

EUR 1888.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT — EURATOM
INTERNATIONALE ATOMREAKTORBAU GESELLSCHAFT — INTERATOM
Bensberg (Deutschland)

RECHNUNGEN ZUR OPTIMALEN
AUSLEGUNG DER PRIMÄRABSCHIRMUNG
DES OM-SCHIFFSREAKTORS

von

H. WAGNER und H. HENSSEN
(Interatom)

1964



Vertrag Nr 001-61-1 PNID

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen :

- 1° — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt ;
- 2° — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird zum Preise von 50,— bfrs. verkauft. Bestellungen sind zu richten an : PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES — 98, chaussée de Charleroi, Brüssel 6.

Die Zahlung ist zu leisten durch Überweisung an :

— die BANQUE DE LA SOCIETE GENERALE (Agence Ma Campagne) — Brüssel — Konto Nr. 964.558 ;

— die BELGIAN AMERICAN BANK AND TRUST COMPANY — New York — Konto Nr. 22.186 ;

— die LLOYDS BANK (Europe) Ltd. — 10 Moorgate, London E.C.2,

als Bezug ist anzugeben : « EUR 1888.d — RECHNUNGEN ZUR OPTIMALEN AUSLEGUNG DER PRIMÄRABSCHIRMUNG DES OMSCHIFFSREAKTORS ».

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

EUR 1888.d

SHIELDING CALCULATIONS FOR THE OM-SHIP-REACTOR
by H. WAGNER (Interatom) and H. HENSSEN (Interatom)

European Atomic Energy Community — EURATOM
Internationale Atomreaktorbau Gesellschaft — INTERATOM
Bensberg (Germany)
Contract No 001-61-1 PNID
Brussels, August 1964 — 30 pages — 4 figures

The methods of calculation and the results are described concerning the optimization of the primary shielding configuration for a shipreactor.

The neutron fluxes are calculated according to a three energy-group diffusion theory, using group constants, which were determined from experiments on laminated iron-water shields.

The γ -dose rates at the outer edge of the shield are calculated using double exponential build-up factors.

EUR 1888.d

SHIELDING CALCULATIONS FOR THE OM-SHIP-REACTOR
by H. WAGNER (Interatom) and H. HENSSEN (Interatom)

European Atomic Energy Community — EURATOM
Internationale Atomreaktorbau Gesellschaft — INTERATOM
Bensberg (Germany)
Contract No 001-61-1 PNID
Brussels, August 1964 — 30 pages — 4 figures

The methods of calculation and the results are described concerning the optimization of the primary shielding configuration for a shipreactor.

The neutron fluxes are calculated according to a three energy-group diffusion theory, using group constants, which were determined from experiments on laminated iron-water shields.

The γ -dose rates at the outer edge of the shield are calculated using double exponential build-up factors.

EUR 1888.d

SHIELDING CALCULATIONS FOR THE OM-SHIP-REACTOR
by H. WAGNER (Interatom) and H. HENSSEN (Interatom)

European Atomic Energy Community — EURATOM
Internationale Atomreaktorbau Gesellschaft — INTERATOM
Bensberg (Germany)
Contract No 001-61-1 PNID
Brussels, August 1964 — 30 pages — 4 figures

The methods of calculation and the results are described concerning the optimization of the primary shielding configuration for a shipreactor.

The neutron fluxes are calculated according to a three energy-group diffusion theory, using group constants, which were determined from experiments on laminated iron-water shields.

The γ -dose rates at the outer edge of the shield are calculated using double exponential build-up factors.



EUR 1888.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT — EURATOM
INTERNATIONALE ATOMREAKTORBAU GESELLSCHAFT — INTERATOM
Bensberg (Deutschland)

RECHNUNGEN ZUR OPTIMALLEN
AUSLEGUNG DER PRIMÄRABSCHIRMUNG
DES OM-SCHIFFSREAKTORS

von

H. WAGNER und H. HENSSEN
(Interatom)

1964



Vertrag Nr 001-61-1 PNID

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. <u>Problemstellung</u>	5
2. <u>Ergebnisse</u>	5
3. <u>Methode zur Berechnung der Dosisleistung am Schild</u>	5
3.1 Neutronen	6
3.1.1 Bestimmung der Gruppenkonstanten	6
3.1.2 Neutronendosis am Schildrand	10
3.2 γ -Strahlung	12
3.2.1 $(n\gamma)$ -Prozesse im Schild	12
3.2.2 Dosisleistung am Schildrand, erzeugt durch Core- γ -Strahlung	13
4. <u>Wärmeerzeugung im Schild</u>	13
5. <u>Optimalisierung des Schildgewichtes</u>	14
6. <u>Erläuterung einiger Symbole</u>	17
7. <u>Literaturverzeichnis</u>	18

Rechnungen zur optimalen Auslegung der Primärabschirmung
des OM-Schiffsreaktors*

1. Problemstellung

Es soll zu einem vorgegebenen Core eine Abschirmanordnung von möglichst kleinem Gewicht ermittelt werden, wobei die Forderung erfüllt sein muß, daß die Gesamtdosisleistung an der Außenseite des Schildes etwa 100 mrem/h beträgt. Es sollen ausschließlich Eisen-Wasser-Anordnungen betrachtet werden, deren Aufteilung in Schichten verschiedener Dicke variiert werden kann.

Neben der durch $(n\gamma)$ -Prozesse im Schild erzeugten γ -Strahlung soll auch der Beitrag der Core- γ -Strahlung berücksichtigt werden. Ferner soll die Wärmezeugung durch Absorption von γ -Quanten und inelastische Neutronenstrahlung in den einzelnen Abschirmschichten berechnet werden.

2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Rechnungen sind in den Tabellen 1 bis 4 sowie den Abbildungen 1 - 2 zusammengefasst. Abb. 1 zeigt die Neutronenflüsse in einer für 16 Schichten optimalen Schildanordnung. In Abb. 2 sind für diesen Fall die Beiträge der einzelnen Schichtelemente zur gesamten γ -Dosisleistung am Rande über dem jeweiligen Entstehungsort aufgetragen.

3. Methode zur Berechnung der Dosisleistung am Schild

Die Dosisleistung am Rande des Schildes ist bestimmt durch

- 1.) Spaltneutronen,
- 2.) intermediäre Neutronen,
- 3.) thermische Neutronen,
- 4.) Core- γ -Strahlung,
- 5.) γ -Strahlung, herrührend von $(n\gamma)$ -Prozessen im Schild.

Der letztgenannte Punkt liefert den wesentlichen Beitrag zur Dosisleistung am Schildrand. Zu seiner Berechnung ist die Kenntnis der Neutronenflüsse innerhalb der verschiedenen Energiegruppen notwendig, da die Quellen der γ -Strahlung in jedem Material proportional dem Neutroneneinfang sind.

*) Der Bericht wurde nach Ausscheiden von H. Wagner aus der INTERATOM zum Zwecke der Veröffentlichung von H. Henssen überarbeitet und ergänzt.

3.1 Neutronen

3.1.1 Bestimmung der Gruppenkonstanten

Den Neutronenflußrechnungen liegt ein Mehrgruppen-Diffusionsprogramm (HEIDI) für den Digitalrechner X₁ (Electrologica) zugrunde. Dieses Programm kann für eine beliebige Zahl von Neutronengruppen und für beliebig viele Schichten angewendet werden. Im vorliegenden Fall werden 3 Neutronengruppen betrachtet. Die dazu benötigten Gruppenkonstanten sind einer Arbeit von Cooper, Jones und Horton [1] entnommen und stellen an Experimente angepasste Größen dar. Die im Programm HEIDI benutzten Werte ergeben sich durch Koeffizientenvergleich der den beiden Verfahren zugrundeliegenden Differentialgleichungen. Die Gruppengleichungen bei Cooper lauten:

$$(1) \quad \Delta \phi^{(0)} - \frac{1}{\lambda_r^2} \phi^{(0)} = 0 \quad (\text{"Removal"-Gruppe})$$

$$(2) \quad \Delta \phi^{(1)} - \frac{1}{L_{s2}^2} \phi^{(1)} = -\mu \phi^{(0)} \quad (\text{intermediäre Gruppe})$$

$$(3) \quad \Delta \phi^{(2)} - \frac{1}{L^2} \phi^{(2)} = -\rho \frac{D^{(1)}}{D^{(2)}} \cdot \left\{ \frac{1}{L_{s2}^2} \phi^{(1)} + \zeta \phi^{(0)} \right\}$$

(thermische Gruppe)

mit

$$(4) \quad \mu = \frac{1}{\lambda_r D^{(1)}} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_r}{L_{s2}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\lambda_r}{L_{s1}}\right)^2 - 1}$$

$$(5) \quad \zeta = \frac{\lambda_r}{D^{(1)} \left[\left(\frac{\lambda_r}{L_{s1}}\right)^2 - 1 \right]} \cdot \left(\frac{1}{L_{s1}^2} - \frac{1}{L_{s2}^2} \right)$$

In dem Programm HEIDI lauten die Gruppengleichungen wie folgt:

$$(6) \quad \Delta \phi^{(0)} - \frac{\sum \tau^{(0)}}{\mathcal{D}^{(0)}} \cdot \phi^{(0)} = 0$$

$$(7) \quad \Delta \phi^{(1)} - \frac{\sum \tau^{(1)}}{\mathcal{D}^{(1)}} \cdot \phi^{(1)} = - \frac{\sum \mathcal{R}^{(0 \rightarrow 1)}}{\mathcal{D}^{(1)}} \cdot \phi^{(0)}$$

$$(8) \quad \Delta \phi^{(2)} - \frac{\sum \tau^{(2)}}{\mathcal{D}^{(2)}} \cdot \phi^{(2)} = - \frac{\sum \mathcal{R}^{(0 \rightarrow 2)}}{\mathcal{D}^{(2)}} \cdot \phi^{(0)} - \frac{\sum \mathcal{R}^{(1 \rightarrow 2)}}{\mathcal{D}^{(2)}} \cdot \phi^{(1)}$$

Durch Vergleich von (7) und (2) ergibt sich für die intermediäre Gruppe

$$(9) \quad \sum \tau^{(1)} = \frac{\mathcal{D}^{(1)}}{L_{S2}^2}$$

$$(10) \quad \sum \mathcal{R}^{(0 \rightarrow 1)} = \mathcal{D}^{(1)} \cdot \mu = \frac{1}{\lambda_r} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_r}{L_{S2}}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\lambda_r}{L_{S1}}\right)^2 - 1}$$

Speziell für Eisen gilt $L_{S2} = L_{S1}$ und damit

$$(11) \quad \sum \mathcal{R}^{(0 \rightarrow 1)} = \frac{1}{\lambda_r}$$

Aus den Gleichungen (8) und (3) ergibt sich für die thermische Gruppe

$$(12) \quad \sum_T^{(2)} = \frac{D^{(2)}}{L^2}$$

und

$$(13) \quad \sum_R^{(0 \rightarrow 2)} = \rho \cdot \xi \cdot D^{(1)} = \frac{\rho \cdot \lambda_r}{\left(\frac{\lambda_r}{L_{S1}}\right)^2 - 1} \cdot \left(\frac{1}{L_{S1}^2} - \frac{1}{L_{S2}^2}\right)$$

wobei speziell für Eisen $\sum_R^{(0 \rightarrow 4)} = 0$ ist.

Ferner folgt aus (8) und (3)

$$(14) \quad \sum_R^{(1 \rightarrow 2)} = \rho \cdot \frac{D^{(1)}}{L_{S2}^2}$$

In Tabelle 5 sind die Konstanten aus [1] angegeben. Damit lassen sich $\sum_T^{(1)}$, $\sum_T^{(2)}$ und $\sum_R^{(1 \rightarrow 2)}$ berechnen. Zur Ermittlung von $\sum_R^{(0 \rightarrow 1)}$ und $\sum_R^{(0 \rightarrow 3)}$ benötigen wir noch L_{S1} und λ_r , wobei L_{S1} aus dem in [1] angegebenen Wert für β ermittelt wird. β bedeutet das Verhältnis vom thermischen zum schnellen Fluß, das sich in Wasser nach 40 cm einstellt ($\beta = 35 \pm 3,5$). Aus Gleichung (26) in [1] ergibt sich für

$$(15) \quad L_{S1}^2 = \lambda_r^2 - \frac{\rho \cdot \lambda_r}{\beta \cdot D^{(1)}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{L^2} - \frac{1}{\lambda_r^2}}; \quad \lambda_r = \frac{1}{\Sigma_{RE}^{(0)}}$$

Die Größe λ_r kann für Eisen als konstant angesehen werden, für Wasser hingegen ist sie wegen der starken Variation des Streuquerschnitts von Wasserstoff $\sigma_B(E)$ bei hohen Energien von der Härtung des schnellen Neutronenspektrums abhängig. Daher ändert sich λ_r mit der im Wasser durchlaufenen Strecke. Diese Verhältnisse kann man dadurch berücksichtigen, daß der Spaltneutronenfluß (Removalfluß) in Wasser durch eine doppelt exponen-

tielle Form dargestellt wird

$$(16) \quad \phi^{(0)} = \frac{1}{1+\varepsilon} \cdot \left(e^{-\sum_H^{(1)}(r-R_0)} + \varepsilon \cdot e^{-\sum_H^{(2)}(r-R_0)} \right) = \phi_1^{(0)} + \phi_2^{(0)}$$

Das entspricht formal einer Aufspaltung in zwei Untergruppen mit verschiedenem Removalquerschnitt.

Die Gesamtquelle für die thermische und intermediäre Gruppe wird dann

$$(17) \quad \phi_1^{(0)} \cdot \sum_H^{(1)} + \phi_2^{(0)} \cdot \sum_H^{(2)} = - \frac{d\phi^{(0)}}{dr} = \frac{1}{\lambda_r} \phi^{(0)}$$

womit λ_r als Funktion des Ortes bestimmt ist. Im vorliegenden Fall ist die Ortsabhängigkeit dadurch berücksichtigt worden, daß für jede Wasserschicht ein geeigneter Mittelwert von λ_r benutzt wurde, um die Größen $\sum_R^{(0 \rightarrow 1)}$ und $\sum_R^{(0 \rightarrow 2)}$ zu ermitteln.

$$(18) \quad \sum_R^{(0 \rightarrow 1)} = \frac{1}{\lambda_r} \left\{ \left(\frac{\lambda_r}{L_{s2}} \right)^2 - 1 \right\} \cdot \left\{ \frac{D^{(2)} \cdot \beta \left[\left(\frac{\lambda_r}{L} \right)^2 - 1 \right]}{\rho \cdot \lambda_r} - 1 \right\}$$

aus (10) und

$$(19) \quad \sum_R^{(0 \rightarrow 2)} = \frac{\rho}{\lambda_r} \cdot \left\{ \frac{D^{(2)} \cdot \beta \left[\left(\frac{\lambda_r}{L} \right)^2 - 1 \right]}{\rho \cdot \lambda_r} - 1 \right\} \cdot$$

$$\cdot \left\{ \frac{1}{1 - \frac{\rho \cdot \lambda_r}{D^{(2)} \cdot \beta \left[\left(\frac{\lambda_r}{L} \right)^2 - 1 \right]}} - \left(\frac{\lambda_r}{L_{s2}} \right)^2 \right\}$$

aus (13).

Im Programm HEIDI kann ϕ^0 in der Form

$$(20) \quad \phi^{(0)} = A e^{-\sum_j \kappa_j r_j} + B e^{-\sum_j \lambda_j r_j}$$

r_j : in der Schicht j zurückgelegter Weg

explizit berechnet werden. Damit lassen sich sämtliche im Programm HEIDI eingehenden Konstanten numerisch bestimmen.

3.1.2 Neutronendosis am Schildrand

Der Beitrag zur Neutronendosis am Rande des Schildes wird vornehmlich von der schnellen und intermediären Neutronengruppe geliefert. Der thermische Neutronenanteil ist wegen seiner geringen biologischen Wirksamkeit ($480 \text{ n/cm}^2 \text{ sec} = 1 \text{ mrem/h}$) vernachlässigbar klein. Da die intermediäre Neutronengruppe sich über einen großen Energiebereich mit entsprechend unterschiedlicher biologischer Wirksamkeit $w(E)$ erstreckt, muß ein über das Neutronenspektrum $\phi^{(1)}(E)$ gemittelter Wert $\bar{w}^{(1)}$ bestimmt werden. Es ist zweckmäßig, als Energievariable die Lethargie $u = \ln \frac{E_0}{E}$ ($E_0 = 10 \text{ MeV}$) zu nehmen.

$$(21) \quad \bar{w}^{(1)} = \frac{\int_{u_1}^{u_2} \phi^{(1)}(u) \cdot w(u) du}{\int_{u_1}^{u_2} \phi^{(1)}(u) du} ; \quad \begin{array}{l} u_1 = 2.5 \quad (0.82 \text{ MeV}) \\ u_2 = 16.6 \quad (0.625 \text{ eV}) \end{array}$$

Wie aus einer MUFT-IV-Rechnung ermittelt wurde, kann in guter Näherung das intermediäre Spektrum in Wasser in der folgenden Form dargestellt werden

$$\begin{array}{l} \phi^{(1)}(u) = \text{const.} (6.65 - 1.08 u) ; \quad 2.5 \leq u \leq 5.5 \\ \phi^{(1)}(u) = \text{const.} \cdot 0.75 \quad u > 5.5 \end{array}$$

Nach Th. Rockwell [2] ergibt sich durch Anpassung an die dort dargestellte Kurve

$$W(u) = 0.648 \cdot e^{-0.75u}$$

Mit diesen Werten erhält man

$$(22) \quad \bar{W}^{(1)} = \frac{\hat{D}^{(1)}}{J^{(1)}} = 0.0193 \quad \left[\frac{\text{mrem/h}}{\text{n/cm}^2 \text{ sec}} \right]$$

wobei $J^{(1)}$ der intermediäre Neutronenstrom am Schildrand bedeutet.

$J^{(1)}$ kann aus den berechneten Flußwerten berechnet werden

$$J^{(1)} = - \frac{\phi_{R^*}^{(1)} - \phi_{R^* - \Delta r}^{(1)}}{\Delta r} \cdot D_{H_2O}^{(1)}$$

R^* = Radius am Rande der letzten
Wasserschicht

Im Falle der Konfiguration aus Abb. 1 zum Beispiel wird

$$J^{(1)} = \frac{0,112 - 0,0894}{1,2} \cdot 10^{-8} \cdot 0,944 \cdot \underbrace{2 \cdot 10^{12}}_{\text{schneller Fluß an der Außenseite des Reflektors}}$$

$$= 362 \frac{\text{n}}{\text{cm}^2 \text{s}}$$

und damit

$$\hat{D}^{(1)} = 7 \quad \left[\frac{\text{mrem}}{\text{h}} \right]$$

Nach Gl. (14) beträgt der schnelle Neutronenfluß am Schildrand

$$\phi_R^{(1)} = 16,45 \quad \left[\frac{\text{n}}{\text{cm}^2 \text{ sec}} \right] \approx J_R^0$$

dabei ist der Fluß auf $2 \cdot 10^{12}$ schnelle Neutronen am Außenrand des Reflektors normiert worden.

Da der schnelle Fluß praktisch nur aus Primärneutronen besteht, kann der Strom am Schildrand gleich dem Fluß gesetzt werden. Mit

$$W^{(0)} = 0.208 \quad \left[\frac{\text{mrem/h}}{\text{n/cm}^2 \text{ sec}} \right]$$

ergibt sich

$$\hat{D}^{(0)} = 3.42 \quad [\text{mrem/h}]$$

3.2 γ -Strahlung

3.2.1 $(n\gamma)$ -Prozesse im Schild

Die Quelldichte der $(n\gamma)$ -Strahlung ist gegeben durch

$$(23) \quad S_j^{(g,i)}(r) = \sum_a^{(i)} \phi_a^{(i)} \cdot \gamma_j^{(g)}$$

j = Index der Schicht

g = Index der γ -Energiegruppe

i = Index der Neutronenenergiegruppe

Die zugehörige Dosisleistung am Rande des Schildes ist im Falle der Zylindergeometrie und bei Berücksichtigung eines doppelt-exponentiellen Build-up-Faktors durch die folgende Gleichung gegeben:

$$(24) \quad \hat{D}_\gamma = \int_{R_{\text{inn}}}^R \frac{1}{2\sqrt{r}} \cdot \sum_{g=1}^6 W^{(g)} \cdot \sum_{j=1}^{N_g} \left(S_j^{(g,1)}(r) + S_j^{(g,2)}(r) \right) \cdot \left\{ A^{(1)} \cdot E_1 \left((1+\alpha^{(1)}) \cdot b_j^{(g)}(r) \right) + A^{(2)} \cdot E_1 \left((1+\alpha^{(2)}) \cdot b_j^{(g)}(r) \right) \right\} \sqrt{r} dr.$$

wobei

$$b_j^{(g)}(r) = \mu_j^{(g)} \cdot (R_j - r) + \sum_{e=j+1}^{N_g} \mu_e^{(g)} \cdot r_e ; \quad R_j = \sum_{e=0}^j r_e$$

(weitere Erläuterung der Symbole s. S. 13)

Diese Formel wurde für den Digitalrechner K₁ programmiert, so daß das Programm die von dem HEIDI-Teil berechneten Neutronenflüsse gleich verwendet.

Der Integrand von (23) ist in der Abb. 2 für eine Schildanordnung dargestellt. Die physikalische Bedeutung dieser Kurven ist unmittelbar anschaulich. Sie zeigen die Beiträge zur γ -Dosisleistung am Schildrand, die aus den einzelnen Schichtelementen herrühren. Diese Beiträge sind in Abb. 2 über dem Ort ihrer Entstehung aufgetragen. Eine Zusammenstellung der $(n\gamma)$ -Dosisleistungen für verschiedene Schildanordnungen findet sich in Tabelle 1 - 4.

3.2.2 Dosisleistung am Schildrand, erzeugt durch Core- γ -Strahlung

Der weitaus kleinste Beitrag zur Dosisleistung am Rande des Primärschildes wird im Falle der hier behandelten Eisen-Wasser-Schilde durch die Core- γ -Strahlung geliefert. Unter Zugrundelegung der in Tabelle 8 angegebenen Quellstärken sind die in Tabelle 1 - 3 aufgeführten Werte der Dosisleistung für einige Schildkonfigurationen berechnet worden nach der Formel:

$$(25) \quad \hat{D}_{\text{Core } \gamma} = \frac{S_v}{2} \sqrt{\frac{R_{\text{Core}}}{R}} \cdot \left\{ \frac{A^{(1)}}{\mu_{\text{Core}} \cdot (1 + \alpha^{(1)})} \cdot E_2 \left((1 + \alpha^{(1)}) \cdot b(r) \right) + \frac{A^{(2)}}{\mu_{\text{Core}} (1 + \alpha^{(1)})} \cdot E_2 \left((1 + \alpha^{(2)}) \cdot b(r) \right) \right\}$$

4. Wärmeerzeugung im Schild

Die Wärmeerzeugung durch Energieabgabe von γ -Quanten und inelastische Neutronenstreuung ist für einzelne corenahe Schildschichten berechnet worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 - 3 mit aufgeführt. Den größten Beitrag zu dieser Wärmeentwicklung bringt die Strahlung aus $(n\gamma)$ -Prozessen im Schild.

5. Optimalisierung des Schildgewichtes

Bei der Untersuchung des Schiffreaktorschirmes wurde von der in Abb. 3 angegebenen Konfiguration ausgegangen. Darin sind die Stahlschilde 1, 5 und 7, welche die Coretankwand, die Reaktortankwand und die Wand des Abschirmtanks darstellen, in ihrer Lage und Stärke aus konstruktiven Gründen fest vorgegeben. Für den thermischen Schild (Pos. 3) wurden drei Varianten untersucht: ein einschichtiger thermischer Schild von 15 cm Stärke, ein zweischichtiger Schild von insgesamt 10 cm Stärke und kein besonderer thermischer Schild.

Aus praktischen rechentechnischen Gründen empfahl es sich, zunächst bei konstantem Gesamtgewicht der Anordnung die Lage der beiden im eigentlichen Abschirmtank befindlichen Stahlschichten so lange zu variieren, bis die Dosisleistung pro eintretendes schnelles Neutron^{*)} am äußeren Rande ein Minimum war.

Für zwei spezielle Fälle (mit und ohne) thermischen Schild sind die Verhältnisse in Abb. 3 und 4 dargestellt. Gleichzeitig ist angedeutet, in welcher Weise vorgegangen wurde. Abb. 3 kann zunächst entnommen werden, daß die Wasserschicht 8 von großer Bedeutung ist, weil ein Heranzücken der Stahlschicht 9 an die Tankwand 7 zu einer Vervielfachung der Dosisleistung führen würde. Die Aufteilung in die Stahlschichten 9 und 11 ist demgegenüber schon nicht mehr so wichtig, da die Eliminierung der Wasserschicht 10 (Schicht 11 an 9 heranrücken) nur noch etwa eine Verdoppelung der Dosisleistung bewirkt. Es war daher zu erwarten, daß eine weitere Unterteilung der Stahlschilde keinen wesentlichen Gewinn mehr bringen würde. Dies konnte bei der endgültig gewählten Anordnung (vergl. Abb. 1 und 2) nachgeprüft werden, indem auch eine Variante mit drei Stahlringen untersucht wurde. Es ergab sich dabei eine um rund 20 % verringerte Dosisleistung im optimalen

*) Die Dosisleistung ist nur vom eintretenden schnellen Neutronenfluß abhängig, weil nur diese sowie die Gammastrahlen, die durch Einfang der von den schnellen Primär-Neutronen erzeugten intermediären und thermischen Neutronen entstehen, eine Rolle spielen. Der Beitrag der aus dem Core austretenden thermischen Neutronen und Gammaquanten ist vernachlässigbar klein.

Fall (Fall 5 in Tabelle 4). Diese Ersparnis würde jedoch die konstruktive Komplizierung durch eine Dreischichtenanordnung nicht rechtfertigen, so daß die jetzige Konstruktion nur zwei Eisenschichten im Abschirmtank vorsieht.

Eine Untersuchung über den Einfluß der Schichtdicken der beiden Stahlschilde (wiederum bei konstantem Gewicht und in optimaler Lage) auf die Dosisleistung ergab bei Variationen von bis zu $\pm 20\%$ in der Dicke gegenüber der Gleichaufteilung keinen wesentlichen Effekt. Die in der endgültigen Auslegung gewählte Aufteilung ist daher verhältnismäßig unempfindlich gegenüber leichten Variationen bei konstantem Gewicht.

Die vorstehend beschriebenen Ergebnisse beziehen sich alle auf einen konstanten Außendurchmesser des Abschirmtanks, der bei einer früheren Abschätzung als Anhaltswert für die Konstruktion festgelegt worden war. Nach der Bestimmung der optimalen Anordnung der Eisenschilde zeigte sich, daß die zwischen dem äußeren Schild und der äußeren Abschirmtankwandung verbleibende Wasserschicht unverhältnismäßig stark sein mußte. Da das Wasser hier praktisch nur der Abschirmung (Bremsung) von schnellen Neutronen dient, die ihrerseits aber nur zu einem geringen Bruchteil an der Gesamtdosisleistung am Rande beteiligt sind, lag es nahe, diese Wasserschicht unter Einsparung von Raum und Gewicht zu verringern, wobei allerdings eine geringe Verstärkung der Eisenschilde in Kauf genommen werden mußte. Auf diese Weise wurde eine endgültige Schildkonfiguration bestimmt, für welche die Neutronenflußverteilungen in Abb. 1 dargestellt sind^{*)}. Für den thermischen Schild fiel die Entscheidung zugunsten der zweigeteilten Variante, weil ein dicker einteiliger Schirm Fertigungsprobleme aufgeworfen hätte.

Eine summarische Charakterisierung der ausgewählten Abschirmanordnung läßt sich aus einer Betrachtung der Abb. 2 herleiten. Die dort aufgetragenen Dosisanteile pro cm Schichtdicke für die

^{*)} Nachträglich wurde die äußere Wasserschicht wiederum um 10 cm vergrößert, um durch die Verringerung des Dosisanteils der schnellen Neutronen die Sekundärabschirmung zu erleichtern. (Gesamtdosisleistung ist dann 76 mrem/h, davon 3 mrem/h Neutronen und 2 mrem/h Coregammas.)

Einfanggammastrahlen, welche ca. 90 % der Gesamtdosisleistung von 100 mrem/h ausmachten, zeigen, daß die stärksten Strahlungsquellen der Coretank und die thermische Abschirmung sind. Daraus folgt:

- a) Die Hauptstrahlungsquellen sind konstruktiv ziemlich weitgehend festgelegt. Sie können in die Optimalisierungsüberlegungen kaum einbezogen werden.
- b) Die relative Unempfindlichkeit der Dosisleistung gegenüber gewisser Anordnungsabänderungen der Eisenschichten im Abschirmtank könnte bedingt sein durch deren geringen Anteil an der Dosisleistung. Die Optimalisierung betrifft aber nur diesen Anteil. Eine wesentliche Funktion dieser Schichten ist daher die Abschirmung der von Coretank und thermischen Schild herrührenden Gammastrahlen.
- c) Bei einer gewichts- und volumenmäßig optimalisierten Schildanordnung würde man etwa gleiche Dosisanteile von allen Eisenschichten erwarten. Dies ist im vorliegenden Falle wegen der konstruktiven Festlegung der ersten Eisenschichten und der Höhe der zugelassenen Dosisleistung praktisch nicht ganz zu erreichen.
- d) Aus den vorgenannten Gründen dürfte die Anwendung von Bleischichten oder Borlösungen im Abschirmtank keinen wesentlichen Gewinn bringen, da durch diese Maßnahme lediglich der Strahlungsanteil der Bestandteile des Abschirmtanks verringert werden könnte^{*)}.

Volumenmäßig ließe sich möglicherweise wegen der höheren Absorptionskoeffizienten des Bleis einiges einsparen. Es ist jedoch zweifelhaft, ob dies die höheren Kosten und zusätzlichen konstruktiven Probleme rechtfertigen würde.

Die Verwendung von Bor-schichten oder Borlösungen in den ersten Eisenschichten (Coretank und therm. Schild) würde theoretisch unter Umständen einen Vorteil erbringen. Praktisch ist jedoch eine solche Maßnahme nicht nur aus metallurgischen Gründen, sondern auch im Hinblick auf den starken Borabbrand in Corenähe illusorisch.

Die vorliegenden Resultate zur Auslegung der Primärabschirmung sind noch mit einigen Unsicherheiten behaftet, die zum Teil auf die beschränkten experimentellen Ergebnisse und zum Teil auf die Begrenztheit der bisher bekannten Theorien zurückzuführen sind. Insbesondere scheint die Anwendbarkeit der hinsichtlich der Grup-

*) Die Lösung von 1,34 Gew.% Bor im Wasser des Abschirmtanks ergab eine Verminderung der Dosisleistung um rund 30 %.

penkonstanten rein empirischen Theorie der Neutronenverteilung auf die Terphenylschichten im Reaktortank fragwürdig und die Festlegung des "schnellen Flusses" im Sinne der Theorie am Core-rand problematisch. Es besteht die Hoffnung, daß durch Weiterverfolgung der theoretischen Untersuchungen in beiden Punkten Fortschritte erzielt werden können. Diese Vertiefung der Darstellung scheint übrigens auch zur besseren Interpretation jeglicher Abschirmexperimente erforderlich zu sein.

6. Erläuterung einiger Symbole

$$\left. \begin{array}{l} A_1^{(g)} \\ A_2^{(g)} = 1 - A_1^{(g)} \\ \alpha_1^{(g)} \\ \alpha_2^{(g)} \end{array} \right\} \text{Materialkonstanten zur Berechnung des "Build-up"-Faktors}$$

β Experimentell ermitteltes Verhältnis $\phi^{(2)}/\phi^{(0)}$, welches sich asymptotisch in Wasser einstellt

\hat{D} Dosisleistung

$$E_n(r) = r^{n-1} \int_r^\infty \frac{e^{-z}}{z^n} dz; \text{ Exponentialintegral}$$

λ_r Mittlere Weglänge für schnelle Neutronen ("Removal"-Weglänge)

$\mu_j^{(g)}$ Absorptionskoeffizient für γ -Strahlung

N_j Gesamtzahl der Schichten

$\nu_j^{(g)}$ Zahl der zur Energiegruppe g gehörenden γ -Quanten, die pro eingefangenen Neutron im Material der Schildschicht j emittiert werden

R Radius des äußeren Schildrandes

$\phi^{(i)}$ Neutronenfluß der Energiegruppe i

Indizes

i	Neutronenenergiegruppe	0 : schnelle Gruppe 1 : intermediäre Gruppe 2 : thermische Gruppe
g	γ -Energiegruppe	
j	Schicht in der Schildanordnung	

7. Literaturverzeichnis

- [1] C. Cooper, J. D. Jones, C. C. Horton
"Some Design Criteria for Hydrogen-Metal Reactor Shields"
A/Conf 15/8/84
- [2] Th. Rockwell
"Reactor Shielding Design Manual"
- [3] ANL 5800, S. 452

Tabelle 1

5,2 cm Terphenylreflektor $\phi^0 = 2 \cdot 10^{12} \frac{n}{cm^2 \cdot s}$ am Rande des Reflektors;
Reaktorleistung 30 MW

F a l l 1		spezieller Fall mit thermischem Schild		
Anordnung	r ₁	4,5 cm Eisen		
	r ₂	7,5 cm Terphenyl		
	r ₃	15,0 cm Eisen		
	r ₄	7,5 cm Terphenyl		
	r ₅	4,0 cm Eisen		
	r ₆	12,0 cm Isolation		
	r ₇	6,0 cm Eisen		
	r ₈	24,0 cm Wasser		
	r ₉	21,0 cm Eisen		
	r ₁₀	14,0 cm Wasser		
	r ₁₁	22,0 cm Eisen		
	r ₁₂	27,0 cm Wasser		
	r ₁₃	4,0 cm Eisen		
Gewicht t/m		69,8		
Neutronendosisleistung (mrem/h)		- *)		
Core-γ-Dosisleistung (mrem/h)		1,83		
(nγ)-Dosis (mrem/h)		119,2 (2 -Energiegruppen 7,4 MeV; 2,2 MeV)		
Gesamtdosisleistung (mrem/h)		-		
		Schild 3	Schild 5	Schild 7
Erwärmung durch (nγ) kcal/m ³ h		8,40 · 10 ⁴	0,94 · 10 ⁴	0,252 · 10 ⁴
Erwärmung durch Core-γ -Strahlung kcal/m ³ h		0,0848 · 10 ⁴	-	-
Erwärmung durch in-elast. Neutronenstreuung kcal/m ³ h		0,0157 · 10 ⁴	-	-

*) Zahlenwerte wurden nicht berechnet

Tabelle 2

F a l l 2		spezieller Fall ohne thermischen Schild	
Anordnung	r ₁	4,5 cm	Eisen
	r ₂	20,0 cm	Terphenyl
	r ₃	0,0 cm	-
	r ₄	0,0 cm	-
	r ₅	4,0 cm	Eisen
	r ₆	12,0 cm	Isolation
	r ₇	6,0 cm	Eisen
	r ₈	11,0 cm	Wasser
	r ₉	26,0 cm	Eisen
	r ₁₀	15,0 cm	Wasser
	r ₁₁	25,0 cm	Eisen
	r ₁₂	80,0 cm	Wasser
	r ₁₃	4,0 cm	Eisen
Gewicht t/m		72,6	
Neutronendosisleistung (mrem/h)		0,534	
Core-γ-Dosisleistung (mrem/h)		2,64	
(nγ)-Dosis (mrem/h)		121,0 (2 -Energiegruppen 7,4 MeV; 2,2 MeV)	
Gesamtdosisleistung (mrem/h)		124,17	
		Schild 5	Schild 7
Erwärmung durch (nγ) kcal/m ³ h		7,25 · 10 ⁴	1,70 · 10 ⁴
Erwärmung durch Core-γ-Strahlung kcal/m ³ h		0,146 · 10 ⁴	
Erwärmung durch inelast. Neutronenstreuung kcal/m ³ h		-	-

Tabelle 3

F a l l 3 dargestellt in Abb. 1 und 2		optimaler Fall mit geteiltem thermischem Schild	
Anordnung	r ₁	4,5 cm	Eisen
	r ₂	7,0 cm	Terphenyl
	r ₃	5,0 cm	Eisen
	r ₄	7,0 cm	Terphenyl
	r ₅	5,0 cm	Eisen
	r ₆	6,0 cm	Terphenyl
	r ₇	4,0 cm	Eisen
	r ₈	12,0 cm	Isolation
	r ₉	6,0 cm	Eisen
	r ₁₀	20,0 cm	Wasser
	r ₁₁	27,0 cm	Eisen
	r ₁₂	18,0 cm	Wasser
	r ₁₃	19,0 cm	Eisen
	r ₁₄	24,0 cm	Wasser
	r ₁₅	4,0 cm	Eisen
Gewicht t/m		69,6	
Neutronendosisleistung (mrem/h)		10,4	
Core-γ-Dosisleistung (mrem/h)		2,92	
(n γ)-Dosis (mrem/h)		104,0 ^{*)} 90,0	{ 5 γ-Energiegruppen) (6 γ-Energiegruppen, geänderte Randbeding.)
Gesamtdosisleistung (mrem/h)		117,3 103,3	{ 5 γ-Gruppen) (6 γ-Gruppen)
Erwärmung durch (n γ) kcal/m ³ h		Schild 3	Schild 5
		25,5 · 10 ⁴	5,30 · 10 ⁴
Erwärmung durch Core-γ- Strahlung kcal/m ³ h		0,322 · 10 ⁴	0,0412 · 10 ⁴
Erwärmung durch inelast. Neutronenstreuung kcal/m ³ h		-	-

*) Im Falle der 2 und 5 γ-Gruppen wurde mit einem $\Sigma_H^{(1)} = 0,192 \text{ cm}^{-1}$,
 $\Sigma_H^{(2)} = 0,122 \text{ cm}^{-1}$, $\epsilon = 0,01982$, im Falle der 6 γ-Gruppen mit
 $\Sigma_H^{(1)} = 0,196 \text{ cm}^{-1}$, $\Sigma_H^{(2)} = 0,117 \text{ cm}^{-1}$ und $\epsilon = 0,0322$
gerechnet.

Tabelle 4

5,2 cm Terphenylreflektor, geteilter thermischer Schild, $\varphi^0 = 2 \cdot 10^{12} \frac{n}{cm^2 \cdot s}$ am Rande des Reflektors,
 Reaktorleistung 30 MW

	F a l l 4 mit Sekundärschild	F a l l 5 optimaler Fall mit feinerer Aufteilung der Eisenschichten
Anordnung	r_1 bis r_{13} wie in Fall 3 (Tab. 3) r_{14} = 34 cm Wasser r_{15} = 4 cm Eisen r_{16} = 290 cm Entfernung zwischen Primärschild und Sekundärschild r_{17} = 20,5 cm Sekundärschild	r_1 bis r_{10} wie Tab. 3 r_{11} = 19 cm Eisen r_{15} = 10 cm Eisen r_{12} = 15 cm Wasser r_{16} = 12 cm Wasser r_{13} = 17 cm Eisen r_{17} = 4 cm Eisen r_{14} = 15 cm Wasser
Gewicht	71,354 (ohne Sekundärschild)	69,3 t/m
Neutronendosis (mrem/h)	0,202 (hinter dem Sekundärschild)	10,2
Core- γ -Dosisleistung (mrem/h)	0,02	2,9
(n β)-Dosisleistung (mrem/h)	0,38 (hinter dem Sekundärschild)	66,6 (6 γ -Gruppen)
Gesamtdosisleistung	0,6 (hinter dem Sekundärschild)	79,7

Tabelle 5

(Konstanten in [1])

Material	L_{s2} (cm)	p	$D^{(1)}$ (cm)	$D^{(2)}$ (cm)	L (cm)
Eisen	17,7	0,5	0,794	0,362	1,33
Wasser	4,0	1,0	0,914	0,147	2,74

Tabelle 6

Material	Gebiete	$\sum_r = \frac{1}{\lambda_r}$	
		Im Falle 1 u.2	Im Falle 3,4 u.5
Eisen	sämtliche Eisengebiete	0,173	0,173
Wasser	Reflektor bis einschl. 1. Wasserschild hinter Isolation	0,181	0,181
	darauffolgende Wasser- schicht	0,134	0,156
	äußere Wasserschicht	0,125	0,125

Tabelle 7

Material	Fall	Bereich	$\sum_R^{(0 \rightarrow 1)}$	$\sum_R^{(0 \rightarrow 2)}$	$\sum_R^{(1 \rightarrow 2)}$	$\sum_T^{(1)}$	$\sum_T^{(2)}$	$D^{(1)}$	$D^{(2)}$	$\sum_H^{(1)}$	$\sum_H^{(2)}$	
Eisen	für beide Fälle	in allen Eisenschilden	0,173	0,0	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$2,535 \cdot 10^{-3}$	0,205	0,794	0,362	-	-	-
	im Wasserbereich für die Fälle 1 und 2	Reflektor einsch. 1. Wasserschicht hinter Isolation	0,303	-0,122								
		darauffolgende Wasserschicht	1,137	-1,002	$5,90 \cdot 10^{-2}$	$5,90 \cdot 10^{-2}$	0,0196	0,944	0,147	0,192	0,122	0,01982
		äußere Wasserschicht	1,440	-1,314								
Wasser	im Wasserbereich für die Fälle 3, 4 und 5	Reflektor einsch. 1. Wasserschicht hinter Isolation	0,303	-0,122								
		darauffolgende Wasserschicht	0,632	-0,477	$5,90 \cdot 10^{-2}$	$5,90 \cdot 10^{-2}$	0,0196	0,944	0,147	0,196	0,117	0,0322
		äußere Wasserschicht	1,440	-1,314								

Die negativen "Wirkungsquerschnitte" haben nur formale Bedeutung.
Für Terphenyl wurden die Wirkungsquerschnitte des Wassers auf die entsprechende Wasserstoffdichte umgerechnet.

Tabelle 8

Quelldichte der γ -Strahlung im Schiffsreaktorcore
(30 MW)

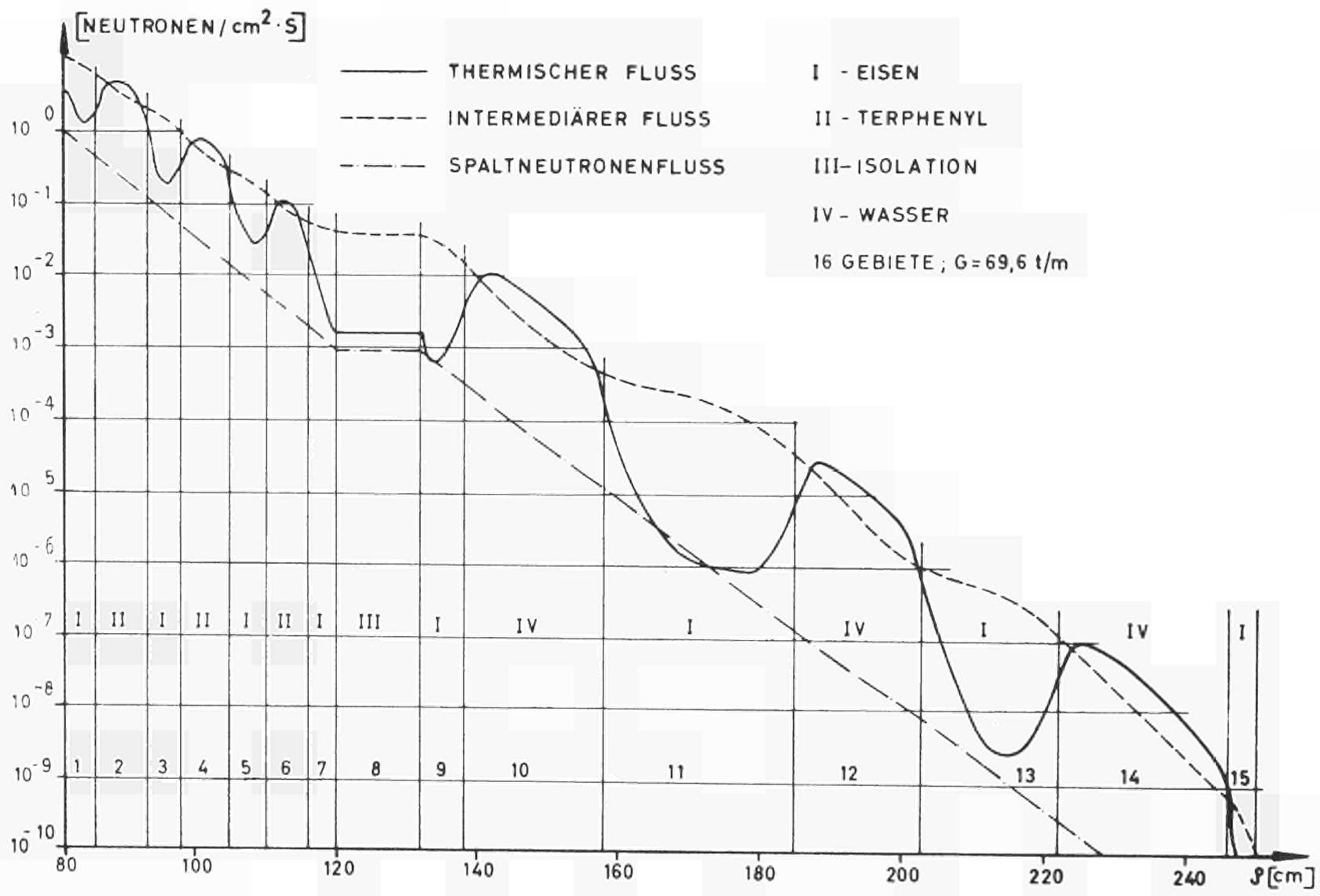
Energiebereich MeV	S_v $\frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}}$
7 - 8	$2,77 \cdot 10^{10}$
6 - 7	$0,945 \cdot 10^{10}$
5 - 6	$4,42 \cdot 10^{10}$
4 - 5	$18,25 \cdot 10^{10}$
3 - 4	$9,38 \cdot 10^{10}$

Tabelle 9 - Eingangsdaten zur Berechnung der γ -Strahlung
(die Build-up-Faktoren beziehen sich auf Eisen)

	Energie- Intervall	$E_j^{(g)}$	Material	$\nu_j^{(g)}$	$w^{(g)}$	$\mu_j^{(g)}$	$\alpha_1^{(g)}$	$\alpha_2^{(g)}$	$A_1^{(g)}$	$A_2^{(g)}$
1	6 - 10	-	H ₂ O	0	0	0,0242	- 0,087	0,035	2,5	- 1,5
		-	C ₁₈ H ₁₄	0	0	0,0206				
		7,43	Fe	0,509	8,47 · 10 ⁻³	0,234				
2	5 - 6	-	H ₂ O	0	0	0,0288	- 0,079	0,063	3,25	- 2,25
		-	C ₁₈ H ₁₄	0	0	0,0248				
		5,5	Fe	0,153	6,75 · 10 ⁻³	0,242				
3	4 - 5	-	H ₂ O	0	0	0,0318	- 0,0755	0,067	3,71	- 2,71
		4,0 (vom C)	C ₁₈ H ₁₄	0,012	5,32 · 10 ⁻³	0,0274				
		4,5	Fe	0,100	5,81 · 10 ⁻³	0,251				
4	3 - 4	-	H ₂ O	0	0	0,0364	- 0,0725	0,0655	4,40	- 3,40
		-	C ₁₈ H ₁₄	0	0	0,0316				
		3,5	Fe	0,106	4,87 · 10 ⁻³	0,268				
5	2 - 3	2,23	H ₂ O	1,00	3,52 · 10 ⁻³	0,0466	- 0,0720	0,0565	5,72	- 4,72
		2,23 (vom H)	C ₁₈ H ₁₄	0,99	3,52 · 10 ⁻³	0,0412				
		2,50	Fe	0,08	3,84 · 10 ⁻³	0,315				
6	0 - 2	-	H ₂ O	0	0	0,0540	- 0,077	0,0430	7,25	- 6,25
		-	C ₁₈ H ₁₄	0	0	0,0477				
		1,67	Fe	0,30	2,91 · 10 ⁻³	0,354				

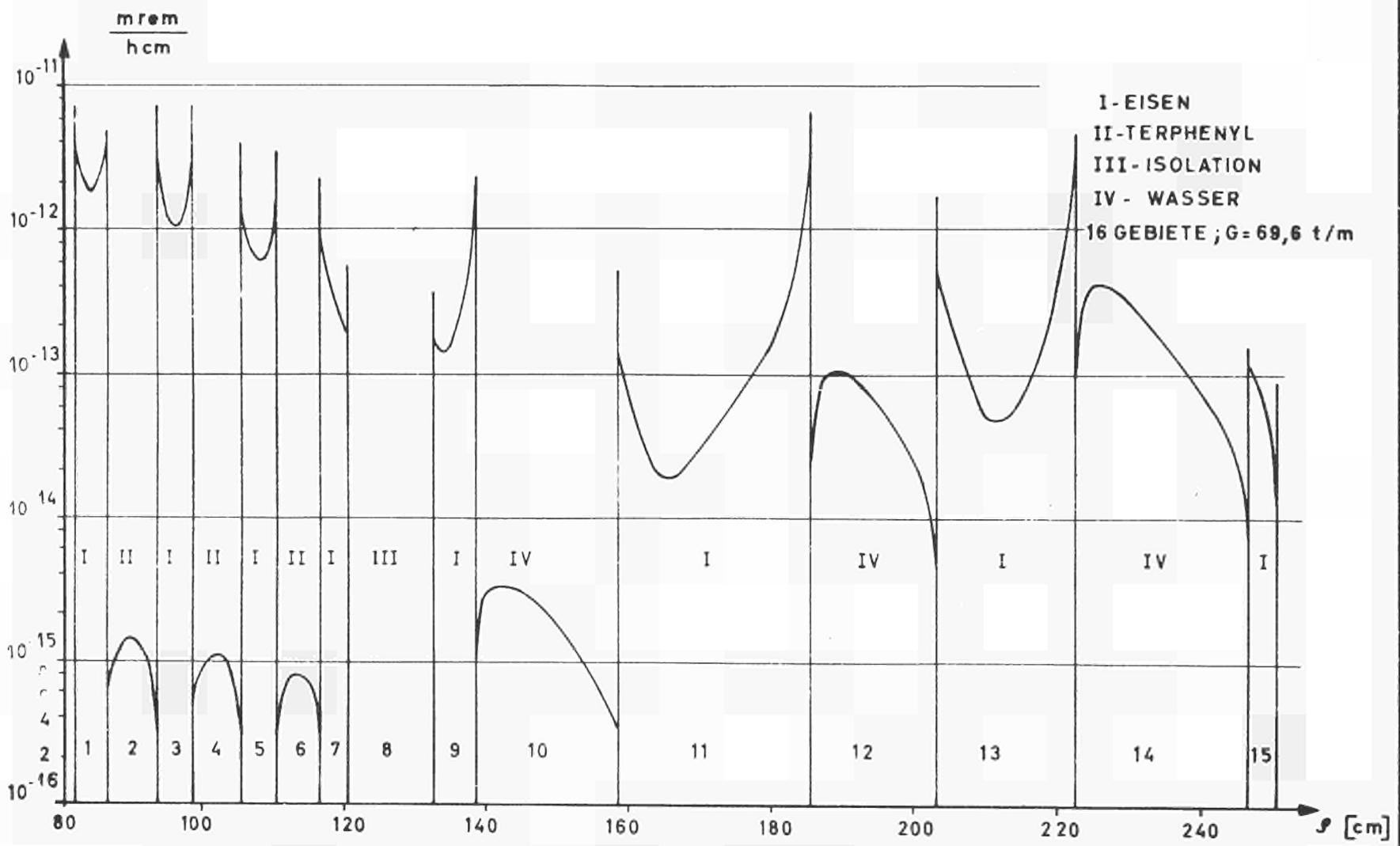
die Build-up-Faktoren aus [2]

die $\nu_j^{(g)}$ aus [3]



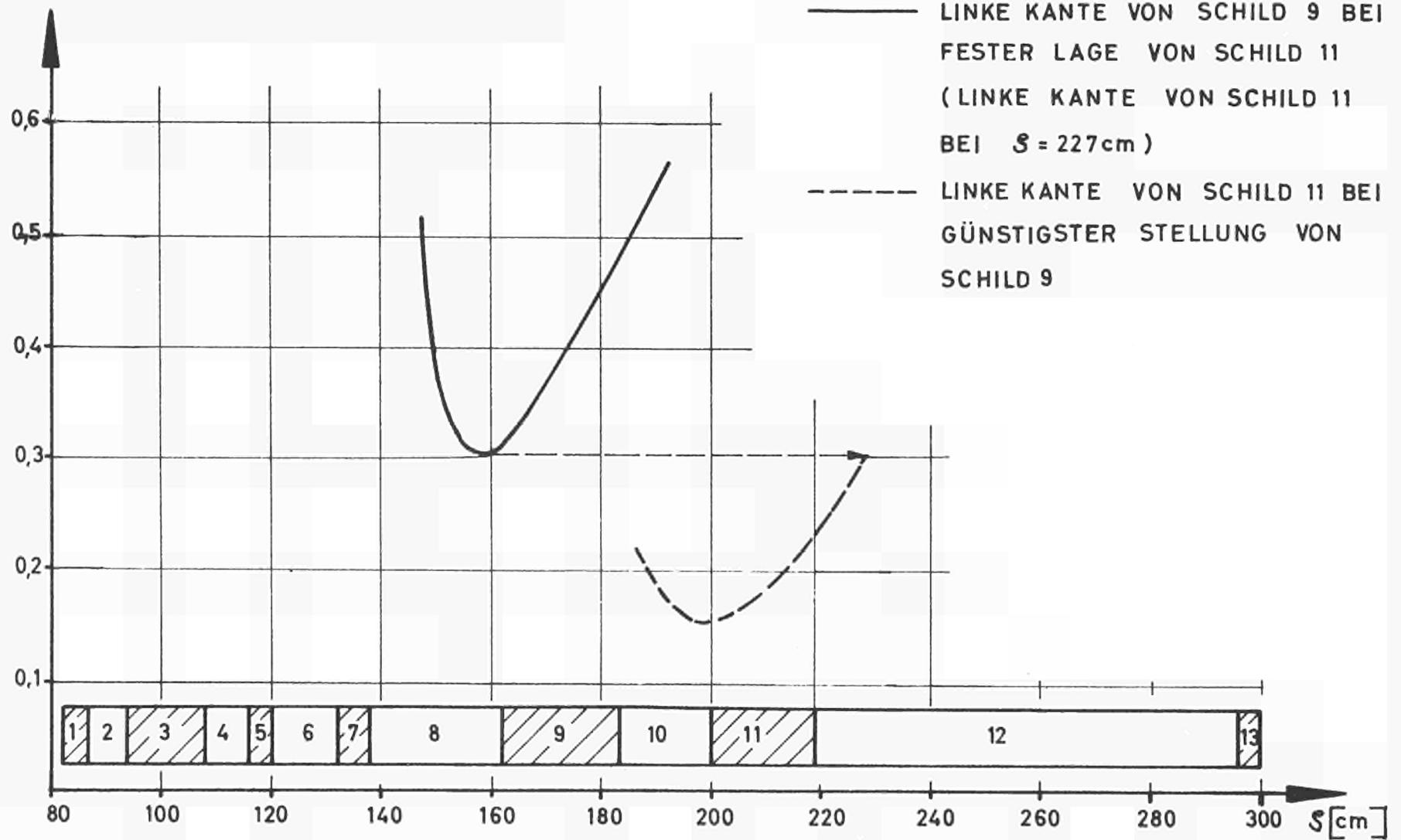
INTERATOM
 FLUSSVERLÄUFE IN EINEM
 OPTIMALEN SCHILD
 (GETEILTEN THERMISCHER SCHILD)
 ABB. 1

INTERATOM
 DOSISLEISTUNG AUS DEN SCHILD-
 SCHICHTEN EINER OPTIMALEN
 KONFIG.(GETEILTER THERM. SCHILD)
 ABB. 2



ALS ORDINATE IST DER VON DER STELLE s HERSTAMMENDE BEITRAG ZUR γ -DOSISLEISTUNG AN DER AUßENSEITE DES PRIMÄRSCHILDES AUFGETRAGEN:
 SPALTNEUTRONENFLUß ($s=81,5\text{cm}$) = $1 \text{ (n/cm}^2 \cdot \text{s)}$; $\phi(\gamma) = 0,516 \cdot 10^{-10} \text{ mrem/h}$

DOSISLEISTUNG in willkürlichen Einheiten



MINIMALISIERUNG DER DOSIS-LEISTUNG BEI KONST. SCHILDGEW. (79,2 t/m) THERM. SCHILD 15cm STARK

INTERATOM

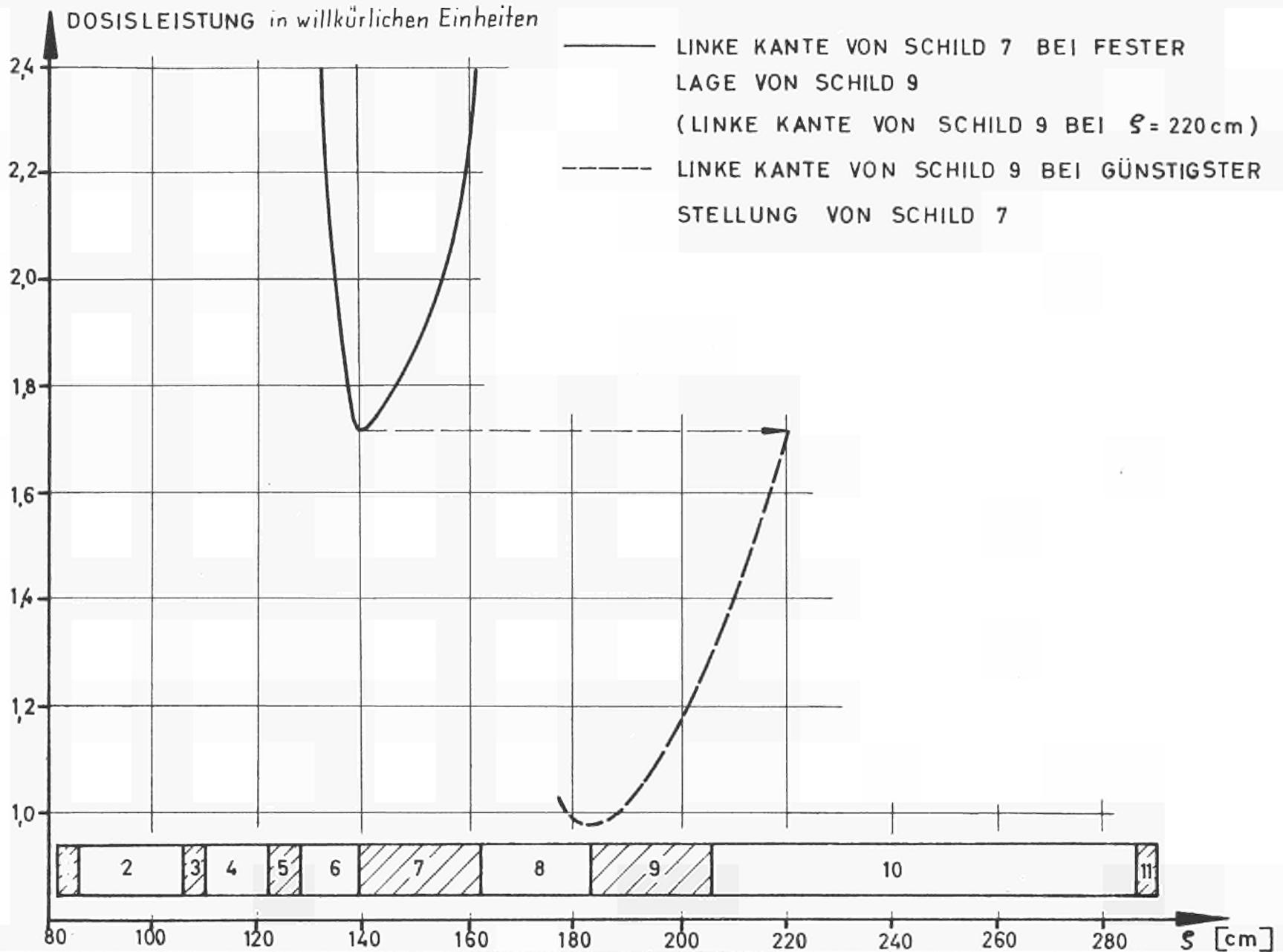
ABB.

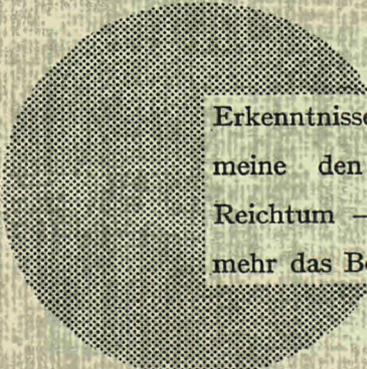
3

MINIMALISIERUNG DER DOSIS-
LEISTUNG BEI KONST. SCHILDGEW.
(68,6 t/m) THERM. SCHILD FEHLT

INTERATOM

ABB.
4





Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

CDNA01888DEC

f

EURATOM — C.I.D.
51 - 53, rue Belliard
Bruxelles (Belgique)