^{22}(2) \ b_{21}^{22}(3)$ $b_{21}^{22}(3) \ a_{21}^{22}(3)$	$a_{22}^{22}(1) \ b_{22}^{22}(2)$ $b_{22}^{22}(2) \ a_{22}^{22}(2) \ b_{22}^{22}(3)$ $b_{22}^{22}(3) \ a_{22}^{22}(3)$		
$s_{11}^{31}(1)$ $s_{11}^{31}(2)$ $s_{11}^{31}(3)$	$s_{12}^{31}(1)$ $s_{12}^{31}(2)$ $s_{12}^{31}(3)$	$s_{11}^{32}(1)$ $s_{11}^{32}(2)$ $s_{11}^{32}(3)$	$s_{12}^{32}(1)$ $s_{12}^{32}(2)$ $s_{12}^{32}(3)$	$a_{11}^{33}(1) \ b_{11}^{33}(2)$ $b_{11}^{33}(2) \ a_{11}^{33}(2) \ b_{11}^{33}(3)$ $b_{11}^{33}(3) \ a_{11}^{33}(3)$	$a_{12}^{33}(1) \ b_{12}^{33}(2)$ $b_{12}^{33}(2) \ a_{12}^{33}(2) \ b_{12}^{33}(3)$ $b_{12}^{33}(3) \ a_{12}^{33}(3)$
$s_{21}^{31}(1)$ $s_{21}^{31}(2)$ $s_{21}^{31}(3)$	$s_{22}^{31}(1)$ $s_{22}^{31}(2)$ $s_{22}^{31}(3)$	$s_{21}^{32}(1)$ $s_{21}^{32}(2)$ $s_{21}^{32}(3)$	$s_{22}^{32}(1)$ $s_{22}^{32}(2)$ $s_{22}^{32}(3)$	$a_{21}^{33}(1) \ b_{21}^{33}(2)$ $b_{21}^{33}(2) \ a_{21}^{33}(2) \ b_{21}^{33}(3)$ $b_{21}^{33}(3) \ a_{21}^{33}(3)$	$a_{22}^{33}(1) \ b_{22}^{33}(2)$ $b_{22}^{33}(2) \ a_{22}^{33}(2) \ b_{22}^{33}(3)$ $b_{22}^{33}(3) \ a_{22}^{33}(3)$

Für die rechte Seite von (III.1) entsteht die Matrix:

$f_{11}^{11}(1)$ $f_{11}^{11}(2)$ $f_{11}^{11}(3)$	$f_{12}^{11}(1)$ $f_{12}^{11}(2)$ $f_{12}^{11}(3)$	$f_{11}^{12}(1)$ $f_{11}^{12}(2)$ $f_{11}^{12}(3)$	$f_{12}^{12}(1)$ $f_{12}^{12}(2)$ $f_{12}^{12}(3)$	$f_{11}^{13}(1)$ $f_{11}^{13}(2)$ $f_{11}^{13}(3)$	$f_{12}^{13}(1)$ $f_{12}^{13}(2)$ $f_{12}^{13}(3)$
$f_{21}^{11}(1)$ $f_{21}^{11}(2)$ $f_{21}^{11}(3)$	$f_{22}^{11}(1)$ $f_{22}^{11}(2)$ $f_{22}^{11}(3)$	$f_{21}^{12}(1)$ $f_{21}^{12}(2)$ $f_{21}^{12}(3)$	$f_{22}^{12}(1)$ $f_{22}^{12}(2)$ $f_{22}^{12}(3)$	$f_{21}^{13}(1)$ $f_{21}^{13}(2)$ $f_{21}^{13}(3)$	$f_{22}^{13}(1)$ $f_{22}^{13}(2)$ $f_{22}^{13}(3)$
$f_{11}^{21}(1)$ $f_{11}^{21}(2)$ $f_{11}^{21}(3)$	$f_{12}^{21}(1)$ $f_{12}^{21}(2)$ $f_{12}^{21}(3)$	$f_{11}^{22}(1)$ $f_{11}^{22}(2)$ $f_{11}^{22}(3)$	$f_{12}^{22}(1)$ $f_{12}^{22}(2)$ $f_{12}^{22}(3)$	$f_{11}^{23}(1)$ $f_{11}^{23}(2)$ $f_{11}^{23}(3)$	$f_{12}^{23}(1)$ $f_{12}^{23}(2)$ $f_{12}^{23}(3)$
$f_{21}^{21}(1)$ $f_{21}^{21}(2)$ $f_{21}^{21}(3)$	$f_{22}^{21}(1)$ $f_{22}^{21}(2)$ $f_{22}^{21}(3)$	$f_{21}^{22}(1)$ $f_{21}^{22}(2)$ $f_{21}^{22}(3)$	$f_{22}^{22}(1)$ $f_{22}^{22}(2)$ $f_{22}^{22}(3)$	$f_{21}^{23}(1)$ $f_{21}^{23}(2)$ $f_{21}^{23}(3)$	$f_{22}^{23}(1)$ $f_{22}^{23}(2)$ $f_{22}^{23}(3)$
$f_{11}^{31}(1)$ $f_{11}^{31}(2)$ $f_{11}^{31}(3)$	$f_{12}^{31}(1)$ $f_{12}^{31}(2)$ $f_{12}^{31}(3)$	$f_{11}^{32}(1)$ $f_{11}^{32}(2)$ $f_{11}^{32}(3)$	$f_{12}^{32}(1)$ $f_{12}^{32}(2)$ $f_{12}^{32}(3)$	$f_{11}^{33}(1)$ $f_{11}^{33}(2)$ $f_{11}^{33}(3)$	$f_{12}^{33}(1)$ $f_{12}^{33}(2)$ $f_{12}^{33}(3)$
$f_{21}^{31}(1)$ $f_{21}^{31}(2)$ $f_{21}^{31}(3)$	$f_{22}^{31}(1)$ $f_{22}^{31}(2)$ $f_{22}^{31}(3)$	$f_{21}^{32}(1)$ $f_{21}^{32}(2)$ $f_{21}^{32}(3)$	$f_{22}^{32}(1)$ $f_{22}^{32}(2)$ $f_{22}^{32}(3)$	$f_{21}^{33}(1)$ $f_{21}^{33}(2)$ $f_{21}^{33}(3)$	$f_{22}^{33}(1)$ $f_{22}^{33}(2)$ $f_{22}^{33}(3)$

Dabei bedeuten die einzelnen Größen (a_{ik}^{gg} und b_{ik}^{gg} sind Koeffizienten der Diagonal- und Nebendiagonalmatrix $\mathcal{V}(z)$, $s_{ik}^{gg'}$ Koeffizienten der Streumatrix $\mathcal{Y}(z)$ und $f_{ik}^{gg'}$ Koeffizienten der Spaltmatrix $\mathcal{F}(z)$):

$$\begin{aligned}
 a_{ik}^{gg}(1) = & \frac{2}{\Delta z_{1+1}} \int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot D^g(x,y,1+1) H_k^g(x,y) dx dy \\
 & + \frac{2}{\Delta z_1} \int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot D^g(x,y,1) H_k^g(x,y) dx dy \\
 & + \frac{\Delta z_{1+1}}{2} \left[\int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot \sigma^{gg}(x,y,1+1) H_k^g(x,y) dx dy \right. \\
 & \left. + \int_Q V H_i^{*g}(x,y) \cdot D^g(x,y,1+1) V H_k^g(x,y) dx dy \right] \\
 & + \frac{\Delta z_1}{2} \left[\int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot \sigma^{gg}(x,y,1) H_k^g(x,y) dx dy \right. \\
 & \left. + \int_Q V H_i^{*g}(x,y) \cdot D^g(x,y,1) V H_k^g(x,y) dx dy \right]
 \end{aligned}$$

$$b_{ik}^{gg}(1) = -\frac{2}{\Delta z_1} \int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot D^g(x,y,1) H_k^g(x,y) dx dy$$

$$\begin{aligned}
 s_{ik}^{gg'}(1) = & \frac{\Delta z_{1+1}}{2} \int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot \sigma^{gg'}(x,y,1+1) H_k^{g'}(x,y) dx dy \\
 & + \frac{\Delta z_1}{2} \int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot \sigma^{gg'}(x,y,1) H_k^{g'}(x,y) dx dy
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{ik}^{gg'}(1) = & \frac{\Delta z_{1+1}}{2} \int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot \chi^g \cdot v \sigma_f^{g'}(x,y,1+1) H_k^{g'}(x,y) dx dy \\
 & + \frac{\Delta z_1}{2} \int_Q H_i^{*g}(x,y) \cdot \chi^g \cdot v \sigma_f^{g'}(x,y,1) H_k^{g'}(x,y) dx dy
 \end{aligned}$$

wobei mit Δz_1 die Schrittweite auf der Achse in der zu synthetisierenden z-Richtung in der Höhe 1 und mit H_i^{*g} ganz allgemein eine Wichtungsfunktion mit dem Index i der Energiegruppe g bezeichnet wird.

IIIc) Umordnung des Gleichungssystems in Block-Tridiagonalform

Die Koeffizienten für das zu lösende Eigenwertproblem (II.10) wurden in Phase IIIb in einer Reihenfolge berechnet, wie sie durch eine optimale Ausnutzung der Anordnung der Versuchs- und gegebenenfalls auch der Wichtungsfunktion vorgegeben war. Zur Lösung des Eigenwertproblems für den größten Eigenwert nach der Power-Methode ist es jedoch zweckmäßig, die Koeffizienten des Gleichungssystems in Block-Tridiagonalform umzuordnen. Dies geschieht im Unterprogramm KOESOR. Damit ergibt sich dann die folgende Anordnung für die linke Seite des Gleichungssystems (III.1):

$a_{11}^{11}(1) a_{12}^{11}(1)$	$b_{11}^{11}(2) b_{12}^{11}(2)$							
$a_{21}^{11}(1) a_{22}^{11}(1)$	$b_{21}^{11}(2) b_{22}^{11}(2)$							
$b_{11}^{11}(2) b_{12}^{11}(2)$	$a_{11}^{11}(2) a_{12}^{11}(2)$	$b_{11}^{11}(3) b_{12}^{11}(3)$						
$b_{21}^{11}(2) b_{22}^{11}(2)$	$a_{21}^{11}(2) a_{22}^{11}(2)$	$b_{21}^{11}(3) b_{22}^{11}(3)$						
	$b_{11}^{11}(3) b_{12}^{11}(3)$	$a_{11}^{11}(3) a_{12}^{11}(3)$						
	$b_{21}^{11}(3) b_{22}^{11}(3)$	$a_{21}^{11}(3) a_{22}^{11}(3)$						
$s_{11}^{21}(1) s_{12}^{21}(1)$			$a_{11}^{22}(1) a_{12}^{22}(1)$	$b_{11}^{22}(2) b_{12}^{22}(2)$				
$s_{21}^{21}(1) s_{22}^{21}(1)$			$a_{21}^{22}(1) a_{12}^{11}(1)$	$b_{21}^{22}(2) b_{22}^{22}(2)$				
	$s_{11}^{21}(2) s_{12}^{21}(2)$		$b_{11}^{22}(2) b_{12}^{22}(2)$	$a_{11}^{22}(2) a_{12}^{22}(2)$	$b_{11}^{22}(3) b_{12}^{22}(3)$			
	$s_{21}^{21}(2) s_{22}^{21}(2)$		$b_{21}^{22}(2) b_{22}^{22}(2)$	$a_{21}^{22}(2) a_{22}^{22}(2)$	$b_{21}^{22}(3) b_{22}^{22}(3)$			
		$s_{11}^{21}(3) s_{12}^{21}(3)$		$b_{11}^{22}(3) b_{12}^{22}(3)$	$a_{11}^{22}(3) a_{12}^{22}(3)$			
		$s_{21}^{21}(3) s_{22}^{21}(3)$		$b_{21}^{22}(3) b_{22}^{22}(3)$	$a_{21}^{22}(3) a_{22}^{22}(3)$			
$s_{11}^{31}(1) s_{12}^{31}(1)$			$s_{11}^{32}(1) s_{12}^{32}(1)$			$a_{11}^{33}(1) a_{12}^{33}(1)$	$b_{11}^{33}(2) b_{12}^{33}(2)$	
$s_{21}^{31}(1) s_{22}^{31}(1)$			$s_{21}^{32}(1) s_{22}^{32}(1)$			$a_{21}^{33}(1) a_{22}^{33}(1)$	$b_{21}^{33}(2) b_{22}^{33}(2)$	
	$s_{11}^{31}(2) s_{12}^{31}(2)$		$s_{11}^{32}(2) s_{12}^{32}(2)$			$b_{11}^{33}(2) b_{12}^{33}(2)$	$a_{11}^{33}(2) a_{12}^{33}(2)$	$b_{11}^{33}(3) b_{12}^{33}(3)$
	$s_{21}^{31}(2) s_{22}^{31}(2)$		$s_{21}^{32}(2) s_{22}^{32}(2)$			$b_{21}^{33}(2) b_{22}^{33}(2)$	$a_{21}^{33}(2) a_{22}^{33}(2)$	$b_{21}^{33}(3) b_{22}^{33}(3)$
		$s_{11}^{31}(3) s_{12}^{31}(3)$			$s_{11}^{32}(3) s_{12}^{32}(3)$		$b_{11}^{33}(3) b_{12}^{33}(3)$	$a_{11}^{33}(3) a_{12}^{33}(3)$
		$s_{21}^{31}(3) s_{22}^{31}(3)$			$s_{21}^{32}(3) s_{22}^{32}(3)$		$b_{21}^{33}(3) b_{22}^{33}(3)$	$a_{21}^{33}(3) a_{22}^{33}(3)$

$z_1^1(1)$
$z_2^1(1)$
$z_1^1(2)$
$z_2^1(2)$
$z_1^1(3)$
$z_2^1(3)$
$z_1^2(1)$
$z_2^2(1)$
$z_1^2(2)$
$z_2^2(2)$
$z_1^2(3)$
$z_2^2(3)$
$z_1^3(1)$
$z_2^3(1)$
$z_1^3(2)$
$z_2^3(2)$
$z_1^3(3)$
$z_2^3(3)$

neu

und für die rechte Seite:

$f_{11}^{11}(1) f_{12}^{11}(1)$ $f_{21}^{11}(1) f_{22}^{11}(1)$			$f_{11}^{12}(1) f_{12}^{12}(1)$ $f_{21}^{12}(1) f_{22}^{12}(1)$			$f_{11}^{13}(1) f_{12}^{13}(1)$ $f_{21}^{13}(1) f_{22}^{13}(1)$			$Z_1^1(1)$ $Z_2^1(1)$
	$f_{11}^{11}(2) f_{12}^{11}(2)$ $f_{21}^{11}(2) f_{22}^{11}(2)$			$f_{11}^{12}(2) f_{12}^{12}(2)$ $f_{21}^{12}(2) f_{22}^{12}(2)$			$f_{11}^{13}(2) f_{12}^{13}(2)$ $f_{21}^{13}(2) f_{22}^{13}(2)$		$Z_1^1(2)$ $Z_2^1(2)$
		$f_{11}^{11}(3) f_{12}^{11}(3)$ $f_{21}^{11}(3) f_{22}^{11}(3)$			$f_{11}^{12}(3) f_{12}^{12}(3)$ $f_{21}^{12}(3) f_{22}^{12}(3)$			$f_{11}^{13}(3) f_{12}^{13}(3)$ $f_{21}^{13}(3) f_{22}^{13}(3)$	$Z_1^1(3)$ $Z_2^1(3)$
$f_{11}^{21}(1) f_{12}^{21}(1)$ $f_{21}^{21}(1) f_{22}^{21}(1)$			$f_{11}^{22}(1) f_{12}^{22}(1)$ $f_{21}^{22}(1) f_{22}^{22}(1)$			$f_{11}^{23}(1) f_{12}^{23}(1)$ $f_{21}^{23}(1) f_{22}^{23}(1)$			$Z_1^2(1)$ $Z_2^2(1)$
	$f_{11}^{21}(2) f_{12}^{21}(2)$ $f_{21}^{21}(2) f_{22}^{21}(2)$			$f_{11}^{22}(2) f_{12}^{22}(2)$ $f_{21}^{22}(2) f_{22}^{22}(2)$			$f_{11}^{23}(2) f_{12}^{23}(2)$ $f_{21}^{23}(2) f_{22}^{23}(2)$		$Z_1^2(2)$ $Z_2^2(2)$
		$f_{11}^{21}(3) f_{12}^{21}(3)$ $f_{21}^{21}(3) f_{22}^{21}(3)$			$f_{11}^{22}(3) f_{12}^{22}(3)$ $f_{21}^{22}(3) f_{22}^{22}(3)$			$f_{11}^{23}(3) f_{12}^{23}(3)$ $f_{21}^{23}(3) f_{22}^{23}(3)$	$Z_1^2(3)$ $Z_2^2(3)$
$f_{11}^{31}(1) f_{12}^{31}(1)$ $f_{21}^{31}(1) f_{22}^{31}(1)$			$f_{11}^{32}(1) f_{12}^{32}(1)$ $f_{21}^{32}(1) f_{22}^{32}(1)$			$f_{11}^{33}(1) f_{12}^{33}(1)$ $f_{21}^{33}(1) f_{22}^{33}(1)$			$Z_1^3(1)$ $Z_2^3(1)$
	$f_{11}^{31}(2) f_{12}^{31}(2)$ $f_{21}^{31}(2) f_{22}^{31}(2)$			$f_{11}^{32}(2) f_{12}^{32}(2)$ $f_{21}^{32}(2) f_{22}^{32}(2)$			$f_{11}^{33}(2) f_{12}^{33}(2)$ $f_{21}^{33}(2) f_{22}^{33}(2)$		$Z_1^3(2)$ $Z_2^3(2)$
		$f_{11}^{31}(3) f_{12}^{31}(3)$ $f_{21}^{31}(3) f_{22}^{31}(3)$			$f_{11}^{32}(3) f_{12}^{32}(3)$ $f_{21}^{32}(3) f_{22}^{32}(3)$			$f_{11}^{33}(3) f_{12}^{33}(3)$ $f_{21}^{33}(3) f_{22}^{33}(3)$	$Z_1^3(3)$ $Z_2^3(3)$

$\frac{1}{\lambda}$

alt
(III.4)

Dieses Schema für das Gleichungssystem wird allerdings durchbrochen, wenn eine Syntheserechnung für RZ/θ Geometrie durchgeführt wird, wenn also die Versuchsfunktionen für Reaktorschnitte in RZ-Ebenen vorliegen und in θ Richtung synthetisiert wird. Für diesen Fall läuft $0 \leq \theta \leq 2\pi$, d.h. es muß dafür gesorgt werden, daß ein stetiger Übergang von $\theta = 2\pi$ nach $\theta = 0$ geschaffen wird. Im Gleichungssystem (III.4) wirkt sich das dann so aus, daß für das obige Beispiel die Blöcke der oberen Nebendiagonalen

$$\mathcal{L}^{\text{EG}}(2) = \begin{bmatrix} b_{11}^{\text{EG}}(2) & b_{12}^{\text{EG}}(2) \\ b_{21}^{\text{EG}}(2) & b_{22}^{\text{EG}}(2) \end{bmatrix}$$

durch

$$\mathcal{L}^{\text{EG}}(3) = \begin{bmatrix} b_{11}^{\text{EG}}(3) & b_{12}^{\text{EG}}(3) \\ b_{21}^{\text{EG}}(3) & b_{22}^{\text{EG}}(3) \end{bmatrix}$$

an der entsprechenden Stelle der ersten Zeile jeder Gruppe zu ersetzen sind, wobei im allgemeinen Fall anstelle von $\mathcal{L}^{\text{EG}}(3) \rightarrow \mathcal{L}^{\text{EG}}(n)$ zu setzen ist. Genauso ist in der letzten Zeile jeder Gruppe $\mathcal{L}^{\text{EG}}(3)$ durch $\mathcal{L}^{\text{EG}}(2)$ an der entsprechenden Stelle der Zeile, im allgemeinen Fall also $\mathcal{L}^{\text{EG}}(n)$ für $\mathcal{L}^{\text{EG}}(2)$ zu ersetzen.

Die Auflösung des so entstehenden Gleichungssystems ist etwas aufwendiger als die Auflösung für die beiden anderen Geometrien.

Die in der oben beschriebenen Weise umgeordneten Koeffizienten der rechten Seite des Gleichungssystems werden in jedem Fall extern sequentiell gespeichert. Die Koeffizienten der Hauptdiagonalen werden vor dem Speichern noch modifiziert, und zwar in der Art, daß für jede Energiegruppe einmal der Gaußsche Algorithmus in Abwärtsrichtung, angewandt nur auf die linke Seite des Gleichungssystems, durchgerechnet wird. Wirklich extern gespeichert werden dann beispielsweise für die erste Zeile jeder Gruppe

$$\bar{a}^{\text{EG}}(1) = [\bar{a}^{\text{EG}}(1)]^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11}^{\text{EG}}(1) & a_{12}^{\text{EG}}(1) \\ a_{21}^{\text{EG}}(1) & a_{22}^{\text{EG}}(1) \end{bmatrix}^{-1} \quad \text{und } \mathcal{L}^{\text{EG}}(2)$$

und für die zweite Zeile jeder Gruppe

$$\bar{a}^{gg}(2) = [\bar{a}^{gg}(2) - [\bar{L}^{gg}(2)]^2 \cdot [\bar{a}^{gg}(1)]^{-1}]^{-1} \quad \text{und } \bar{L}^{gg}(3)$$

u.s.w.

Dieses Verfahren bietet den großen Vorteil, daß einmal nur sehr kleine Matrizen invertiert werden müssen (Kantenlänge = Anzahl der Versuchsfunktionen) und daß außerdem die Bildung der inversen Matrizen nur einmal durchgeführt werden muß und diese Inversen auf diese Weise für jeden Iterationsschritt des Quelliterationsverfahrens ständig zur Verfügung stehen. Die notwendigen Matrizenoperationen werden mit den Unterprogrammen MATOP (Matrizen-Addition und -Multiplikation) und MATIN1 (Matrizeninversion) im Zusammenhang mit den Unterprogrammen MATRAN, DECOMP und SOLVE nach einem Verfahren von G. FORSYTHE und C. MOLLER [2] durchgeführt.

In dieser Form werden die Koeffizienten der linken Seite des Gleichungssystems ebenfalls extern sequentiell gespeichert, wobei vor die Koeffizienten der Diagonal- und Nebendiagonalmatrizen die von 0 verschiedenen Koeffizienten der Streumatrix gespeichert werden. Bei dem in IIIId beschriebenen Quelliterationsverfahren zur Auflösung des Gleichungssystems nach den gesuchten Überlagerungsfunktionen kann dann bei jedem Iterationsschritt jeder dieser beiden Datenfiles einmal sequentiell abgearbeitet werden.

IIIId) Durchführung der Quelliteration

Vor der eigentlichen Quelliteration wird eine Ausgangsschätzung für die zu berechnenden Überlagerungsfunktionen $Z_k^g(z)$ vom Unterprogramm ZETKAL von einem archivierten Datenfile oder als äußere Eingabe eingelesen. Ist dies für die betreffende Syntheserechnung nicht vorgesehen, nimmt das Unterprogramm ZETKAL eine eigene, grobe Quellschätzung vor.

Mit Hilfe dieser Ausgangsschätzung wird dann die rechte Seite des Gleichungssystems (III.4) gebildet durch

$$R = F \cdot J_{\text{alt}}$$

Diese rechte Seite wird komponentenweise normiert gemäß

$$\bar{R}_i^g(z) = \frac{R_i^g(z)}{|\bar{R}|}$$

und es wird ein Anfangskehrwert für den zu ermittelnden größten Eigenwert

$$\lambda = k_{\text{eff}} = \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \sum_{z=1}^L \bar{R}_i^g(z)$$

ausgegeben.

Das sich somit ergebende Gleichungssystem

$$(\mathcal{V}(z) + \mathcal{J}(z)) \cdot \mathcal{J}_{\text{neu}} = \bar{R}(z)$$

wird gruppenweise streng nach dem Gaußschen Algorithmus für die \mathcal{J}_{neu} gelöst, und zwar in der Art, daß jeweils sämtliche von 0 verschiedenen Teilstreumatrizen für die betreffende Gruppenzeile mit den in den vorherigen Gruppen neu berechneten \mathcal{J}_k -Werten multipliziert und zur rechten Seite der betreffenden Gruppe addiert werden. Da der Gaußsche Algorithmus, und dabei vor allem die Matrizeninversionen für die linke Seite des Gleichungssystems, bereits in der Phase IIIc) durchgeführt wurde, sind für die Durchführung des Gaußschen Algorithmus für die um die Teilstreumatrizen erweiterte rechte Seite des Gleichungssystems lediglich Matrizen-Multiplikationen und -Additionen zur Berechnung der neuen \mathcal{J}_k -Werte nötig. Mit diesen neu gewonnenen Werten für die Überlagerungsfunktionen $\mathcal{J}_{k\text{neu}}$ wird die rechte Seite des Gleichungssystems neu berechnet und normiert und der neugebildete Wert für k_{eff} ausgegeben. Das Iterationsverfahren wird in dieser Weise fortgeführt und dann abgebrochen, wenn die Genauigkeitsabfragen

$$\left| \frac{|\bar{R}|_{\text{neu}} - |\bar{R}|_{\text{alt}}}{|\bar{R}|_{\text{neu}}} \right| < \epsilon \quad (\text{III.5})$$

und

$$\left| \frac{Z_o - Z_u}{|\bar{R}|_{\text{neu}}} \right| < \delta \quad (\text{III.6})$$

erfüllt sind. Dabei sind ϵ und δ als äußere Eingabe vorzugeben, und außerdem bedeuten

$$Z_o = \max_{g,k,z} \left| \frac{Z_k^g(z)_{\text{alt}}}{Z_k^g(z)_{\text{neu}}} \right|$$

$$Z_u = \min_{g,k,z} \left| \frac{Z_k^g(z)_{\text{alt}}}{Z_k^g(z)_{\text{neu}}} \right|$$

Die Abfrage (III.6) wird in dieser Form nur durchgeführt, wenn die Größen $Z_k^g(z)_{\text{neu}}$ und $Z_k^g(z)_{\text{alt}}$ einen von Null verschiedenen Wert besitzen. Ist dies nicht der Fall, wird eine Differenzenbildung durchgeführt. Die Abfrage (III.6) nimmt Einfluß auf die Genauigkeit der Neutronenfluß-Verteilung (also einer lokalen Größe) und ist damit wesentlich schärfer als die Abfrage (III.5), die sich auf die integrale Größe des effektiven Multiplikationsfaktors k_{eff} bezieht.

Nach jeder äußeren Iteration werden die ermittelten Werte für k_{eff} , sowie Z_o und Z_u als dessen Schranken ausgegeben. Insgesamt sind bei einer Genauigkeit für

$$\epsilon = 10^{-3} \text{ und für}$$

$$\delta = 5 \cdot 10^{-3}$$

je nach Beispiel etwa 10 bis 30 äußere Iterationen nötig, sofern die verwendeten Versuchsfunktionen vorher orthonormiert wurden. Die Rechenzeit zur Berechnung der Koeffizienten verhält sich dann zu der für die Quelliteration notwendigen wie etwa 2:1.

Für den praktisch am häufigsten vorkommenden Fall, daß nämlich die Versuchsfunktionen selbst als Wichtungsfunktionen verwendet werden, ergibt sich nach der Orthonormierung ein stark diagonaldominantes Gleichungssystem, wie sich leicht aus (III.4) mit den zugehörigen Definitionsgleichungen für die einzelnen Koeffizienten ersehen läßt.

Obwohl für die Konvergenz des Verfahrens kein Beweis angegeben werden kann,

wurde trotz vieler Test- und Produktionsrechnungen noch kein Fall bekannt, bei dem das Verfahren nicht konvergiert hat. Die Forderung, daß der größte Eigenwert einfach und die Differenz zum zweitgrößten ausreichend groß ist, scheint durch die physikalischen Gegebenheiten in Reaktoren der Typen, wie sie untersucht wurden, und durch die Eigenart des Verfahrens der Bestimmung der Versuchsfunktionen erfüllt zu sein.

IIIe) Bildung der Linearkombinationen (II.1) als Näherungslösung für die dreidimensionale Neutronendiffusionsgleichung

Aus den eingelesenen Versuchsfunktionen $H_i^g(z)$ und den unter IIIId) berechneten Überlagerungsfunktionen $Z_k^g(z)$ werden in dieser Phase die Näherungslösungen für die dreidimensionale Mehrgruppen-Diffusionsgleichung (I.1) in Form der Linearkombinationen

$$\phi^g(x,y,z) = \sum_{k=1}^K H_k^g(x,y) \cdot Z_k^g(z) \quad \text{für } g=1, \dots, G$$

gebildet. Anschließend werden diese dreidimensionalen Neutronenflüsse in einem externen Datenfile gespeichert und zwar in linearer Anordnung nach folgendem Schema:

$$\left[\phi^g(x,y,z) \text{ mit } x=x_1, \dots, x_N; y=y_1, \dots, y_M; z=z_1, \dots, z_L; \quad g=1, \dots, G \right]$$

wobei mit N die Anzahl der Spalten und mit M die Anzahl der Zeilen im zweidimensionalen Koordinatengitter und mit L die Anzahl der Punkte in der zu synthetisierenden Richtung bezeichnet wird. G ist die Anzahl der Energiegruppen. Der Inhalt der eckigen Klammer stellt genau einen FORTRAN-Satz dar.

IIIIf) Das Ausgabeprogramm AGABE

Es hat sich als sehr zweckmäßig herausgestellt, bei einem Programm zur Berechnung dreidimensionaler Neutronenflüsse zwischen Primär- und Sekundärausgabe zu unterscheiden. Als Primärausgabe erscheint im Programm KASY lediglich

- ein Ausgabekopf,
- die gesamte äußere Eingabe im Kartenformat zu Kontrollzwecken,
- die verarbeitete äußere Eingabe zur Kennzeichnung der betreffenden Rechnung,
- Angaben über die Orthonormierung,
- die Kontrollskizzen für die Mischungsverteilungen in sämtlichen Platten,

der Wert für den effektiven Multiplikationsfaktor mit seiner oberen und unteren Schranke für jeden Iterationsschritt,

die Überlagerungsfunktionen $Z_k^{\xi}(z)$ für alle Gruppen, Versuchsfunktionen und Punkte in der zu synthetisierenden Richtung sowie

Kontrollangaben über die für die einzelnen Phasen benötigten Rechenzeiten, das Datum und die jeweilige Uhrzeit.

Die Werte für den Neutronenfluß an den Gitterpunkten des dreidimensionalen Koordinatennetzes werden durch KASY nicht ausgegeben; sie werden, wie schon in IIIe) gesagt, in einem externen Datenfile gespeichert. Dort stehen sie für anzuschließende Auswerteprogramme und für das Ausgabeprogramm AGABE zur Verfügung. AGABE ist getrennt von KASY geschrieben und kann auch von KASY unabhängig aufgerufen werden. Damit ist es möglich, von einem einmal erstellten Datenfile dreidimensionaler Neutronenflüsse in mehreren Gängen gezielt Informationen auszugeben. Insbesondere sind folgende Möglichkeiten der Ausgabe, wahlweise einzeln oder kombiniert, vorhanden:

- a) Ausgabe der Flußwerte an Gitterpunkten des Koordinatennetzes für beliebige dreidimensionale Reaktorgebiete mit achsenparallelen Begrenzungsflächen, gegebenenfalls für den gesamten Reaktor.
- b) Ausgabe von beliebigen Flußtraversen in allen 3 achsenparallelen Richtungen.
- c) Ausgabe der Flußwerte für Reaktorgebiete oder Traversen für bestimmte Energiegruppen oder Energiegruppenbereiche.
- d) Ausgabe von Skizzen der unter b) genannten Traversen über den Zeilendrucker.
- e) Ausgabe von Zeichnungen der unter b) genannten Traversen über den Plotter, wahlweise Ausführung in Tusche auf weißes Papier.

IV DISKUSSION VON ERGEBNISSEN

Nach der Fertigstellung des Programms KASY in der FORTRAN II-Version für die Rechenanlage IBM 7074 wurde als Testfall ein homogener Reaktor mit frei gewählten makroskopischen Wirkungsquerschnitten gerechnet, wobei das Ergebnis für den effektiven Multiplikationsfaktor k_{eff} mit dem analytisch ermittelten Wert übereinstimmte. Dieser Tatbestand kann zwar als Beweis für die Richtigkeit des formalen Programmablaufs gelten, aber erfahrungsgemäß nicht als Beweis für die Anwendbarkeit der Synthesemethode auf komplizierter aufgebaute Reaktorkonfigurationen.

Es wurden deshalb 4 Reaktorsysteme in ausgedehnten Berechnungen untersucht und die Ergebnisse teilweise mit denen von zweidimensionalen DIXY RZ-Rechnungen [7] und teilweise mit denen von dreidimensionalen Differenzen-Approximations-Programmen verglichen. So wurde für die erste FORTRAN II-Version eine 5-Gruppenrechnung für den dampfgekühlten Reaktor D1 durchgeführt und das Ergebnis mit einer zweidimensionalen RZ-5-Gruppenrechnung verglichen. Außerdem wurde eine stark abgeänderte Anordnung des natriumgekühlten Reaktors Na2 mit KASY und WHIRLAWAY [16] gerechnet und ein systematischer Vergleich durchgeführt.

Für die neuere FORTRAN IV-Version von KASY für IBM-Rechenanlagen des Systems 360 Modell 65 und größer wurde zunächst ebenfalls das kleine Testbeispiel für den homogenen Reaktor gerechnet und das Ergebnis mit dem analytisch gewonnenen verglichen, womit es gleichfalls übereinstimmte. Daran anschließend wurde eine ausgedehnte Vergleichsuntersuchung zwischen einer 5-Gruppen KASY-Rechnung und einer 5-Gruppen TRITON-Rechnung [21] und [19] für das Reaktorsystem ZPR III Assembly 48 durchgeführt.

Um die Leistungsfähigkeit von KASY zu testen und eine Übersicht über anfallende Rechenzeiten zu bekommen, wurden 5-, 12- und 26-Gruppenrechnungen für den natriumgekühlten Reaktor Na2 durchgeführt.

Inzwischen wurde im Institut für angewandte Reaktorphysik der Gesellschaft für Kernforschung mbH auch eine ausgedehnte Untersuchungsreihe abgeschlossen, in deren Verlauf für die Anordnung SNEAK 2C einmal für einen zentralen Kontrollstab und zum zweiten für einen Kontrollstab an der Core-Peripherie mit KASY gerechnete Ergebnisse mit Messungen des Neutronenflusses

längs radialer und axialer Traversen verglichen wurden [12]. Daneben wurde eine weitere Untersuchung für eine Anordnung mit 3 Kontrollstäben abgeschlossen [13]. Über diese Ergebnisse wurde auch auf der Reaktortagung des Deutschen Atomforums in Berlin [6] im Rahmen des Vortrages "Physikalische Untersuchungen für den SNR in der SNEAK" berichtet.

IVa) 5-Gruppenrechnung für den dampfgekühlten Reaktor D1

Die Berechnung wurde für den dampfgekühlten Reaktor D1 durchgeführt, wie er mit einem Viertel seiner Gesamtausdehnung in Abb. 1 zusammen mit den Abmessungen in Abb. 2 in Grund- und Aufriß dargestellt ist.

Es wurde davon ausgegangen, daß die auf dem inneren Ring liegenden 6 Absorberstäbe (ausgeführt in B_4C) nur 35 cm tief bis zur Trennlinie zwischen oberem axialen Blanket und der oberen Corezone eingefahren sind, genau wie die Hälfte der 12 Absorberstäbe (in derselben B_4C Ausführung) auf dem äußeren Ring, während die restlichen 6 Stäbe auf diesem Ring 73 cm weiter in die obere Corezone eingefahren sind. In den freibleibenden Teil der Kanäle für die Absorberstäbe wurden Aluminium-Nachfolger (Al_2O_3) nachgezogen.

Weiter wurde den Berechnungen ein leicht modifizierter ABN-26 Gruppensatz [1] zur Bestimmung der makroskopischen Wirkungsquerschnitte zugrundegelegt, wobei die ursprünglich angenommenen 26 Energiegruppen mit Hilfe eines geeignet gewählten Spektrums auf 5 Gruppen kondensiert wurden, wobei folgende Gruppengrenzen des 26 Gruppenbildes für die neue Einteilung festgelegt wurden:

$$1 - 5, 6 - 11, 12 - 18, 19 - 24, 25 - 26.$$

Als Vergleichsmaßstab für die KASY-Rechnungen dienten in diesem Fall zweidimensionale DIXY RZ-Rechnungen, wie sie näher in [10] beschrieben sind. Der Tabelle 3.3 derselben Arbeit ist auch der Wert für den effektiven Multiplikationsfaktor für die oben beschriebene Anordnung der Absorberstäbe als Vergleichswert mit

$$k_{\text{effDIXY}} = 0.9907$$

entnommen. In den Abbildungen 3,4 und 5 sind jeweils 4 axiale Flußtraversen

für die 2., 3. und 4. Energiegruppe dargestellt, wie sie sich mit den RZ-Rechnungen für die in Abb. 1 eingezeichneten Positionen 1_D, 2, 3 und 5 ergeben haben. Sie dienen für die im folgenden beschriebenen, mit KASY berechneten, Traversen als Vergleichsbilder. Dabei wurde die Gesamthöhe des Reaktors in 43 Intervalle eingeteilt mit einer durchschnittlichen Schrittweite von \approx 5 cm.

Um einen Überblick über den Einfluß der Anzahl und der Auswahl der Versuchsfunktionen, sowie über die Art der Wichtungsfunktionen auf das Ergebnis zu bekommen, wurden 6 KASY-Testrechnungen auf der verhältnismäßig kleinen IBM-Rechenanlage 7074 durchgeführt. (Insgesamt 10 000 Worte Kernspeicherplatz, sowie Anschluß von maximal 5 Magnet-Bandeinheiten, die dem Benutzer als Zwischenspeicher zur Verfügung stehen.) Außerdem wurde noch der Einfluß der Anzahl der Ortspunkte, d.h. der Schrittweiten in der zu synthetisierenden Z-Richtung auf das Ergebnis und die Rechenzeit untersucht.

Über den Reaktorausschnitt des D1 wurde ein Koordinatennetz mit 32 Punkten in R- und 26 Punkten in θ -Richtung gelegt; die Anzahl der Punkte in Z-Richtung variierte, wie schon oben bemerkt. Bei der Festlegung des Koordinatennetzes wurde darauf geachtet, daß die Schrittweite an und in der Umgebung von charakteristischen Stellen im Reaktor genügend klein gewählt wird; also speziell in den Absorberstäben und ihren Nachfolgern, sowie an den Grenzflächen verschiedener Corezonen und zwischen den Corezonen und dem Blanket.

In den Abbildungen 6, 7 und 8 sind jeweils 4 axiale Flußtraversen den entsprechenden aus den zweidimensionalen Rechnungen in den Abbildungen 3, 4 und 5 für dieselben Energiegruppen gegenübergestellt, wie sie mit der 5. KASY-Testrechnung ermittelt wurden. (Gezeichnet sind nur die Ergebnisse dieser 5. Testrechnung, nicht jedoch die der anderen Testrechnungen.) Außerdem ist jeweils noch eine zusätzliche axiale Traverse für die Position 5 aus Abb. 1 gezeichnet. Auf diese 3 Abbildungen (6, 7 und 8) beziehen sich sämtliche Bemerkungen über Abweichungen bei den einzelnen Testrechnungen; sie stellen als beste Näherungslösung dieser ersten Testreihe das Bezugssystem dar.

Insgesamt wurden für die Untersuchungen 4 zweidimensionale Versuchsfunktionen und außerdem 3 weitere zweidimensionale Versuchsfunktionen mit den zugehörigen adjungierten Flußfunktionen für die entsprechende Wichtung in R θ -Geometrie mit dem zweidimensionalen Differenzen-Approximations-Programm DIXY berechnet.

Verwendet wurde ein einheitliches zweidimensionales Koordinatengitter, konsistent mit dem für die KASY-Rechnungen benützten; also mit 32 Punkten in R- und 26 Punkten in θ -Richtung.

Diese Versuchsfunktionen wurden für die folgenden horizontalen Querschnitte des Reaktors berechnet:

1. Im oberen axialen Blanket mit Hilfe eines grob geschätzten Bucklings:

Rechenzeit 108.5 Min $k_{\text{eff}} = 0.4691$

2. Im oberen Teil der Corezone, im Bereich der eingefahrenen Absorberstäbe:

Rechenzeit 57.5 Min $k_{\text{eff}} = 0.9969$

3. Im unteren Teil der Corezone im Bereich der Aluminiumnachfolger:

Rechenzeit 65.5 Min $k_{\text{eff}} = 1.0193$

4. Im oberen axialen Blanket mit einem besser berechneten Buckling:

Rechenzeit 72.5 Min $k_{\text{eff}} = 1.2499$

5. Wie 4. Versuchsfunktion mit adjungierter Rechnung:

Rechenzeit 147 Min $k_{\text{eff}} = 1.2499$
für adjungierte Rechn.: $k_{\text{eff}} = 1.2502$

6. Wie 2. Versuchsfunktion mit adjungierter Rechnung:

Rechenzeit 151 Min $k_{\text{eff}} = 0.9970$
für adjungierte Rechn.: $k_{\text{eff}} = 0.9972$

7. Wie 3. Versuchsfunktion mit adjungierter Rechnung:

Rechenzeit 150 Min $k_{\text{eff}} = 1.0193$
für adjungierte Rechn.: $k_{\text{eff}} = 1.0194$

Sämtliche angegebenen Zeiten sind hier als Gesamtrechenzeiten für die Rechenanlage IBM 7074 zu verstehen (also einschließlich der Zeiten für alle I/O-

Operationen, die bei dem kleinen, zur Verfügung stehenden Kernspeicher einen wesentlichen Teil der Gesamtrechnzeit ausmachen, Selbst Zeiten für notwendige Magnetbandwechsel sind darin enthalten).

Alle KASY Rechnungen wurden den Genauigkeitsabfragen von $\epsilon = 10^{-3}$ für den effektiven Multiplikationsfaktor k_{eff} und von $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ für die Überlagerungsfunktionen unterworfen.

1. Testrechnung.

Zur ersten Testrechnung wurden die Versuchsfunktionen 1., 2. und 3. herangezogen. In der zu synthetisierenden z-Richtung wurden 20 Ortschaftpunkte gewählt, also 19 Intervalle mit einer durchschnittlichen Länge von ≈ 11 cm.

Die axialen Traversen für die 2. Energiegruppe zeigen bereits denselben Verlauf wie die der 5. Testrechnung in Abb. 6. Größere Abweichungen sind für die axialen Traversen der 3. Energiegruppe festzustellen und zwar speziell im Bereich des oberen axialen Blankets und beim Übergang von der Blanket- in die Corezone. Da dieselbe Abweichung in gleicher Weise für die 4. Energiegruppe auftritt, liegt der Verdacht nahe, daß der Bereich des oberen axialen Blankets durch die Versuchsfunktion 1. nicht ausreichend gut repräsentiert ist. Diese Erkenntnis hat zu den Testrechnungen 2, 3 und 5 geführt.

Die Rechenzeit für die Syntheserechnung betrug 64 Min bei 41 äußeren Iterationen (in der alten Fortran II-Version war die Möglichkeit der Orthonormierung noch nicht enthalten). Für den effektiven Multiplikationsfaktor ergab sich

$$k_{\text{eff}} = 0.9984$$

2. Testrechnung.

Für die zweite Testrechnung wurden dieselben 3 Versuchsfunktionen verwendet wie für die 1. Testrechnung. Durch die Wahl von 28 Ortschaftpunkten in der zu synthetisierenden Z-Richtung sollte der Einfluß der Intervalllänge auf die axialen Flußtraversen speziell an den horizontalen Grenzflächen zweier Reaktorzonen untersucht werden. An solchen Stellen wurde eine Schrittweite von ≈ 4 cm vorgegeben.

Die Erkenntnis aus dieser Rechnung bestand darin, daß die Verkleinerung der Intervalllänge das abweichende Ergebnis nicht verbessert, im Gegenteil die Abweichung nur noch ausgeprägter wiedergibt.

Die Rechenzeit betrug hier für KASY 70 Min bei 37 äußeren Iterationen. Als effektiver Multiplikationsfaktor ergab sich

$$k_{\text{eff}} = 0,9983$$

3. Testrechnung.

Hier wurde eine wesentliche Änderung gegenüber den vorhergehenden Rechnungen vorgenommen, indem auf die 1. Versuchsfunktion verzichtet wurde. Die gesamte Rechnung wurde also nur mit den Versuchsfunktionen 2. und 3. durchgeführt. Erwartungsgemäß stimmte dabei auch für alle untersuchten Energiegruppen der Verlauf der axialen Flußtraversen im Coreinneren mit dem in den Abbildungen 6 - 8 dargestellten gut überein. Im Bereich des oberen axialen Blankets ging bei diesen Traversen jedoch jegliche Charakteristik verloren, was durch den Wegfall der diesen Bereich charakterisierenden Versuchsfunktion auch erwartet werden mußte. Speziell verschwanden die bei den Traversen der 4. Energiegruppe in Abb. 8 auftretenden Flußaufwölbungen in diesem Bereich.

Bei 33 äußeren Iterationen ergab sich für KASY eine Rechenzeit von 48 Minuten. Der effektive Multiplikationsfaktor ergab sich zu

$$k_{\text{eff}} = 0,9990$$

4. Testrechnung.

Gegenüber der 3. Testrechnung sollte noch einmal der Einfluß der Schrittweiten in der zu synthetisierenden Z-Richtung untersucht werden. Als einzige Änderung wurden deshalb 46 Ortspunkte in dieser Richtung festgelegt, was einer durchschnittlichen Schrittweite von $\approx 4,78$ cm entspricht.

Der Verlauf der axialen Traversen wurde dadurch jedoch nur ganz unwesentlich beeinflusst. Allerdings waren bei diesen Gegebenheiten 41 äußere Iterationen nötig. Daß in der Angabe der Rechenzeiten eine gewisse Zufälligkeit liegt, zeigt die Tatsache, daß trotz der größeren Anzahl äußerer Iterationen für diese Berechnung nur 47 Minuten nötig waren. (Dieser Umstand kann durch die bei der Anlage IBM 7074 notwendigen Wechsel der Magnet-

bänder erklärt werden, für die keine einheitliche Zeit angesetzt werden kann.) Überraschenderweise ergab sich nur durch die Veränderung der Schrittweiten eine relativ große Abweichung im effektiven Multiplikationsfaktor von

$$k_{\text{eff}} = 0.99865,$$

doch muß dabei berücksichtigt werden, daß die vorgegebene Genauigkeitschranke 10^{-3} betrug, die Abweichung also immer noch kleiner als diese Schranke war.

5. Testrechnung.

Alle vorhergehenden Testrechnungen haben gezeigt, daß die Anzahl der Versuchsfunktionen keinen wesentlichen Einfluß auf den berechneten Wert des effektiven Multiplikationsfaktors hat, daß aber andererseits der Verlauf axialer Flußtraversen maßgeblich von den Versuchsfunktionen beeinflusst werden kann. Wird eine axiale Reaktorzone mit einer speziellen charakteristischen Materialzusammensetzung nicht durch eine entsprechende Versuchsfunktion repräsentiert, können wesentliche Merkmale in den Teilen der Traversen, die durch solche Bereiche verlaufen, verloren gehen. Wird andererseits eine Versuchsfunktion zur Berechnung herangezogen, die physikalische Gegebenheiten in einer solchen axialen Zone nur unzureichend wiedergibt, erhält man ebenfalls unbefriedigende Ergebnisse. Aus diesen Gründen wurde für die 5. Testrechnung die neue Versuchsfunktion 4. mit einem sorgfältiger bestimmten axialen Buckling berechnet. Durch die Syntheserechnung ergaben sich für die einzelnen Energiegruppen die axialen Traversen, wie sie in den Abbildungen 6 - 8 dargestellt sind. Beim Vergleich mit den axialen Traversen, wie sie sich durch die zweidimensionale DIXY - RZ - Rechnung ergaben, fallen die folgenden Unterschiede auf:

- a) Für die zweite Energiegruppe ist für die dreidimensionale Syntheserechnung durch KASY ein wesentlich langsames Ansteigen der im Borteil des Absorberstabs gerechneten Flußtraverse (Pos. 2 in Abb. 6) zu beobachten als bei der vergleichbaren Traverse (Pos. 2 in Abb. 3), die durch die zweidimensionale DIXY-Rechnung ermittelt wurde. Diese Tatsache ist nicht weiter verwunderlich, da bei der Syntheserechnung die geometrischen Verhältnisse in und um einen eingefahrenen Absorber-

stab noch dreidimensional wiedergegeben werden können. Andererseits müssen bei zweidimensionalen RZ-Rechnungen Stäbe einer auf einem konzentrischen Ring liegenden Stabbank entweder als volumengleicher und damit wesentlich dünnerer Ring dargestellt werden, oder die Stabdicke wird beibehalten und die Mischungszusammensetzung in dem so gewonnenen dickengleichen Ring wird verändert. Im ersten Fall können Dickeneffekte und im zweiten Fall Absorptions- und Streueffekte auftreten, die völlig unkontrollierbar sind. Ebenso unkontrollierbar sind die Einflüsse auf die unmittelbare oder weitere Umgebung im Core um den betreffenden Ring.

Derselbe Effekt, lediglich in weit stärkerem Ausmaß, ist für die 3. Energiegruppe (Positionen 2 in den Abbildungen 4 und 7), sowie für die 4. Energiegruppe (Positionen 2 in den Abbildungen 5 und 8) festzustellen.

- b) Dieselbe Erklärung wie unter a) findet die Tatsache, daß für die dreidimensionale Syntheserechnung durch KASY für die 3. Energiegruppe die im Aluminiumteil des nicht eingefahrenen Absorberstabs in Pos. 1 verlaufende Traverse stets über der in Pos. 3 gezeichneten Traverse in der Nähe des Corezentrums liegt (Abb. 7), während für die zweidimensionale Rechnung die Werte der in der Nähe des Corezentrums gerechneten Traverse stets größer sind als diejenigen im Aluminiumteil.
- c) Für die 3. Energiegruppe ergeben sich auch schon qualitative Unterschiede im Verlauf der nahe dem Reaktorzentrum gerechneten Traversen. Die Traverse als Ergebnis der zweidimensionalen Rechnung (Pos. 3 in Abb. 4) verläuft noch "weitgehend glatt" durch den gesamten Reaktor, während die Traverse als Ergebnis der dreidimensionalen Rechnung schon ausgeprägte Charakteristiken an den Übergängen vom oberen Blanket in die obere Corezone, von der oberen in die untere Corezone und von der unteren Corezone in das untere Blanket aufweisen, wie sie für die zweidimensionale Rechnung erst für die 4. Energiegruppe (Pos. 2 in Abb. 5) auftreten.

Um diesen Sachverhalt näher zu untersuchen, ist es zweckmäßig, die für die 3. Energiegruppe berechneten und in Abb. 9 dargestellten Überlagerungs-

funktionen in die Betrachtung mit einzubeziehen. (Die für die 2. und 4. Energiegruppe berechneten Überlagerungsfunktionen unterscheiden sich nur unwesentlich von denen der 3. Energiegruppe und sind deshalb nicht in diese Arbeit aufgenommen.) Dabei fällt zunächst auf, daß sich für jede Versuchsfunktion in dem Bereich, für den sie berechnet wurde, bei der zugehörigen Überlagerungsfunktion ein Maximum ergibt. Diese Maxima sind besonders stark ausgeprägt bei den Überlagerungsfunktionen, die zu den in den beiden Corezonen vorgegebenen Versuchsfunktionen berechnet wurden. Wesentlich schwächer ausgebildet ist dieses Maximum bei der Überlagerungsfunktion im Bereich des oberen und unteren Blankets, die zu der für das obere Blanket vorgegebenen Versuchsfunktion berechnet wurde; ein Anzeichen dafür, daß trotz der verbesserten Bucklings keine Versuchsfunktion zur Verfügung steht, welche die physikalischen Verhältnisse im Rahmen der Diffusionsnäherung im oberen und unteren axialen Blanket ausreichend gut repräsentiert.

Sowohl das überaus langsame Ansteigen des Neutronenflusses im Borteil des in die obere Corezone eingefahrenen Kontrollstabs, als auch das im selben Borteil im Bereich des oberen axialen Blankets auftretende merkwürdige Maximum lassen sich bei Kenntnis der zugehörigen Überlagerungsfunktionen verstehen:

Unter der Voraussetzung, daß für jeden axialen Reaktorschnitt Versuchsfunktionen vorliegen, die nahezu exakt die Neutronenverteilung in einem solchen zweidimensionalen Schnitt beschreiben, kann man für die Überlagerungsfunktionen Ideallösungen in folgender Form erwarten: die zu einer Versuchsfunktion berechnete Überlagerungsfunktion steigt an den Rändern des Bereichs an, für den die Versuchsfunktion repräsentativ ist, erreicht irgendwo im Innern des Bereichs den maximalen Wert 1 und verschwindet in allen anderen Bereichen. Von dieser Idealform sind die im Rahmen dieser 5. Testrechnung berechneten Überlagerungsfunktionen weit entfernt. Dies wird auch in fast allen praktischen Fällen so sein, wenn die benötigten Versuchsfunktionen noch mit einem einigermaßen erträglichen zeitlichen Aufwand erstellt werden sollen. Unzulänglichkeiten in den Versuchsfunktionen werden dann durch einen entsprechend von der Idealform abweichenden Verlauf der Überlagerungsfunktionen ausgeglichen; immer jedoch mit der Maßgabe, daß das Syntheseverfahren auf die integrale Größe k_{eff} optimalisiert ist.

Bei dieser 5. Testrechnung wirkt sich dies nun folgendermaßen aus: Im Bereich des oberen axialen Blankets ergeben sich für sämtliche Überlagerungsfunktionen positive Werte in etwa derselben Größenordnung. Dazu kann nach dem im Programm DIXY zur Lösung der zweidimensionalen Multigruppen-Diffusionsgleichung angewandten Verfahren stets vorausgesetzt werden, daß alle Versuchsfunktionen an jeder Stelle positiv sind. An einer beliebigen Stelle im axialen Blanket wird also nach (II.1) der Betrag des Neutronenflusses durch Addition der mit den errechneten Überlagerungsfunktionen gewichteten Versuchsfunktionen ermittelt. Dies führt in einem Punkt mit "normaler" Mischungszusammensetzung auch zum richtigen Ergebnis, da sich die Versuchsfunktionen, die für die obere und untere Corezone repräsentativ sind, an einem solchen Punkt nur unwesentlich unterscheiden. Sie unterscheiden sich aber wesentlich voneinander in einem Punkt des Reaktorquerschnitts, für den im oberen Corebereich eine erheblich andere Materialzusammensetzung gilt als in der unteren Corezone, der also etwa im Inneren eines Stabes liegt. Dort ergibt sich für den Borteil in der oberen Corezone eine wesentliche Flußeinbuchtung gegenüber der Umgebung, während sich für den Aluminiumteil in der unteren Corezone eine wesentliche Flußaufwölbung gegenüber der Umgebung ergibt.

Während also die Werte der drei Versuchsfunktionen, mit der entsprechenden Wichtung mit den Werten der berechneten Überlagerungsfunktionen addiert im größten Teil des axialen Reaktorquerschnitts zum richtigen Ergebnis führen, kann die Richtigkeit des Ergebnisses für das Innere eines Absorberstabes angezweifelt werden.

Noch ausgeprägter stellen sich diese Verhältnisse im Innern des Absorberstabs in der oberen Corezone dar. Im Bereich der oberen Corezone besitzt die Überlagerungsfunktion zu der für die untere Corezone repräsentativen Versuchsfunktion durchweg negative Werte. Für Punkte im Reaktorcore, in dem sich obere und untere Zone kaum unterscheiden, wird damit der zu groß ausgefallene Anteil der für die obere Corezone repräsentativen Versuchsfunktion, gewichtet mit der dafür berechneten Überlagerungsfunktion kompensiert, wobei sich auch hier wieder für den weitaus größten Teil des Reaktorquerschnitts das richtige Ergebnis einstellt. Anders ist dies jedoch in Punkten, die im Stab liegen. Die Werte der für die obere Core-

zone repräsentativen Versuchsfunktion sind im Absorberteil des Stabs sehr niedrig, und sie werden mit demselben Wert der Überlagerungsfunktion gewichtet wie im gesamten übrigen Querschnitt. Die Werte der für die untere Corezone repräsentativen Versuchsfunktion sind aber im Aluminiumteil des Stabs sehr hoch, und diese werden ebenfalls mit den negativen Werten der Überlagerungsfunktion gewichtet, wie im übrigen Teil des Reaktorquerschnitts. Dies kann zu einer beträchtlichen Abweichung vom richtigen Ergebnis an solch singulären Punkten führen.

Genau dieselben Verhältnisse, wie sie für die 3. Energiegruppe dargestellt werden, wiederholen sich für die 4. Energiegruppe mit zwei Erweiterungen:

Einmal verstärkt sich der zuletzt beschriebene Effekt in einem solchen Ausmaß, daß im Absorberteil der Stäbe negative Werte für den Neutronenfluß auftreten.

Zum zweiten treten auch bei der im radialen Blanket berechneten axialen Traverse (Pos. 5 in Abb. 8) Wendepunkte beim Übergang in eine andere axiale Zone auf, obwohl längs der gesamten Traverse dieselbe Materialverteilung vorgegeben ist, die einen "glatten" Verlauf dieser Traverse erwarten läßt, wie er sich auch bei der zweidimensionalen Rechnung ergeben hat. Ursache für diese Abweichung ist wieder die Tatsache, daß für den gesamten Reaktorquerschnitt nur ein Satz von Überlagerungsfunktionen berechnet wird und damit Traversen in Gebiete mit geringer Neutronendichte denselben Verlauf annehmen, wie er für Traversen richtig ist, die durch Corematerial mit großer Neutronendichte verlaufen.

Die Ergebnisse mit den oben dargestellten Nachteilen, die mit Syntheserechnungen in der beschriebenen Art zu erhalten sind, können durch einige Maßnahmen verbessert werden:

1. Durch eine erste Erweiterung des Syntheseverfahrens auf die sogenannte Multichannel-Methode [17], wobei mehrere Sätze von Überlagerungsfunktionen für verschiedene Kanäle berechnet werden.
2. Durch eine zweite Erweiterung des Syntheseverfahrens durch Einführung und Behandlung innerer Randbedingungen an Absorbern [15].

3. Durch eine Verbesserung der zugrunde gelegten Versuchsfunktionen durch Wichtung mit ausgewählten makroskopischen Wirkungsquerschnitten [11]7.

Für diese 5. KASY-Testrechnung ergab sich bei 45 äußeren Iterationen eine Rechenzeit von 72 Minuten und ein effektiver Multiplikationsfaktor von

$$k_{\text{eff}} = 0.9999$$

6. Testrechnung

Diese Testrechnung sollte erstmals den Einfluß auf das Ergebnis untersuchen, den die Verwendung von adjungierten Flußfunktionen als Wichtungsfunktionen bringt, anstelle der bisher stets zu diesem Zweck verwendeten Versuchsfunktionen.

Mit dem in der Einleitung zu diesem Abschnitt angegebenen Aufwand an Rechenzeit und einem sehr großen Bedarf an Speicherplatz wurden zu den Flüssen auch noch die adjungierten mit dem Programm DIXY berechnet und der KASY-Testrechnung als Wichtungsfunktion zugrunde gelegt. Das Ergebnis war einigermassen erstaunlich. Der effektive Multiplikationsfaktor von

$$k_{\text{eff}} = 0.9991$$

unterschied sich lediglich um $8 \cdot 10^{-4}$, bei einer geforderten Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-3}$ von dem in der 5. Testrechnung ermittelten Wert und auch für die axialen Fluß-Traversen ergaben sich nur kleine, zu vernachlässigende Abweichungen. Auch die Rechenzeit von 72.5 Minuten bei 48 äußeren Iterationen bewegte sich im selben Rahmen.

Aus dieser Testrechnung ist für das vorgegebene Beispiel des dampfgekühlten Reaktors D1 der Schluß zu ziehen, daß sich der erhöhte Aufwand nicht lohnt, der zur Berechnung der adjungierten Flußfunktionen notwendig ist. Dies steht im übrigen auch in Übereinstimmung mit anderen Ergebnissen aus Syntheserechnungen.

In der Erkenntnis, daß das Bezugsergebnis in Form einer zweidimensionalen DIXY RZ-Rechnung mit wesentlichen geometrischen Vereinfachungen (Kontroll-

stäbe wurden durch volumengleiche konzentrische Ringe approximiert) höchst unbefriedigend ist, sollte die beschriebene Reihe von Testrechnungen doch folgende Erkenntnisse liefern:

1. Anwendbarkeit von KASY auf einen realen Reaktor.
2. Einfluß der Schrittweitereinteilung auf das Ergebnis.
3. Einfluß der Anzahl und der Auswahl der Versuchsfunktionen auf das Ergebnis.
4. Einfluß der Wahl der Wichtungsfunktionen auf das Ergebnis.

Zu 1.: KASY kann zur Berechnung des effektiven Multiplikationsfaktors und der dreidimensionalen Neutronenverteilung in schnellen Reaktoren eingesetzt werden. Allerdings müssen die Ergebnisse noch sorgfältig untersucht und diskutiert werden, möglichst anhand von Vergleichsrechnungen mit dreidimensionalen Differenzen-Approximations-Programmen.

Zu 2.: Die Schrittweitereinteilung in der zu synthetisierenden Z-Richtung hat nur einen sehr geringen Einfluß auf den effektiven Multiplikationsfaktor. Allerdings empfiehlt es sich, für eine möglichst genaue Darstellung der Neutronenverteilung längs axialer Traversen in der Umgebung von Grenzflächen zwischen Zonen unterschiedlicher Materialzusammensetzung kleine Schrittweiten zu wählen. Die Anzahl der äußeren Iterationen zur Bestimmung der Überlagerungsfunktionen wird durch eine Vergrößerung der Anzahl der Intervalle nur schwach beeinflusst. Die Rechenzeit steigt etwa linear mit der Anzahl der Ortspunkte in der zu synthetisierenden Richtung; allerdings erhöht sich durch eine Erhöhung der Anzahl dieser Ortspunkte die Anzahl der anfallenden und intern zu verwaltenden Daten ganz erheblich.

Zu 3.: Bei der Bestimmung der Anzahl der Versuchsfunktionen hat man davon auszugehen, daß bei einer Berechnung der Neutronenfluß-

verteilung in einem Reaktor mit dem Syntheseverfahren die exakte Lösung (in diesem Fall dargestellt durch das Ergebnis der zweidimensionalen DIXY-RZ-Rechnung) dann am besten approximiert wird, wenn jede axiale Zone im Reaktor mit einer charakteristischen Materialzusammensetzung durch eine Versuchsfunktion repräsentiert wird. Dies zeigten deutlich die Ergebnisse der 2. und 3. Testrechnung, bei denen die Neutronen-Flußverteilung im oberen und unteren axialen Blanket nur sehr unzureichend berechnet wurde. Für beide Gebiete war in diesen Testrechnungen keine Versuchsfunktion berücksichtigt.

Zu 4.: Der erhöhte Aufwand für die Wichtung mit den adjungierten Flußfunktionen ist im Hinblick auf das für diesen Fall des dampfgekühlten Reaktors D1 gewonnene Ergebnis nicht zu rechtfertigen.

Betrachtet man alle 6 Testrechnungen, so ist das Ergebnis bemerkenswert, daß trotz solch massiver Änderungen in den Voraussetzungen, wie sie die wesentliche Verkleinerung der Schrittweiten, das Weglassen, Austauschen und Hinzufügen von Versuchsfunktionen oder die unterschiedliche Wichtung mit den Versuchsfunktionen selbst oder mit den adjungierten Flußfunktionen bedeuten, sämtliche errechneten Werte für den effektiven Multiplikationsfaktor in einem Intervall der Größe

$$k_{\text{eff}} = 1,67 \cdot 10^{-3}$$

bei einer jeweils vorgeschriebenen Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-3}$ liegen.

IVb) Vergleichsrechnungen für KASY mit dem Differenzen-Approximations-Programm WHIRLAWAY zur Lösung der dreidimensionalen Neutronen-Diffusionsgleichung für eine 2-Gruppenrechnung einer modifizierten Form des natriumgekühlten Reaktors Na2

Um weitere Aussagen über die mit KASY erzielten Ergebnisse machen zu können, wurde ein ausgedehnter Vergleich mit dem Differenzen-Approximations-Programm WHIRLAWAY [16] zur Lösung der dreidimensionalen Neutronen-Diffusionsgleichung durchgeführt.

Dieses Programm ist in seiner Anwendung für diese Aufgabe leider einschneidenden Beschränkungen unterworfen. So ist die Maximalzahl der Gitterpunkte des über den Reaktor gelegten Koordinatennetzes auf 12 000 und die Anzahl der zu rechnenden Energiegruppen auf 2 begrenzt. Außerdem sind Rechnungen nur in rechtwinkliger XYZ-Geometrie möglich und als Randbedingung kann nur der Neutronenfluß auf dem Reaktorrand = 0 gesetzt werden.

Trotz dieser Beschränkungen war mit diesem Programm erstmals die Möglichkeit zu einem umfassenden Vergleich gegeben. Die Rechnungen wurden für den natriumgekühlten Reaktor Na2, wie er in [3] beschrieben ist, durchgeführt, wozu allerdings die Darstellung aus Abb. 1 so modifiziert werden mußte, daß eine Rechnung mit WHIRLAWAY möglich war. Es wurden deshalb sämtliche Kreiszyylinder und Kreiszyylinder-Ausschnitte der Anordnung durch flächengleiche Rechtecke ersetzt. Über den so geänderten Reaktor wurde ein Koordinatennetz mit 576 Ortspunkten (24×24) in der XY-Ebene und 20 Ortspunkten in Z-Richtung gelegt. Gerechnet wurde mit 2 Energiegruppen, wobei aus dem 26-Gruppenbild des ABN-Gruppensatzes [1] kondensiert wurde in eine Gruppe schneller Neutronen, welche die Gruppen 1 - 20 (d.h. 10.0 eV - 10.5 MeV) umfaßt, und in eine Gruppe langsamer Neutronen, in der die Gruppen 21 - 26 (d.h. therm. - 10.0 eV) zusammengefaßt sind.

Die KASY-Rechnungen wurden mit 3 Versuchsfunktionen durchgeführt, von denen eine im oberen Blanketbereich, eine zweite im Bereich der oberen Corezone mit eingefahrenen Bor-Absorberstäben und eine dritte im Bereich der unteren Corezone mit Natriumnachfolgern gerechnet wurde. Als Wichtungsfunktionen wurden, wie für alle weiteren Untersuchungen, diese Versuchsfunktionen selbst verwendet.

Für diese Vergleichsrechnung benötigte WHIRLAWAY 42.5 Minuten reine CPU-Zeit auf der Rechenanlage IBM 360/65; KASY 65.5 Minuten Gesamtrechnenzeit auf der etwa 10 mal langsameren Rechenanlage IBM 7074, also einschließlich Rüst- und Organisationszeit für ausgedehnte Bandoperationen und einschließlich der Zeit zur Berechnung der zweidimensionalen Versuchsfunktionen und der makroskopischen Wirkungsquerschnitte mit anschließender Kondensation auf 2 Energiegruppen. Um größtmögliche Übereinstimmung zu erzielen, wurden diese kondensierten, makroskopischen Querschnitte dem Programm WHIRLAWAY

in Kartenformat als äußere Eingabe zugänglich gemacht. (Die Syntheserechnung mit KASY alleine benötigte 17 Minuten.)

Dabei ergaben sich für den effektiven Multiplikationsfaktor folgende Ergebnisse:

$$k_{\text{eff}} = 0.9950 \quad \text{mit KASY}$$
$$k_{\text{eff}} = 0.9944 \quad \text{mit WHIRLAWAY,}$$

also eine Abweichung in dieser integralen Größe von 0.6 ‰. Speziell untersucht wurde dann der Flußverlauf längs axialer Traversen in besonders ausgesuchten Punkten des Reaktorquerschnitts:

- im Reaktorzentrum
- in beiden radialen Corezonen
- in 2 bis zur Hälfte eingefahrenen Bor-Absorberstäben
mit Übergang in einen mit Natrium gefüllten
Kühlkanal
- im radialen Blanket, nahe am Reaktorrand.

Für einen optischen, qualitativen Vergleich sind die mit KASY gewonnenen Ergebnisse für die Gruppe schneller Neutronen auf der oberen Hälfte der Abb. 10 den mit WHIRLAWAY erzielten Ergebnissen auf der unteren Hälfte gegenübergestellt. Aufgetragen sind über Z die auf ein Spaltneutron im Reaktor normierten Werte für den Neutronenfluß. Dabei zeigt sich für diese Energiegruppe global eine gute Übereinstimmung.

Abb. 11 zeigt dieselbe Gegenüberstellung für die Gruppe langsamer Neutronen. Auch hier wird der charakteristische Flußverlauf längs der untersuchten axialen Traversen weitgehend genau wiedergegeben.

Zur quantitativen Analyse des Verlaufs der Neutronenverteilung, wie sie durch KASY und WHIRLAWAY wiedergegeben wird, wurde das Volumenintegral der Neutronendichte auf 1 normiert. Für jeweils beide Energiegruppen sind in den Abbildungen 12 - 15 die normierten Flußverläufe, wie sie mit KASY und WHIRLAWAY errechnet wurden, längs einer Traverse über Z aufgetragen.

Abb. 14 zeigt den Flußverlauf für eine durch die äußere 2. Corezone verlaufende axiale Traverse. Man erkennt für die Gruppe schneller Neutronen eine nahezu vollständige Übereinstimmung der durch KASY berechneten Ergebnisse, die durch Kreuze dargestellt sind und die für diese Gruppe ausschließlich auf der Kurve liegen, welche die WHIRLAWAY-Ergebnisse

darstellt.

Abweichungen der Ergebnisse treten in der Gruppe der langsamen Neutronen hauptsächlich im Core auf, wo diese Abweichungen, bezogen auf die Maximalwerte, jedoch höchstens 1,2% ausmachen.

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen einen Vergleich der Flußverläufe längs axialer Traversen, die zunächst in bis zur Hälfte eingefahrenen Bor-Absorberstäben verlaufen und dann ab einer Tiefe, die mit 108 cm gekennzeichnet ist, in einen mit Natrium gefüllten Kühlkanal übergehen.

In beiden Fällen ist die Übereinstimmung in der Gruppe der schnellen Neutronen sehr zufriedenstellend (auch wenn man berücksichtigt, daß darin Neutronen mit einer Energie von 10,0 eV - 10,5 MeV zusammengefaßt sind).

Für die Gruppe langsamer Neutronen ergeben sich jedoch Diskrepanzen und zwar von unterschiedlicher Art, je nachdem, ob die axiale Traverse in einem Stab auf dem inneren oder auf dem äußeren Ring verläuft.

Zwar wird auch hier noch der charakteristische Flußverlauf wiedergegeben, doch fällt der Vergleich der absoluten Zahlen etwas ungünstig aus. KASY ermittelt im Bereich der starken Borabsorber sogar negative Flüsse, welche dieselben Ursachen haben, wie sie bei den Untersuchungen für den dampfgekühlten Reaktor D1 in IVa) beschrieben sind.

Bei der Betrachtung der Abb. 12, in welcher der axiale Flußverlauf in einem Kontrollstab auf dem äußeren Ring dargestellt ist, fällt auf, daß von einer Übereinstimmung der Ergebnisse im Borteil des Stabs keine Rede sein kann, andererseits aber der starke Anstieg des Neutronenflusses beim Übergang in den Natriumteil und der Verlauf darin durch KASY durchaus befriedigend wiedergegeben wird.

In Abb. 13, in welcher der axiale Flußverlauf in einem Kontrollstab auf dem inneren Ring dargestellt ist, sind die Abweichungen im Borteil nicht so extrem; andererseits erreicht der durch KASY berechnete Neutronenfluß beim Durchgang des Natriumkanals durch das untere Blanket um einen Faktor 10 nicht das Maximum des durch WHIRLAWAY berechneten Flusses. Man darf

annehmen, daß diese Abweichung durch eine Syntheserechnung mit 4 Versuchsfunktionen wesentlich korrigiert werden kann, da unter den drei verwendeten Versuchsfunktionen keine enthalten ist, welche die Verhältnisse in diesem axialen Reaktorbereich des axialen Blankets, durchsetzt mit Natrium-Kühlkanälen, genügend gut repräsentiert.

Außerdem muß berücksichtigt werden, daß in diesem Fall auch die Ergebnisse von WHIRLAWAY nicht als absoluter Maßstab angesehen werden können. Maxima und Minima im Verlauf des Neutronenflusses, wie sie im Borteil im oberen Blanketbereich und in der oberen Corezone auftreten, sind physikalisch nicht zu klären. Die Ursache für diese unphysikalischen Ergebnisse in beiden Berechnungsarten dürfte sein, daß an solchen Stellen mit starken Absorbern im Reaktor die Diffusionsnäherung unzulässig ist, da die Diffusionsnäherung steile Flußgradienten nicht gut beschreiben kann.

Diese offensichtliche Schwäche von KASY und anderer Rechenprogramme, die sich auf die Diffusionsnäherung beziehen und solche Erscheinungen nicht gesondert behandeln, kann unter Umständen durch eine Erweiterung des Programms beseitigt werden; etwa durch die Einführung von inneren Randbedingungen an den Grenzen zwischen starken Absorbern und Corematerial, indem man die Absorber durch Extrapolationslängen beschreibt, wie dies auch in [15] vorgesehen ist.

Abb. 15 zeigt den Vergleich der durch KASY und WHIRLAWAY berechneten Flußverläufe längs axialer Traversen im radialen Blanket, sehr nahe am Reaktorrand.

Für die Gruppe schneller Neutronen ergibt sich dabei eine konstante Abweichung um etwa einen Faktor 2, der sich aus den unterschiedlichen Randbedingungen erklärt, die für diese Vergleichsrechnung verwendet wurden. Bei der Berechnung mit WHIRLAWAY wurde der Fluß auf dem gesamten Reaktorrand = 0 vorgeschrieben, während für die Berechnung der Versuchsfunktionen für die Syntheserechnung mit KASY der Neutronenfluß auf dem gruppenabhängigen extrapolierten Rand in X- und Y-Richtung = 0 vorgeschrieben wurde. In Z-Richtung bestand jedoch Übereinstimmung in den Randbedingungen.

Interessanter ist jedoch auch hier der Vergleich der Traversen für die Gruppe der langsamen Neutronen. Die durch WHIRLAWAY berechnete Traverse zeigt etwa den erwarteten glatten Sinusverlauf. Der durch KASY berechnete

Verlauf zeigt im oberen und unteren axialen Blanket genau dieselben Flußaufwölbungen, die sich auch für alle axialen Traversen ergeben, die durch das Core verlaufen.

Hier erkennt man wieder die schon in IVa) diskutierte Schwäche eines Syntheseverfahrens der angewendeten Art. Für einen horizontalen Reaktorquerschnitt wurde wieder lediglich ein Satz von Überlagerungsfunktionen berechnet, der so unterschiedliche Verhältnisse beschreiben soll, wie sie beispielsweise im Core, im radialen Blanket oder in einem eingefahrenen Absorberstab gegeben sind. Schon von der Anschauung her ist dabei zu erwarten, daß beim Vorgang der Syntheserechnung eine Art Mittelwertbildung durchgeführt wird, extreme Verhältnisse an bestimmten Stellen im Reaktor also nicht in gewünschtem Maß wiedergegeben werden können. Auch hier zeigt sich wieder deutlich die Notwendigkeit eines Multichannel-Verfahrens, wenn man die gewonnenen Ergebnisse entscheidend verbessern will.

Interessant ist auch hier wieder die Darstellung der in den Abbildungen 16 und 17 gezeichneten, von KASY berechneten Überlagerungsfunktionen für die beiden Energiegruppen. Eine solche Überlagerungsfunktion ergibt sich für jede Energiegruppe jeder zweidimensionalen Versuchsfunktion für den ganzen Reaktor, die für die Syntheserechnung zur Bestimmung des dreidimensionalen Neutronenflusses herangezogen wird. In diesem Fall also für jede Energiegruppe jeweils eine für die für das obere Blanket, die obere Corezone im Bereich der eingefahrenen Absorber und für die untere Corezone im Bereich der natriumgefüllten Kühlkanäle berechneten Versuchsfunktion. Diese Überlagerungsfunktionen lassen nun wieder Rückschlüsse auf die Güte der gewählten Versuchsfunktionen zu. Aus Abb. 16, welche die Überlagerungsfunktionen für die Gruppe der schnellen Neutronen darstellt, ist zu ersehen, daß die für die beiden axialen Corezonen berechneten Versuchsfunktionen wieder zweifellos gut gewählt waren, wie die Tatsache zeigt, daß sowohl die Maxima als auch die weitaus größten Flächenintegrale der für sie berechneten Überlagerungsfunktionen in den zugehörigen Gebieten liegen. Die Überlagerungsfunktion für die im oberen Blanket berechnete Versuchsfunktion zeigt dagegen diese Eigenschaften nicht.

Abb. 17 stellt dieselben Überlagerungsfunktionen für die Gruppe langsamer Neutronen dar. Für die Überlagerungsfunktionen für die in den beiden

axialen Corezonen berechneten Versuchsfunktionen gilt dasselbe wie für die Gruppe schneller Neutronen. Hier zeigt jedoch die Überlagerungsfunktion zu der für das obere Blanket berechneten Versuchsfunktion in beiden axialen Blanketbereichen ausgeprägte Maxima. Diese erfreuliche positive Erscheinung wird aber durch negative Vorzeichen für die zu den in den beiden axialen Corezonen repräsentativen Versuchsfunktionen berechneten Überlagerungsfunktionen in diesen Bereichen der axialen Blankets sofort wieder kompensiert.

Trotz aller Mängel des Programms WHIRLAWAY für die Durchführung einer solchen Vergleichsrechnung mit einem Syntheseprogramm waren doch interessante Gesichtspunkte aus diesen Ergebnissen zu gewinnen. Sieht man von außergewöhnlichen Stellen im Reaktor für die Gruppe der langsamen Neutronen ab, wie sie etwa im Innern von Absorberstäben, in der Nähe des Reaktorrandes oder an Grenzflächen zwischen Bereichen unterschiedlicher Zusammensetzung gegeben sind, so kann man von einer sehr guten Übereinstimmung der Ergebnisse sprechen, wie sie das Syntheseprogramm KASY und das Differenzen-Approximations-Programm WHIRLAWAY liefern. Ein Vergleich der notwendigen Rechenzeiten ist an dieser Stelle noch nicht angebracht, da beide Rechnungen auf sehr unterschiedlichen Rechenanlagen durchgeführt wurden.

IVc) Vergleichsrechnungen für KASY mit dem Differenzen-Approximations-Programm TRITON zur Lösung der dreidimensionalen Neutronen-Diffusionsgleichung für eine 5-Gruppenrechnung des Reaktors ZPRIII-Assembly 48

Weitere Untersuchungen zur Überprüfung der Qualität der mit KASY erzielten Ergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Belgonucléaire, Brüssel, durchgeführt. Mitarbeiter der Firma Belgonucléaire [19] führten die ausgedehnten Vergleichsrechnungen mit dem in Ispra/Italien verfügbaren Programm TRITON [21] durch und übernahmen die umfangreichen Auswertungen.

Bei TRITON handelt es sich um ein Differenzen-Approximations-Programm zur Lösung der dreidimensionalen Multigruppen-Diffusionsgleichung mit 9-Punkte-Differenzenformeln; das aufgestellte Gleichungssystem wird mit

dem Überrelaxationsverfahren mit Tschebyscheff-Beschleunigung aufgelöst. Dabei sind folgende Beschränkungen zu beachten:

Maximale Anzahl der Ortspunkte (dreidimensional)	8000
davon in einer Dimension maximal	200
Maximale Anzahl der Energiegruppen	10

Die Rechenzeit ist proportional der Gruppenzahl.

Für diese Vergleichsrechnungen konnte erstmals die für die Rechenanlage IBM System 360 Modell 65 fertiggestellte FORTRAN IV-Version von KASY eingesetzt werden, nachdem auch diese Version bei dem früher genannten Testbeispiel des homogenen Reaktors den analytisch berechneten Wert für den effektiven Multiplikationsfaktor reproduzierte.

Die Vergleichsrechnungen wurden durchgeführt für den Reaktor ZPR III - Assembly 48, wie er in den Abbildungen 18 und 19 in Grund- und Aufriß dargestellt ist, wobei auf eine möglichst weitgehende Übereinstimmung der Ausgangsdaten für beide Berechnungsarten Wert gelegt wurde. So wurden beispielsweise die in Ispra berechneten makroskopischen Wirkungsquerschnitte für die TRITON-Rechnungen als äußere Eingabe im Kartenformat auch in KASY verwendet.

Leider wurden für die TRITON-Rechnungen 19 Koordinatenpunkte in jeder Richtung gewählt, während für KASY in X- und Y-Richtung 20 Ortspunkte festgelegt werden mußten, weil für die Berechnung der zweidimensionalen Versuchsfunktionen mit dem Programm DIXY dort geltende Vorschriften einzuhalten sind. In Z-Richtung wurde bei den KASY-Rechnungen der axiale Stahlreflektor nicht berücksichtigt, weil eine dafür repräsentative Versuchsfunktion nicht unmittelbar aus einer zweidimensionalen Rechnung zu gewinnen ist. Der Einfluß dieses Stahlreflektors auf das Ergebnis ist außerdem nicht sehr groß, da bei der entsprechenden TRITON-Rechnung nur die leeren Halterungsvorrichtungen für die Stahlstäbe berücksichtigt wurden. Aus diesem Grund wurden in Z-Richtung bei den KASY-Rechnungen nur 17 Ortspunkte, gegenüber 20 bei den TRITON-Rechnungen, festgelegt.

Die Genauigkeitsschranken wurden in beiden Fällen auf 10^{-3} für den effektiven Multiplikationsfaktor festgesetzt; in KASY wurde außerdem noch eine Fehlerschranke für die Überlagerungsfunktionen mit $5 \cdot 10^{-3}$ festgelegt.

Gerechnet wurden jeweils 3 Anordnungen für den zentralen Kontrollstab:

1. ohne Bor-Absorberstab, also nur Stahlnachfolger im Testkanal
2. Bor-Absorberstab bis zur Reaktormitte eingefahren, Rest Stahlnachfolger
3. Bor-Absorberstab ganz eingefahren.

Dabei wurden folgende Größen verglichen:

1. der effektive Multiplikationsfaktor k_{eff}
2. der Reaktivitätswert für den Kontrollstab
3. die Verteilung des Neutronenflusses
4. die Rechenzeit

Für die Vergleichsrechnungen wurden folgende Gesichtspunkte berücksichtigt:

1. Der Berechnung der makroskopischen Wirkungsquerschnitte wurde der ABBN-Gruppensatz der Firma Belgonucléaire zugrunde gelegt.
2. Zur Kondensation der für 26 Energiegruppen berechneten Wirkungsquerschnitte auf 5 Energiegruppen wurde mit dem eindimensionalen Programm PANOPLIE ein Spektrum berechnet; die Kondensation selbst folgte dem 5-, 3-, 3-, 3-, 12-Schema.
3. Für die KASY-Rechnungen wurden 3 Versuchsfunktionen mit dem Programm DIXY für 3 verschiedene axiale Zonen auf folgende Weise ermittelt (siehe auch Abb. 19):

oberes axiales Blanket mit B_4C	Zone 1	H_1
obere Corezone mit B_4C	Zone 2	H_2
untere Corezone mit Stahl	Zone 3	H_3

Die Zuordnung für die 3 verschiedenen Teilrechnungen geschah dann wie folgt:

Anordnung	Versuchsfunktion	repräsentierte axiale Zone
Ohne Bor-Absorberstab	$\left\{ \begin{array}{l} H_1 \\ H_3 \end{array} \right.$	(4) (3)
Bor-Absorberstab bis zur Hälfte eingefahren	$\left\{ \begin{array}{l} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{array} \right.$	(1) und (4) (2) (3)
Bor-Absorberstab ganz eingefahren	$\left\{ \begin{array}{l} H_1 \\ H_2 \end{array} \right.$	(1) (2)

Bei der 1. und 3. Anordnung wird die zweite Hälfte des Reaktors jeweils durch symmetrische Randbedingungen berücksichtigt.

Unter diesen Voraussetzungen ergaben sich dann die folgenden, vergleichbaren Ergebnisse für den effektiven Multiplikationsfaktor k_{eff} :

Anordnung	TRITON	KASY
Ohne Bor-Absorberstab	0.9889	0.9887
Bor-Absorberstab zur Hälfte eingefahren	0.9782	0.9781
Bor-Absorberstab ganz eingefahren	0.9683	0.9681

Diese ausgezeichnete Übereinstimmung in den ermittelten Ergebnissen für den effektiven Multiplikationsfaktor schlägt sich auch in den Reaktivitätswerten für den Kontrollstab nieder:

Anordnung	Δk_{eff} (TRITON)	Δk_{eff} (KASY)
Bor-Absorberstab zur Hälfte eingefahren	1.07 %	1.06%
Bor-Absorberstab ganz eingefahren	2.06%	2.06%

Im Verlauf der Berechnung dieser Ergebnisse trat erstmals der Fall ein, daß keine Konvergenz beim Ausiterieren des Gleichungssystems (II.10) zu erzielen war. Dies läßt sich dadurch erklären, daß die für die Auflösung des linearen Gleichungssystems (II.10) geforderte lineare Unabhängigkeit der dem Verfahren zugrunde gelegten Versuchsfunktionen "nicht in ausreichendem Maß" gegeben war. Der durch eine zweidimensionale Diffusionsrechnung ermittelte allgemeine Flußverlauf im oberen axialen Blanket und in der oberen Corezone mit dem zentralen Bor-Absorberstab wird sich naturgemäß (von einem konstanten Faktor abgesehen) nicht stark unterscheiden. Der Verlauf des Neutronenflusses in der unteren Corezone mit dem Stahlnachfolger wird ebenfalls nur im Inneren des zentralen Kontrollstabs und in dessen unmittelbarer Umgebung Abweichungen aufweisen.

Diese Erkenntnis führte zur Aufnahme der Subroutine FLUVOR in das Programm KASY, welche die einzelnen Versuchsfunktionen vor Durchführung der eigentlichen Syntheserechnung orthonormiert.

Seit der Aufnahme dieser Subroutine FLUVOR hat die Frage der Konvergenz bei Rechnungen mit KASY keine Rolle mehr gespielt. Fälle, die vorher 300 - 500 äußere Iterationen benötigten, bis sie zu einer vorgegebenen Genauigkeit ausiteriert waren, benötigten nach der Orthonormierung noch 10 - 30 äußere Iterationen. Das Endergebnis selbst blieb davon unberührt. Dabei ist der Zeitaufwand für die Orthonormierung praktisch zu vernachlässigen. Er bewegt sich zwischen 10 und 20 Sekunden für die Orthonormierung von 4 Versuchsfunktionen mit 5 Energiegruppen und zweidimensional 1760 Ortspunkten.

Auch bezüglich der Art der Versuchsfunktionen bringt die Orthonormierung eine Vereinfachung. Vorher (siehe IVa) mußten noch mit erheblichem Aufwand zonen- und energiegruppenabhängige axiale Bucklings bestimmt werden, namentlich für die Berechnung der Versuchsfunktionen in den axialen Blankets. Dadurch sollte ein "gewisses Maß" an linearer Unabhängigkeit von den für die benachbarten Corebereiche berechneten Versuchsfunktionen gewährleistet werden. Diese Notwendigkeit entfällt, wenn die Versuchsfunktionen vor ihrer Verwendung orthonormiert werden. Selbstverständlich können aber auch weiterhin axiale Bucklings für die Berechnung der Versuchsfunktionen berücksichtigt werden, wenn dadurch spezielle physikalische Gegebenheiten in dem betreffenden horizontalen Reaktorschnitt repräsentiert werden sollen.

Die mit KASY und TRITON ermittelten Flußverteilungen längs axialer Traversen durch den Reaktor für die verschiedenen Anordnungen des Absorberstabs sind in den Tabellen der Abbildungen 20 und 21 enthalten. Die für die einzelnen Energiegruppen angegebenen Zahlen über den einzelnen Spalten beziehen sich auf die Positionen der betreffenden axialen Traverse, wie sie in Abb. 18 eingetragen sind. Die Zahlen vor den einzelnen Zeilen geben die Reaktortiefe an. Normiert wurde jeweils auf den Maximalwert des Neutronenflusses,

der sich für die 2. Energiegruppe für die Anordnung ohne Kontrollstab im Reaktorzentrum ergab.

Bei der Firma Belgonucléaire wurde dabei eine Genauigkeit der mit KASY berechneten Flüsse, im Vergleich mit den durch TRITON ermittelten Werten, wie folgt festgestellt (angegeben sind die aufgetretenen Maximalabweichungen):

- 0.3% im Reaktorcore
- 2 % im radialen Blanket
- 1 % im eingefahrenen Teil des zentralen Borstabs und Stahlnachfolgers.

Der gesamte Vergleich wurde für solche Punkte durchgeführt, die in einer Symmetrieebene ($Y=0$ in Abb. 18) des Reaktors liegen. Für diese Punkte mußten also die symmetrischen Randbedingungen (Strom = 0) erfüllt sein. Da solche Randbedingungen in verschiedenen Programmen durchaus unterschiedlich behandelt werden können, sind dadurch hervorgerufene kleine Abweichungen der Ergebnisse möglich.

Beim Vergleich der Rechenzeiten ist zu beachten, daß erstmals beide Vergleichsrechnungen auf einer Rechenanlage des selben Typs, IBM System 360, Modell 65, durchgeführt wurden.

Mit dem Programm TRITON mußte jede Anordnung des Bor-Absorberstabs neu und getrennt gerechnet werden, wodurch sich folgende Gesamtrechenzeit für die gesamte Untersuchung ergab:

Anordnung	Rechenzeit
ohne Bor-Absorberstab	19 Min
Bor-Absorberstab zur Hälfte eingefahren	40 Min
Bor-Absorberstab ganz eingefahren	20 Min
<hr/>	
Gesamtrechenzeit	79 Min

Bei der Syntheserechnung mit KASY konnten die drei Versuchsfunktionen für die drei charakteristischen axialen Reaktorquerschnitte einmal im voraus berechnet und, wie oben dargestellt, für die einzelnen Stabanordnungen

für das Variationsverfahren entsprechend herangezogen werden. Für KASY ergab sich dadurch folgende Gesamtrechnenzeit:

Berechnung der drei Versuchsfunktionen	4 Min 46 Sek
3 Syntheserechnungen mit KASY	1 Min 14 Sek
3 Ausgaben der 3 dim. Neutronenflüsse	54 Sek
<hr/>	
Gesamtrechnenzeit	6 Min 54 Sek

IVd) 5-, 12- und 26-Gruppenrechnung für den natriumgekühlten Reaktor Na2

Um einen Begriff von der Leistungsfähigkeit des Flußsynthese-Programms KASY bei ausgedehnten Problemstellungen zu bekommen, wurden umfangreiche Rechnungen im 5-, 12- und 26-Gruppenbild für den natriumgekühlten Reaktor Na2 durchgeführt. Dieser Reaktor besteht im wesentlichen aus einem oberen Core-Bereich mit einer inneren und einer äußeren Corezone mit jeweils einer radialen Bank eingefahrener Bor-Absorberstäbe, einem unteren Core-Bereich mit denselben Zonen und Natriumnachfolgern sowie einem oberen, einem unteren und einem radialen Blanket.

Genauere Angaben über den Aufbau, die Geometrie und die Zusammensetzung der einzelnen Materialzonen des natriumgekühlten Reaktors Na2 sind in [37] enthalten. Die genauen Abmessungen sind in Abb. 22 eingetragen. Da bei diesen Testrechnungen erstmals auch Flußintegrale für die einzelnen Materialzonen berechnet wurden, wird die Zusammensetzung der einzelnen Mischungen hier angegeben. Festgelegt wurden 8 Mischungen, die sich im einzelnen wie folgt zusammensetzen (angegeben werden die Teilchenzahlen in 10^{+24}):

Mischung 1	Cr52 $1.23 \cdot 10^{-3}$	Mischung 5	Cr52 $2.87 \cdot 10^{-3}$
(zentraler Kühlkanal)	Fe56 $5.07 \cdot 10^{-3}$	(axiales Blanket	Fe56 $1.14 \cdot 10^{-2}$
	Na23 $2.02 \cdot 10^{-2}$	über und unter der	Na23 $1.01 \cdot 10^{-2}$
	Nb93 $4.50 \cdot 10^{-5}$	äußeren Corezone)	Nb93 $1.09 \cdot 10^{-4}$
	Ni59 $1.00 \cdot 10^{-3}$		Ni59 $2.26 \cdot 10^{-3}$
			O16 $1.33 \cdot 10^{-2}$
			Pu239 $3.33 \cdot 10^{-5}$
			Si28 $1.49 \cdot 10^{-4}$
			U235 $1.66 \cdot 10^{-5}$
			U238 $6.61 \cdot 10^{-3}$

Mischung 2 (innere Corezone)	Cr52	$2.87 \cdot 10^{-3}$
	Fe56	$1.14 \cdot 10^{-2}$
	Na23	$1.01 \cdot 10^{-2}$
	Nb93	$1.09 \cdot 10^{-4}$
	Ni59	$2.26 \cdot 10^{-3}$
	O16	$1.40 \cdot 10^{-2}$
	Pu239	$9.70 \cdot 10^{-4}$
	Pu240	$3.16 \cdot 10^{-4}$
	Pu241	$4.40 \cdot 10^{-5}$
	Pu242	$8.30 \cdot 10^{-6}$
	Si28	$1.49 \cdot 10^{-4}$
	SPP90	$2.36 \cdot 10^{-4}$
	U235	$1.00 \cdot 10^{-5}$
U238	$5.05 \cdot 10^{-3}$	

Mischung 3 (äußere Corezone)	Cr52	$2.88 \cdot 10^{-3}$
	Fe56	$1.14 \cdot 10^{-2}$
	Na23	$1.01 \cdot 10^{-2}$
	Nb93	$1.09 \cdot 10^{-4}$
	Ni59	$2.26 \cdot 10^{-3}$
	O16	$1.40 \cdot 10^{-2}$
	Pu239	$1.45 \cdot 10^{-3}$
	Pu240	$4.63 \cdot 10^{-4}$
	Pu241	$5.92 \cdot 10^{-5}$
	Pu242	$1.13 \cdot 10^{-5}$
	Si28	$1.49 \cdot 10^{-4}$
	SPP90	$1.82 \cdot 10^{-4}$
	U235	$1.00 \cdot 10^{-6}$
U238	$4.49 \cdot 10^{-3}$	

Mischung 4 (axiales Blanket- über und unter der inneren Corezone)	Cr52	$2.87 \cdot 10^{-3}$
	Fe56	$1.14 \cdot 10^{-2}$
	Na23	$1.01 \cdot 10^{-2}$
	Nb93	$1.09 \cdot 10^{-4}$
	Ni59	$2.26 \cdot 10^{-3}$
	O16	$1.49 \cdot 10^{-2}$
	Pu239	$3.72 \cdot 10^{-5}$
	Si28	$1.49 \cdot 10^{-4}$
	U235	$1.85 \cdot 10^{-5}$
	U238	$7.38 \cdot 10^{-3}$

Mischung 6 radiales Blanket)	Cr52	$3.11 \cdot 10^{-3}$
	Fe56	$1.24 \cdot 10^{-2}$
	Na23	$6.71 \cdot 10^{-3}$
	Nb93	$1.09 \cdot 10^{-4}$
	Ni59	$2.46 \cdot 10^{-3}$
	O16	$2.10 \cdot 10^{-2}$
	Pu239	$2.09 \cdot 10^{-5}$
	Si28	$1.62 \cdot 10^{-4}$
U235	$2.00 \cdot 10^{-5}$	
U238	$1.04 \cdot 10^{-2}$	

Mischung 7 (B ₄ C-Absorber- stäbe)	B10	$7.56 \cdot 10^{-3}$
	B11	$1.13 \cdot 10^{-2}$
	C12	$4.73 \cdot 10^{-3}$
	Cr52	$3.86 \cdot 10^{-3}$
	Fe56	$1.53 \cdot 10^{-2}$
	Na23	$1.17 \cdot 10^{-2}$
Nb93	$1.35 \cdot 10^{-4}$	
Ni59	$4.32 \cdot 10^{-3}$	
Si28	$2.01 \cdot 10^{-4}$	

Mischung 8 (Natrium-Nach- folger)	Cr52	$3.86 \cdot 10^{-3}$
	Fe56	$1.53 \cdot 10^{-2}$
	Na23	$1.59 \cdot 10^{-2}$
	Nb93	$1.35 \cdot 10^{-4}$
	Ni59	$3.04 \cdot 10^{-3}$
	Si28	$2.01 \cdot 10^{-4}$

Die für die Berechnung erforderlichen makroskopischen Wirkungsquerschnitte wurden mit den "26-GR.KFKSET 035" mit den im Karlsruher Programmsystem NUSYS [20] dafür vorgesehenen Programmen berechnet.

Leider ist im Augenblick noch kein Programm verfügbar, das Vergleichsrechnungen mit einem Differenzen-Approximationscode für solch umfangreiche Problemstellungen erlaubt. Die Qualität der mit KASY durch die Syntheserechnungen gewonnenen Ergebnisse kann deshalb nur an Hand von physikalischen Erfahrungen geprüft werden.

Die Rechnungen wurden in R θ /Z-Geometrie durchgeführt, d.h. die zweidimensionalen Versuchsfunktionen wurden für R θ -Ebenen des Reaktors mit 1760 Ortspunkten, davon 40 in R- und 44 in θ -Richtung, berechnet; synthetisiert wurde in Z-Richtung, in der 36 Punkte festgelegt wurden.

Zunächst wurden 4 Versuchsfunktionen in 4 Reaktorebenen für jeweils 26 Energiegruppen berechnet. Dabei wurden

8 Mischungen (wie angegeben)

20 Materialzonen

26 Energiegruppen

$1 \cdot 10^{-3}$ für die Genauigkeit des effektiven

Multiplikationsfaktors k_{eff}

$5 \cdot 10^{-3}$ für die Genauigkeit der Versuchsfunktionen

festgelegt. Außerdem wurden für die Bestimmung jeder einzelnen Versuchsfunktion gruppenabhängige axiale Bucklings berechnet. (Die Erkenntnisse des Vergleichs KASY-TRITON, die zur Orthonormierung der Versuchsfunktionen geführt haben, lagen zum Zeitpunkt der Berechnung dieser Versuchsfunktionen noch nicht vor.) Damit ergaben sich in den angegebenen Rechenzeiten für die einzelnen Versuchsfunktionen folgende Werte für den effektiven Multiplikationsfaktor:

1. Versuchsfunktion, repräsentiert die im oberen axialen Blanket mit eingefahrenen Absorberstäben gegebenen Verhältnisse:

$$k_{\text{eff}} = 0.6151$$

Rechenzeit: 41 Min 23 Sek bei 12 äußeren Iterationen.

2. Versuchsfunktion, repräsentiert den oberen Corebereich mit eingefahrenen Absorberstäben:

$$k_{\text{eff}} = 0.8765$$

Rechenzeit: 33 Min 43 Sek bei 10 äußeren Iterationen.

3. Versuchsfunktion, repräsentiert den unteren Corebereich mit Natriumnachfolgern:

$$k_{\text{eff}} = 1.0062$$

Rechenzeit: 38 Min 39 Sek bei 12 äußeren Iterationen.

4. Versuchsfunktion, repräsentiert das untere axiale Blanket mit Natriumnachfolgern:

$$k_{\text{eff}} = 1.3926$$

Rechenzeit: 29 Min 41 Sek bei 9 äußeren Iterationen.

Bei der Berechnung der 4. Versuchsfunktion wurde offensichtlich der Betrag des negativ gewählten Bucklings, das in diesem Fall ein Einströmen von Neutronen aus der benachbarten Corezone beschreiben sollte, überschätzt. Diese Versuchsfunktion wurde auch nur einmal zu einer Vergleichsrechnung für eine 5-Gruppenrechnung herangezogen, wobei sie auch zur Vergrößerung des ~~des~~ effektiven Multiplikationsfaktors beitrug, wie dies auch erwartet werden mußte (vergl. IVd) - α : 5-Gruppenrechnung).

Nach dem Einbau der Möglichkeit in das Programm KASY, die verschiedenen Versuchsfunktionen zu orthonormieren, kann, wie schon in IVc) beschrieben, auf die teilweise mühsame Berechnung geeigneter Bucklings verzichtet werden. Es kann sogar im Gegensatz dazu die Ansicht vertreten werden, daß die Versuchsfunktionen dann für das Syntheseverfahren am geeignetsten bestimmt werden, wenn davon ausgegangen wird, daß sie die physikalisch gegebenen Verhältnisse in einem in axialer Richtung unendlich ausgedehnten Zylinder mit dem entsprechenden Querschnitt repräsentieren und der Übergang des Neutronenflusses zwischen den einzelnen charakteristischen Schichten durch das Syntheseverfahren geleistet wird. Dazu sind dann axiale Bucklings nicht mehr notwendig.

Die Gesamtzeit zur Berechnung der für das Syntheseverfahren bestimmten Versuchsfunktionen 1. - 4. betrug also

2 Stunden 23 Minuten 25 Sekunden

auf der Rechenanlage IBM System 360 Modell 65.

α) 5-Gruppenrechnung

Zunächst wurde eine Syntheserechnung für 5 Energiegruppen durchgeführt, indem die oben beschriebenen 3 ersten Versuchsfunktionen durch Flußaddition von 26 auf 5 Energiegruppen kondensiert und anschließend orthonormiert wurden. Dabei wurde folgende Einteilung vorgenommen:

1. Gruppe (Gruppen 1 - 5 des 26-GR.KFKSET 035)	0,8 - 10,5 MeV
2. Gruppe (Gruppen 6 -10 des 26-GR.KFKSET 035)	21,5 - 800 KeV
3. Gruppe (Gruppen 11-15 des 26-GR.KFKSET 035)	0,465- 21,5 KeV
4. Gruppe (Gruppen 16-20 des 26-GR.KFKSET 035)	10,0 - 465 eV
5. Gruppe (Gruppen 21-26 des 26-GR.KFKSET 035)	therm.- 10,0 eV

Für die Syntheserechnung mit KASY wurde ebenfalls (wie für die Berechnung der Versuchsfunktionen) eine Genauigkeit von

$$1 \cdot 10^{-3} \text{ für den effektiven Multiplikationsfaktor } k_{\text{eff}} \text{ und}$$
$$5 \cdot 10^{-3} \text{ für die Überlagerungsfunktionen}$$

vorgeschrieben. Nach 28 äußeren Iterationen ergab sich bei einer Rechenzeit (für Syntheserechnung einschließlich Kondensation und Orthonormierung der Versuchsfunktionen) von

$$3 \text{ Min } 34 \text{ Sek}$$

ein effektiver Multiplikationsfaktor

$$k_{\text{eff}} = 0,9409.$$

Mit Hilfe des Ausgabeprogramms AGABE wurden Skizzen tangentialer, radialer und axialer Traversen über die Neutronenfluß-Verteilung ausgegeben. Über die Anordnung der einzelnen Traversen im Reaktormodell gibt Abb. 22 Aufschluß. In zwei Ebenen, von denen die eine im oberen Corebereich mit eingefahrenen Bor-Absorberstäben und die andere im unteren Corebereich mit den Natriumnachfolgern liegt, werden jeweils 2 tangentiale und 3 radiale Traversen gezeichnet. Die erste tangentiale Traverse (β) verläuft durch die Stabbank auf dem äußeren Radius, die zweite (α) in der ersten Corezone, nahe der Grenze zur zweiten Corezone. Die erste radiale Traverse (a) verläuft durch zwei Stabpositionen, die zweite (b) durch den Raum zwischen den Stäben und die dritte (c) durch eine Stabposition. Die Positionen der axialen Traversen sind auf zwei Radialstrahlen angeordnet, und zwar so,

daß jeweils eine in der Nähe des Reaktorzentrums ((1) und (6)), eine durch einen Stab (2) bzw. den Raum zwischen den Stäben (7), jeweils zwei auf beiden Seiten der Grenze zwischen erster und zweiter Corezone ((3), (4) und (8), (9)) und jeweils eine weitere im radialen Blanket ((5) und (10)), nahe der Grenze zur zweiten Corezone verläuft.

In den Abbildungen 23 - 32 sind tangentiale Flußtraversen für alle 5 gerechneten Energiegruppen dargestellt. Aus den Abbildungen 23 und 24 ist für die erste Energiegruppe zu ersehen, daß die Traversen α durch die erste Corezone für beide Ebenen nahezu linear verlaufen, unabhängig davon, ob sich Absorber oder Natriumnachfolger in der Umgebung befinden. Auch die durch die Stabbank verlaufenden Traversen β unterscheiden sich für die erste Energiegruppe kaum; lediglich die in den Stäben auftretenden Flußminima sind für die Absorber (in Abb. 23) gegenüber den Nachfolgern (in Abb. 24) etwas stärker ausgeprägt.

Für die zweite Energiegruppe, dargestellt in den Abbildungen 25 und 26, ergibt sich für die tangentialen Traversen (α), durch die erste Corezone derselbe nahezu lineare Flußverlauf wie für die erste Energiegruppe. Für die durch die Stabbank verlaufenden Traversen (β) ergeben sich jedoch insofern Abweichungen gegenüber der ersten Energiegruppe, als die durch die Natriumnachfolger verlaufende Traverse (Abb. 26) ebenfalls nahezu linear verläuft und die Flußminima in den Absorbern (Abb. 25) wesentlich schwächer ausgeprägt sind.

Eine wesentliche Veränderung tritt für die dritte Energiegruppe in Abb. 27 und 28 auf. Zwar verlaufen auch hier die Traversen (α) durch die erste Corezone noch nahezu linear, doch ergeben sich für den oberen Corebereich in den Absorbern (Abb. 27) ausgeprägte Flußminima und für die Zwischenbereiche der Absorber Flußmaxima, während sich im unteren Corebereich in den Natriumnachfolgern (Abb. 28) ausgeprägte Maxima und in den Zwischenbereichen Flußminima ergeben. Diese Tatsache kann wie folgt physikalisch erklärt werden: Durch Absorption gehen im Bereich der Borstäbe Neutronen verloren, während durch Streuung verstärkt Neutronen in den Bereich der Natriumnachfolger eindringen.

Die für die dritte Energiegruppe erstmals aufgetretene Tendenz setzt sich, wesentlich verstärkt, für die vierte Energiegruppe fort, dargestellt in den Abbildungen 29 und 30. Außerdem tritt hier erstmals eine Abweichung vom linearen Flußverlauf entlang der Traversen (α) durch die erste Corezone auf, d.h. von der vierten Energiegruppe an wirken Bor-Absorber und Natriumnachfolger auch auf die weitere Umgebung im Core.

Ausgesprochen interessant ist der durch das Syntheseverfahren ermittelte Flußverlauf längs der tangentialen Traversen für die fünfte Energiegruppe, dargestellt in den Abbildungen 31 und 32. Für den unteren Corebereich (Abb. 32) stimmt noch alles mit der Erwartung überein. In den Natriumnachfolgern ergeben sich stark ausgeprägte Flußmaxima und für die Zwischenbereiche ebenso stark ausgeprägte Flußminima. Der Flußverlauf längs der Traverse (α) wird wesentlich stärker durch die Stabbank auf dem inneren Radius beeinflusst, was durch das Auftreten von jeweils zwei Flußmaxima und -Minima gekennzeichnet ist. Die beiden Natriumnachfolger in der ersten Corezone bewirken für die Umgebung zwei Flußmaxima; in den Zwischenbereichen ergibt sich das Flußniveau der ersten Corezone.

Für den oberen Corebereich (Abb. 31) ergibt sich für die Traverse (α) durch die erste Corezone der erwartete Verlauf: Flußminima in der weiteren Umgebung der Absorber, sonst das Flußniveau der ersten Corezone. Ein geradezu krass falscher Flußverlauf ergibt sich für die Traverse (β) durch die Stabbank der Absorber. Zwar ergeben sich für die Bereiche zwischen den Stäben die erwarteten Flußmaxima, doch werden die erwarteten Flußminima in den Absorbern durch Nebenmaxima ersetzt. Dies kann, wie auch schon früher in den Abschnitten IVa-c beschrieben, dadurch erklärt werden, daß durch die Syntheserechnung für die zu bildende Linearkombination (II.1) ein additiver Flußbeitrag ermittelt wird aus dem Produkt der berechneten Überlagerungsfunktion und der Versuchsfunktion für den unteren Corebereich, wobei diese Versuchsfunktion aber gerade in den Natriumnachfolgern richtigerweise stark ausgeprägte Maxima besitzt, während die eigentlich für den oberen Corebereich zuständige Versuchsfunktion in den Absorbern praktisch verschwindet. Dies kennzeichnet wieder die schon bekannte Schwäche des Syntheseverfahrens, die aber deshalb für die Berechnung des effektiven

Multiplikationsfaktors k_{eff} nicht zu sehr ins Gewicht fällt, weil der Absolutbetrag des normierten Neutronenflusses für diese Energiegruppe in der Größenordnung $2 \cdot 10^{-10}$ liegt, verglichen etwa mit $6 \cdot 10^{-5}$ für die vierte und $2 \cdot 10^{-3}$ für die erste und zweite Energiegruppe.

In den Abbildungen 33 und 34 ist für die vierte Energiegruppe der Verlauf des Neutronenflusses längs radialer Traversen dargestellt. Der Verlauf dieser Traversen ist in Abb. 22 mit a, b und c bezeichnet.

In Abb. 33 sind diese drei Traversen für die durch die obere Corezone mit den Bor-Absorbern gelegte Ebene dargestellt. Deutlich sind die beiden stark ausgeprägten Flußminima für die Traverse (a) in den beiden Borstäben als Folge der starken Neutronen-Absorption in Bor für den dargestellten Energiebereich zu sehen. Bei der Traverse (b), die durch den Bereich zwischen den Absorbern verläuft, sind diese beiden Minima nur angedeutet, wobei das für den äußeren Radius deutlicher ausgeprägt ist, da es an einer Stelle liegt, die von zwei unmittelbar benachbarten Absorberstäben beeinflusst wird, während auf dem inneren Radius nur ein Stab in unmittelbarer Nachbarschaft liegt. Die Traverse (c) verläuft nur durch einen Absorberstab und besitzt deshalb nur ein Flußminimum, das sich mit dem der Traverse (a) für den äußeren Radius deckt. Auffallend ist außerdem das starke Ansteigen des Neutronenflusses im radialen Blanket, bedingt durch die kleineren Absorptionsquerschnitte für den dargestellten Energiebereich als Folge der erhöhten Anreicherung, wobei für diesen Bereich alle drei gezeichneten Traversen zur Deckung kommen.

In Abb. 34 sind die drei entsprechenden radialen Traversen für die durch die untere Corezone mit den Natriumnachfolgern gelegte Ebene dargestellt. Umgekehrt zu oben sind hier für die Traverse (a) zwei Flußmaxima in den Natriumnachfolgern festzustellen, wobei sich wieder das für den Stab auf dem äußeren Radius mit dem der Traverse (c) deckt. Auch hier ist wieder das Ansteigen des Neutronenflusses im radialen Blanket zu beobachten, wobei wieder alle drei Traversen zur Deckung kommen.

Am besten geeignet zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Syntheseverfahrens sind axiale Traversen, also eine Verfolgung des Flußverlaufs längs der Richtung, in der die Flußsynthese vorgenommen wurde. Solche axialen Flußverläufe sind in den Abbildungen 35 - 44 für die fünf gerechneten Energiegruppen dargestellt.

Die Abbildungen 35 und 36 zeigen jeweils fünf axiale Flußtraversen für die erste Energiegruppe an den in Abb. 22 eingetragenen Positionen. Sie zeigen den erwarteten ungestörten sinusähnlichen Verlauf mit einer leichten Verschiebung des Flußmaximums in den unteren Reaktorbereich. Der Betrag der Flußwerte fällt vom Reaktorzentrum zum Rand hin stetig ab. Für diesen Energiebereich ist noch kein Einfluß der Absorber- oder Nachfolgerstäbe festzustellen.

Dieselben axialen Flußtraversen sind für die zweite Energiegruppe in den Abbildungen 37 und 38 dargestellt. Gegenüber der ersten Energiegruppe macht sich hier bei der Traverse (2) in Abb. 38 der Übergang vom Absorber zum Natriumnachfolger durch ein Ansteigen der Flußwerte bemerkbar.

Die Abbildungen 39 und 40 zeigen die axialen Flußtraversen für die dritte Energiegruppe. Hier ist schon sehr stark das Ansteigen der Flußwerte beim Übergang vom Absorber in den Natriumnachfolger bei der Traverse (2) in Abb. 40 zu beobachten. Diese Erscheinung überträgt sich, abhängig vom Abstand zur Stabmitte, auf die gesamte Umgebung. (Vergl. Traversen (3) in Abb. 40 und (7), (8) und (9) in Abb. 39). Außerdem ist bereits für diesen Energiebereich eine geringe Flußaufwölbung im oberen und unteren axialen Blanket festzustellen, für die dieselbe Erklärung gilt wie für die Aufwölbung im radialen Blanket bei den gezeichneten radialen Traversen.

Bei den axialen Traversen der vierten Energiegruppe in den Abbildungen 41 und 42 fällt das langsame Ansteigen des Neutronenflusses im Absorberstab (Traverse (2) in Abb. 42) und dann das steile Ansteigen beim Übergang in den Natriumnachfolger besonders stark auf. Das im Absorberteil auftretende Flußmaximum weist wieder auf die bekannte Schwäche des Syntheseverfahrens unter Verwendung der angegebenen Methode hin. Durch die gleichrangige Bewertung sämtlicher Versuchsfunktionen bei der Bildung der Linearkombinationen für alle Punkte des Reaktorquerschnitts, können kleine Gebiete mit stark abweichender Materialzusammensetzung (wie sie zweifellos in einem Absorberstab gegeben ist) bei der angewendeten Wichtung mit Flußfunktionen nicht genügend gut wiedergegeben werden, wenn für den gesamten Reaktorquerschnitt nur ein Satz von Überlagerungsfunktionen berechnet wird. In diesem Fall geben dann die anteilmäßig am häufigsten vertretenen Materialzusammensetzungen den Ausschlag. An singulären Stellen wird dann der Einfluß der Umgebung stärker berücksichtigt als der der betreffenden Stelle selbst.

Sonst liefern gerade die beiden Abbildungen 41 und 42 ein gutes Beispiel für die Leistungsfähigkeit des Syntheseverfahrens. Die Flußaufwölbungen im oberen und unteren axialen Blanket werden richtig wiedergegeben. Der Neutronenfluß im radialen Blanket wird parallel zur oberen und unteren Corezone maximal (Traversen 5 in Abb. 42 und 10 in 41), verglichen mit den durch das Core verlaufenden Traversen, und allgemein ist ein Ansteigen der Neutronenverteilung zum Reaktorzentrum hin festzustellen.

Dieselben Aussagen, nur noch etwas ausgeprägter, treffen für die in den Abbildungen 43 und 44 dargestellten axialen Traversen für die fünfte Energiegruppe zu.

Unter Hinzunahme der oben beschriebenen vierten Versuchsfunktion wurde, unter sonst gleichen Voraussetzungen, eine zweite 5-Gruppen-Syntheserechnung durchgeführt. Damit war jede zweidimensionale axiale Reaktorzone durch eine Versuchsfunktion repräsentiert, wobei allerdings, wie schon gesagt, die vierte Versuchsfunktion mit einem effektiven Multiplikationsfaktor von 1.3926 für das untere axiale Blanket nicht unbedingt ein besseres Ergebnis erwarten läßt. Nach einer Rechenzeit von

5 Min. 21 Sek.

(einschließlich Kondensation auf 5 Energiegruppen und anschließender Orthonormierung der Versuchsfunktionen) für 24 äußere Iterationen ergab sich ein effektiver Multiplikationsfaktor von

$$k_{\text{eff}} = 0.9425$$

also eine Abweichung von knapp 1.7 ‰, und zwar, wie auf Grund des zu großen effektiven Multiplikationsfaktors bei der neu hinzugenommenen Versuchsfunktion zu erwarten war, eine Abweichung nach oben.

Die Abbildungen der radialen, tangentialen und axialen Flußtraversen sind von der ersten bis einschließlich der dritten Energiegruppe mit denen der Rechnung mit drei Versuchsfunktionen völlig identisch. Abweichungen treten von der vierten Energiegruppe an auf, und zwar in der Art, daß Extremalwerte des Flusses in Absorber- oder Nachfolgerstäben nicht so stark ausgeprägt sind wie in der Rechnung mit drei Versuchsfunktionen. So entsprechen die in Abb. 45 dargestellten tangentialen

Traversen denen in der Abb. 30. Maximal- und Minimalwerte sind für den Bereich zwischen den Stäben und für den Durchgang durch die Natriumnachfolger eindeutig schwächer ausgeprägt. Dasselbe trifft für die in Abb. 46 dargestellten radialen Traversen zu, die mit denen der Abb. 34 zu vergleichen sind.

Aufschlußreich ist die Darstellung der axialen Traversen in Abb. 47, zu vergleichen mit denen der Abb. 42. Die Traversen (1) und (5) (Darstellung des axialen Flußverlaufs im Reaktorzentrum und im radialen Blanket) stimmen in ihrem gesamten Verlauf sehr gut überein; die Traversen (3) und (4) (Darstellung des axialen Flußverlaufs an der Grenze innere/ äußere Corezone) nur im Bereich des oberen axialen Blankets, sowie im Bereich der oberen und unteren Corezone. Im Bereich des unteren axialen Blankets steigen diese beiden Traversen, deren Verlauf durch eine Syntheserechnung mit vier Versuchsfunktionen ermittelt wurde, wesentlich stärker an als die Traversen, deren Verlauf mit drei Versuchsfunktionen ermittelt wurde, und erreichen das Niveau der für das Reaktorzentrum berechneten axialen Traverse. Dieser Verlauf dürfte der physikalischen Verifikation näher liegen, da speziell der Bereich, in dem die Abweichung auftritt, durch eine neue Versuchsfunktion repräsentiert wurde.

Ein völlig anderes Bild als in Abb. 42 liefert die durch den Stab verlaufende axiale Traverse (2) im oberen, in Bor ausgeführten Teil. Hier ist der Flußverlauf entgegen jeder Erwartung wiedergegeben. Die Frage, ob in einem solchen Bereich starker Absorber mit Diffusions-Näherung gute Ergebnisse zu erwarten sind, wurde schon früher (Abschnitt IVb) negativ beantwortet. Diese Tatsache ist wieder deshalb für die Ermittlung des effektiven Multiplikationsfaktors k_{eff} nicht sonderlich schwerwiegend, weil die Absolutwerte des normierten Neutronenflusses für diesen Bereich des Reaktors mit $\approx 5 \cdot 10^{-7}$ um zwei Zehnerpotenzen unter denen der Umgebung liegen. Für den Bereich des Natriumnachfolgers ist jedoch wieder eine gute Übereinstimmung im Flußverlauf festzustellen.

β) 12-Gruppenrechnung

Im Anschluß an die beiden 5-Gruppenrechnungen wurde unter Verwendung der bereits im voraus berechneten drei ersten Versuchsfunktionen eine 12-Gruppen-Syntheserechnung durchgeführt. Die Versuchsfunktionen wurden

durch Flußaddition von 26 auf 12 Energiegruppen kondensiert und anschließend orthonormiert, wobei für die Kondensation zunächst jeweils zwei Gruppen und schließlich die vier letzten Gruppen des 26-GR.KFKSET 035 zu einer neuen Energiegruppe des 12-Gruppenbildes zusammengefaßt wurden. Für die Syntheserechnung wurden wieder dieselben Genauigkeitsschranken von

$$1 \cdot 10^{-3} \text{ für den effektiven Multiplikationsfaktor } k_{\text{eff}}$$
$$5 \cdot 10^{-3} \text{ für die Überlagerungsfunktionen}$$

vorgeschrieben. Nach 24 äußeren Iterationen ergab sich bei einer Rechenzeit (wieder einschließlich Kondensation und Orthonormierung der Versuchsfunktionen) von

10 Min. 23 Sek.

ein effektiver Multiplikationsfaktor von

$$k_{\text{eff}} = 0.9414.$$

Gegenüber der 5-Gruppenrechnung mit 3 Versuchsfunktionen also eine Abweichung in dieser integralen Größe von

$$0.5 \text{ } ^\circ/\text{oo}$$

Die Ausgabe der tangentialen, radialen und axialen Traversen brachte keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse. Die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse für den Fluß im Innern starker Bor-Absorber nimmt etwa von der 10. Energiegruppe an mit abnehmender Energie, also steigender Gruppenzahl, ab. Dies ist aber auch nicht weiter verwunderlich, wenn man berücksichtigt, daß die Größenordnung des Absolutwertes für den normierten Neutronenfluß, beispielsweise für die 12. Gruppe, etwa um einen Faktor 10^{-10} kleiner ist gegenüber dem Wert, der sich für die zweite Energiegruppe ergibt. Die Flußwerte in diesen Gruppen energiereicher Neutronen liefern damit kaum noch einen erkennbaren Beitrag für den effektiven Multiplikationsfaktor, auf dessen Richtigkeit das angewendete Variationsverfahren bei Verwendung der gewählten Wichtung allein optimalisiert ist.

γ) 26-Gruppenrechnung

Der volle Umfang des Syntheseprogramms KASY wurde durch eine abschließende 26-Gruppenrechnung demonstriert. Verwendet wurden wieder die schon vorliegenden ersten drei Versuchsfunktionen, die orthonormiert wurden. Bei Vorgabe derselben Genauigkeitsschranken wie bei den vorhergehenden Rechnungen

wurde nach 26 äußeren Iterationen nach einer Rechenzeit von

34 Min 56 Sek

ein effektiver Multiplikationsfaktor von

$$k_{\text{eff}} = 0.9385$$

ermittelt, also eine Abweichung, diesmal nach unten, von

$$2.5 \text{ ‰}$$

gegenüber der 5-Gruppenrechnung mit drei Versuchsfunktionen.

Auch bei dieser Rechnung können der Ausgabe der tangentialen, radialen und axialen Traversen keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse entnommen werden.

δ) Zusammenstellung der Ergebnisse aus α) - γ)

Zunächst werden in Tabelle 1 die Ergebnisse sämtlicher Rechnungen zum natriumgekühlten Reaktor Na2 noch einmal zusammengestellt:

Zweidimensionale Rechnungen

Art der Rechnung	Anz.d.Iterationen	Rechenzeit	k_{eff}
1.Versuchsfunktion 26-Gruppen (oberes axiales Blanket)	12	41' 23"	0.6151
2.Versuchsfunktion 26-Gruppen (obere Corezone eingefahrene Absorber)	10	33' 43"	0.8765
3.Versuchsfunktion 26-Gruppen (untere Corezone, Natrium- nachfolger)	12	38' 39"	1.0062
4.Versuchsfunktion 26-Gruppen (unteres axiales Blanket)	9	29' 40"	1.3926

Dreidimensionale Synthese-Rechnungen

5-Gruppenrechnung 3 Versuchsfunktionen	28	3' 34"	0.9409
5-Gruppenrechnung 4 Versuchsfunktionen	24	5' 21"	0.9425
12-Gruppenrechnung 3 Versuchsfunktionen	24	10' 23"	0.9414
26-Gruppenrechnung 3 Versuchsfunktionen	26	34' 55"	0.9385

TABELLE 1

Dieser Tabelle kann man entnehmen, daß eine Syntheserechnung zur Ermittlung des Flußverlaufs in der dritten Dimension und eines für den gesamten Reaktor gültigen effektiven Multiplikationsfaktors etwa denselben Aufwand an Rechenzeit erfordert wie eine zweidimensionale Rechnung zur Ermittlung einer Versuchsfunktion. Die Tatsache, daß der Aufwand an Rechenzeit nicht linear mit der Anzahl der Energiegruppen steigt, ist nicht erstaunlich, da bei einer größeren Anzahl von Energiegruppen, bei sonst gleichen Voraussetzungen, in steigendem Ausmaß externe Zwischenspeicher verwendet werden müssen. Ebenso wenig ist es erstaunlich, daß durch die Hinzunahme einer weiteren Versuchsfunktion bei sonst gleichen Voraussetzungen der Aufwand an Rechenzeit erheblich steigt, da die Kantenlänge der zu invertierenden Matrizen im Gleichungssystem (III.4) gleich der Anzahl der verwendeten Versuchsfunktion ist und eine Matrix-Inversion $\approx \frac{4}{3} K^3$ Operationen benötigt. Der Tabelle 1 ist außerdem zu entnehmen, daß alle vier mit dem Programm KASY berechneten Werte für den effektiven Multiplikationsfaktor in einem Intervall der Breite

$$\Delta k_{\text{eff}} = 0.004$$

liegen. Hierin sind Fehler, die beispielsweise durch die Kondensation der makroskopischen Querschnitte entstehen, bereits enthalten.

Für die Auswertung der Ergebnisse einer dreidimensionalen Reaktorrechnung sind weniger die Werte für den Neutronenfluß an den einzelnen Gitterpunkten eines zufällig über den Reaktor gelegten Koordinatennetzes für die einzelnen Energiegruppen von Bedeutung, als vielmehr integrale Größen, wie Spalt- und Absorptionsraten und dergleichen für die einzelnen im Reaktor enthaltenen Materialzonen. Voraussetzung zur Berechnung dieser Größen sind die Neutronenfluß-Integrale über diese Zonen, also Integrale der Form

$$I^g = \int_{V_i} \phi^g(x,y,z) dV_i$$

wobei mit V_i das Volumen der Materialzone i und mit g die Energiegruppe beschrieben wird.

Mit dem kleinen Zusatzprogramm FLINT wurden diese Integrale für die acht im Reaktor Na2 angenommenen Mischungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in einer Form in den Tabellen 2 - 4 dargestellt, die einen Vergleich der 5-,

12- und 26-Gruppenrechnung gestattet. Ermittelt sind die Werte des obigen Integrals für jeweils drei Energiegruppenbereiche, welche die Gruppen 1-10, 11-20 und 21-26 des 26-Gruppen-KFKSET 035 umfassen. Normiert wurden die einzelnen Tabellenwerte auf den Wert für das gesamte Flußintegral über den Reaktor, also auf die Größe

$$IG = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^8 \int_{V_i} \phi^g(R, \theta, Z) dV$$

Für dieses Integral ergaben sich bei den einzelnen Rechnungen folgende Beträge:

IG = 22 606.89	für die 5-Gruppenrechnung
IG = 22 546.53	für die 12-Gruppenrechnung
IG = 22 375.11	für die 26-Gruppenrechnung

Gruppen										$\sum_{i=1}^8$
im KFKSET035	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4	Mischung 5	Mischung 6	Mischung 7	Mischung 8		
1 - 10	0.006	0.316	0.184	0.054	0.031	0.150	0.024	0.042		0.807
11 - 20	0.001	0.052	0.030	0.019	0.010	0.067	0.004	0.010		0.193
21 - 26	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.		0.
	0.007	0.368	0.214	0.073	0.041	0.217	0.028	0.052		1.000

TABELLE 2 Flußintegrale der 5-Gruppenrechnung

Gruppen										$\sum_{i=1}^8$
im KFKSET035	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4	Mischung 5	Mischung 6	Mischung 7	Mischung 8		
1 - 10	0.006	0.316	0.187	0.056	0.032	0.152	0.024	0.043		0.816
11 - 20	0.001	0.050	0.029	0.018	0.010	0.064	0.003	0.009		0.184
21 - 26	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.		0.
	0.007	0.366	0.216	0.074	0.042	0.216	0.027	0.052		1.000

TABELLE 3 Flußintegrale der 12-Gruppenrechnung

Gruppen										$\sum_{i=1}^8$
im KFKSET035	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3	Mischung 4	Mischung 5	Mischung 6	Mischung 7	Mischung 8		
1 - 10	0.006	0.318	0.188	0.057	0.033	0.154	0.024	0.043		0.823
11 - 20	0.001	0.048	0.029	0.017	0.010	0.060	0.003	0.009		0.177
21 - 26	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.		0.
	0.007	0.366	0.217	0.074	0.043	0.214	0.027	0.052		1.000

TABELLE 4 Flußintegrale der 26-Gruppenrechnung

Beim Vergleich dieser drei Tabellen kann von einer guten Konsistenz für diese Darstellung der Ergebnisse für die Flußintegrale gesprochen werden. Die willkürliche Einteilung in 5, 12 und 26 Energiegruppen bewirkt keine erhebliche Abweichung. Andererseits ist die Einteilung in drei Energiegruppenbereiche ziemlich grob, doch ist dies die einzige Möglichkeit, die Ergebnisse für die gewählten Gruppenzahlen überhaupt zu vergleichen.

Einige Tatsachen, die den drei Tabellen entnommen werden können, sollen noch besonders betrachtet werden:

Im Rahmen der zugrunde gelegten Genauigkeit verschwindet der Anteil für das Neutronenfluß-Integral für den Bereich der 21. - 26. Energiegruppe.

Mit einer Erhöhung der Anzahl der Energiegruppen steigt der Prozentsatz des auf den ersten Bereich der 1. - 10. Energiegruppe entfallenden Anteils des Neutronenfluß-Integrals von 80.7% bei der 5-Gruppenrechnung auf 81.6% bei der 12-Gruppenrechnung auf schließlich 82.3% bei der 26-Gruppenrechnung. Diese Tendenz ist etwas stärker ausgeprägt bei den Mischungen 3 und 6 (äußere Corezone und radiales Blanket), weniger stark bei den Mischungen 2, 4 und 5 (innere Corezone und den beiden axialen Blanketbereichen) und tritt im zentralen Natriumkühlkanal (Mischung 1), in den Natriumnachfolgern (Mischung 8) und in den Borabsorbern (Mischung 7) überhaupt nicht in Erscheinung.

Weiter fällt auf, daß die prozentualen Anteile für die einzelnen Mischungen am gesamten Neutronen-Flußintegral durch die Vergrößerung der Anzahl der Energiegruppen im wesentlichen unverändert bleiben. Geringfügige Veränderungen, wie beispielsweise die Reduzierung des Anteils der Mischung 2 (innere Corezone) von 36.8% auf 36.6% oder der Mischung 6 (radiales Blanket) von 21.7% auf 21.4% und dafür eine Erhöhung des Anteils der Mischung 3 (äußere Corezone) von 21.4% auf 21.7% und der Mischung 5 (axiales Blanket) von 4.1% auf 4.3%, können mit Ungenauigkeiten bei der Kondensation der makroskopischen Wirkungsquerschnitte erklärt werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Erstellung und der Einsatz von Rechenprogrammen von einer Größenordnung, wie sie für die Berechnung einer energiegruppen-abhängigen, dreidimensionalen Neutronen-Flußverteilung in einem Reaktor notwendig wird, erfordert eingehende Überlegungen zur Optimalisierung bezüglich Rechenzeit und Speicherplatzbedarf. In großem Maß sind auch die Anforderungen zu berücksichtigen, die der Betrieb einer Großrechenanlage an seine etwa 500 aktiven Benutzer stellt.

Das auf der Grundlage der Diffusions-Synthese erstellte Rechenprogramm KASY wurde deshalb von Anfang an so konzipiert, daß ein möglichst großer Gewinn an Rechenzeit gegenüber Programmen mit totalnumerischen Differenzen-Approximations-Verfahren erzielt werden kann. Mit der FORTRAN IV-Version des Flußsynthese-Rechenprogramms KASY zur Approximation der dreidimensionalen Mehrgruppen-Neutronen-Diffusionsgleichung steht ein Hilfsmittel zur Verfügung, das es gestattet, ein im Rahmen der Diffusionsnäherung hinreichend genaues Bild der Neutronen-Flußverteilung für drei Raumdimensionen in einem Reaktor zu berechnen.

Ein wesentlicher Vorzug von KASY besteht darin, daß im Prinzip keinerlei Beschränkungen zu beachten sind, was die Anzahl der Koordinatengitterpunkte oder der Energiegruppen anbelangt. Grenzen werden hierfür lediglich implizit durch die Rechenzeit und den zur Verfügung stehenden Gesamtspeicherbereich gesetzt. Reicht für eine zu berechnende Problemstellung der Kernspeicherplatz nicht aus, weicht das Rechenprogramm KASY automatisch auf externe Speicher aus. Dabei steigt die Anzahl der zu speichernden Zwischengrößen und die Anzahl der auszuführenden arithmetischen Operationen etwa quadratisch mit der Anzahl der der Berechnung zugrunde gelegten Versuchsfunktionen und Energiegruppen, während die Anzahl der Koordinatengitterpunkte in jeder Raumdimension linear zu berücksichtigen ist.

Die mit dem Rechenprogramm KASY angestellten Untersuchungen zur Diffusions-Synthese brachten einige aufschlußreiche Ergebnisse. Es wurde im Rahmen dieser Untersuchungen keine technisch interessierende Problemstellung gefunden, bei der das Synthese-Verfahren nicht konvergiert hat.

Es konnte außerdem gezeigt werden, daß eine erhebliche Verbesserung des Konvergenzverhaltens des Synthese-Verfahrens erzielt werden kann, wenn man die als Versuchsfunktionen vorgesehenen zweidimensionalen Flußverteilungen vor ihrer Verwendung orthonormiert. Durch diese Orthonormierung legt man der Berechnung ein Orthonormalsystem von Funktionen zugrunde, das den Vorzug bietet, daß es physikalische und geometrische Gegebenheiten im Reaktor voll repräsentiert. Dadurch reicht eine verhältnismäßig kleine Anzahl solcher Versuchsfunktionen für die Syntheserechnung aus. Bei den Untersuchungen für schnelle Brutreaktoren waren in der Regel nur drei, in Ausnahmefällen zwei oder vier Versuchsfunktionen erforderlich. Würde man dagegen der Berechnung eines der sonst üblichen Orthonormalsysteme (wie z.B. Legendre Polynome) zugrunde legen, müßte man eine erheblich größere Anzahl von Versuchsfunktionen zur Verfügung stellen, um Ergebnisse vergleichbarer Genauigkeit zu erhalten.

Man kann davon ausgehen, daß im Rahmen einer Reaktorstudie zweidimensionale Neutronen-Flußverteilungen für verschiedene axiale Querschnitte des Reaktors für eine bestimmte Anzahl von Energiegruppen berechnet und archiviert werden. KASY bietet dann unter anderem die Möglichkeit, diese Ausgangsfunktionen durch eine Integration über die Energie auf eine geringere Anzahl von Energiegruppen zu reduzieren und sie außerdem geometrischen Ähnlichkeitstransformationen zu unterwerfen. Mit diesen häufig vorhandenen und in dieser Weise vorbereiteten Daten kann man anschließend eine Syntheserechnung durchführen, die ohne großen zusätzlichen Aufwand eine dreidimensionale Neutronen-Flußverteilung mit dem zugehörigen effektiven Multiplikationsfaktor k_{eff} liefert.

Das Rechenprogramm KASY ist besonders gut geeignet für Absorber- und Regelstabuntersuchungen zur Bestimmung der Reaktivitätswerte. Dies gilt insbesondere, wenn man berücksichtigt, daß bei einer axialen Veränderung der Stabstellungen eine neue Syntheserechnung mit geänderter Materialzoneneingabe, aber häufig mit denselben Versuchsfunktionen durchgeführt werden kann. Dasselbe gilt bei horizontaler Veränderung der Stabpositionen, wenn die Werte der vorliegenden Versuchsfunktionen durch geometrische Ähnlichkeits-

transformationen in ein neu anzulegendes Koordinatengitter eingepaßt werden können. KASY ist außerdem geeignet, für eine große Anzahl von Energiegruppen Spektren für die Energieintegration von makroskopischen Wirkungsquerschnitten zu erstellen. Zusätzlich kann mit KASY die Neutronen-Flußverteilung bei Untersuchungen des Langzeitverhaltens eines Reaktors ermittelt werden. Diese Verteilung wird an den Stellen des Reaktors gut berechnet, an denen die Wichtungsfunktionen keinen zu geringen Beitrag liefern, das heißt also im Reaktorkern, in Kanälen für das Kühlmittel und in den Stabpositionen im Bereich des Nachfolgermaterials sowie im Brutmantel, sofern die untersuchten Stellen noch genügend weit vom Reaktorrand entfernt sind. Dagegen kann man für die niedrigen Energiegruppen (mit Neutronen geringer kinetischer Energie) in starken Absorbern keine guten Ergebnisse erwarten, genausowenig wie in randnahen Gebieten im Brutmantel.

Die Richtigkeit des formalen Programmablaufs in KASY konnte durch eine Vergleichsrechnung für einen idealisierten, homogenen Reaktor gezeigt werden, für den ein räumlicher Separationsansatz zur analytischen Lösung zulässig war. k_{eff} und Neutronen-Flußverteilung wurden mit KASY berechnet und die Ergebnisse mit den Resultaten der analytischen Rechnung verglichen. Dabei konnten diese Resultate im Rahmen der Rechengenauigkeit der Anlage mit jeder beliebig vorgeschriebenen Genauigkeit erreicht werden.

Aufgrund der ersten Proberechnungen für den dampfgekühlten schnellen Brutreaktor D1 konnte die Frage nach Anzahl und Art der für die Syntheserechnung notwendigen Versuchsfunktionen beantwortet werden. Jede axiale Reaktorzone mit charakteristischer Materialzusammensetzung sollte durch eine zweidimensionale Versuchsfunktion repräsentiert werden, wenn nicht grobe Ungenauigkeiten im Neutronen-Flußverlauf in der entsprechenden Zone auftreten sollen. Die integrale Größe k_{eff} wird kaum von der Anzahl der der Berechnung zugrunde gelegten Versuchsfunktionen beeinflusst. Außerdem konnte schon durch diese Rechnungen gezeigt werden, daß die Verwendung der mit großem Zeitaufwand zu berechnenden adjungierten Flußfunktionen zur Wichtung anstelle der Versuchsfunktionen selbst, keine Verbesserung der Ergebnisse bringt.

Die Vergleichsrechnungen mit dem Rechenprogramm WHIRLAWAY lieferten erste Anhaltspunkte für Abweichungen in der Neutronen-Flußverteilung, allerdings nur für eine Zweigruppen-Rechnung. Für die Gruppe schneller Neutronen waren dabei, von Bereichen im Brutmantel nahe am Reaktorrand abgesehen, im Rahmen der Rechengenauigkeit keine Abweichungen festzustellen. Anders für die Gruppe der langsamen Neutronen im Energiebereich von thermisch - 10,0 eV: hier können ganz massive Abweichungen im Absorberstab und im oberen und unteren axialen Brutmantel auftreten. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß für diese Gruppe das gesamte Flußniveau um etwa einen Faktor 10^{-4} kleiner ist als für die Gruppe schneller Neutronen. Abweichungen in dieser Gruppe machen sich also bei der Berechnung von integralen Größen, wie k_{eff} oder bei den verschiedenen Ratentypen, kaum bemerkbar.

Die mit dem Rechenprogramm TRITON durchgeführten Vergleichsrechnungen für den Reaktor ZPR III Assembly 48 erlaubten einen exakten Vergleich der Rechenzeiten. Mit dem Syntheseprogramm KASY waren Ergebnisse in einer Zeit zu erhalten, die um einen Faktor 10 unter der für die Rechnungen mit TRITON benötigten lag. Beide Rechnungen wurden auf einer Rechanlage IBM 360 Modell 65 durchgeführt. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß es sich bei dem Vergleich um eine Untersuchungsreihe handelte, bei der jeweils k_{eff} und die Neutronen-Flußverteilung bei drei verschiedenen Einfahrtiefen des zentralen Absorberstabs berechnet wurden. Solche Berechnungsreihen sind besonders gut für die Syntheserechnung geeignet, weil immer wieder dieselben Versuchsfunktionen in anderer Zusammensetzung verwendet werden können; andererseits ist jeweils eine völlig getrennte totalnumerische Rechnung durchzuführen. Für eine Einzelrechnung reduziert sich der Faktor 10 etwa auf einen Faktor 6 bis 7.

Dabei ergaben sich für den effektiven Multiplikationsfaktor k_{eff} maximale Abweichungen von $2 \cdot 10^{-4}$, was sich in Abweichungen bei den Reaktivitätswerten für den Kontrollstab von maximal 0,01% für Δk_{eff} bemerkbar machte. Außerdem wurden maximale Abweichungen in den Spalt- und Capture-Raten für verschiedene Zonen des Reaktors ermittelt, die sich wie folgt ergaben:

1) für den inneren Teil des Reaktorkerns	0,9%	} Spalt-Raten
2) für radiale Kerngrenzen	2,4%	
3) für axiale Kerngrenzen	1,6%	
4) für Eckpunkte im Reaktorkern	7,0%	
5) für den radialen Brutmantel um den Kern	6,0%	
6) für die axialen Brutmäntel	10,0%	
7) für Eckpunkte im Brutmantel	66,0%	
8) für den Kontrollstab im Kern	1,0%	} Capture-Raten
9) für den Kontrollstab im Brutmantel	6,0%	

Die Rechnungen für den natriumgekühlten schnellen Brutreaktor Na2 haben gezeigt, daß das Syntheseprogramm KASY auch für große Anzahlen von Koordinaten-Gitterpunkten und Energiegruppen angewendet werden kann, wobei allerdings die erzielten Ergebnisse physikalisch interpretiert werden müssen, da Rechenprogramme mit totalnumerischen Verfahren für Vergleichsrechnungen in diesem Ausmaß heute noch nicht zur Verfügung stehen.

Erst in letzter Zeit durchgeführte Vergleiche zwischen Rechnungen mit KASY und Messungen an der SNEAK - Anordnung 2C [12] und [13] haben nach Berücksichtigung bekannter Korrekturgrößen für die Abweichung der Diffusionsnäherung von der Neutronen-Transportrechnung zu befriedigenden Ergebnissen geführt.

Zur Verbesserung der mit KASY ermittelten Ergebnisse können die in der neueren Literatur vorgeschlagenen Möglichkeiten überprüft werden. Dies gilt insbesondere für eine Erweiterung des Synthese-Verfahrens zur Multichannel-Methode [17] oder die Behandlung der starken Absorber durch energiegruppenabhängige innere Randbedingungen [15]. Außerdem kann noch untersucht werden, in welchem Maß sich die von NEUHOLD und OTT [11] vorgeschlagene Methode der Wichtung der Versuchs- und Wichtungsfunktionen mit verschiedenen makroskopischen Wirkungsquerschnitten auf eine Verbesserung der Ergebnisse auswirkt.

Zu besonderem Dank verpflichtet bin ich verschiedenen Mitarbeitern des Instituts für Neutronenphysik und Reaktortechnik im Kernforschungszentrum Karlsruhe sowie den Herren Dipl.-Ing. PILATE und Dipl.-Phys. CHARLIER von der Firma Belgonucléaire in Brüssel. Von den Herren Dipl.-Math. W. HÖBEL und Dipl.-Math. D. SANITZ stammen viele nützliche Anregungen in zahlreichen fördernden Diskussionen. Herr Dipl.-Math. G. Jacobs führte die Rechnungen mit dem Differenzen-Approximations-Programm WHIRLAWAY durch. Die Rechnungen mit dem Programm TRITON und die Auswertung der Ergebnisse übernahmen die Herren Dipl.-Ing. PILATE und Dipl.-Phys. CHARLIER. An der physikalischen Interpretation der Ergebnisse für die Reaktoren D1 und Na2 waren die Herren Dr. E. KIEFHABER und Dr. W. SCHWETJE beteiligt.

Die Unterprogramme zur Organisation der makroskopischen Wirkungsquerschnitte erstellte Herr H. BACHMANN, die Unterprogramme zur Inversion von Matrizen und zum Zeichnen von Kurven mit dem Zeilendrucker Herr Dipl.-Ing. S. KLEINHEINS.

VI LITERATURVERZEICHNIS

- [1] L.P. ABAGJAN et al.: Gruppen-Konstanten schneller und intermediärer Neutronen für die Berechnung von Kernreaktoren
KFK-tr-144 (1965)
- [2] G. FORSYTHE, C. MOLER: Computer Solution of Linear Algebraic Systems
Prentice-Hall, Englewood Cliffs N J 1967
- [3] K. GAST, E.G. SCHLECHTENDAHL: Schneller natriumgekühlter Reaktor Na2
KFK 660, EUR 3706d (Oktober 1967)
- [4] W. HÖBEL, H. BACHMANN: Two Dimensional Multigroup Diffusion Programme
DIXY (in Vorbereitung)
- [5] IBM System/360 Operating System:
a) Job Control Language Form C28-6539-4
b) Linkage Editor Form C28-6538-4
c) Supervisor and Data Management Services
Form C28-6646-0
d) FORTRAN IV (H) Programmer's Guide Form C28-6602-1
- [6] G. JOURDAN, R. BUYL, F. HELM et al.: Physikalische Untersuchungen für
den SNR in der SNEAK
in Tagungsberichte der Reaktortagung des Deutschen
Atomforums Berlin, 20.-22. April 1970 (Seite 141)
- [7] L.V. KANTOROWITSCH, V.I. KRYLOW: Näherungsmethoden der höheren Analysis
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1956
- [8] S. KAPLAN: Some New Methods of Flux Synthesis
Nuclear Science and Engineering 13, 1962
- [9] S. KAPLAN: Synthesis Methods in Reactor Analysis
Advances in Nuclear Science and Technology
Volume III Academic Press Inc. New York (1965)

- [10] H.Th. KLIPPEL: Control Rod Calculations for the Steam Cooled Fast Breeder Reactor D1
KFK 792, EUR 3961e (Juli 1968)
- [11] R.J. NEUHOLD, K.O. OTT: Improvements in Fast Reactor Space Energy Synthesis
Nuclear Science and Engineering Vol. 39 Nr. 1 (Jan. 1970)
- [12] S. PILATE, F. PLUM: Evaluation of Control Rod Experiments with one Control Rod at the Center or at the Periphery of the SNEAK-2C Core
(persönliche Mitteilung)
- [13] S. PILATE, P. MC GRATH :Evaluation of Control Rod Experiments with three Control rods at the Periphery of the SNEAK-2C Core
(persönliche Mitteilung)
- [14] J.R. RICE: Experiments on GRAM-SCHMIDT Orthogonalisation
Mathematic of Computation Vol 20 1966
- [15] H. SCHÄFFLER: Ein erweitertes Flußsyntheseverfahren
Nukleonik Vol. 11 No. 2 Mai 1968
- [16] M.L. TOBIAS, T.D. FOWLER: A Three-Dimensional , Two Group Neutron Diffusion Code for the IBM 7090 Computer
ORNL 3150
- [17] E.L. WACHSPRESS, R.D. BURGESS, S. BARRON: Multichannel Flux Synthesis
Nuclear Science and Engineering 12 (1962)
- [18] J.B. Yasinsky, S. KAPLAN: Synthesis of Three-Dimensional Flux Shapes Using Discontinuous Sets of Trial-Functions
Nuclear Science and Engineering 28 (Juni 1967)

[19]

Comparison of Three-Dimensional Calculations carried out with a Flux-Synthesis Method (KASY) and a Three-Dimensional Diffusion Code (TRITON)
(persönliche Mitteilung)

[20]

W. HÖBEL, H. KRAETSCH, D. SANITZ: NUSYS I, Grundgedanken, Konventionen und Subroutinen des Karlsruher Nuklear-Programm-Systems
(nicht veröffentlicht)

[21]

A. DANERI, G. MAGGIONI, E. SALINA: TRITON - A Multigroup Diffusion Depletion Program in three Dimensions for IBM 360
Fiat Report FN-E-97 (Research Contract Euratom-Fiat-Ars No. 089-66-2 TEEI), May 1968



Verzeichnis der Abbildungen

1. Reaktorskizze in Grund- und Aufriß für D1 und Na2
2. Aufstellung der Abmessungen für Skizze 1
3. Axiale Flußtraversen aus zweidimensionalen DIXY-RZ-Rechnungen zu D1 (2. Energiegruppe)
4. Dieselben Flußtraversen (3. Energiegruppe)
5. Dieselben Flußtraversen (4. Energiegruppe)
6. Axiale Flußtraversen aus dreidimensionalen KASY-Rechnungen zu D1 (2. Energiegruppe)
7. Dieselben Flußtraversen (3. Energiegruppe)
8. Dieselben Flußtraversen (4. Energiegruppe)
9. Mit KASY berechnete Überlagerungsfunktionen zu D1 (3. Energiegruppe)
10. Globale Gegenüberstellung axialer Flußtraversen, berechnet mit KASY und WHIRLAWAY (1. Energiegruppe)
11. Dieselbe Gegenüberstellung (2. Energiegruppe)
12. Einzelvergleich normierter Flußtraversen berechnet mit KASY und WHIRLAWAY (Verlauf im Borstab auf äußerem Ring)
13. Derselbe Vergleich (Verlauf im Borstab auf innerem Ring)
14. Derselbe Vergleich (Verlauf in der 2. Corezone)
15. Derselbe Vergleich (Verlauf im radialen Blanket)
16. Mit KASY berechnete Überlagerungsfunktionen für den Vergleich KASY-WHIRLAWAY (1. Energiegruppe)
17. Dieselben Überlagerungsfunktionen (2. Energiegruppe)
18. Grundriß des Reaktors ZPR III - Assembly 48
19. Aufriß des Reaktors ZPR III - Assembly 48
20. } Tabellen der mit KASY und TRITON ermittelten axialen
21. } Neutronenflußverteilung
22. Skizze für die Anordnung der tangentialen, radialen und axialen Traversen für die Untersuchungen der Ergebnisse aus Rechnungen zum Na2

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

23. Tangentiale Flußtraversen der 5-Gruppenrechnung im oberen Corebereich mit eingefahrenen Absorbern (1. Energiegruppe)
24. Dieselben Traversen im unteren Corebereich mit Nachfolgern
25. Dieselben Traversen wie in Abb. 23 (2. Energiegruppe)
26. Dieselben Traversen wie in Abb. 24 (2. Energiegruppe)
27. Dieselben Traversen wie in Abb. 23 (3. Energiegruppe)
28. Dieselben Traversen wie in Abb. 24 (3. Energiegruppe)
29. Dieselben Traversen wie in Abb. 23 (4. Energiegruppe)
30. Dieselben Traversen wie in Abb. 24 (4. Energiegruppe)
31. Dieselben Traversen wie in Abb. 23 (5. Energiegruppe)
32. Dieselben Traversen wie in Abb. 24 (5. Energiegruppe)
33. Radiale Flußtraversen der 5-Gruppenrechnung im oberen Corebereich mit eingefahrenen Absorbern (4. Energiegruppe)
34. Dieselben Traversen im unteren Corebereich mit Natriumnachfolgern
35. Axiale Flußtraversen der 5-Gruppenrechnung angeordnet auf einer radialen Traverse im Bereich zwischen den Stäben (1. Energiegruppe)
36. Dieselben Traversen angeordnet auf einer radialen Traverse durch zwei Stäbe
37. Dieselben Traversen wie in Abb. 35 (2. Energiegruppe)
38. Dieselben Traversen wie in Abb. 36 (2. Energiegruppe)
39. Dieselben Traversen wie in Abb. 35 (3. Energiegruppe)
40. Dieselben Traversen wie in Abb. 36 (3. Energiegruppe)
41. Dieselben Traversen wie in Abb. 35 (4. Energiegruppe)
42. Dieselben Traversen wie in Abb. 36 (4. Energiegruppe)
43. Dieselben Traversen wie in Abb. 35 (5. Energiegruppe)
44. Dieselben Traversen wie in Abb. 36 (5. Energiegruppe)
45. Dieselben tangentialen Traversen wie in Abb. 30, gerechnet in einer 5-Gruppenrechnung unter Verwendung von 4 Versuchsfunktionen

今天，我们上了一节非常有趣的课，主题是“认识图形”。老师先给我们看了一些生活中的物体，比如长方形的书本、正方形的骰子、圆形的瓶盖等等。然后，老师让我们自己动手去摸一摸、画一画这些图形。我摸到了一个长方形的橡皮，它的四个角都是直角，而且对边相等。我还画了一个正方形，它的四条边都一样长。老师还教我们怎么区分长方形和正方形，长方形是长长的，正方形是方方的。这节课让我学到了很多新知识，我觉得数学真的很有趣。我还学会了怎么用直尺画一条直线，这让我觉得很有成就感。老师还让我们分组讨论，看看哪些物体是圆形的，哪些是长方形的。我们组找到了很多例子，比如圆形的饼干、长方形的桌子。这节课真是让我大开眼界，我以后还要继续学习更多的数学知识。

46. Dieselben radialen Traversen wie in Abb. 34, gerechnet in einer 5-Gruppenrechnung unter Verwendung von 4 Versuchsfunktionen
47. Dieselben axialen Traversen wie in Abb. 42, gerechnet in einer 5-Gruppenrechnung unter Verwendung von 4 Versuchsfunktionen

Handwritten text, likely bleed-through from the reverse side of the page. The text is mostly illegible due to fading and bleed-through.

Reaktorskizze für D1 und NA 2 :

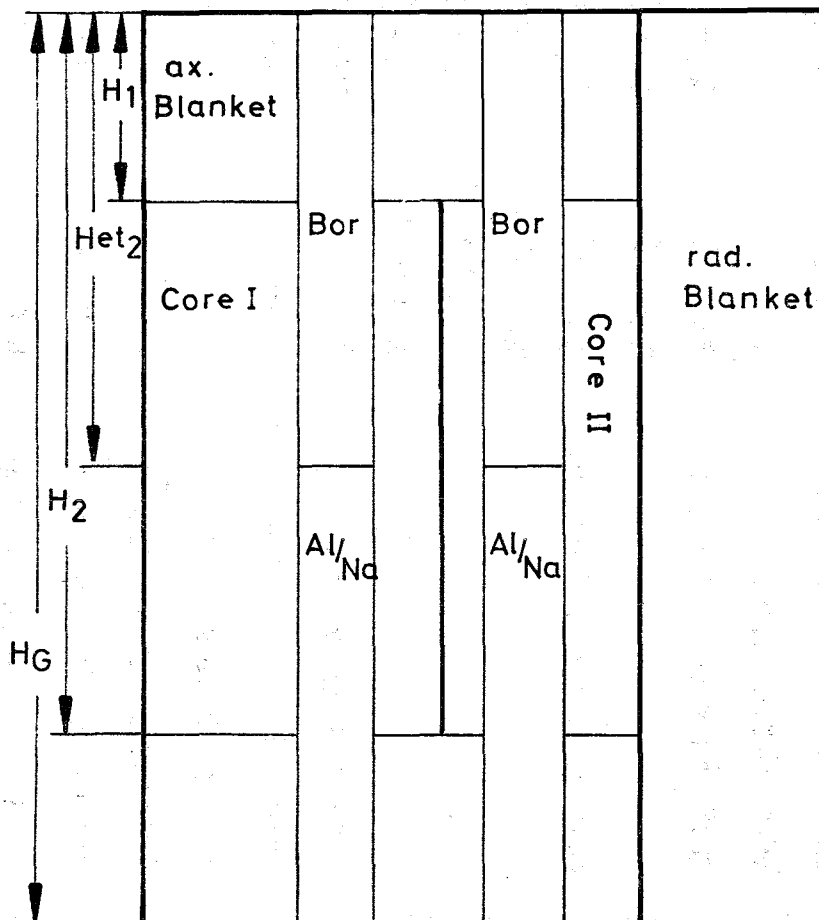
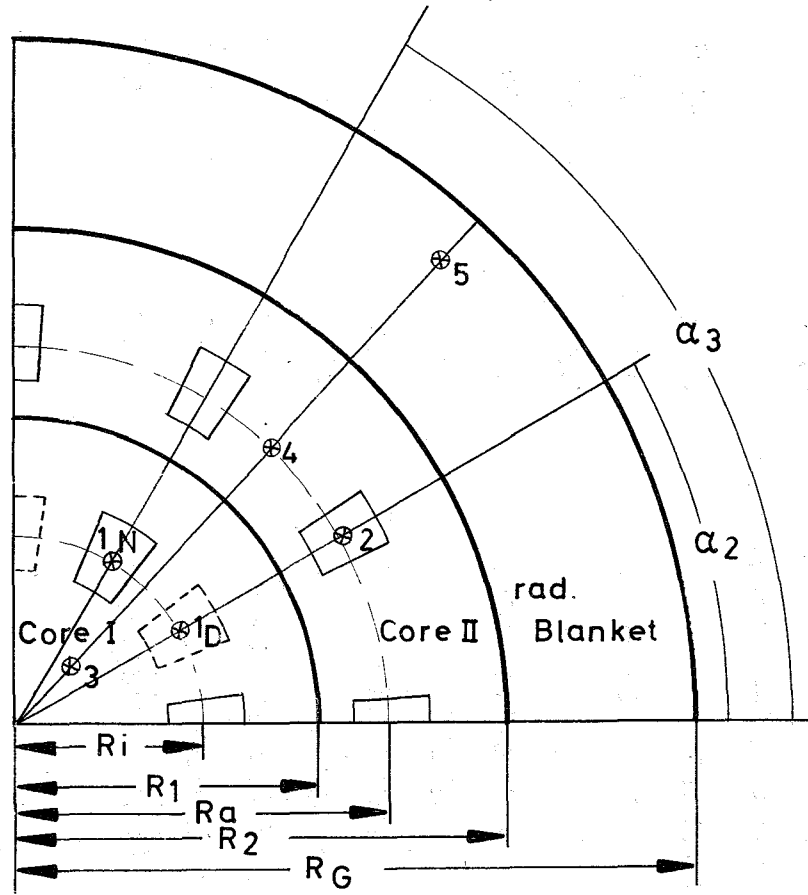


Abb. 1

	D1	NA 2
Gesamtradius R_G	169.5	126.5
Radius (Core I) R_1		
Radius (Core II) R_2	131.5	76.5
Stabpositionen :		
innerer Radius R_i	53.5	33.2
äußerer Radius R_a	95.3	62.2
Winkelstellung :		
auf innerem Radius	$\alpha_2 = 30^\circ$ $\alpha_4 = 90^\circ$	$\alpha_1 = 0^\circ$ $\alpha_3 = 60^\circ$
auf äußerem Radius	$\alpha_1 = 0^\circ$ $\alpha_2 = 30^\circ$ $\alpha_3 = 60^\circ$ $\alpha_4 = 90^\circ$	$\alpha_1 = 0^\circ$ $\alpha_2 = 30^\circ$ $\alpha_3 = 60^\circ$ $\alpha_4 = 90^\circ$
Gesamthöhe H_G	220	175
Höhe d. rad. Blankets H_1	35	40
Eintauchtiefe der Absorberstäbe auf :		
innerem Radius H_{et1}	35	85
äußerem Radius H_{et2}	108	85

	D1	NA 2
Corehöhe $H_2 - H_1$	150	95
Stabquerschnitt	95 cm ²	108.7 cm ²
Absorber - Material	B ₄ C	B ₄ C
Follower - Material	Al ₂ O ₃	Na
untersuchte Traversen :		
1.) Radius	54.2	33.6
Winkelstellung	30°	60°
2.) Radius	96.1	62.7
Winkelstellung	30°	30°
3.) Radius	25	17
Winkelstellung	≈ 49°	≈ 52°
4.) Radius	96.1	62.7
Winkelstellung	≈ 49°	≈ 52°
5.) Radius	154.3	118.2
Winkelstellung	≈ 49°	≈ 52°

Abb. 2

axiale Traversen im Reaktor D1
 (2-dim. RZ - Rechnung mit DIXI)
 2. Energiegruppe (21.5 Kev - 0.8 Mev)

- Traverse im Reaktorzentrum
- " " Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.- " " B_4C -Absorber mit Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.- " " radialen Blanket

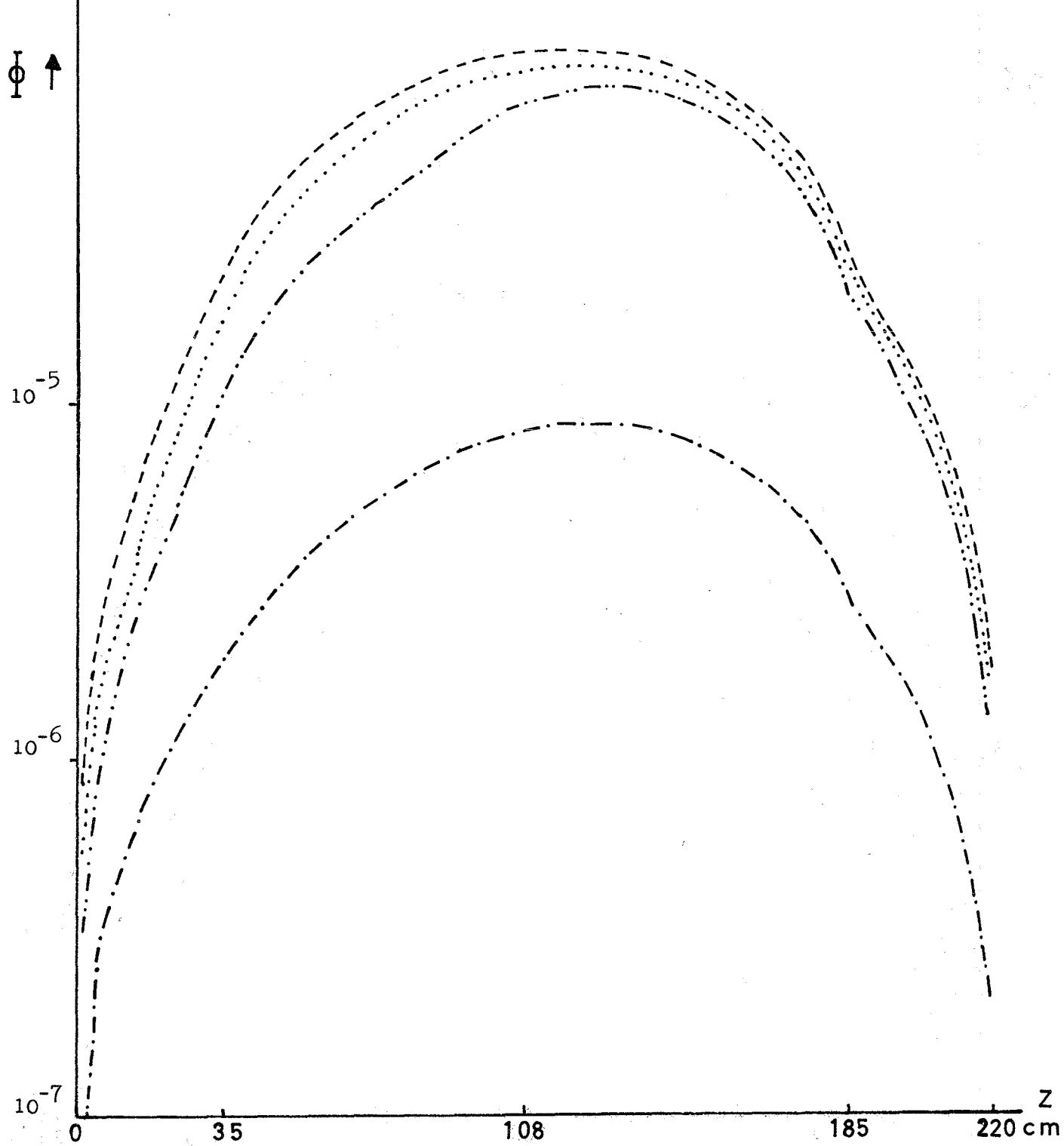


Abb. 3

axiale Traversen im Reaktor D1
 (2-dim. RZ - Rechnung mit DIXY)
 3. Energiegruppe (465 eV - 21.5 KeV)

- Traverse im Reaktorzentrum
- " " Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.-" " B_4C -Absorber mit Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.-" " radialen Blanket

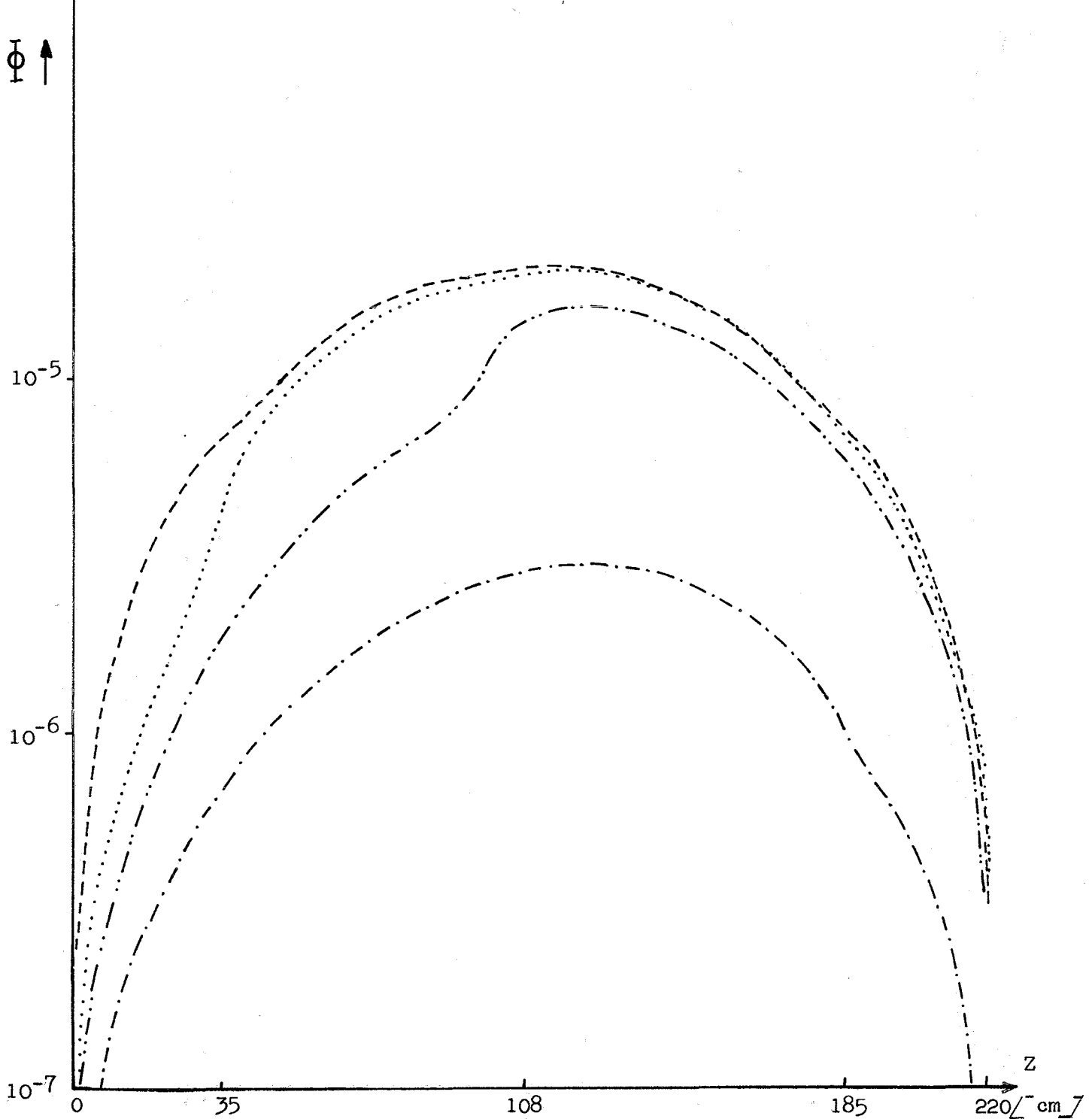


Abb. 4

axiale Traverse im Reaktor D1
 (2 - dim. RZ Rechnung mit DIXY)
 4. Energiegruppe (10.0-465 ev)

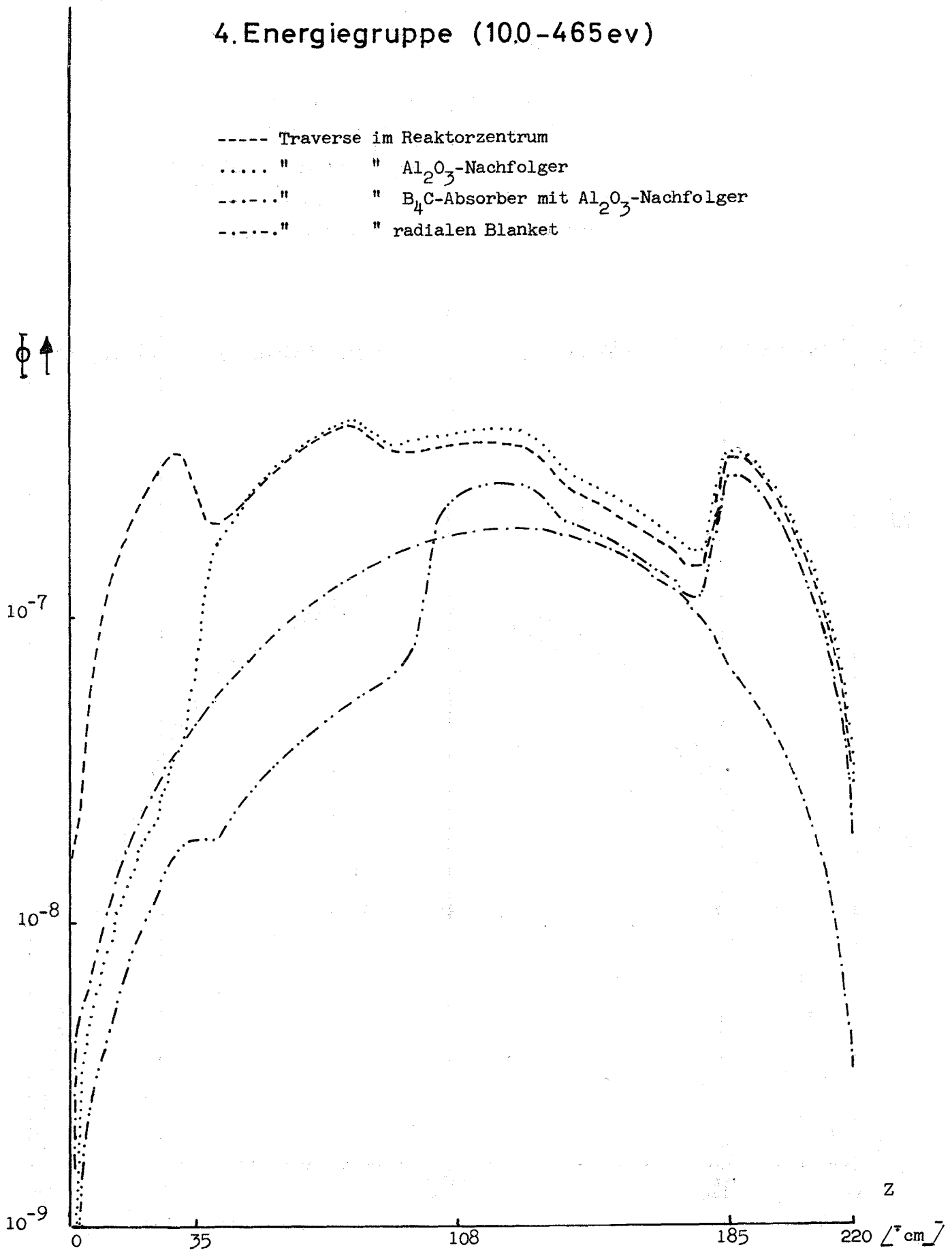


Abb. 5

Reaktor D1

axiale Traversen (3 dim Syntheserechnung)

2. Energiegruppe(21,5 - 800 KeV)

- Traverse im Reaktorzentrum
- " " Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.-" " B_4C -Absorber mit Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.-" " radialen Blanket
- " " in der äußeren Corezone

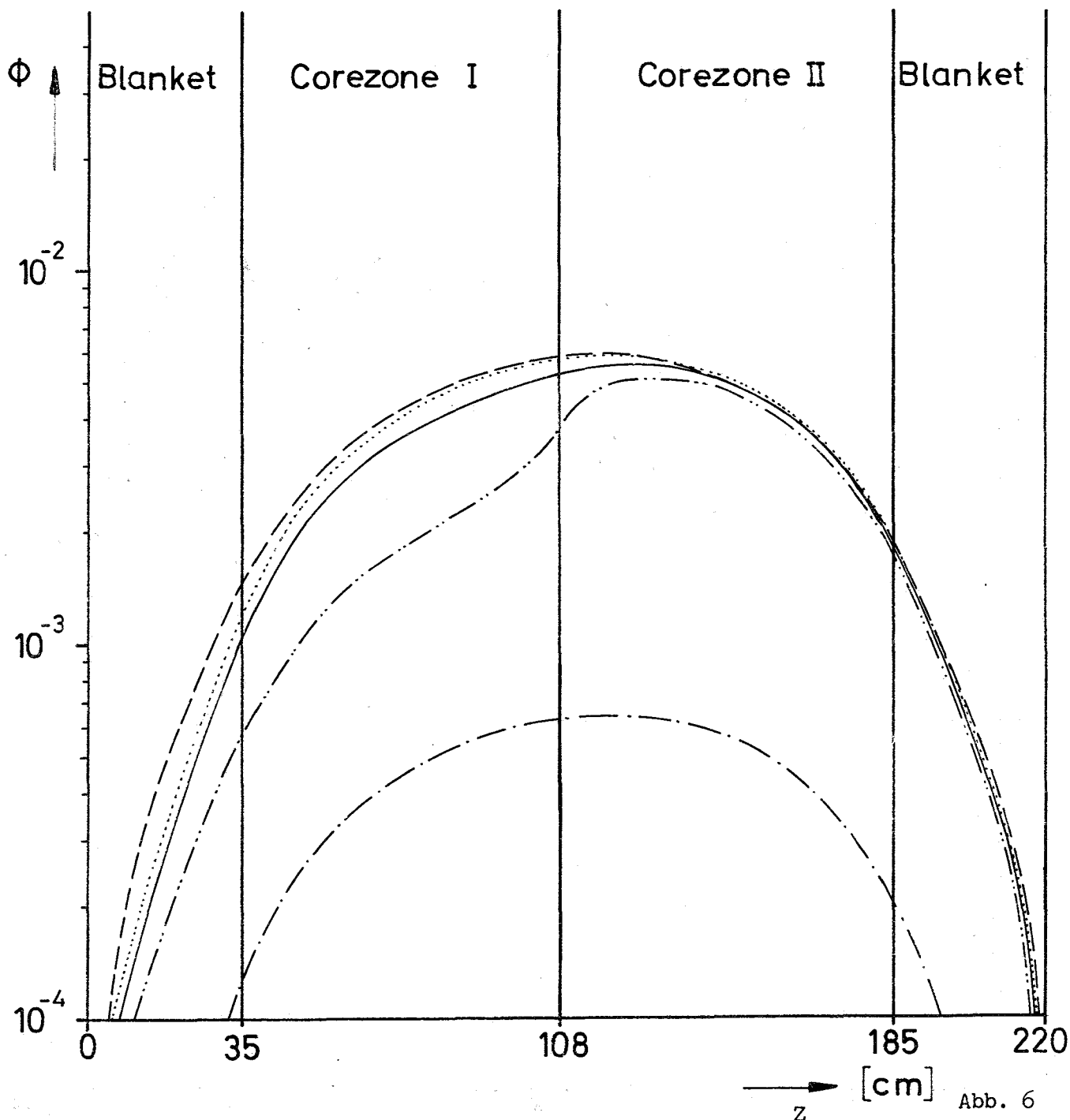


Abb. 6

Reaktor D1

axiale Traversen (3dim. Syntheserechnung)

3. Energiegruppe (465ev - 21.5 Kev)

- Traverse im Reaktorzentrum
- " " Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.-" " B_4C -Absorber mit Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.-" " radialen Blanket
- " in der äußeren Corezone

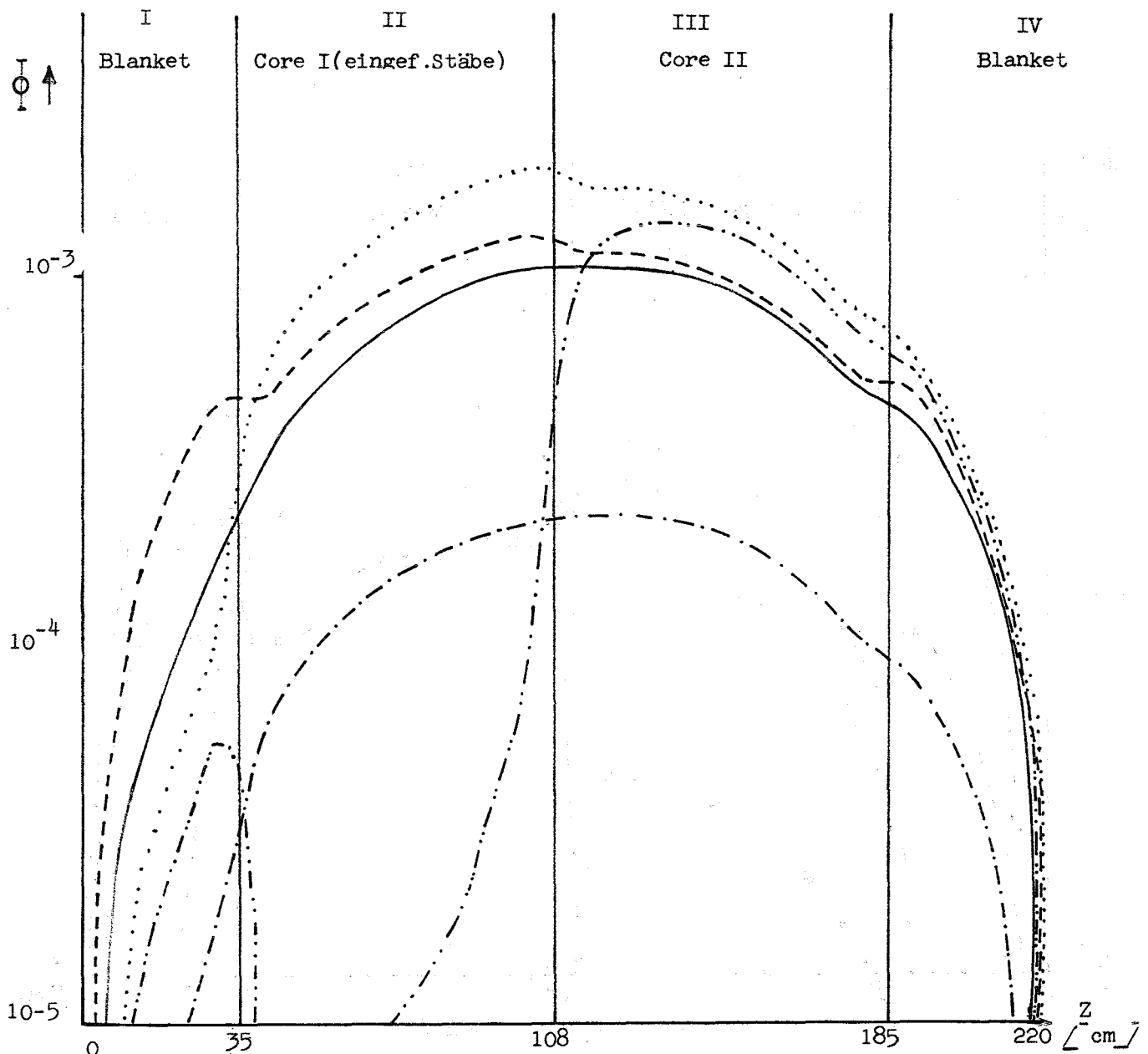


Abb. 7

Reaktor D1

axiale Traversen (3dim. Syntheserechnung)

4. Energiegruppe (10,0-465ev)

- Traversen im Reaktorzentrum
- " " Al_2O_3 -Nachfolger
- .-.-.- " " B_4C -Absorber mit Al_2O_3 -Nachfolger
- " in der äußeren Corezone
- " im radialen Blanket

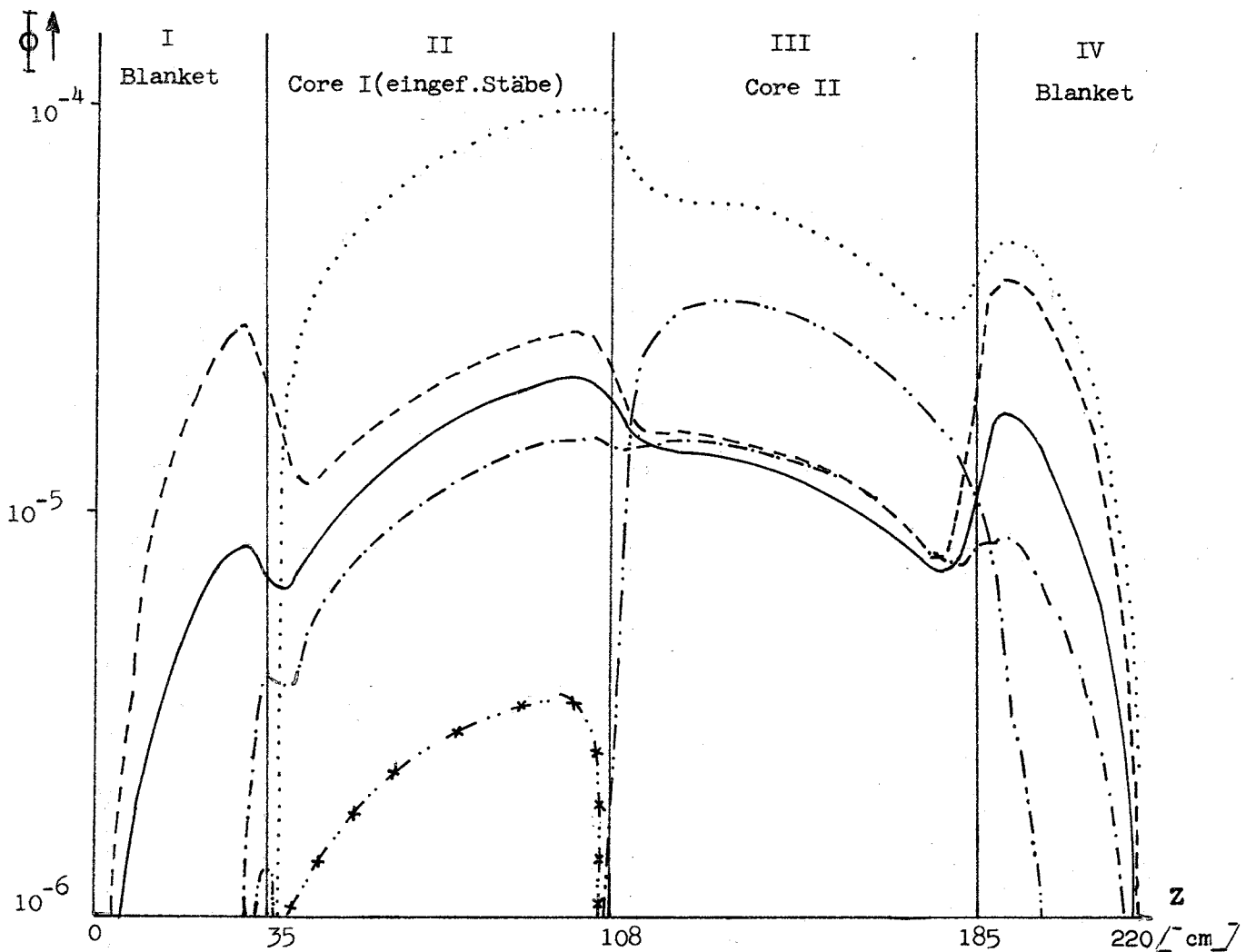


Abb.8

Reaktor D1

Überlagerungsfunktionen

für die Syntheserechnung

(3. Energiegruppe (465ev - 21,5Kev))

- Überlagerungsfunktion zur Versuchsfunktion für den Bereich der oberen Corezone
- - - - Überlagerungsfunktion zur Versuchsfunktion für den Bereich der unteren Corezone
- * * * negative Werte
- Überlagerungsfunktion zur Versuchsfunktion im oberen Blanket
- x x x Negative Werte

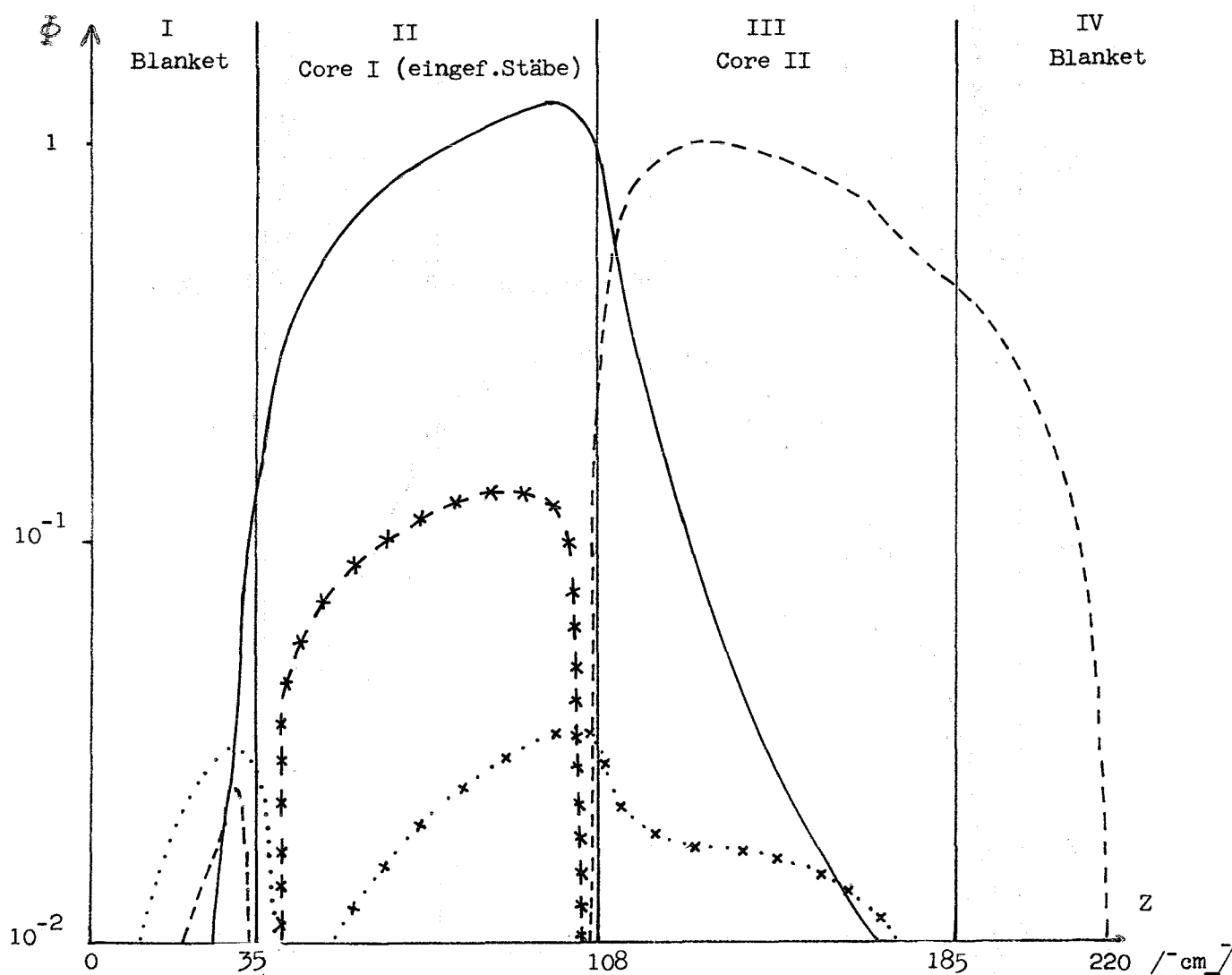
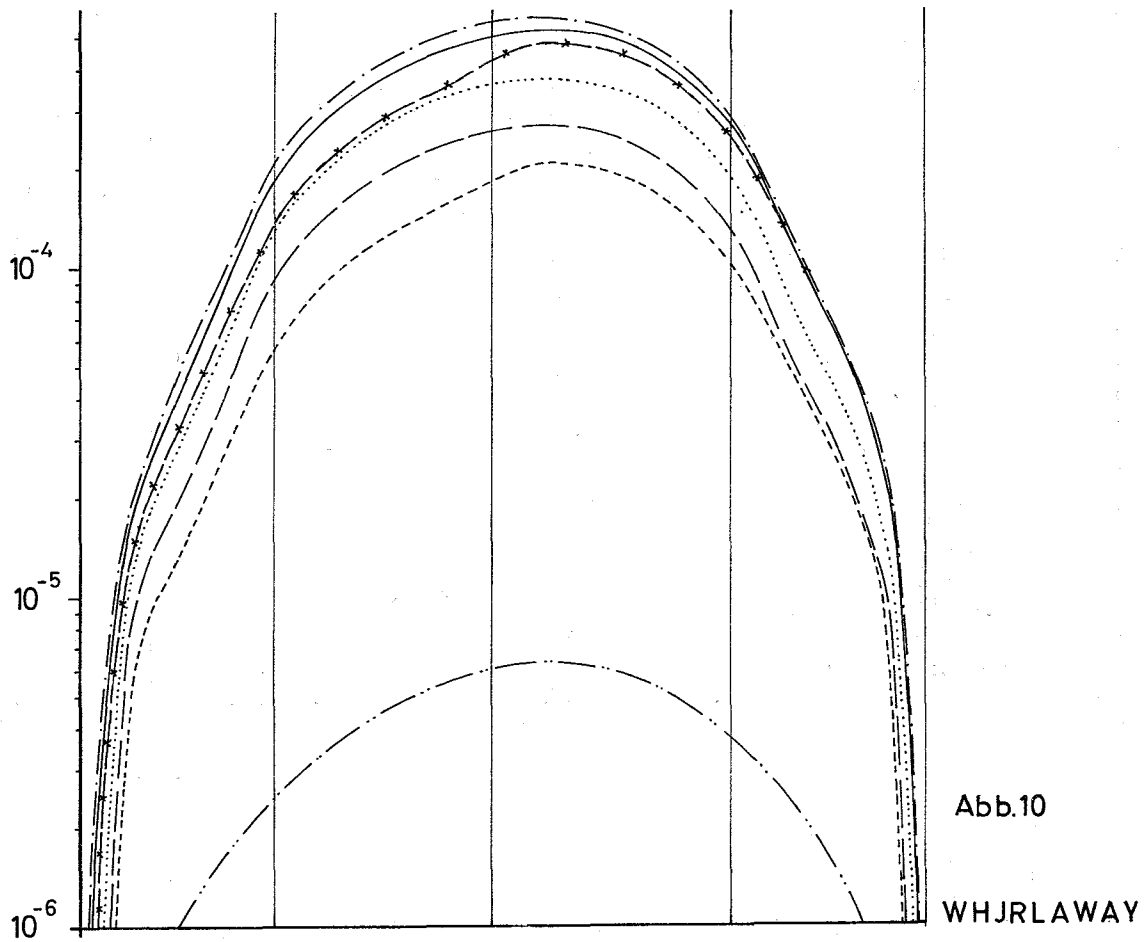
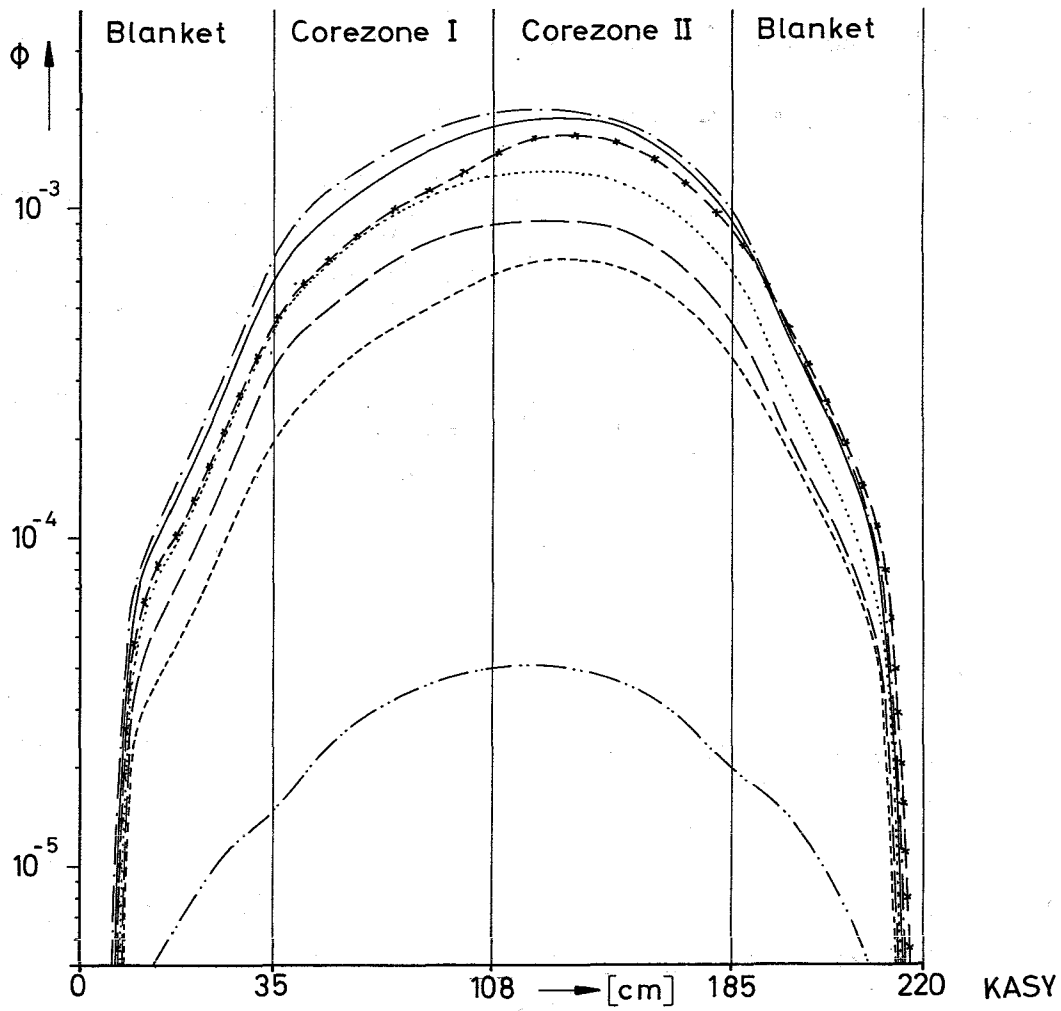


Abb.9

Reaktor Na 2 (quadr. Querschnitt)

axiale Traversen

1. - 20. Energiegruppe (10 - 10.5 MeV)



Reaktor Na 2 (quadr. Querschnitt)
axiale Traversen
21. - 26. Energiegruppe (therm. - 10 eV)

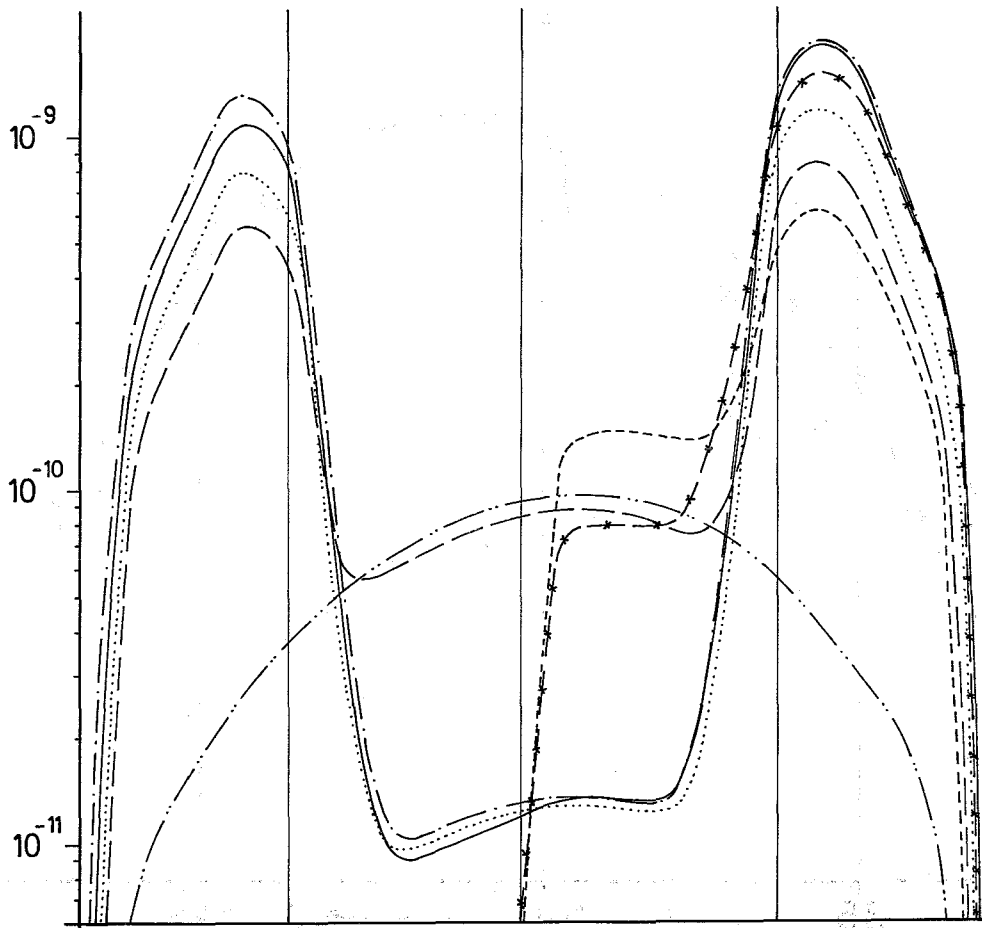
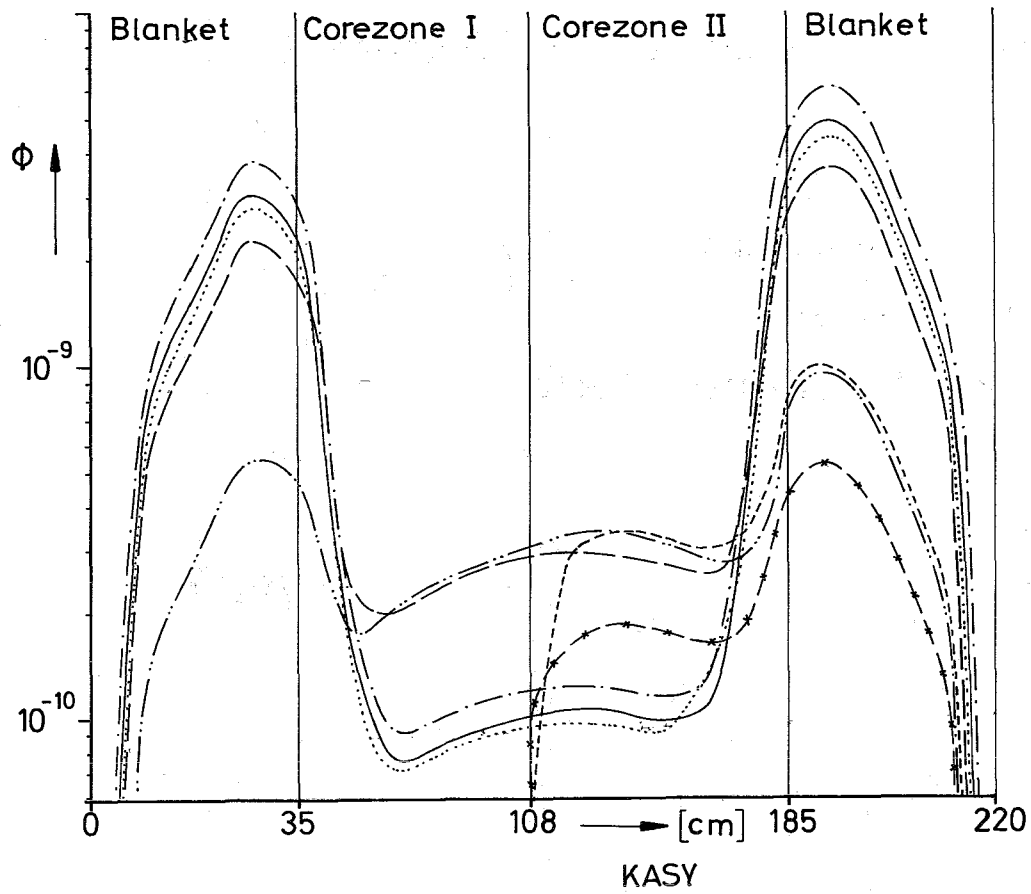


Abb.11

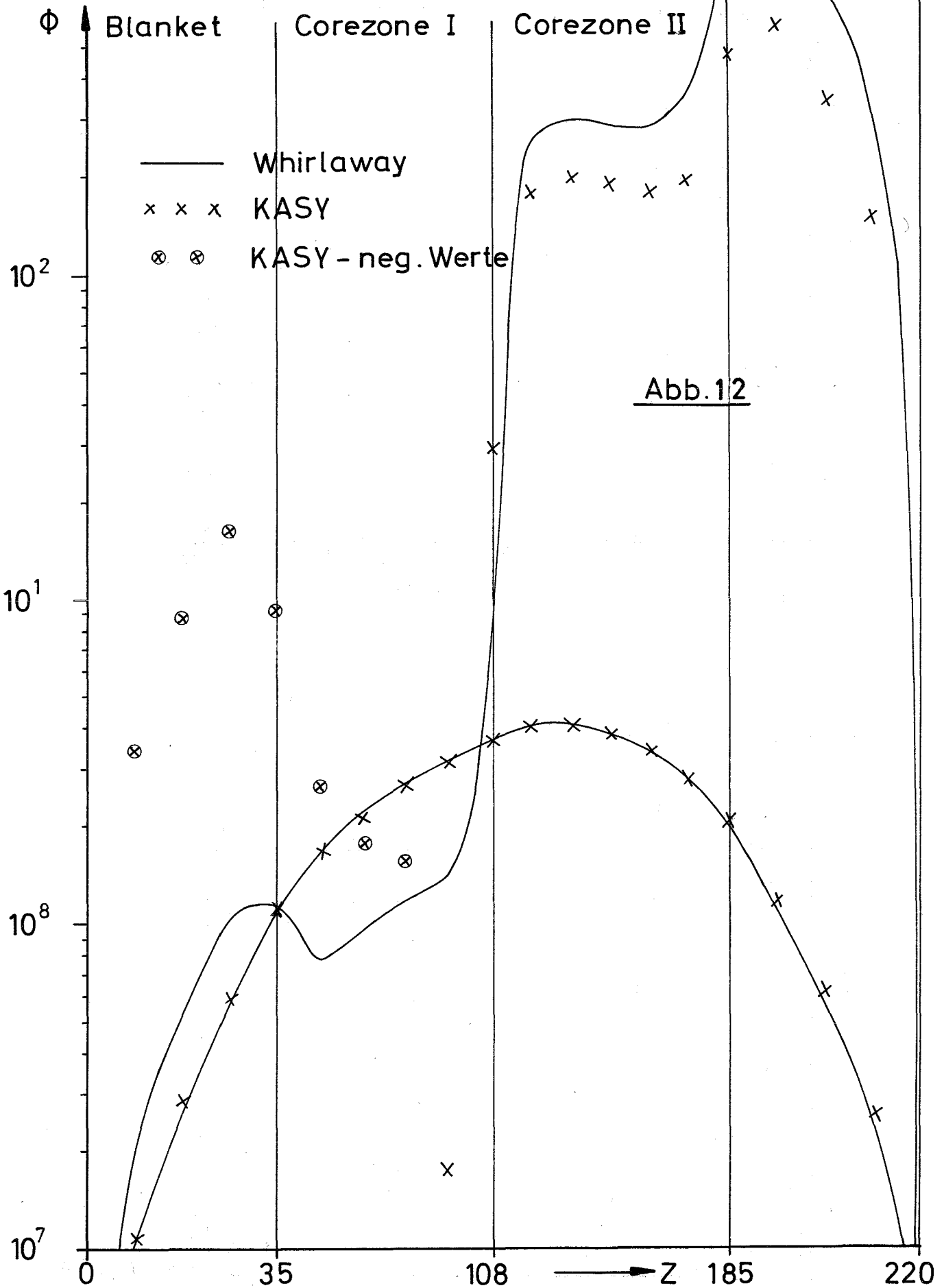
WHJRLAWAY

Flußverlauf im Borstab (äußerer Ring - Na 2)

Vergleich KASY - Whirlaway

1.-20. Energiegruppe (10eV - 10.5 MeV)

21.-26. Energiegruppe (therm. - 10eV)



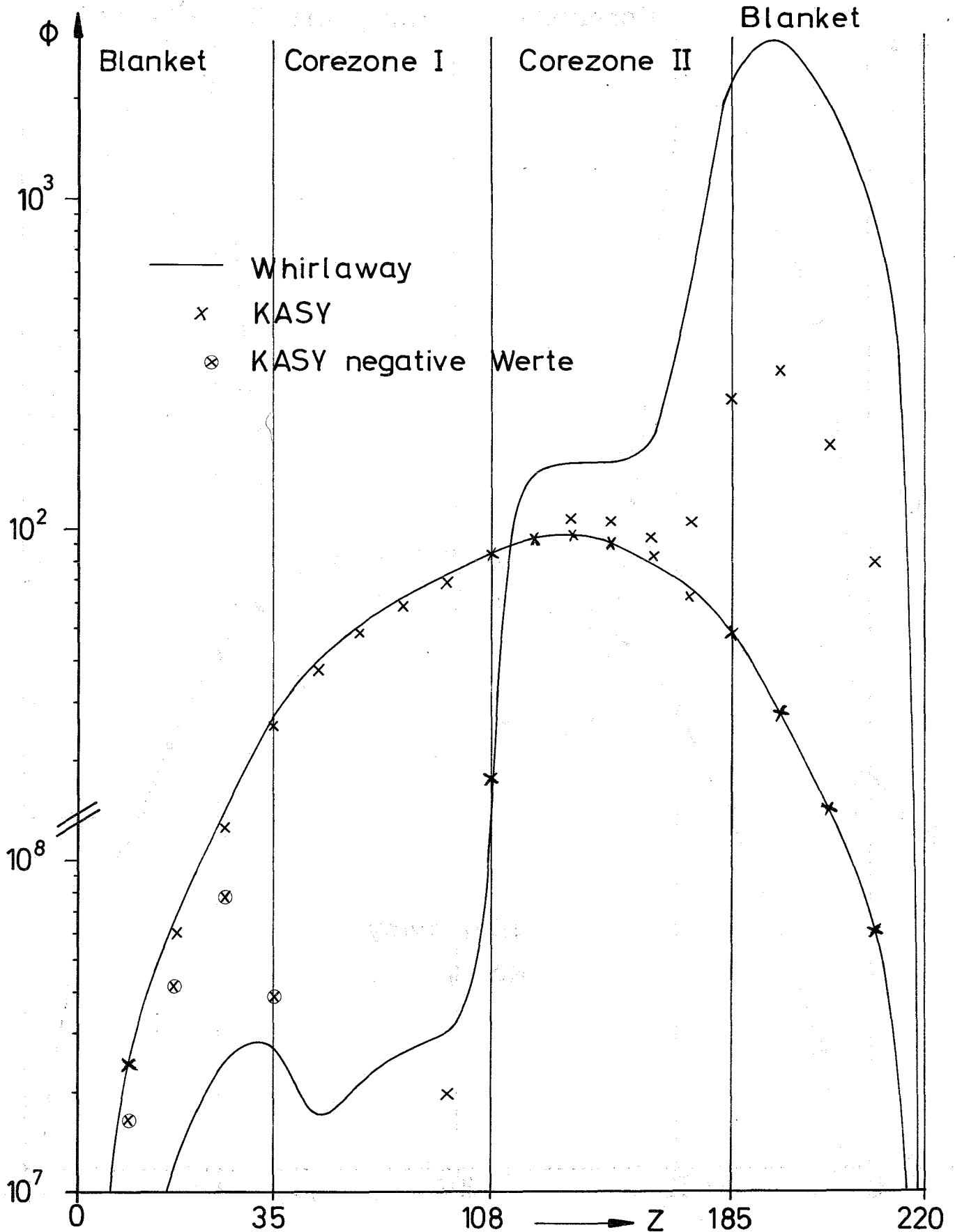
Flußverlauf im Borstab (innerer Ring - Na 2)

Vergleich KASY - Whirlaway

1. - 20. Energiegruppe (10 eV - 10.5 MeV)

Abb.13

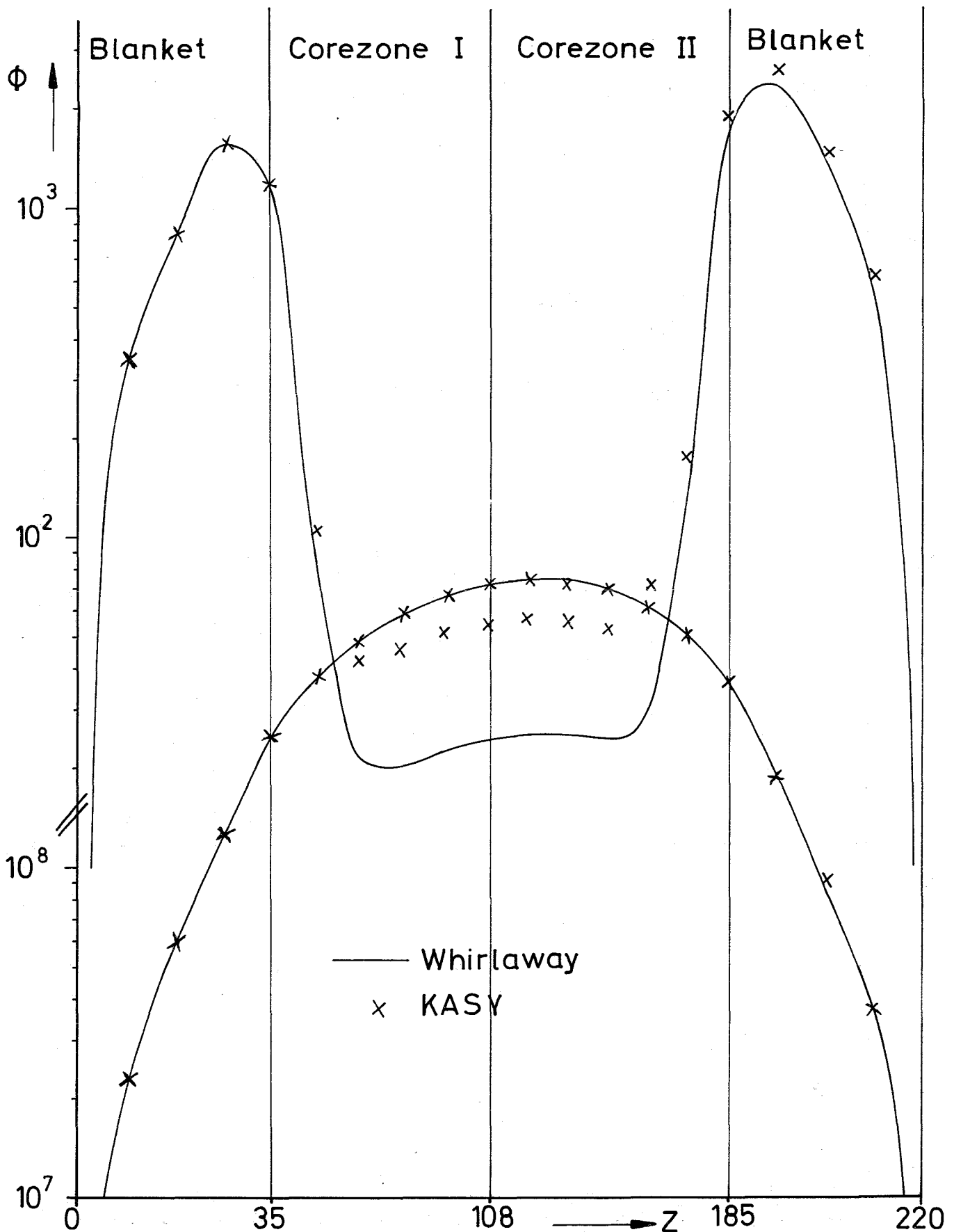
21. - 26. Energiegruppe (therm. - 10 eV)



Vergleich KASY - Whirlaway

1. - 20. Energiegruppe (10 eV - 10.5 MeV)

21. - 26. Energiegruppe (therm. - 10 eV)



Flußverlauf im radialen Blanket

Abb.15

Vergleich KASY - Whirlaway

1. - 20. Energiegruppe (10 eV - 10.5 MeV)

21. - 26. Energiegruppe (therm. - 10 eV)

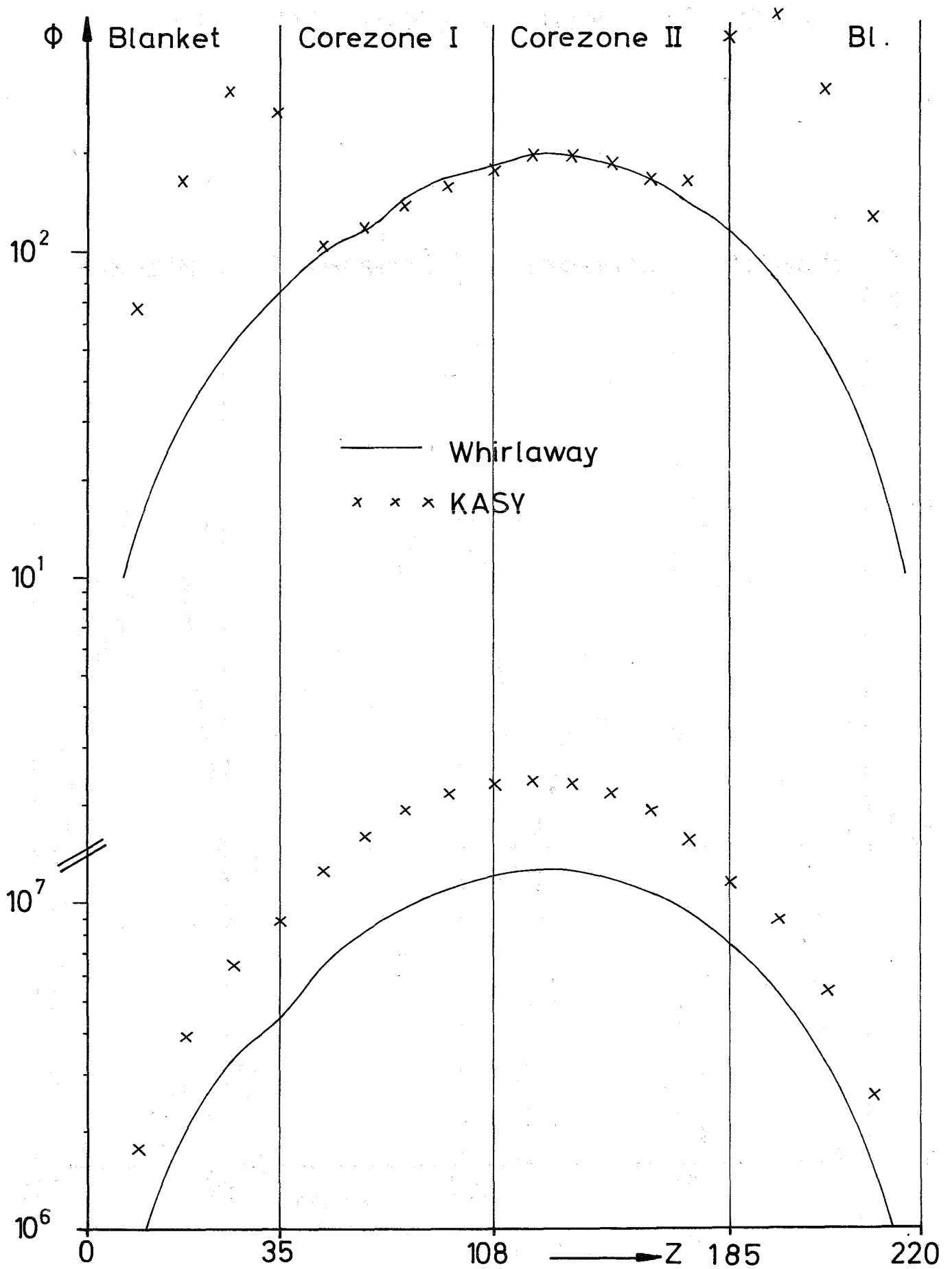
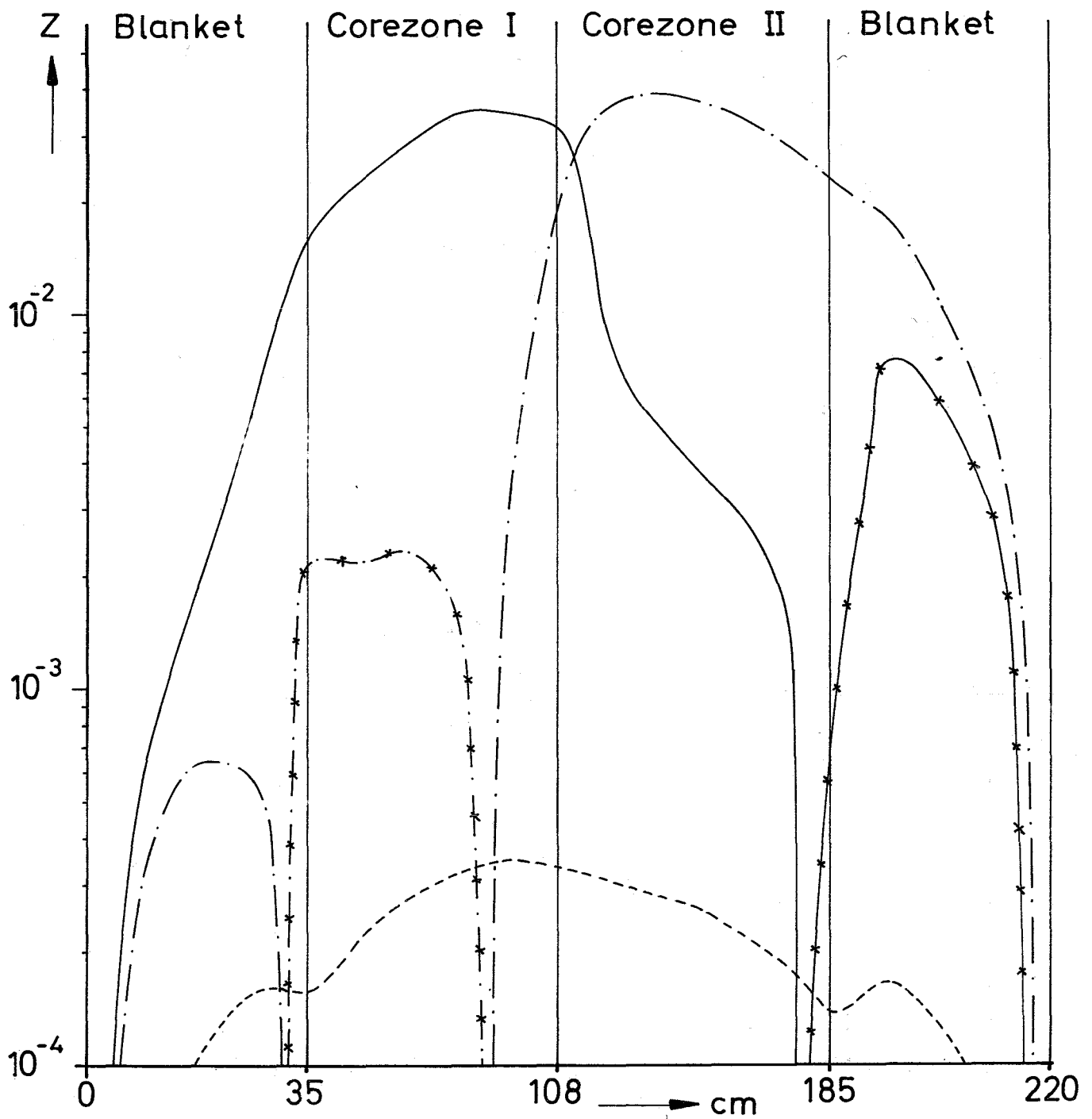


Abb.16

Überlagerungsfunktionen für Na 2
(quadr. Querschnitt)

1. - 20. Energiegruppe (10 eV - 10.5 MeV)



Überlagerungsfunktionen für Na 2
 (quadr. Querschnitt)
 21. - 26. Energiegruppe (therm. - 10eV)

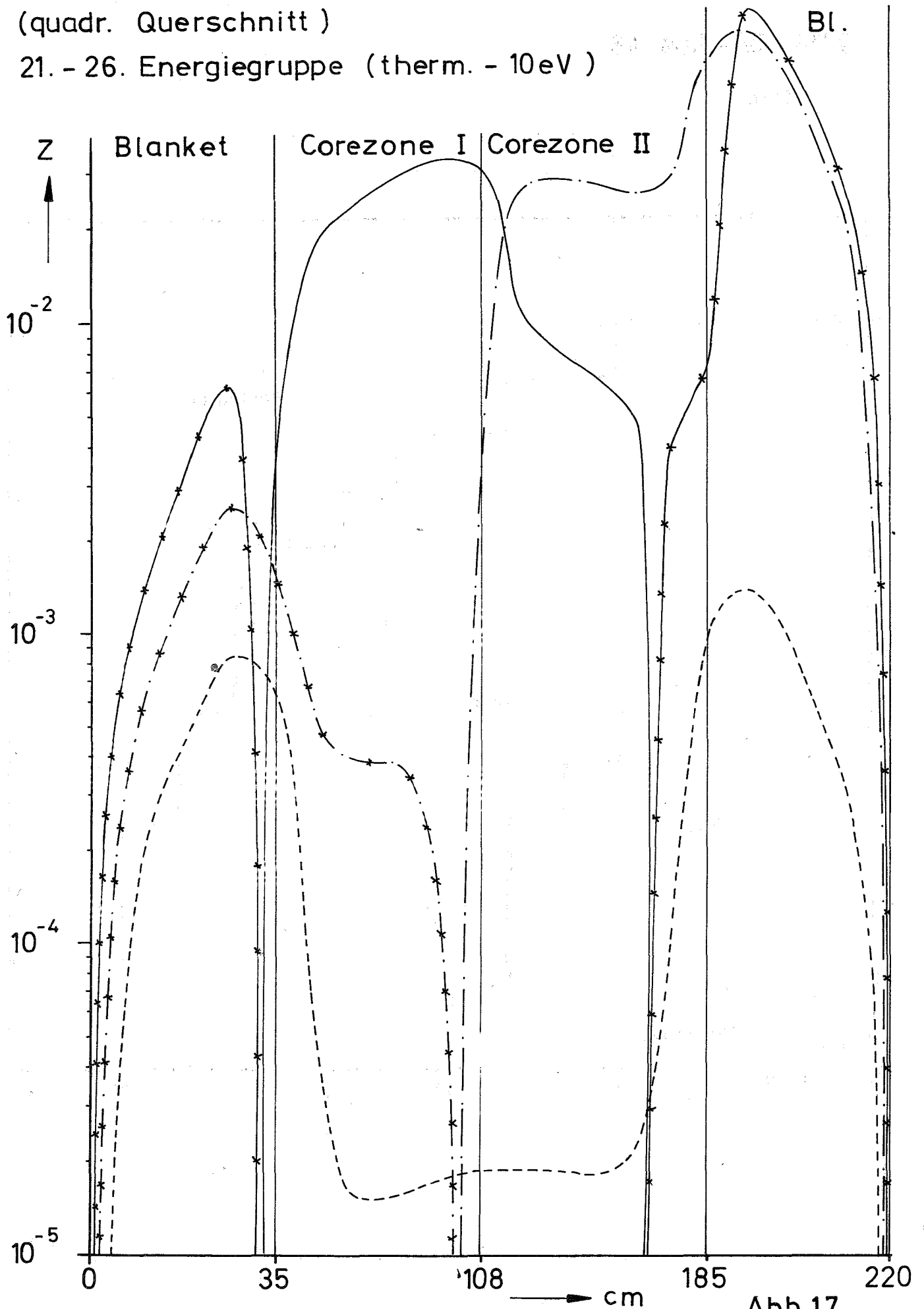


Abb.17

ZPR III - Ass. 48

Grundriß

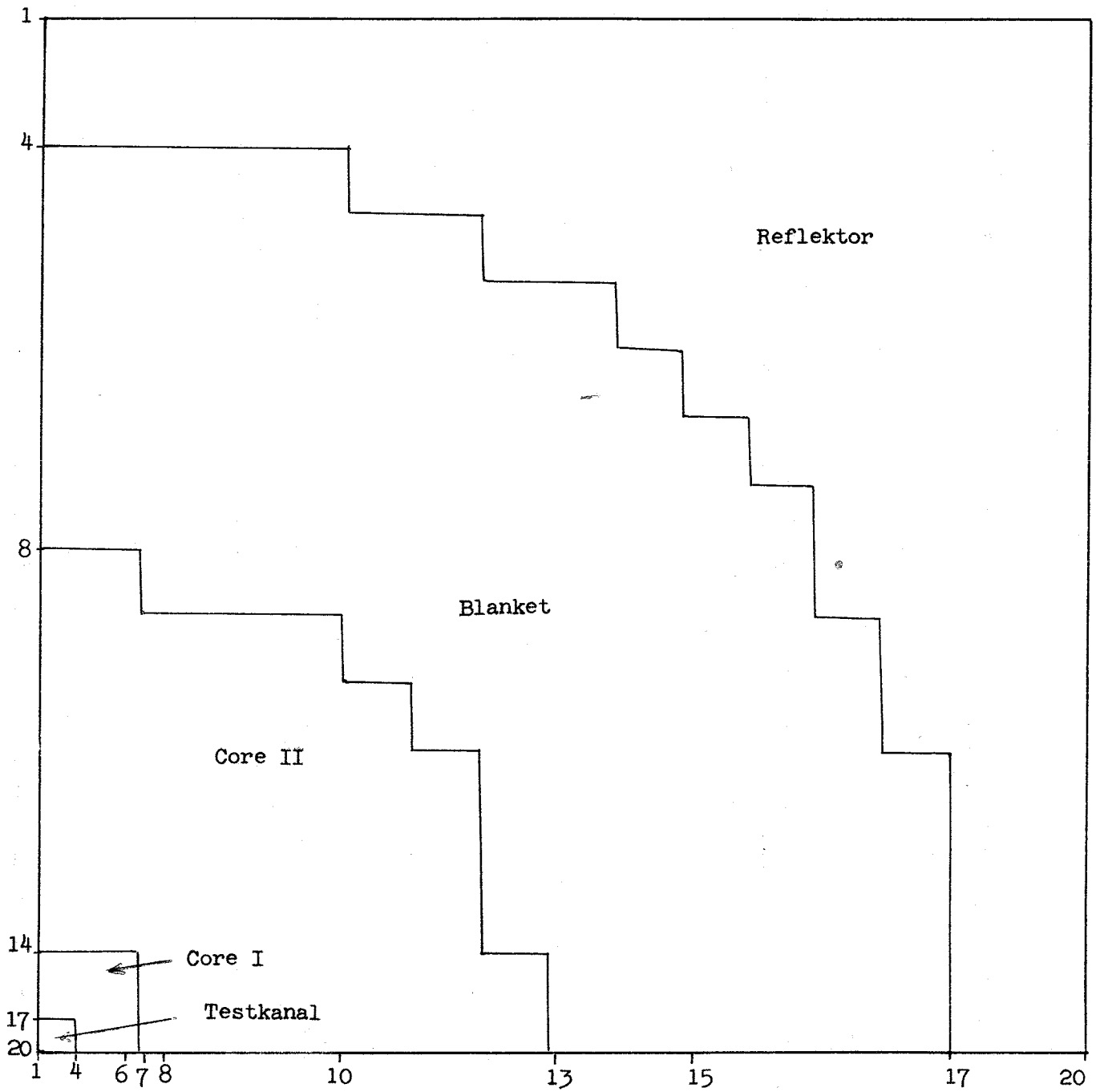
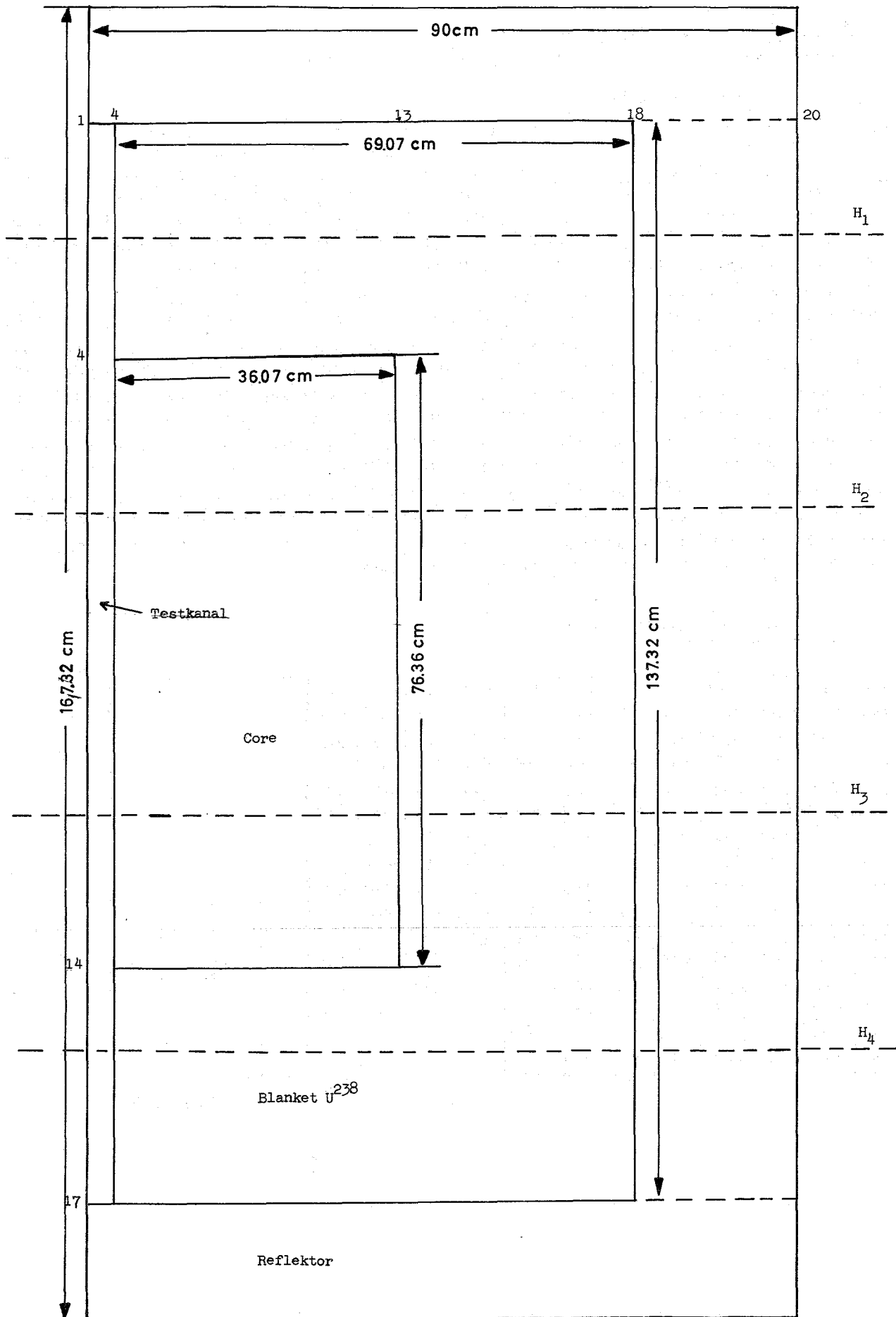


Abb. 18

ZPR III - Ass. 48

Aufriß



TRITON
KASY

axiale Flußverteilung:

Stab nicht eingefahren:

Stab	1. Gruppe				2. Gruppe				3. Gruppe				4. Gruppe				5. Gruppe			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	477	474	363	020	400	960	955	458	539	519	410	068	447	436	106	006	035	030	022	022
2	464	461	353	019	973	935	734	453	525	505	395	066	443	432	104	006	035	028	021	021
3	424	421	322	017	895	860	676	441	485	466	368	061	432	422	096	006	032	026	020	020
4	357	356	272	015	778	743	584	420	421	404	319	053	413	404	081	005	027	022	017	017
4	357	356	272	015	778	743	584	420	421	404	319	053	413	404	081	005	027	022	017	017
5	264	264	201	041	632	603	471	094	338	324	254	041	086	079	061	004	020	016	012	012
6	447	440	406	006	483	466	361	066	241	228	177	046	048	041	031	002	010	007	005	005
7	040	034	023	002	236	211	160	033	109	092	080	045	045	040	007	001	003	002	001	001
8	040	007	005	001	089	075	056	043	043	041	039	024	006	006	004	001	002	001	001	001

Stab ganz eingefahren:

Stab	1. Gruppe				2. Gruppe				3. Gruppe				4. Gruppe				5. Gruppe				6. Gruppe				7. Gruppe				8. Gruppe			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	462	450	392	022	991	994	809	473	422	520	436	075	436	422	520	436	075	075	075	075												
2	449	447	380	021	931	964	772	468	441	506	425	072	425	425	425	425	072	072	072	072												
3	440	435	348	019	857	888	724	454	329	467	391	066	391	391	391	391	066	066	066	066												
4	346	367	293	046	741	768	626	432	329	404	338	052	338	338	338	338	052	052	052	052												
5	255	222	212	042	598	620	504	404	262	323	270	045	270	270	270	270	045	045	045	045												
6	439	444	414	007	450	478	387	073	481	226	188	032	188	188	188	188	032	032	032	032												
7	035	032	025	003	206	213	171	036	071	089	074	046	074	074	074	074	046	046	046	046												
8	008	007	002	001	074	074	060	044	074	074	074	074	074	074	074	074	074	074	074	074												

Abb. 20

TRITON
KASY

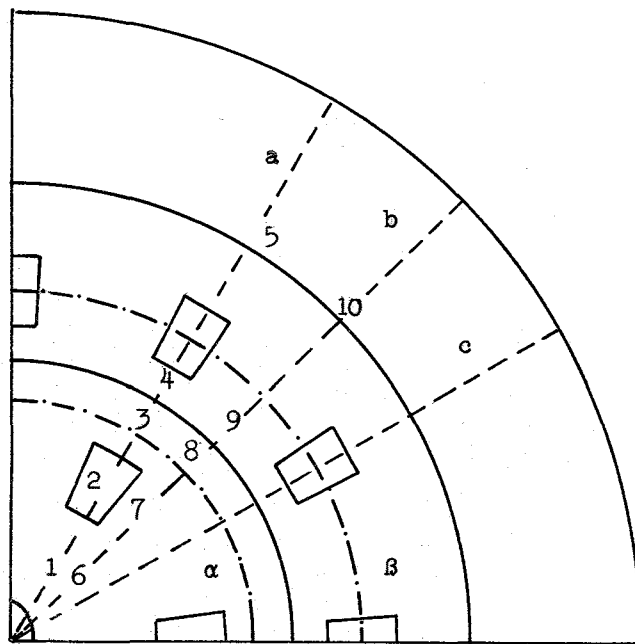
axiale Flußverteilung:

Stab bis zur Mitte eingefahren:

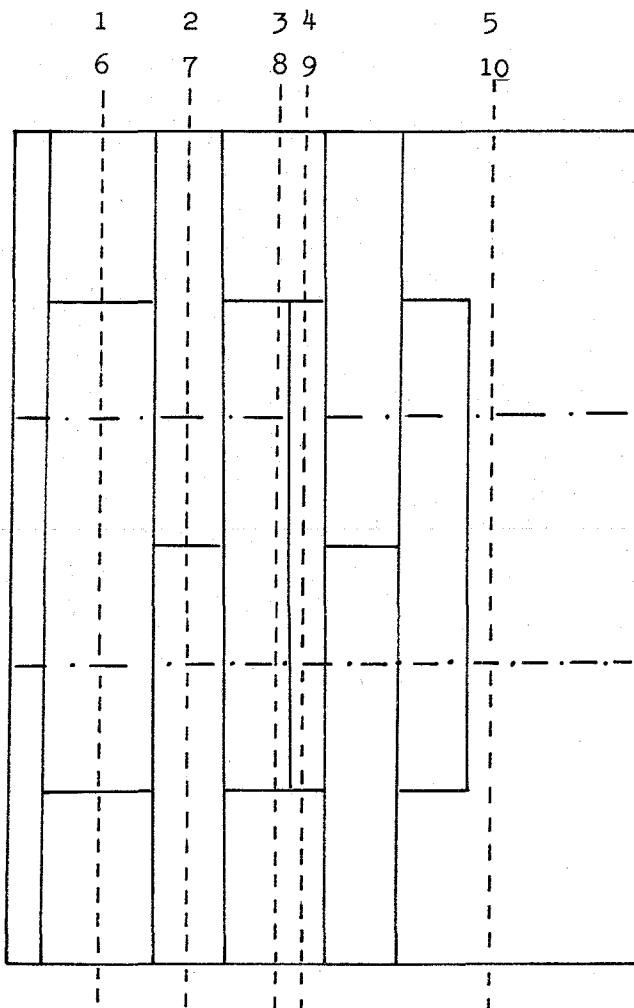
Gr. 1	1. Gruppe										2. Gruppe										3. Gruppe									
	1	4	6	8	13	15	1	4	6	8	13	15	1	4	6	8	13	15	1	4	6	8	13	15						
2	0.36	0.35	0.35	0.35	0.32	0.30	0.32	0.36	0.36	0.32	0.34	0.32	0.36	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36						
3	0.48	0.49	0.49	0.49	0.44	0.40	0.48	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.48	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48						
4	0.68	0.66	0.65	0.65	0.63	0.61	0.68	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.68	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68						
5	1.16	1.18	1.18	1.18	1.10	1.05	1.16	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.16	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16						
6	1.52	1.51	1.51	1.51	1.44	1.40	1.52	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.52	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52						
7	1.89	1.94	1.94	1.94	1.82	1.77	1.89	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.89	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89						
8	2.12	2.16	2.16	2.16	2.04	1.99	2.12	2.07	2.07	2.07	2.07	2.07	2.12	2.07	2.07	2.07	2.07	2.07	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12						
9	2.27	2.30	2.30	2.30	2.18	2.13	2.27	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.27	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27						
10	2.29	2.34	2.34	2.34	2.22	2.17	2.29	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24	2.29	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29						
11	2.14	2.19	2.19	2.19	2.07	2.02	2.14	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.14	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14						
12	1.81	1.86	1.86	1.86	1.74	1.69	1.81	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.81	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81						
13	1.36	1.41	1.41	1.41	1.29	1.24	1.36	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.36	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36						
14	0.97	1.02	1.02	1.02	0.90	0.85	0.97	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.97	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97						
15	0.50	0.55	0.55	0.55	0.43	0.38	0.50	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50						
16	0.20	0.25	0.25	0.25	0.13	0.08	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20						

Abb. 21

Anordnung der radialen, tangentialen und axialen Traversen im Reaktor Na 2



----- 3 radiale Traversen
 -.-.-.- 2 tangentiale Traversen
 M Durchstoßpunkte axialer Traversen



----- 2 Ebenen für radiale und tangentiale Traversen
 -.-.-.- Verlauf der axialen Traversen 1-5 und 6-10

Abb. 22

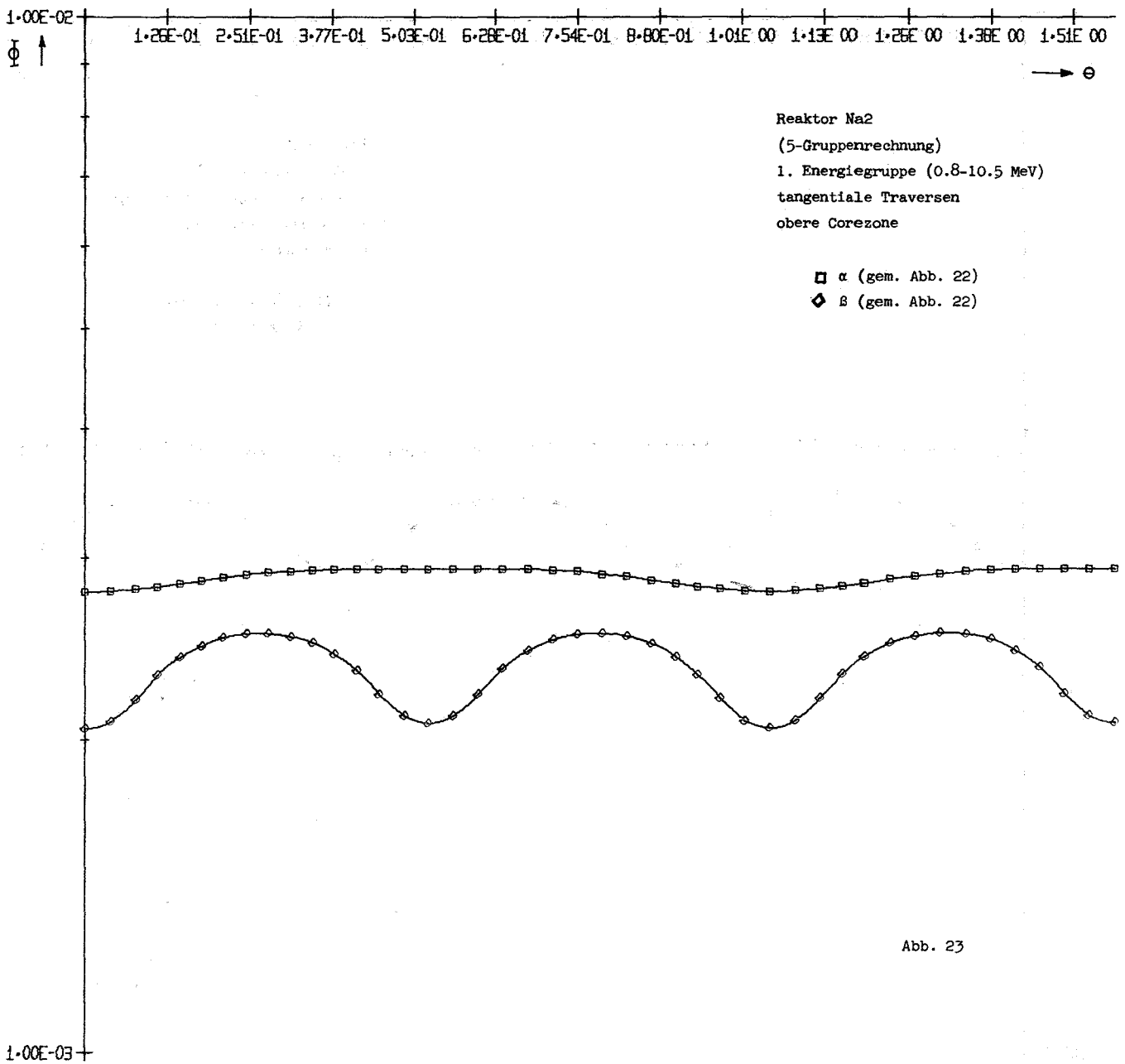


Abb. 23

ABB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN.

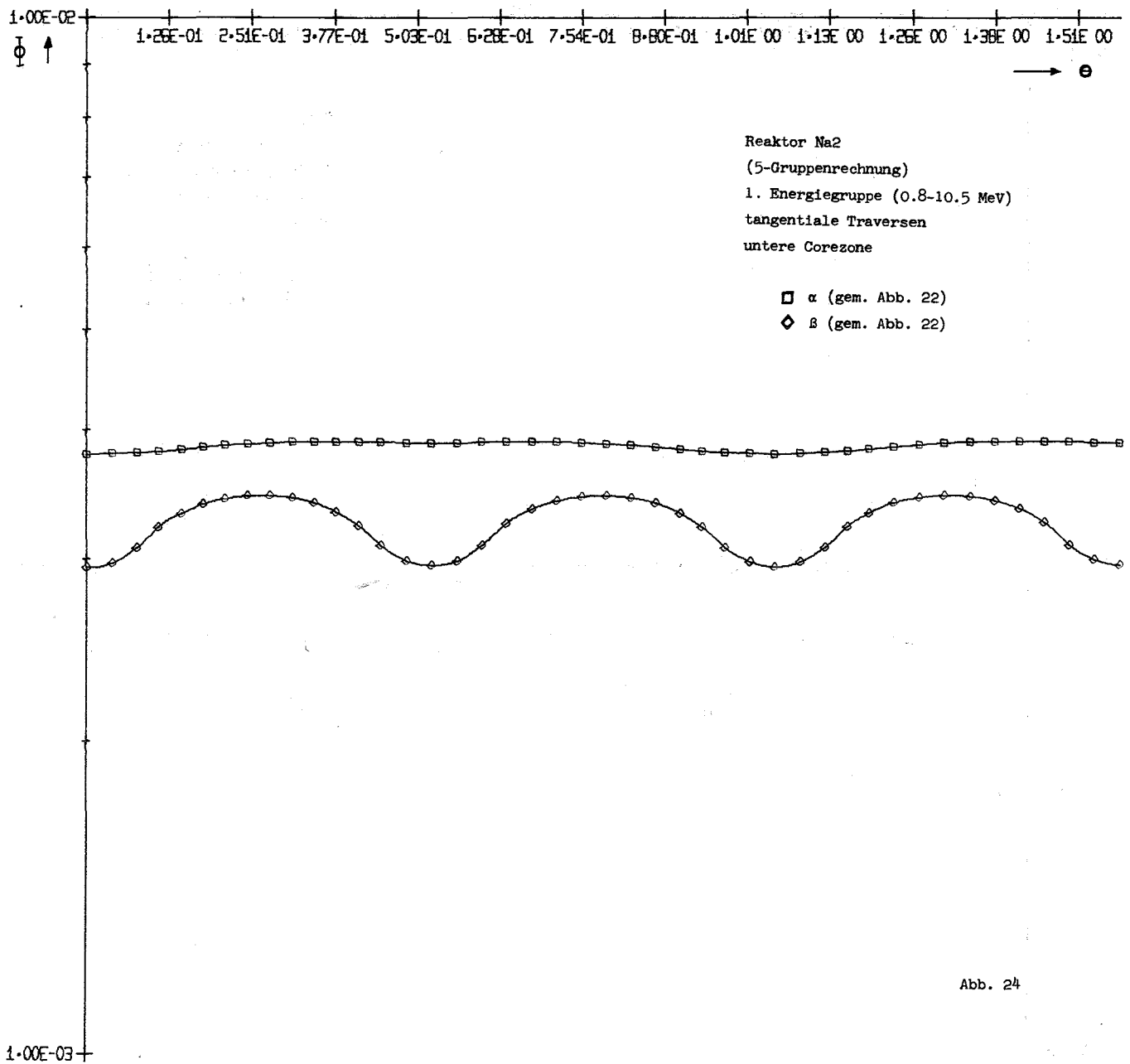


Abb. 24

ABB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN..

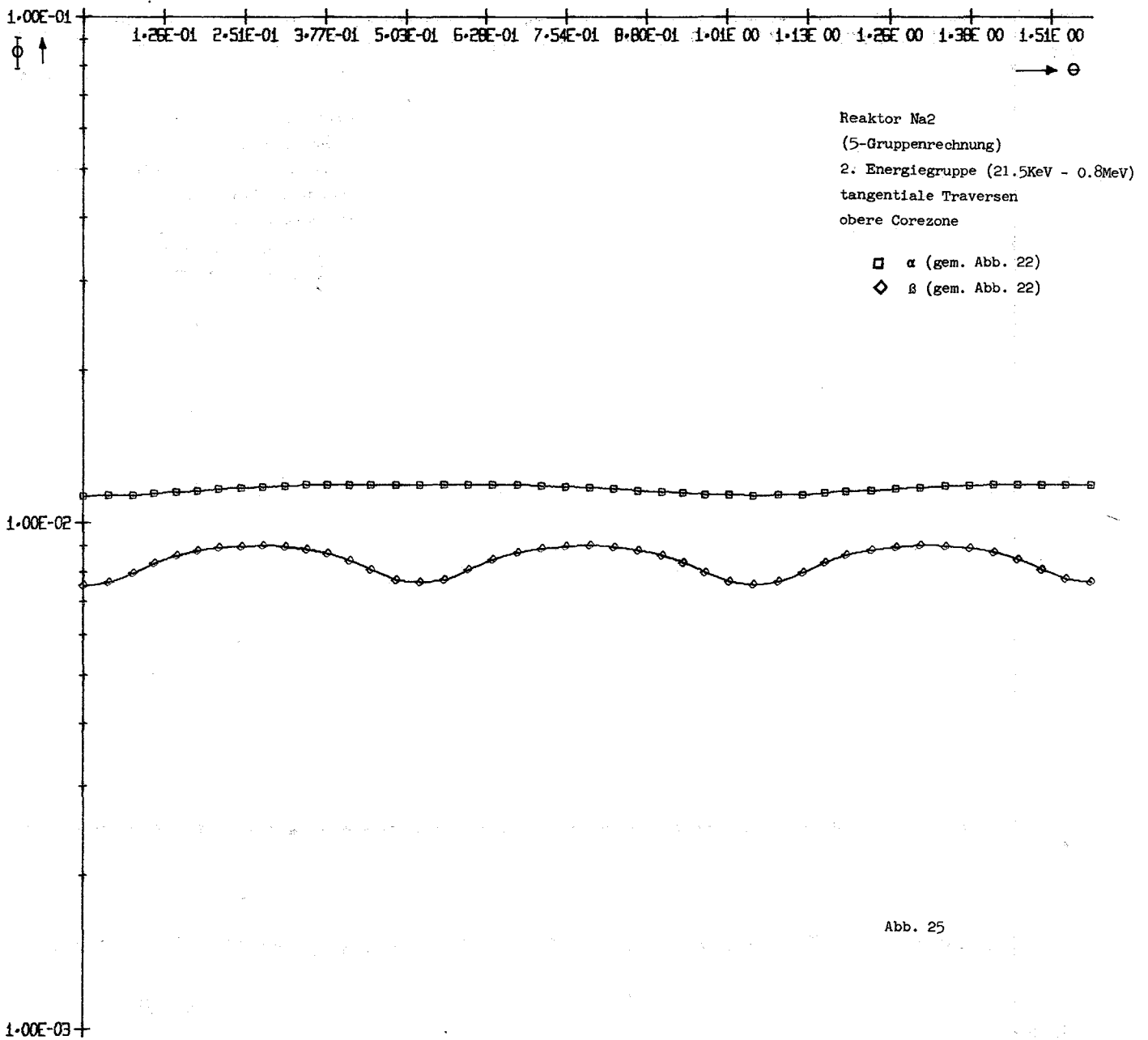


Abb. 25

AEB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN

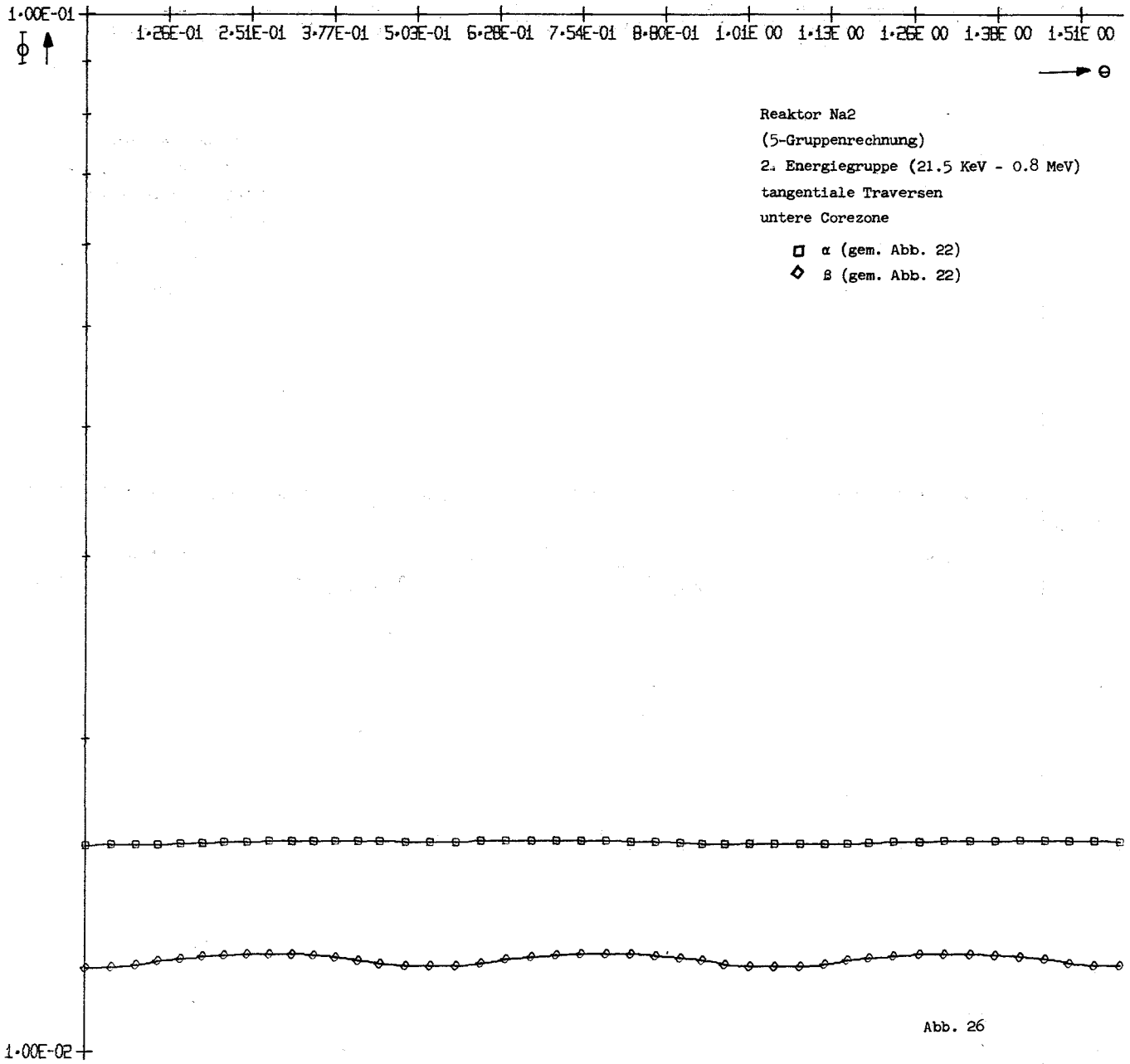


Abb. 26

ABB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN.

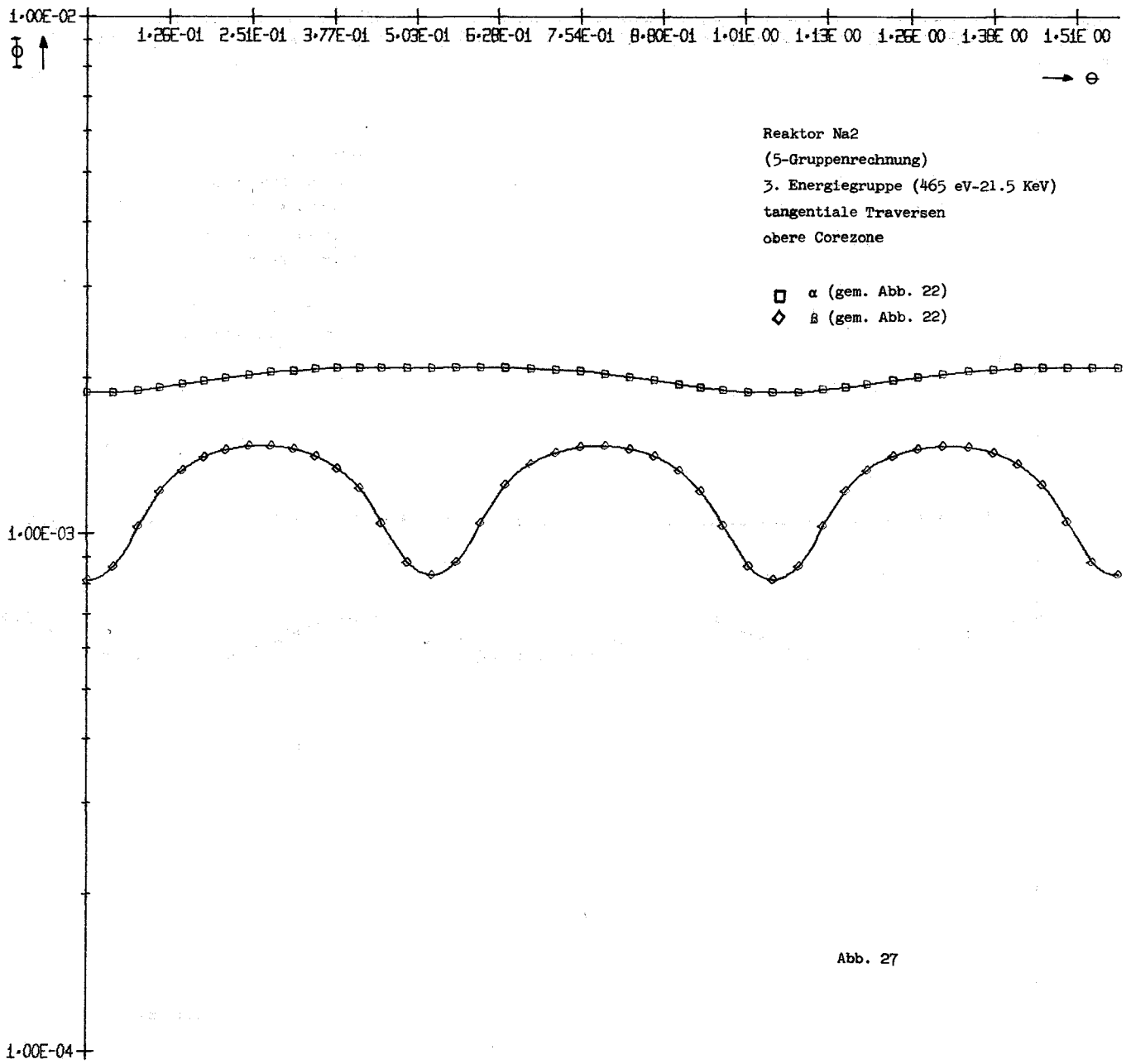


Abb. 27

ABB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN..

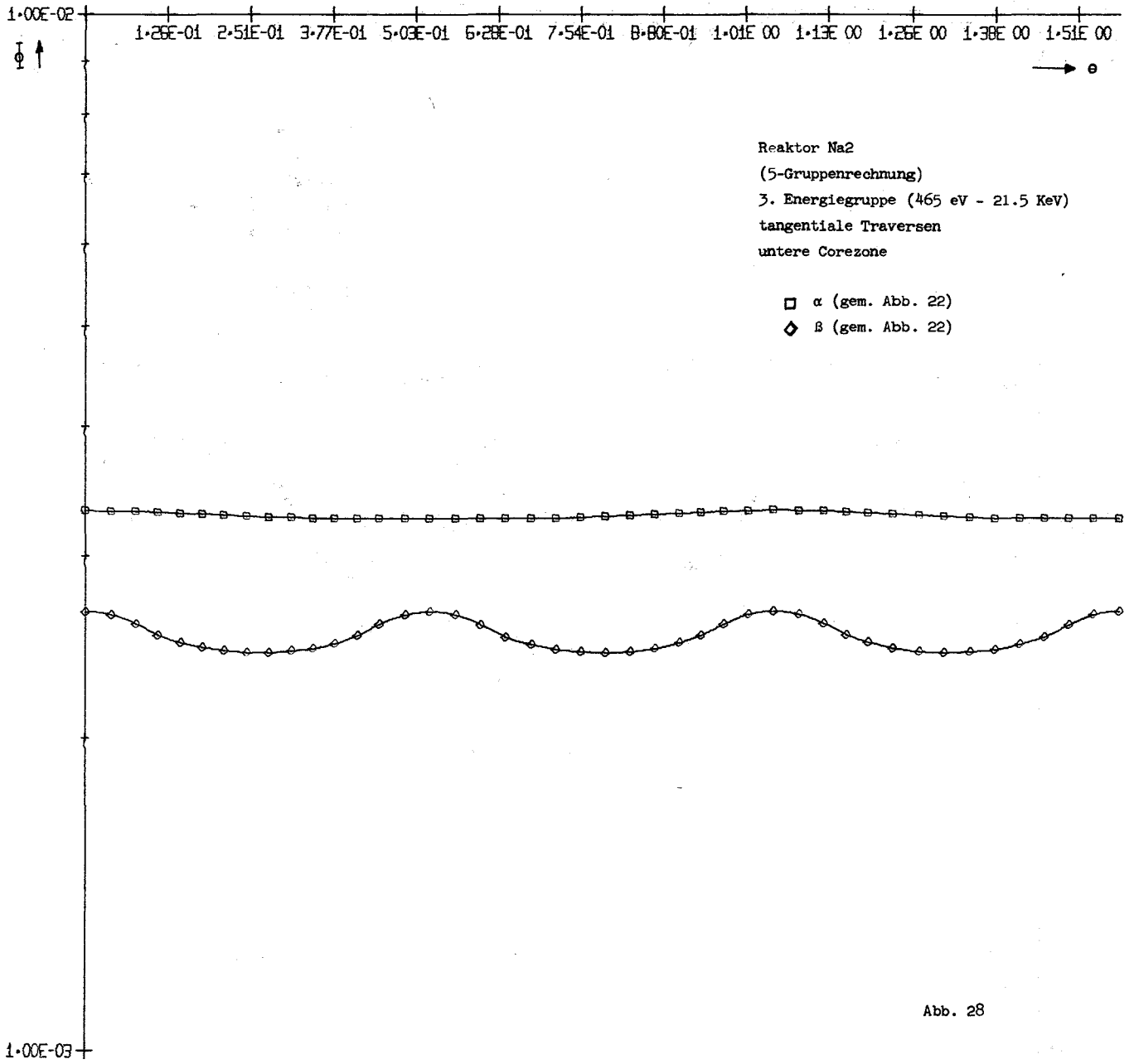


Abb. 28

ABB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN.

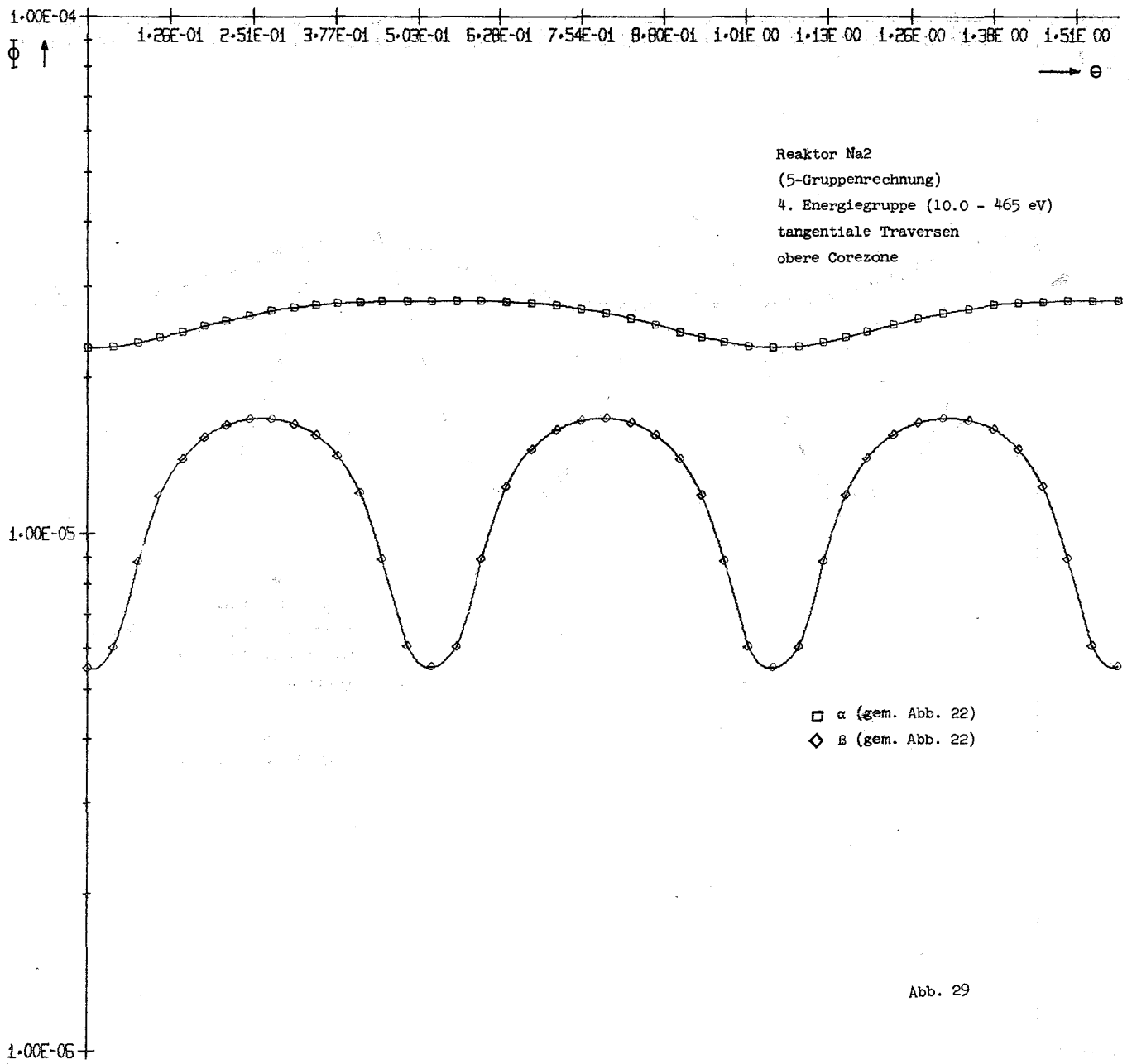


Abb. 29

ABB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN..

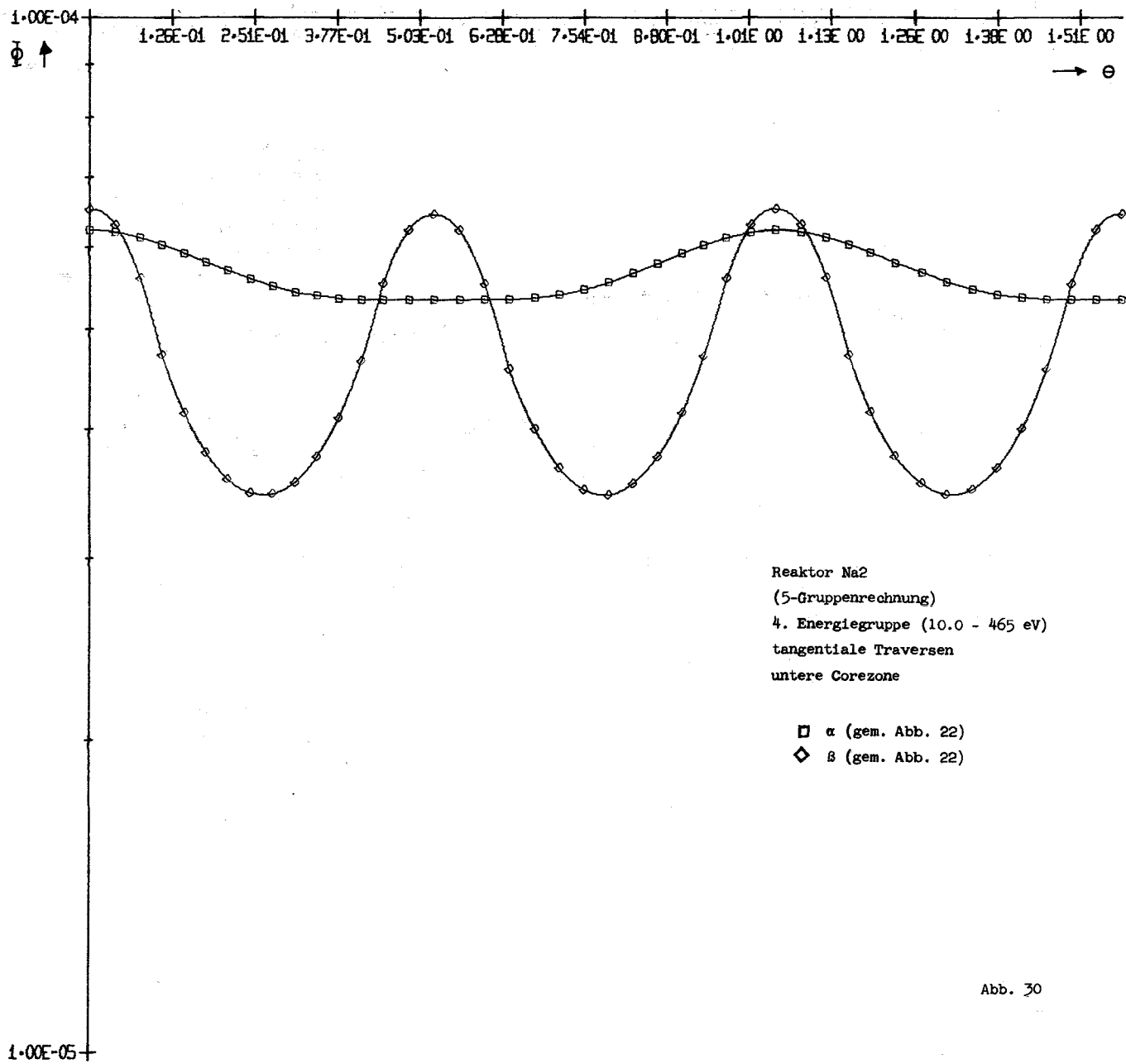


Abb. 30

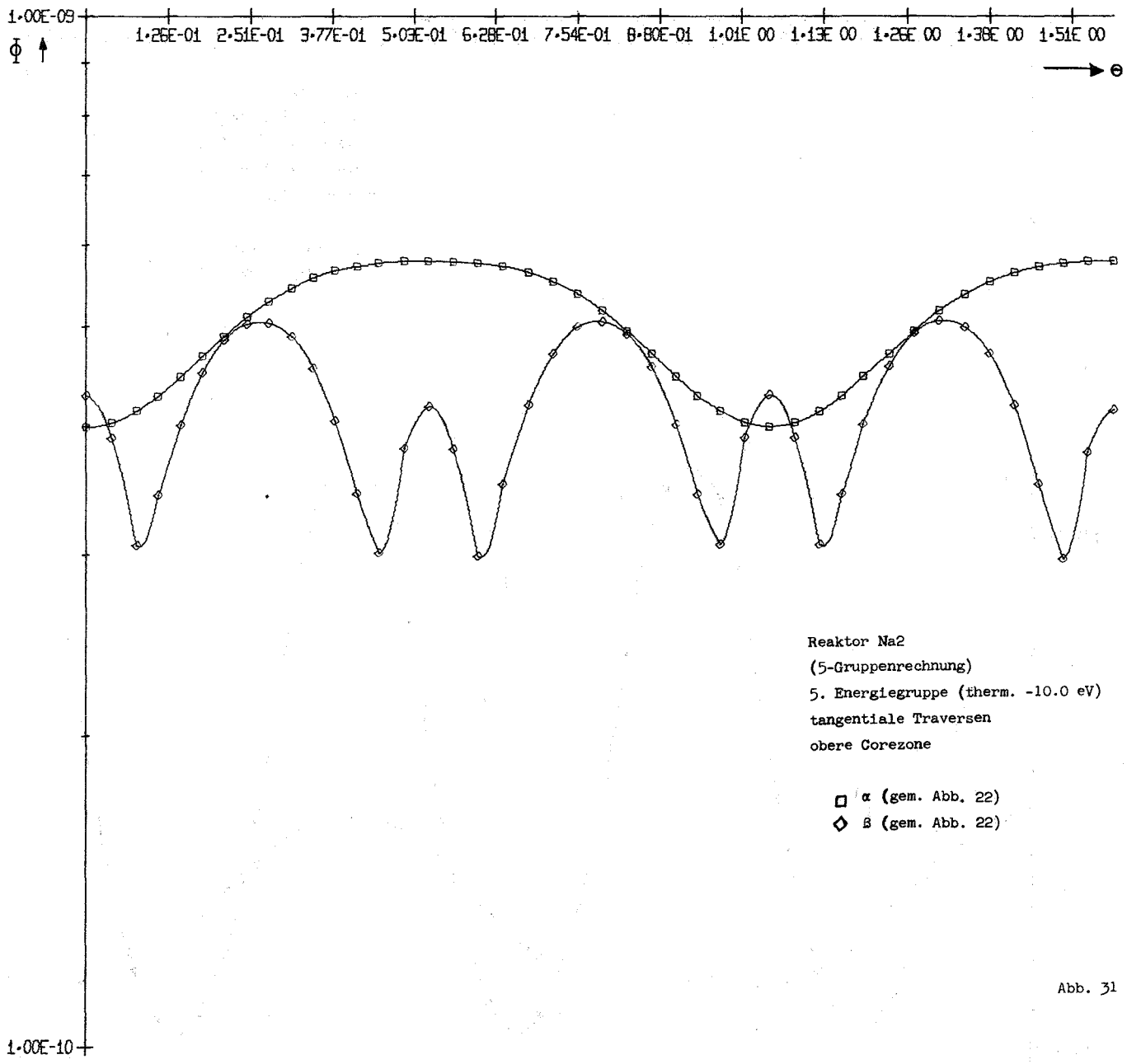


Abb. 31

ABB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN..

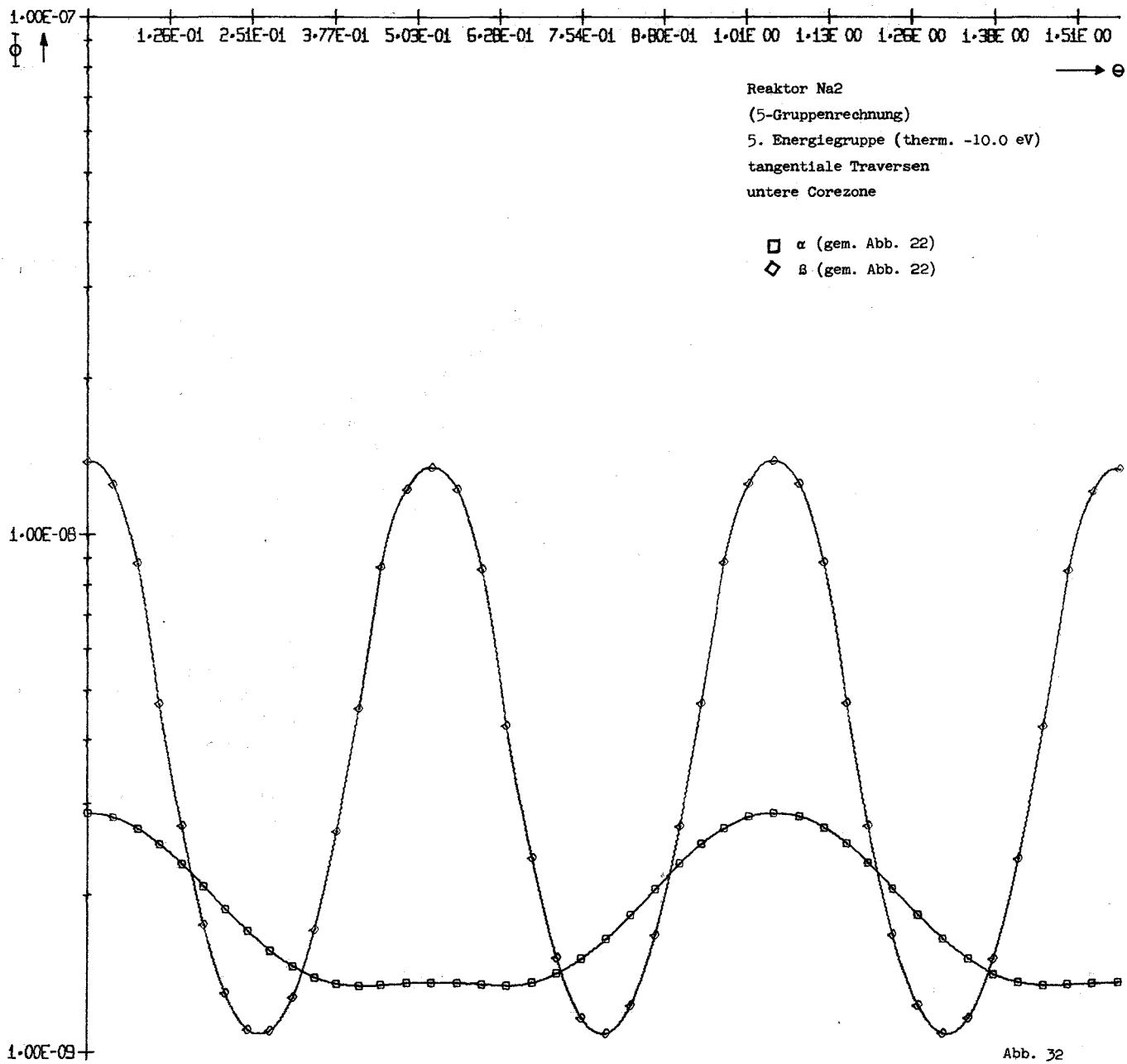


ABB-00001 TANGENTIALE TRAVERSEN

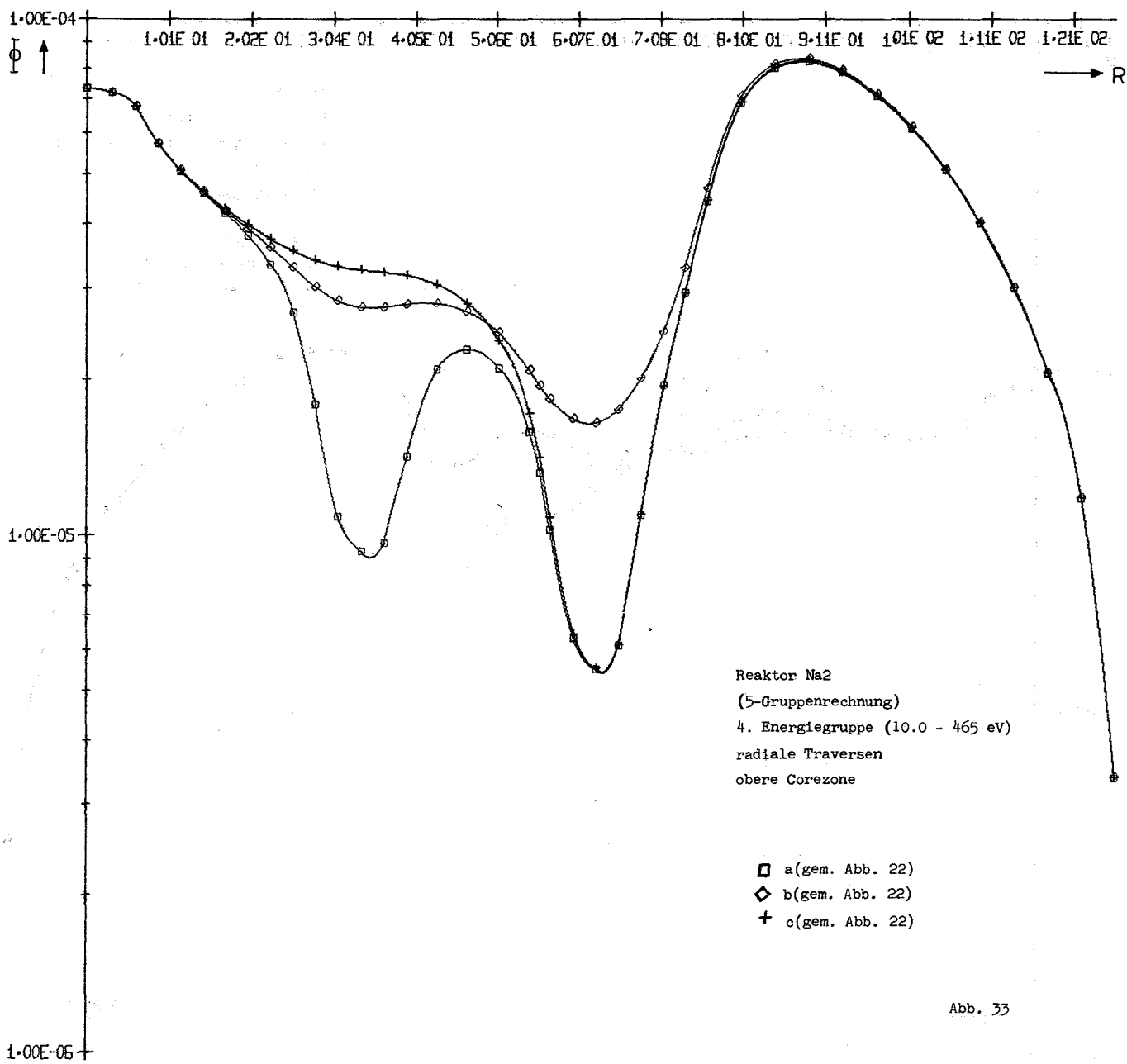


ABB-00001 RADIALE TRAVERSESEN..

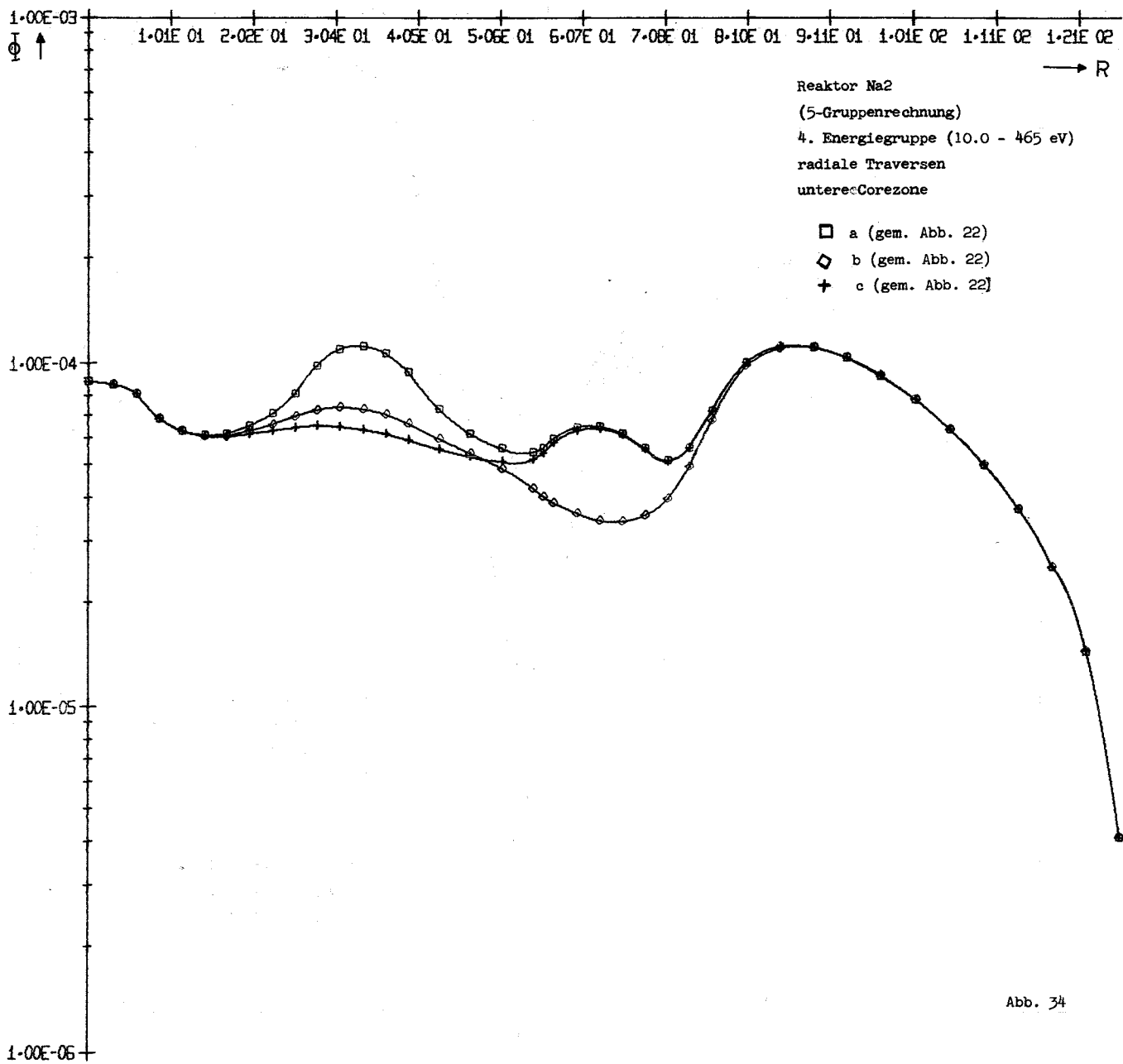


Abb. 34

ABB-00001 RADIALE TRAVERSEN..

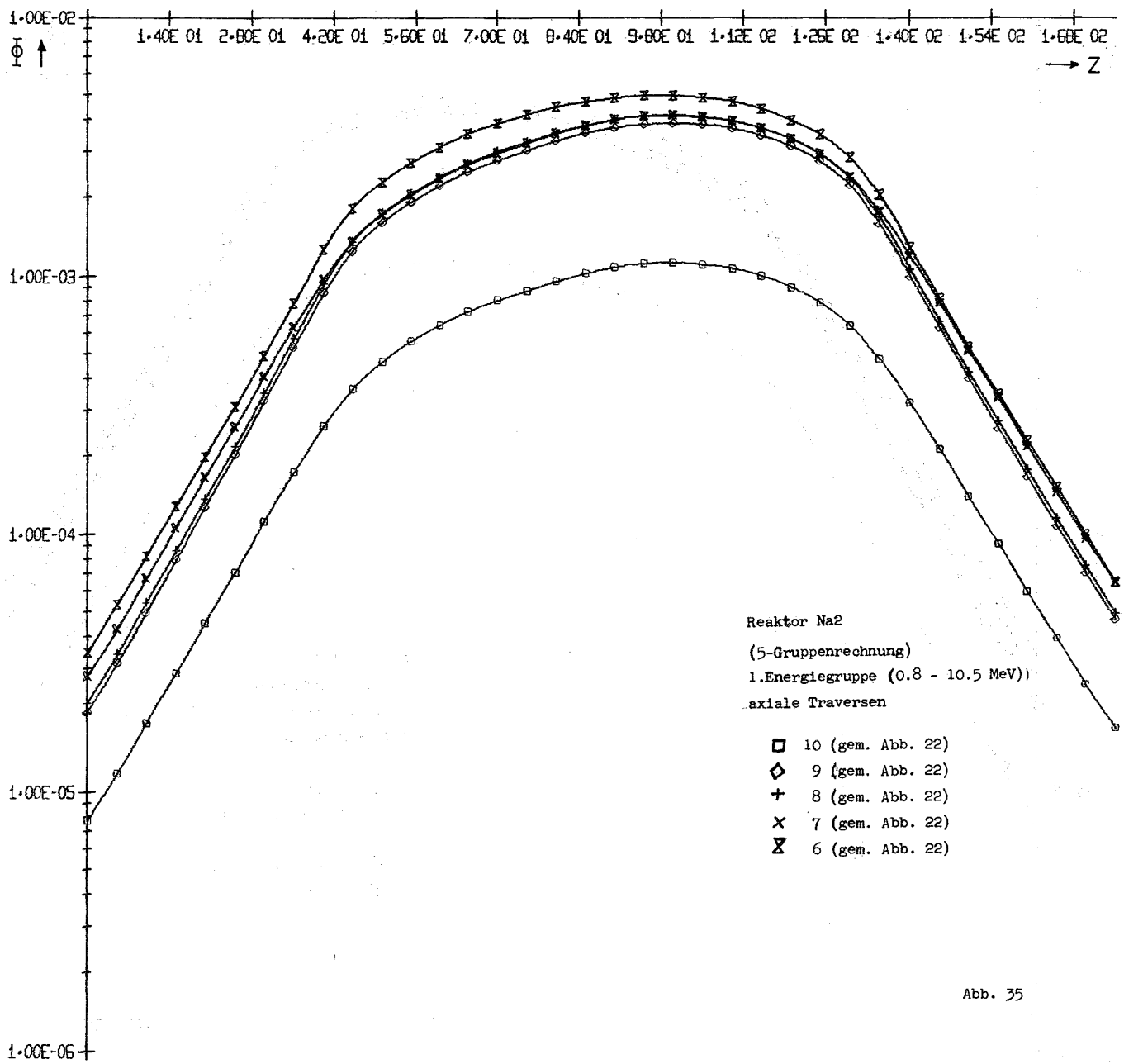


Abb. 35

ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN

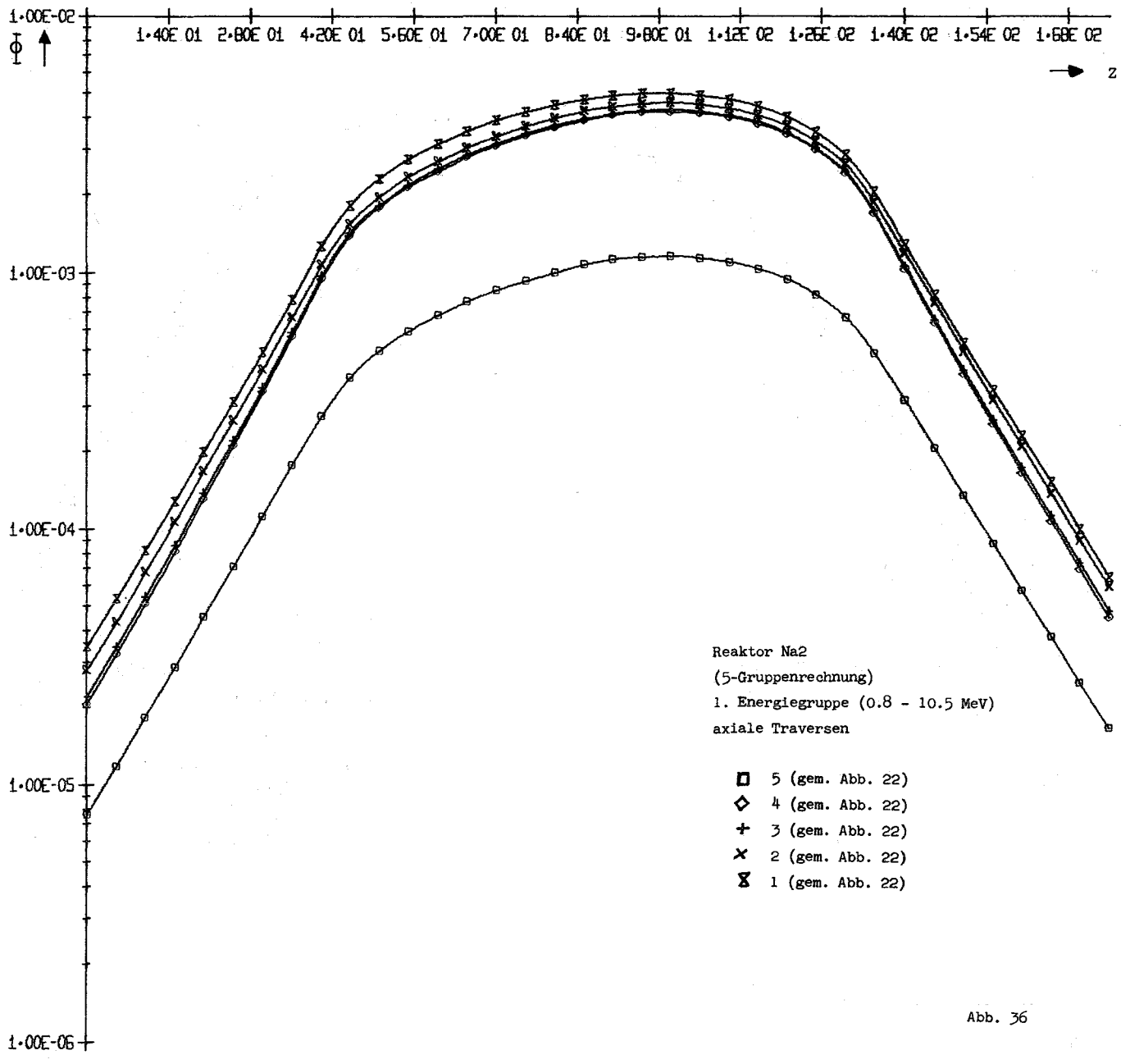


Abb. 36

ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN..

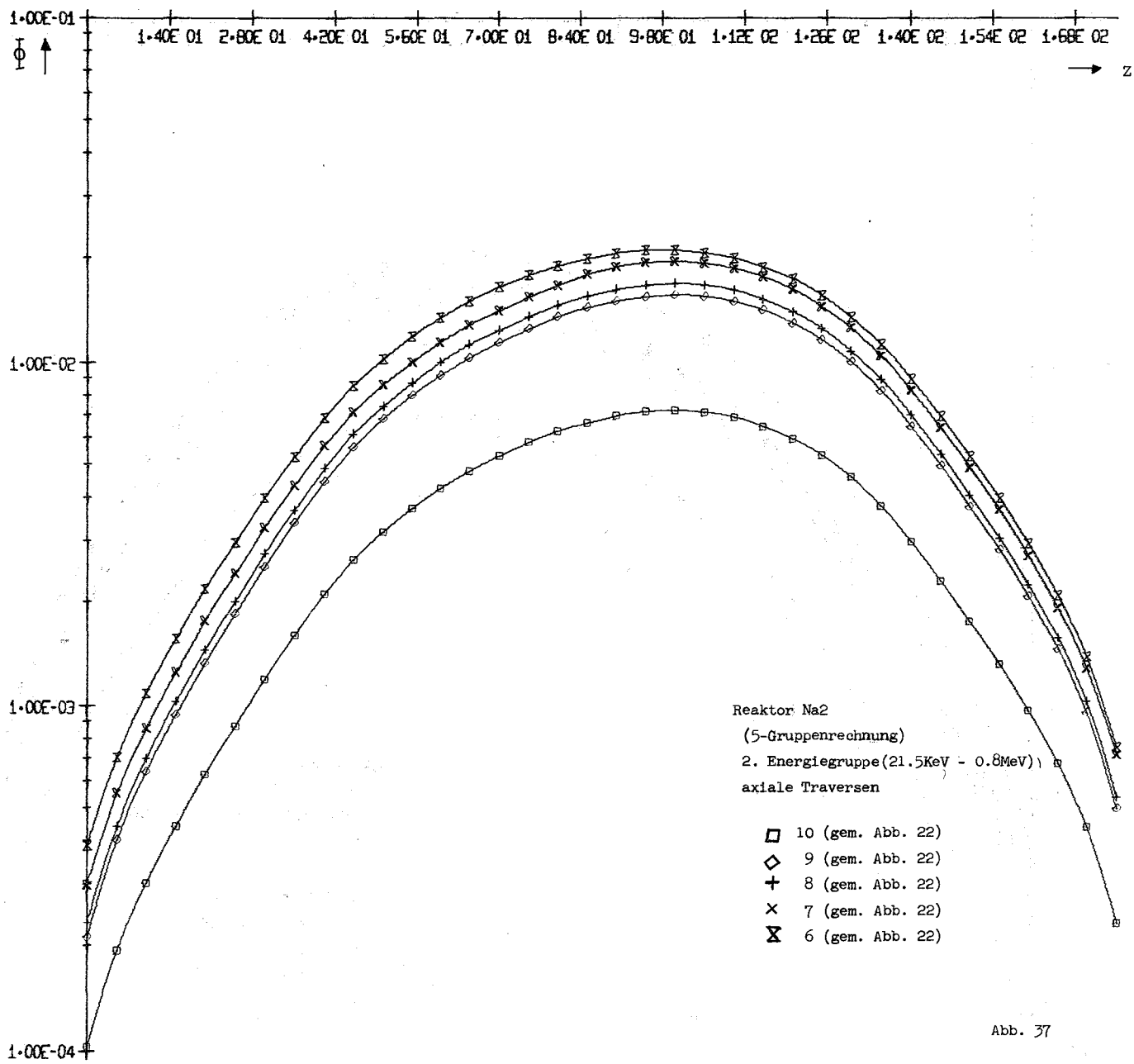


ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN..

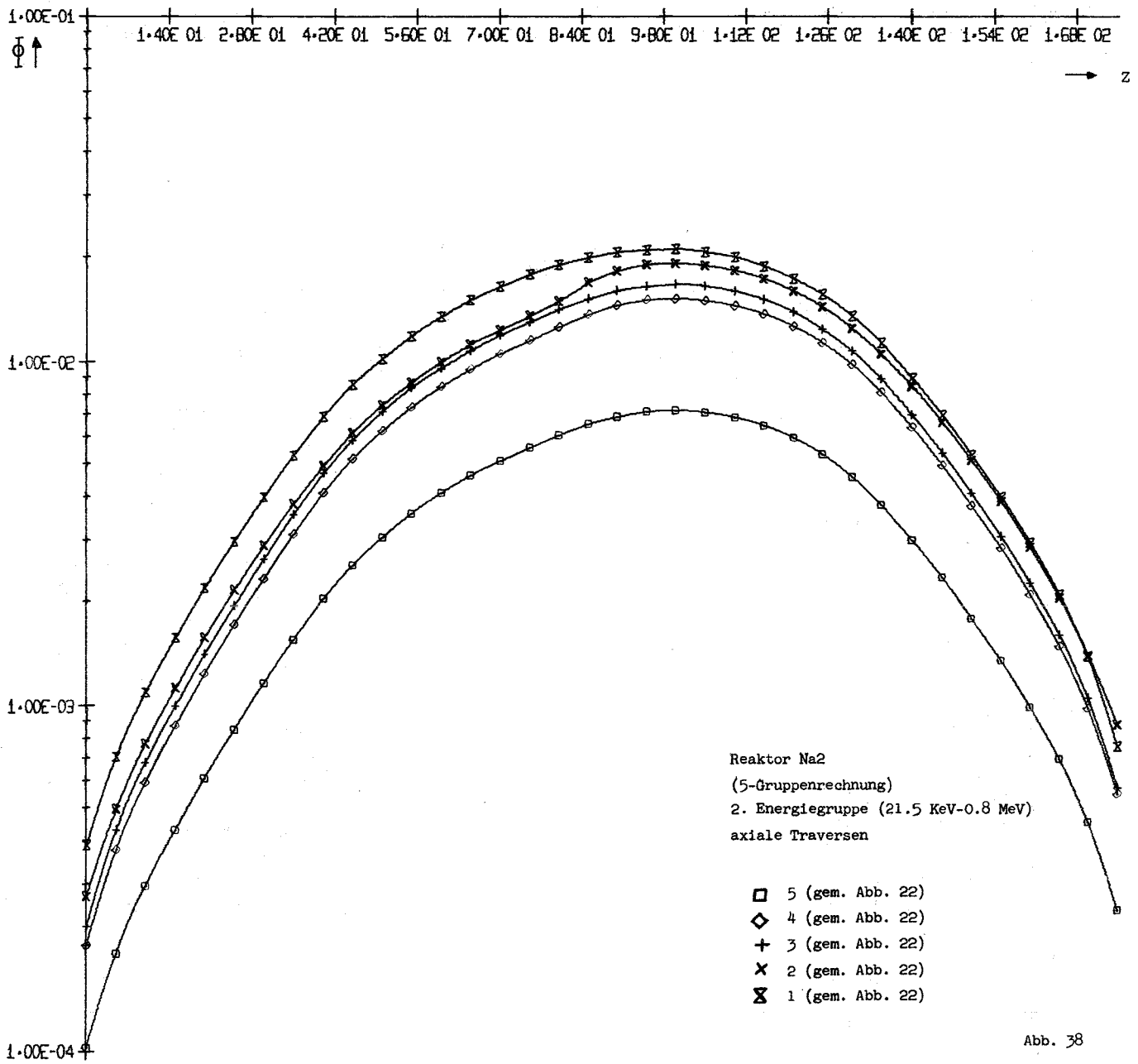


Abb. 38

ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN..

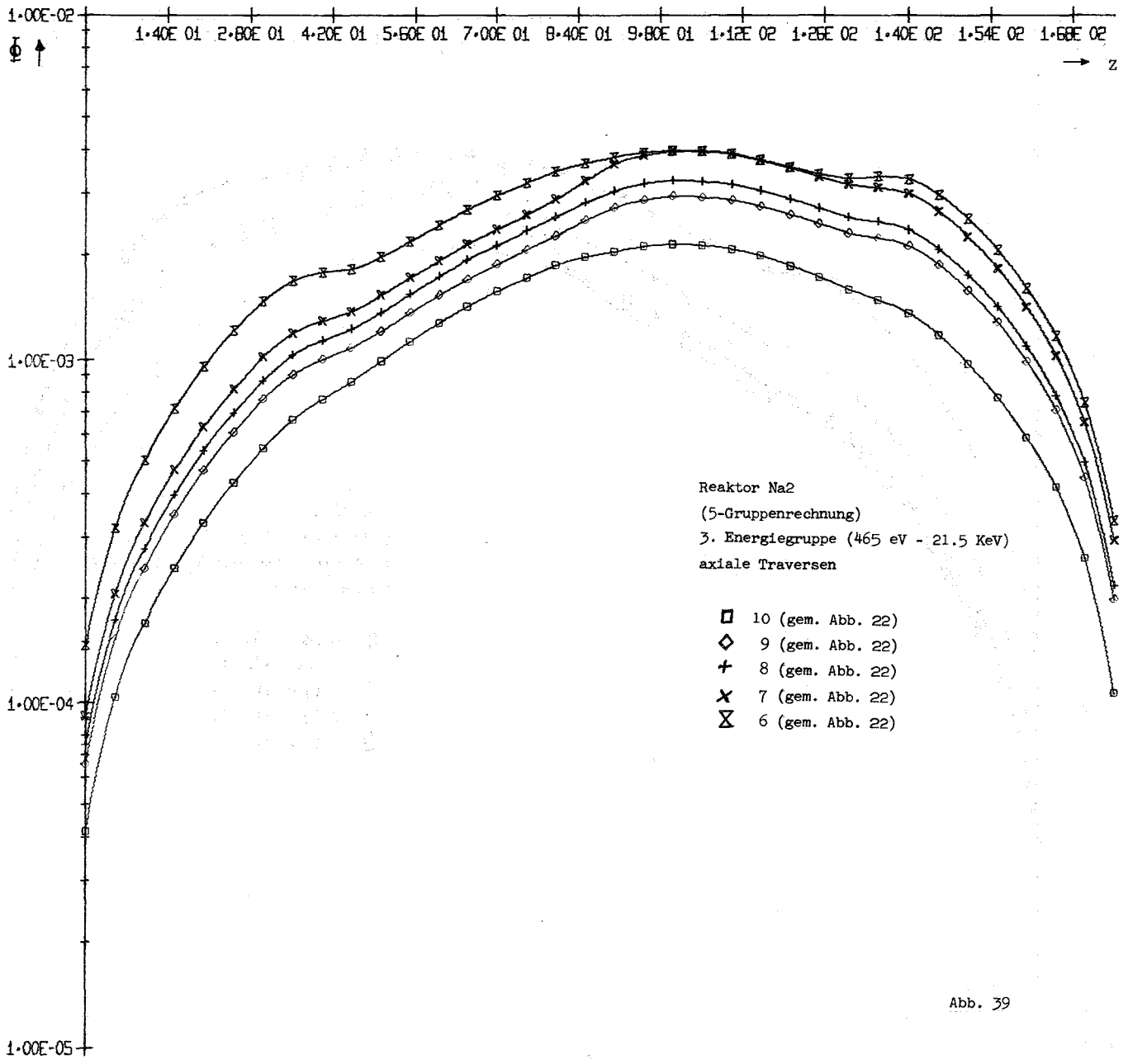


Abb. 39

ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN

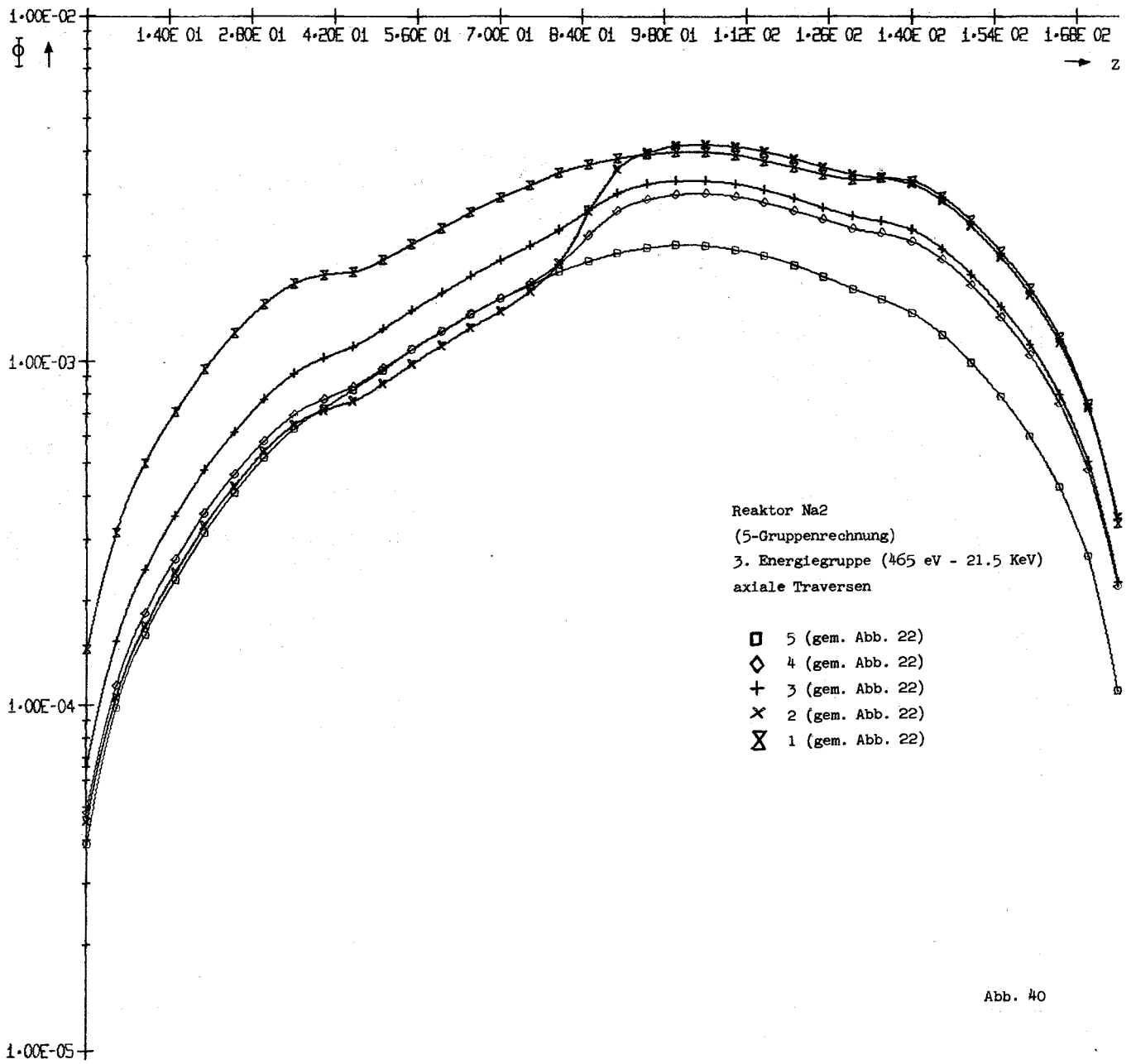


Abb. 40

ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN

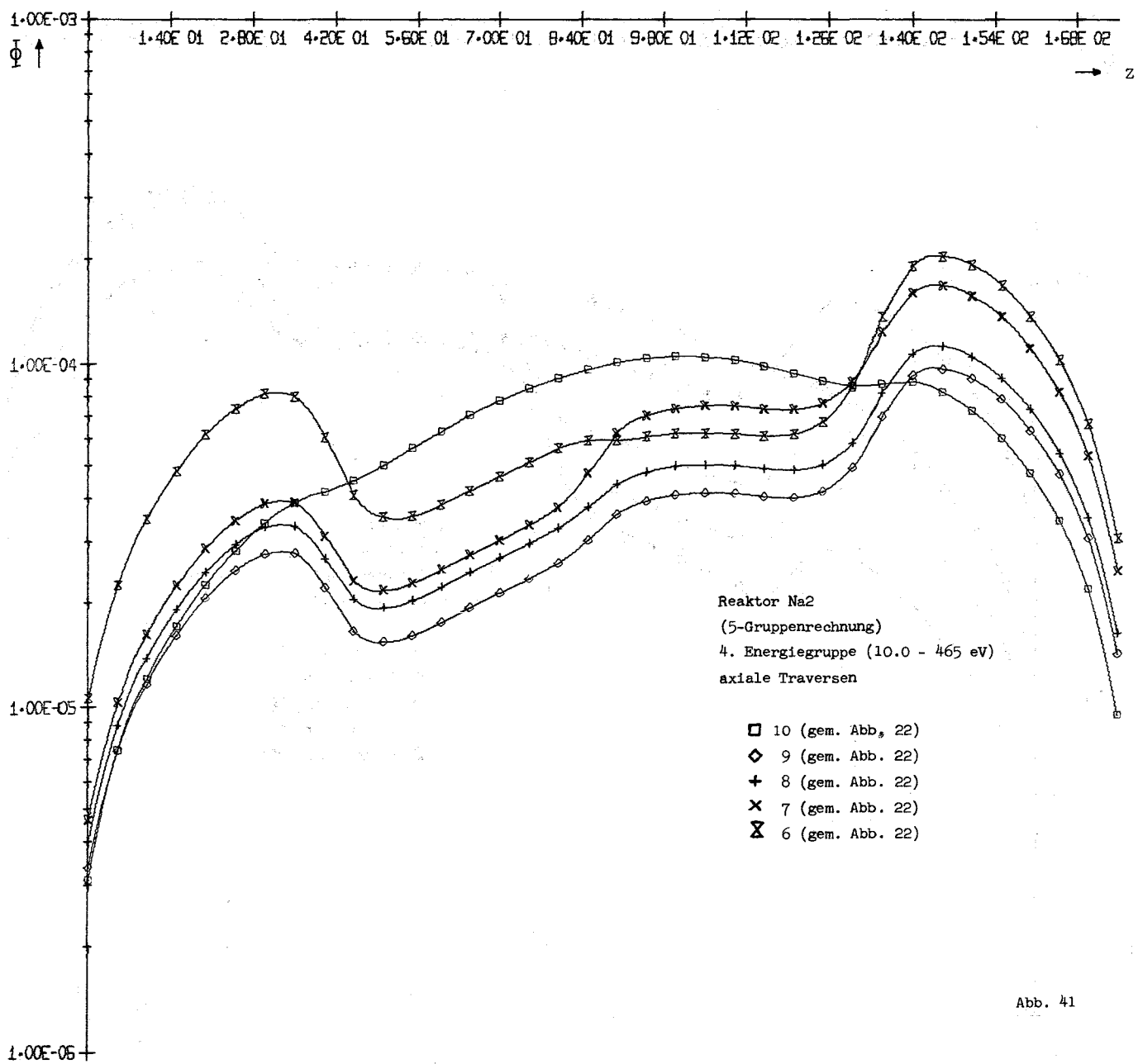


Abb. 41

ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN..

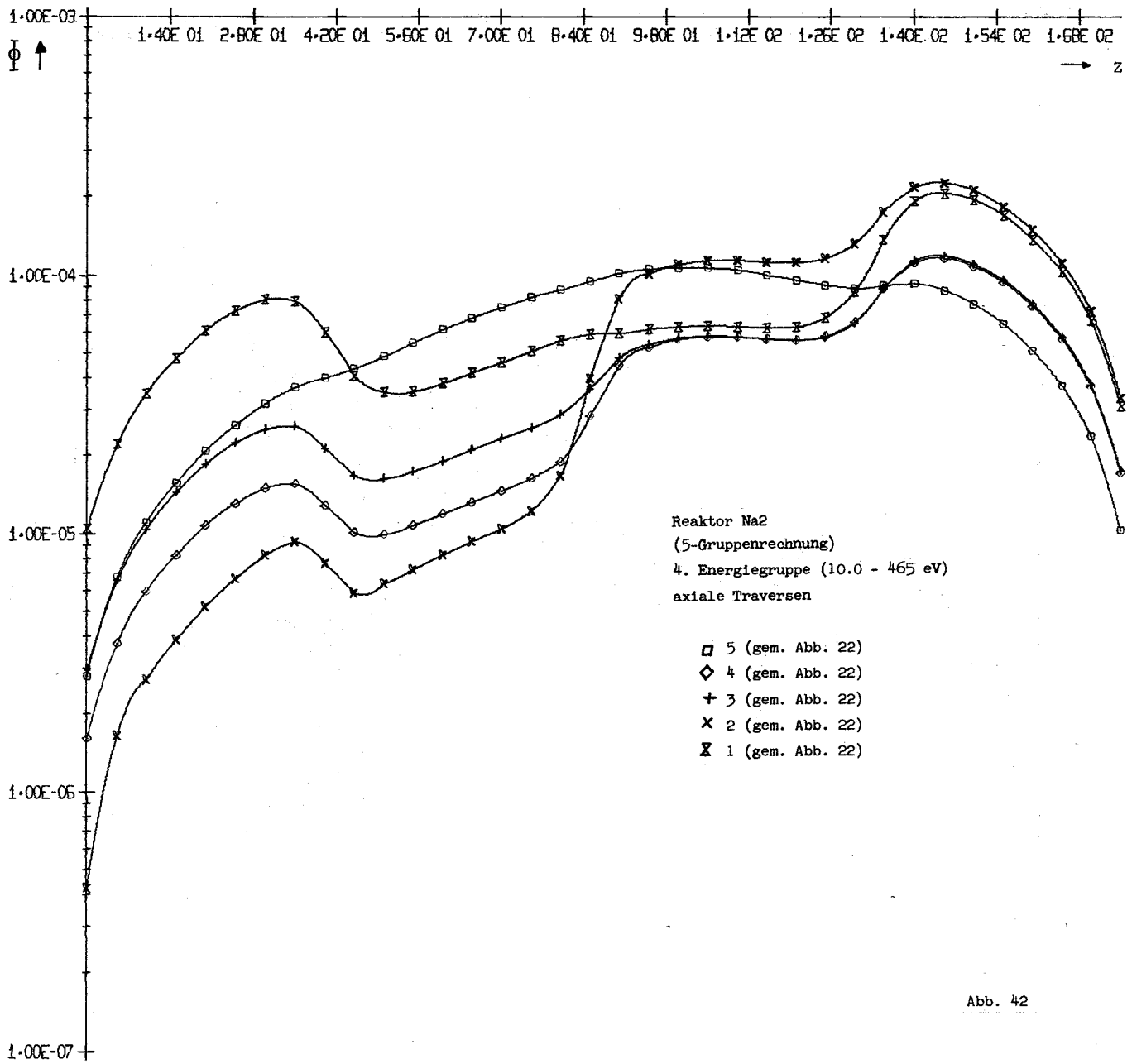


Abb. 42

ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN..

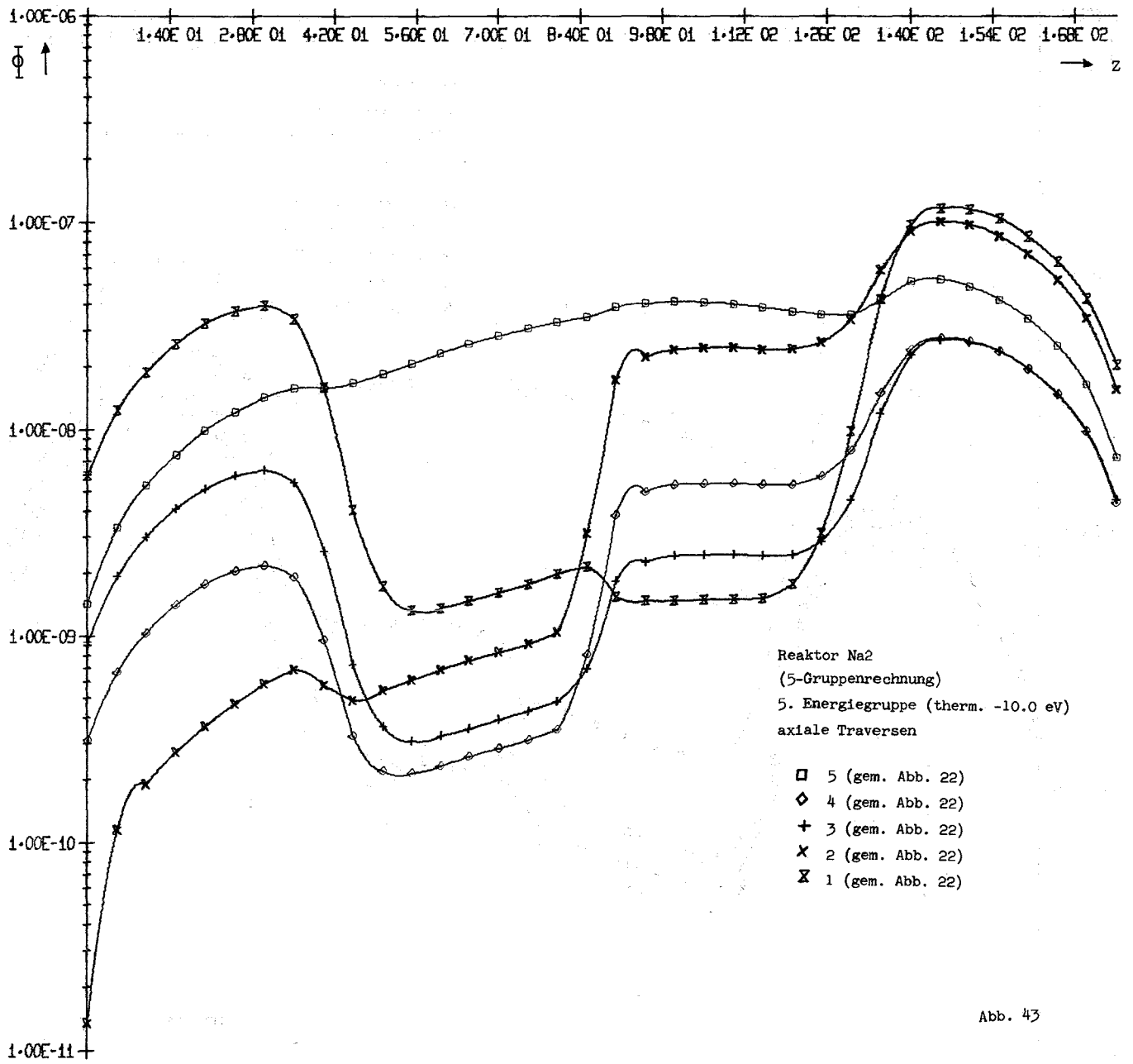


Abb. 43

ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN..

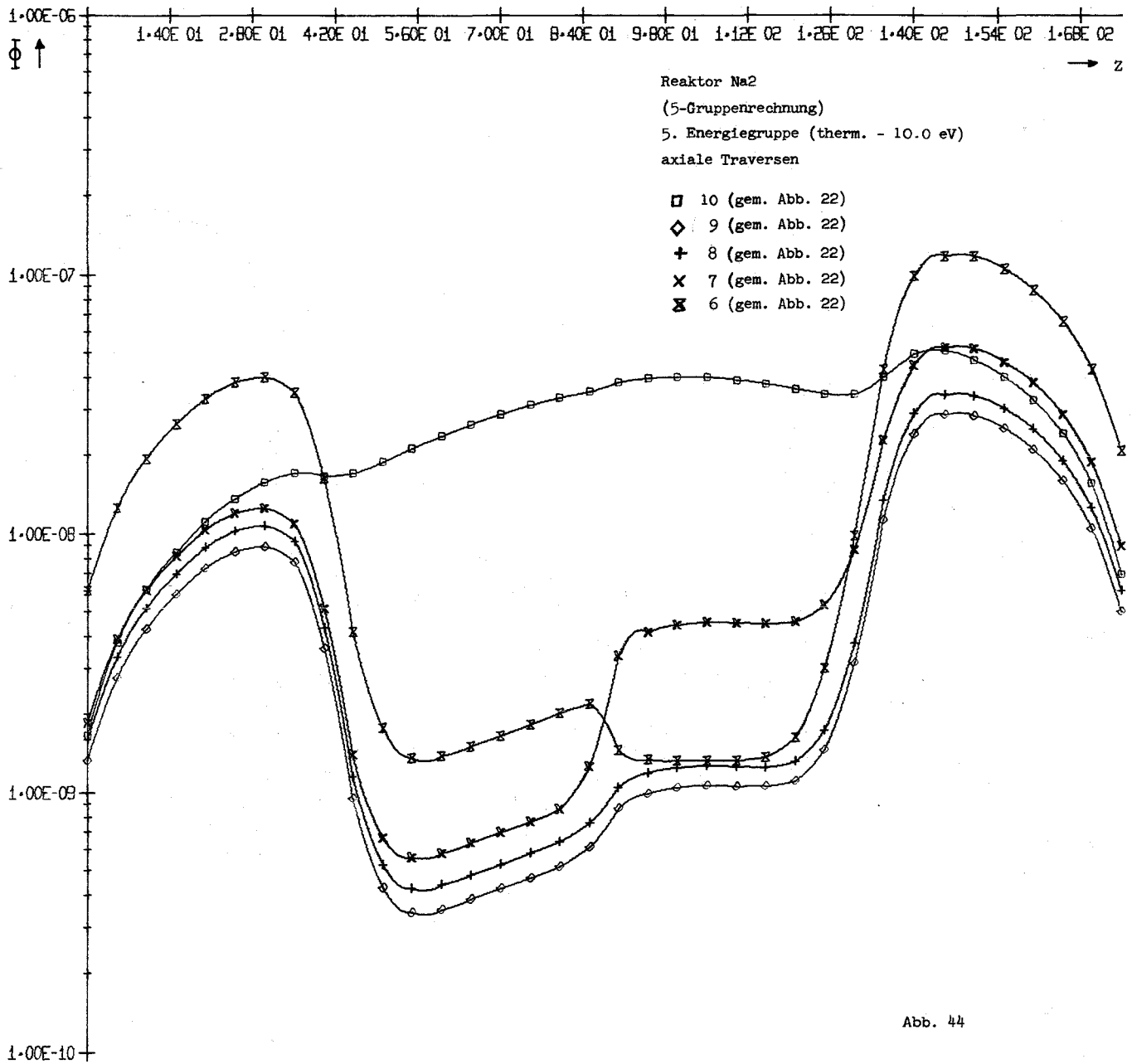
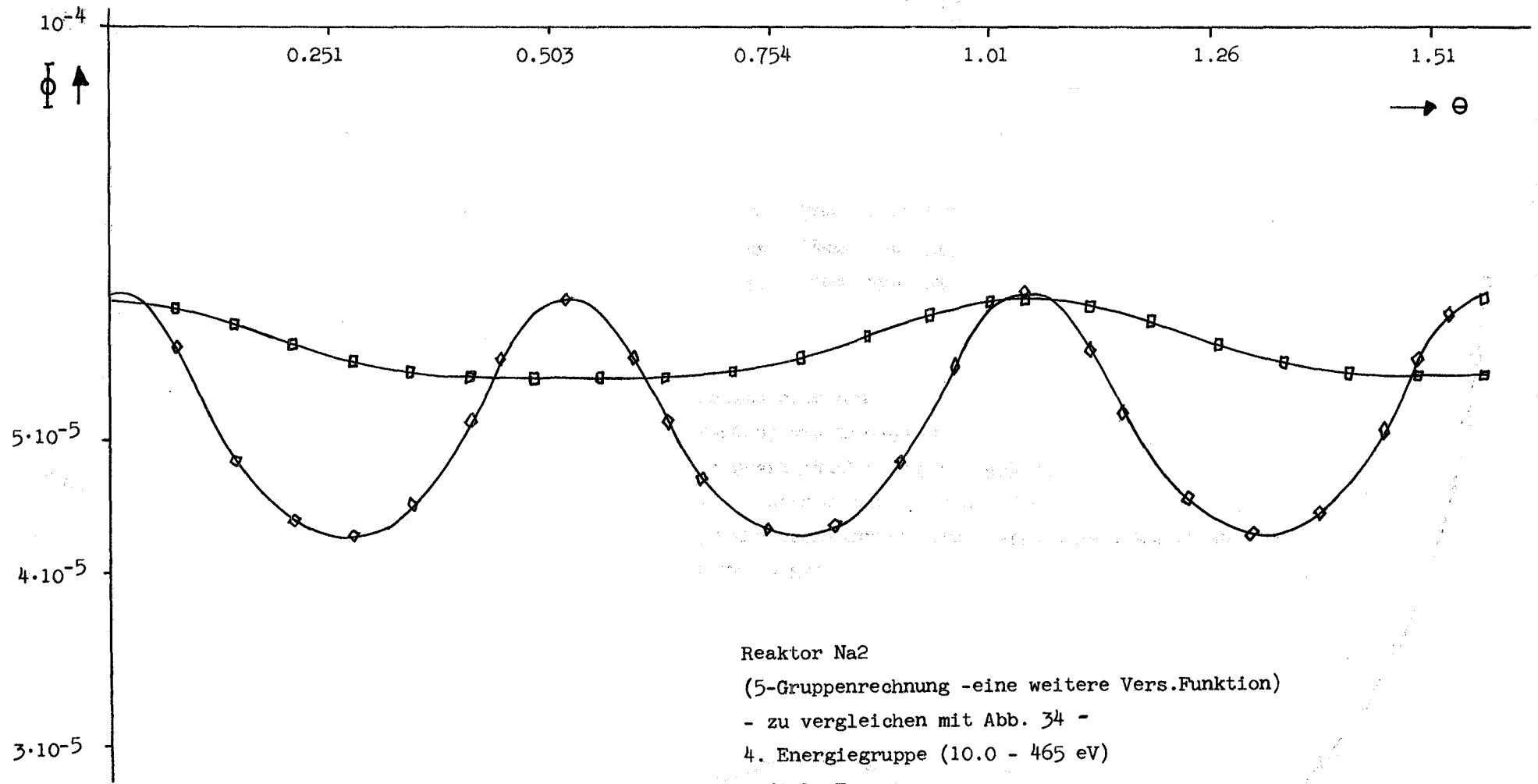


ABB-00001 AXIALE TRAVERSEN



Reaktor Na2
 (5-Gruppenrechnung -eine weitere Vers.Funktion)
 - zu vergleichen mit Abb. 34 -
 4. Energiegruppe (10.0 - 465 eV)
 radiale Traversen
 untere Corezone

- α (gem. Abb. 22)
- ◇ β (gem. Abb. 22)

Abb. 45

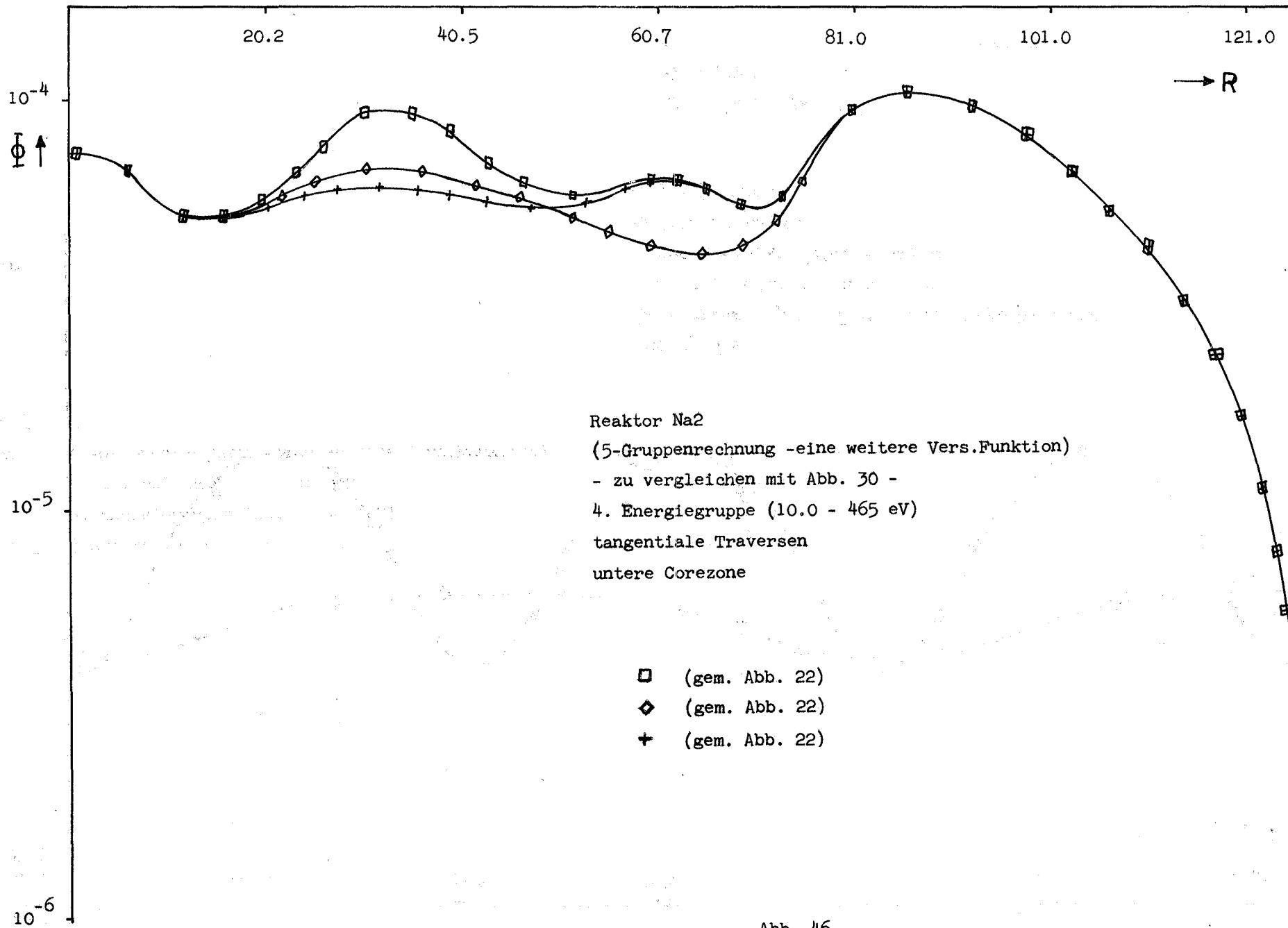


Abb. 46

