

KFK-25

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

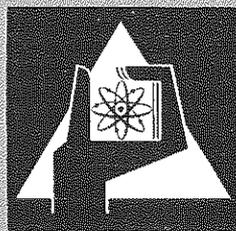
JUNI 1960

KFK 25

INSTITUT FÜR NEUTRONENPHYSIK UND REAKTORTECHNIK

EINE MESSUNG DES NEUTRONENABSORPTIONSQUERSCHNITTES  
VON ALUMINIUM

M. BROSE UND K. H. BECKURTS



KERNREAKTOR

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

KARLSRUHE



5. SEP. 1960

## Eine Messung des Neutronenabsorptionsquerschnittes von Aluminium

Von M. BROSE und K. H. BECKURTS

(Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe)

Mit 3 Textabbildungen

(Eingegangen am 25. März 1960)

**Zusammenfassung.** Es wird über eine Messung des Absorptionsquerschnittes von Aluminium für langsame Neutronen berichtet. Die Messung geschieht durch den Vergleich der integrierten Neutronenflüsse in der Umgebung einer Neutronenquelle in einer Aluminium- und in einer Paraffinanordnung. Es ergibt sich ein Wert von  $\sigma_a(v=2200 \text{ m/s}) = 220 \pm 13 \text{ mbarn}$ .

### 1. Einleitung

Der Absorptionsquerschnitt von Aluminium für langsame Neutronen ist verhältnismäßig ungenau bekannt. Die Tabelle von HUGHES [1] gibt einen Wert von  $\sigma_a(2200 \text{ m/s}) = 230 \pm 5 \text{ mbarn}$  an, dagegen existieren in der Literatur Angaben von 210 bis 246 mbarn [2], [3], [4], [5]. Die Messung dieser Größe ist schwierig: Für langsame Neutronen ist bei Aluminium  $\sigma_a \approx 0,3\sigma_s$ . Daher führen Transmissionsmessungen mit einem Neutronenstrahl, die ja primär den totalen Querschnitt  $\sigma_a + \sigma_s$  ergeben, zu ungenauen Resultaten. Andererseits ist eine genaue Bestimmung von  $\sigma_a$  aus der Diffusionslänge für thermische Neutronen nicht möglich, da die Anwendbarkeit der Diffusionstheorie an die Voraussetzung  $\sigma_a \ll \sigma_s$  gebunden ist. Aus dem gleichen Grunde und wegen der langen Moderations- und Thermalisierungszeit ist auch die Methode der gepulsten Neutronenquelle nicht anwendbar.

Das geeignetste Verfahren ist die Messung mit dem Pile-Oszillator (Vergleich mit einem Bor- oder Goldstandard). Dieses Verfahren ist bei den meisten bisherigen Messungen benutzt worden. Da eine solche Einrichtung nicht zur Verfügung stand, und da der Wunsch nach einer Bestimmung durch eine unabhängige Methode bestand, wurde die vorliegende Messung nach der „Methode der integrierten Neutronenflüsse“ vorgenommen.

Diese Methode besteht darin, eine punktförmige Neutronenquelle nacheinander in einer ausgedehnten Anordnung aus einer homogenen Vergleichssubstanz (Wasser, Paraffin) und in eine Anordnung aus einem Probekörper aus der zu untersuchenden Substanz, der von einem hinreichend dicken Reflektor aus Vergleichssubstanz umgeben ist, einzubringen und in beiden Anordnungen die Verteilung des thermischen Flusses mit Indikatorfolien zu bestimmen. Sind  $\Sigma_x$  und  $\Sigma_v$  die makroskopischen Absorptionsquerschnitte der Probe- und der Vergleichssubstanz (für 2200 m/s-Neutronen), so gilt<sup>1,2</sup> [8], [9]:

$$\frac{\Sigma_x}{\Sigma_v} = \frac{\frac{P_1}{P_2 P_3} I_v - \frac{1}{P_4} I_R}{\frac{1}{P_5} I_P} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Es wird angenommen, daß Probe- und Vergleichssubstanz im Bereich thermischer Energien einen  $1/v$ -Verlauf des Absorptionsquerschnittes haben.

<sup>2</sup> Die Anordnungen müssen so groß sein, daß keine Neutronen nach außen entweichen.

Hierin sind  $I_v$ ,  $I_R$  und  $I_P$  die über Vergleichskörper, Reflektor und Probekörper erstreckten Volumenintegrale des thermischen Neutronenflusses  $n v_0$ ;

$P_1$  = Korrektur für Absorption schneller Neutronen im Probekörper durch  $(n, p)$ - und  $(n, \alpha)$ -Prozesse;

$P_2$  = Korrektur für Absorption langsamer Neutronen in der Neutronenquelle;

$P_3$ ,  $P_4$  und  $P_5$  = „Resonanzentkommwahrscheinlichkeiten“ für epithermische Neutronen in der Vergleichsanordnung, dem Reflektor und dem Probekörper.

Die Bestimmung von  $\Sigma_x$  nach diesem Verfahren besteht einerseits aus der Bestimmung der Größen  $I_v$ ,  $I_R$  und  $I_P$  durch Integration des mit Sonden gemessenen Neutronenflusses, andererseits in der Berechnung der Korrekturen  $P_1$  bis  $P_5$ . Ein ähnliches Verfahren wurde von БОЕЦКHOFF [6] zur Messung des Absorptionsquerschnittes von Graphit benutzt.

### 2. Zur Durchführung der Messung

Das untersuchte Material war sog. 99,5-Aluminium der Hüttenwerke Rheinfelden<sup>3</sup>. Durch chemische Analyse und durch Vergleich mit Reinstaluminium an einem ausländischen Pile-Oszillator war sichergestellt, daß das Material keine nennenswerten Neutronen einfangenden Verunreinigungen enthielt.

Der Probekörper hat die Form einer Kugel von  $55 \pm 0,1 \text{ cm}$  Durchmesser, in deren Zentrum die Neutronenquelle, eine 500 mC(Ra + Be)-Quelle, eingeführt wird. Die Aluminiumkugel ist allseitig von einem Paraffinreflektor umgeben. Abb. 1 zeigt die Anordnung von Probekörper und Reflektor, die Vorrichtung zur Einführung der Neutronenquelle und der Indikatorfolien ist mit eingezeichnet. Als Vergleichskörper dient ein Paraffinwürfel der Abmessungen  $160 \times 160 \times 160 \text{ cm}$ , in dessen Zentrum die Quelle eingeführt werden kann. Die kugelsymmetrische Anordnung hat den Vorteil, daß der Neutronenfluß nur längs eines von der Quelle ausgehenden Radiusvektors gemessen werden muß.

Als Indikatorfolien wurden Dysprosium-Sonden mit einer Flächenbelegung von  $40 \text{ mg/cm}^2$  benutzt, die im Anschluß an die Aktivierungen mit Endfenster-

<sup>3</sup> Aus dem gleichen Material werden die wesentlichen Aluminiumteile im Core des Reaktors FR 2 hergestellt; die Prüfung dieses Materials war der ursprüngliche Anlaß dieser Messungen.

zählrohren ausgezählt wurden<sup>1</sup>. Die Eliminierung der epithermischen Aktivierung erfolgte durch Kadmium-Differenzmessungen. Bei den Messungen im Paraffin tritt eine Depression des thermischen Flusses in der Nähe der Indikatorfolien auf, die zu einer Aktivierungsstörung führt. Sie wurde nach den Formeln von

für Aluminium. Ist  $\varrho$  der Abstand der Sonde von der Grenzfläche Aluminium-Paraffin und  $L$  die Diffusionslänge für thermische Neutronen im Paraffin, so gilt angenähert [9]

$$\kappa_c(\varrho) = \kappa_c \cdot \left( 1 - \frac{e^{-\frac{2}{L}\varrho} - e^{-\frac{1}{L}\sqrt{R^2+4\varrho^2}}}{1 - e^{-R/L}} \right) \quad (3)$$

wo  $R$  der Radius der Sonde ist. Aus Gl. (3) sieht man, daß die „Störung“ der Aktivierungskorrektur nur etwa eine Diffusionslänge von der Grenzfläche wesentlich ist. Beim Anbringen der Aktivierungskorrektur an den Meßwerten wurde diese schwache Ortsabhängigkeit von  $\kappa_c$  nach (3) berücksichtigt.

Aus den gemessenen Flußverteilungen findet man

$$\frac{I_v}{4\pi} = \int_0^\infty n v_0(r) (1 + \kappa_c) r^2 dr = 17176 \pm 249 \quad (\text{willk. Einh.})$$

$$\frac{I_R}{4\pi} = \int_0^{R_{Al}} n v_0(r) \kappa_c(\varrho) r^2 dr = 14479 \pm 203 \quad (\text{willk. Einh.})$$

$$\frac{I_P}{4\pi} = \int_{R_{Al}}^\infty n v_0(r) r^2 dr = 5128 \pm 33 \quad (\text{willk. Einh.})$$

Der Fehler in  $I_v$  und  $I_R$  ist teilweise bedingt durch die ungenaue Kenntnis von  $\kappa_c$ ; dieser Fehler geht jedoch, wie Gl. (1) zeigt, nur linear in das Ergebnis ein.

### 3. Auswertung und Diskussion der Meßergebnisse

Berechnung der Korrekturfaktoren:

$P_1$  beschreibt die Neutronenverluste beim Durchgang der Quellneutronen durch die Aluminiumkugel. Hierfür kommen  $(n, p)$ - und  $(n, \alpha)$ -Prozesse am Aluminium in Frage. Zu einer Berechnung von  $P_1$  bedarf es — neben der Angabe über die Reaktionsquerschnitte und ihre Energieabhängigkeit — einer genauen Kenntnis des Energiespektrums der  $(Ra + Be)$ -Neutronen. Die bisherigen Messungen dieses Spektrums führen zu uneinheitlichen Resultaten [10], [11]; insbesondere liegen über den Verlauf im Energiebereich 0 bis 1 MeV keine Messungen vor. Für unsere Rechnungen wurde im Energiebereich 1 bis 13 MeV der Verlauf des Spektrums nach den Messungen von SCHMIDT-ROHR [11], im Bereich 0 bis 1 MeV der Verlauf nach einer Berechnung von HESS [12] zugrunde gelegt. Eine einfache Berechnung, bei der die drei ersten Stöße berücksichtigt sind, die ein von der Quelle ausgehendes Neutron innerhalb der Kugel ausführt, ergibt [9]<sup>2</sup>:

$$P_1 = 0,990 \pm 0,006$$

$P_2$  beschreibt die Selbstabsorption langsamer Neutronen in der  $(Ra + Be)$ -Quelle. Eine einfache Rechnung mit Hilfe der elementaren Diffusionstheorie ergibt [9]<sup>2</sup>:

$$P_2 = 0,996$$

$P_3$  ist die „Resonanzentkommwahrscheinlichkeit“ der Neutronen in der Vollparaffinanordnung. Zur Berechnung von  $P_3$  kann die übliche Formel für  $P$  in homogenen Anordnungen [8] benutzt werden.

$$P_3 = \exp \left\{ - \int \frac{\sigma_a}{\sigma_t} (E') \frac{dE'}{E'} \right\}. \quad (4)$$

Man erhält mit den Daten des Paraffins  $P_3 = 0,992$ .

$P_4$  berücksichtigt den Einfang epithermischer Neutronen im Paraffinreflektor. Dieser Faktor kann näherungsweise aus dem gemessenen Kadmium-Verhältnis im Reflektor und aus Wirkungsquerschnittsdaten bestimmt werden; man findet [9]

$$P_4 = 1,00,$$

d.h. der Resonanzeinfang im Paraffinreflektor ist zu vernachlässigen.

<sup>2</sup> Wegen der starken Vorwärtsstreuung schneller Neutronen ist die Berücksichtigung weiterer Stöße unnötig.

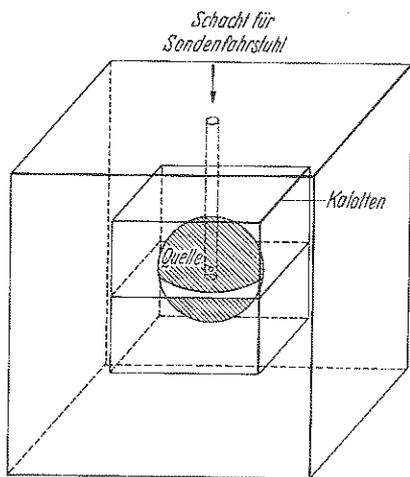


Abb. 1. Kugel-Paraffinanordnung

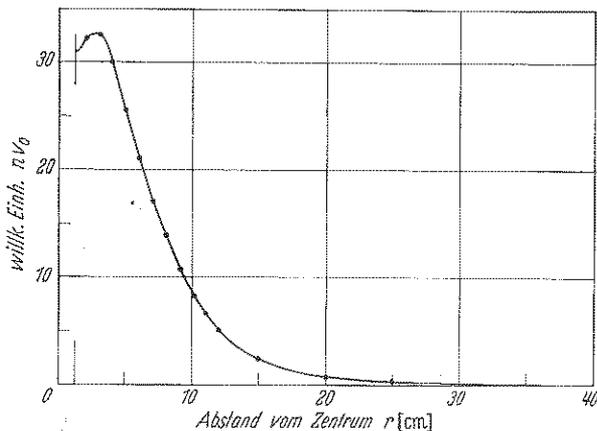


Abb. 2. Thermischer Fluß  $n v_0$  in der Vollparaffinanordnung

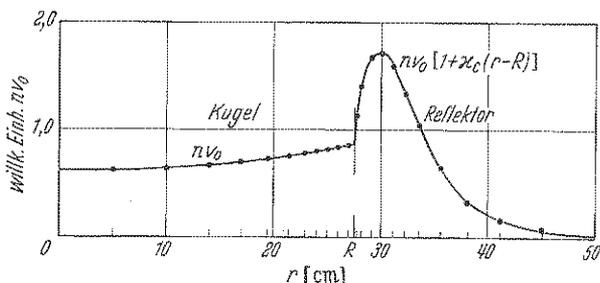


Abb. 3. Flußverteilung in der Aluminiumkugel und im Paraffinreflektor

MEISTER [7] berücksichtigt. Abb. 2 und 3 zeigen die in der Vollparaffinanordnung sowie in der Anordnung Kugel-Reflektor bestimmten Flußverteilungen.

Für die Sondenkorrektur im Inneren eines Streumediums gilt allgemein [8]:

$$\frac{C_0 - C}{C} = \kappa_c \quad (2)$$

mit  $\kappa_c = 0,261 \pm 0,018$  für die benutzten Sonden im Paraffin (nach MEISTER [7]). In der Nähe der Grenzfläche Paraffin-Aluminium nimmt  $\kappa_c$  ab und nähert sich dem Wert  $\kappa_c \approx 0$

<sup>1</sup> Man ersieht aus Gl. (1), daß eine Absolutauszählung nicht erforderlich ist.

$P_5$  berücksichtigt den Einfang epithermischer Neutronen am Aluminium durch  $(n, \gamma)$ -Prozesse und kann auf ähnliche Weise wie  $P_4$  bestimmt werden; es ergibt sich

$$P_5 = 0,966 \pm 0,003.$$

Aus Gl. (1) ergibt sich mit den gemessenen Integralen und den  $P_1 \dots P_5$

$$\frac{\Sigma_{Al}}{\Sigma_{(CH_2)_n}} = 0,518 \pm 0,026.$$

Für den makroskopischen Absorptionsquerschnitt des hier verwendeten Paraffins ergab eine direkte Absolutbestimmung nach der Methode der gepulsten Neutronenquelle [13]

$$\Sigma_{(CH_2)_n} = (256 \pm 8) \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}.$$

Es folgt für den Absorptionsquerschnitt des Aluminiums

$$\sigma_a(v = 2200 \text{ m/s}) = 220 \pm 13 \text{ mbarn}.$$

Die Ungenauigkeit des Resultates ist zum Teil durch die Ungenauigkeit von  $P_1$  bestimmt, die von der mangelnden Kenntnis des Energiespektrums der (Ra + Be)-Quelle herührt; würde dieses genau bekannt sein, so ließe sich  $\sigma_a$  auf  $\pm 9$  mb angeben.

Dieser Wert stimmt im Rahmen der Fehlergrenzen mit dem in der Tabelle von HUGHES [1] angegebenen Wert von 230 mbarn überein. Er liegt dagegen wesentlich niedriger als der in neuerer Zeit von ROSE et al. [5] (Pile-Oszillator) gefundene Wert von  $246 \pm 3$  mbarn.

Literatur: [1] HUGHES, D. J., and R. B. SCHWARK: Neutron Cross Sections, 2nd Edit.; BNL 325. — [2] HARRIS, S. P., C. O. MUEHLHAUSE, S. RASMUSSEN, H. P. SCHROEDER and G. E. TOMAS: Phys. Rev. **80**, 342 (1950). — [3] POMERANCE, H.: Phys. Rev. **83**, 641 (1951). — [4] COLMAR, F. C. W., and D. J. LITTLER: Proc. Phys. Soc. Lond. **63**, 1175 (1950). — [5] ROSE, H., W. A. COOPER and R. B. TATTERSALL: The Use of the Pile Oscillator in Thermal Reactor Problems. A/Conf./15/P/14. — [6] BOECKHOFF, K. H.: Diplomarbeit Göttingen 1955. — [7] MEISTER, H.: Diplomarbeit Göttingen 1954; Z. Naturforsch. **10a**, 669 (1955). — [8] WIRTZ, K., u. K. H. BECKURTS: Elementare Neutronenphysik. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1958. — [9] BROSE, M.: Absorptionsquerschnitt von Aluminium für thermische Neutronen, Interner Arbeitsbericht der Kernreaktor Bau- und Betriebs-Gesellschaft, Karlsruhe 1960. — [10] TRUCHER, M.: Z. Physik **126**, 410 (1949). — [11] SCHMIDT-ROHR, U.: Z. Naturforsch. **8a**, 470 (1953). — [12] HESS, W. H.: Ann. Physics **6**, 2 (1959). — [13] KÜCHLE, M.: Messung der Temperaturabhängigkeit der Neutronendiffusion in Wasser und Diphyl mit der Impulsmethode, Karlsruhe, 1960.