

Elektronenstrahl auftretenden Veränderungen mit den bei reinen Substanzen bekannten thermischen Umwandlungsvorgängen<sup>10</sup> nur ein beschränkter Anwendungsbereich zu.

<sup>10</sup> Solche Überlegungen, die z. Tl. sogar gute Übereinstimmung mit den theoretischen Berechnungen erbrachten, wurden angestellt von: C. E. HALL, Introduction to Electron Microscopy, London 1953, S. 293 ff.; H. FORESTIER,

## Untersuchungen der Neutronendiffusion in Graphit mit einer nichtstationären Methode

Von K. H. BECKURTS

Max-Planck-Institut für Physik, Göttingen  
(Z. Naturforsch. 11 a, 880—881 [1956]; eingeg. am 21. September 1956)

Nach einer von v. DARDEL<sup>1, 2</sup> vorgeschlagenen Methode können durch eine Bestimmung der mittleren Lebensdauer thermischer Neutronen in verschiedenen großen Geometrien eines Moderators dessen Diffusionsparameter mit großer Genauigkeit bestimmt werden.

Für die mittlere Lebensdauer  $\vartheta$  eines thermischen Neutrons gilt:

$$1/\vartheta = 1/\vartheta_0 + D B^2. \quad (1)$$

Dabei ist  $\vartheta_0$  die — nur durch Absorption bedingte — Lebensdauer im unendlich ausgedehnten Streumedium und  $D B^2$  die Ausflußrate;  $D$  ist der Diffusionskoeffizient und  $B^2$  die „geometrische Krümmung“, d. h. der kleinste Eigenwert der Gleichung  $\Delta\Phi + B^2 \Phi = 0$  für den Neutronenfluß mit den Randbedingungen  $\Phi = 0$  an den effektiven Oberflächen des Moderators.

In Moderatoren endlicher Abmessungen liegt die Gleichgewichtstemperatur thermischer Neutronen unter der Moderator temperatur infolge des laufenden Energieverlusts durch den bevorzugten Ausfluß schneller Neutronen, der durch die Wärmeübertragung vom Moderator nur unvollständig kompensiert werden kann (sogenannter Ausfluß-Kühlungs-Effekt). Der Diffusionskoeffizient, der von der Neutronentemperatur abhängt, wird infolgedessen eine Funktion der den Ausfluß-Kühlungs-Effekt charakterisierenden Krümmung  $B^2$ ; in guter Näherung gilt

$$D = D_0 - C B^2. \quad (2)$$

$D_0$  ist der Diffusionskoeffizient bei der Moderator temperatur  $T_0$ . Unter der Annahme, daß sich der Energie austausch zwischen dem Neutronengas und dem Moderator durch eine Wärmeübergangszahl  $\alpha_0$  beschreiben läßt, ergibt die Rechnung für  $C$  in erster Näherung

$$C = \frac{k T_0^2 D_0^2}{4 \alpha_0}. \quad (3)$$

Bei unseren Messungen an einem technischen Graphit erfolgte die Bestimmung der mittleren Lebensdauer aus dem zeitlichen Zerfall eines gepulsten Neutronenfeldes.

<sup>1</sup> G. F. v. DARDEL, Phys. Rev. 94, 1272 [1954].

<sup>2</sup> G. F. v. DARDEL u. N. SJÖSTRAND, Phys. Rev. 96, 1245 [1954].

Herrn Prof. Dr. H. BOERSCH danke ich für wertvolle Diskussionen, die ich während der Zeit seiner Zugehörigkeit zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt mit ihm zu diesem Thema führen konnte.

Ch. HAASSER, M. UHL u. J. BOISSIER, C. R. 1er Congr. intern. Microsc. Electr., Paris 1953, S. 398; S. YAMAGUCHI, Z. Phys. 134, 618 [1953]; Z. angew. Phys. 8, 221 [1956]; A. WINKELMANN, Z. angew. Phys. 8, 218 [1956].

Ein kurzer Neutronenimpuls vom Tritium-Target eines 250 kV-Kaskadenbeschleunigers tritt in den Moderator ein; der Neutronenfluß an der Oberfläche des Streu medium wird mit  $\text{BF}_3$ -Zählern nachgewiesen, deren Impulse in einem Registriergerät in 25 Zeitkanälen entsprechend ihrer Verzögerungszeit gegenüber dem Neutronenimpuls aufgezeichnet werden. Am Ende des Zyklus wird durch das Registriergerät ein Synchronisationssignal angegeben, das an der HF-Ionenquelle des Beschleunigers einen neuen Deuteronenimpuls auslöst.

Abb. 1 zeigt einige der erhaltenen Abfallskurven, die in halblogarithmischem Maßstab hervorragende Geraden ergeben; die mittlere Lebensdauer, also die Abfallzeitkonstante, wird daraus nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

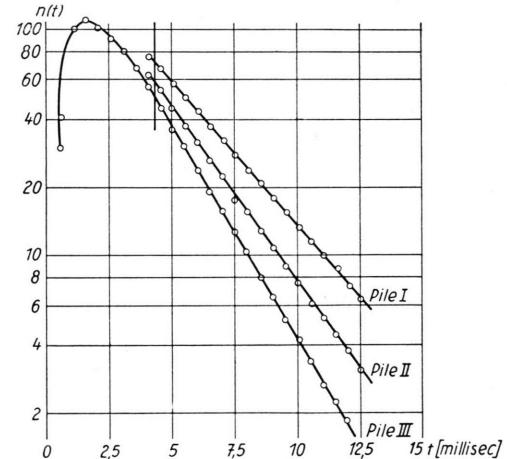


Abb. 1. Neutronenfluß aus verschiedenen Graphitquadern.

Pile I  $189,3 \times 189,3 \times 194,5 \text{ cm}^3$ ;  
Pile II  $189,3 \times 189,3 \times 145 \text{ cm}^3$ ;  
Pile III  $142,5 \times 142,5 \times 145 \text{ cm}^3$ .

Abb. 2 zeigt die reziproke Lebensdauer in verschiedenen großen Graphitquadern als Funktion der Krümmung; die ausgezogene Kurve ist mit den für  $D_0$ ,  $C$  und  $\vartheta_0$  erhaltenen Werten berechnet.

Für die Diffusionsparameter erhalten wir (bei einer Dichte 1,6):

$$\begin{aligned} \vartheta_0 &= (7,82 \pm 0,08) \cdot 10^{-3} \text{ sec}, \\ D_0 &= (2,13 \pm 0,017) \cdot 10^5 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}, \\ C &= (16,3 \pm 2,5) \cdot 10^5 \text{ cm}^4 \text{ sec}^{-1}. \end{aligned}$$



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Daraus folgt: Transportweglänge  $\lambda_t = (2,58 \pm 0,02)$  cm. Eine Bestimmung aus der Extrapolationslänge an der Oberfläche eines Graphitpiles hatte  $(2,6 \pm 0,13)$  cm ergeben<sup>3</sup>.

Diffusionslänge  $L = (40,9 \pm 0,3)$  cm.

Ein Sigma-Pile-Experiment am gleichen Graphit er gab<sup>3</sup>  $L = (40,5 \pm 0,7)$  cm.

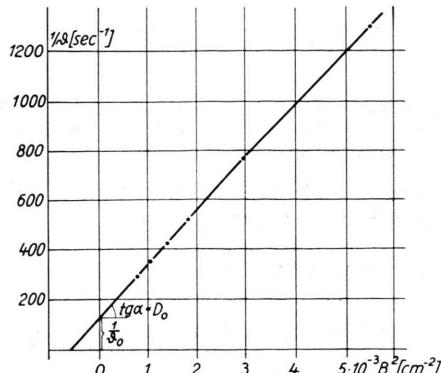


Abb. 2. Reziproke Lebensdauer als Funktion der geometrischen Krümmung. Die ausgezogene Kurve ist gerechnet nach  $1/\theta = 1/\theta_0 + D_0 B^2 - C B^4$  mit den Bestwerten für  $C$ ,  $D_0$  und  $\theta_0$ .

Verschiedene andere Graphitsorten wurden mit der Impulsmethode untersucht. Dabei erwies sich als vorteilhaft, daß zu einer Bestimmung hinreichender Genauigkeit etwa  $1 m^3$  Material erforderlich sind gegenüber ca.  $8 m^3$  für eine Diffusionslängenmessung im gewöhnlichen „Sima-Pile“-Experiment.

$C$  kann auch mittels Gl. (3) aus der Wärmeübergangszahl  $\alpha_0$  berechnet werden; dazu wird  $\alpha_0$  aus dem zeitlichen Verlauf der Temperatur eines Neutronenimpulses in der Nähe des thermischen Gleichgewichts bestimmt. Ist nämlich

$$\frac{dE}{dt} = \alpha_0 (T_0 - T), \text{ so folgt } T - T_0 \sim e^{-(\alpha_0/2) k}.$$

## Über die Wirksamkeit der Abschaltstäbe eines thermischen Reaktors

Von K. H. BECKURTS

Max-Planck-Institut für Physik, Göttingen

(Z. Naturforschg. 11 a, 881—882 [1956]; eingeg. am 21. September 1956)

Für die Planung eines Kernreaktors ist die Kenntnis der Abschaltwirkung „schwarzer“ Stäbe von Bedeutung.

Werden nur thermische Neutronen berücksichtigt, so ist die Verringerung  $\Delta k$  des Exzesses  $k_\infty - 1$  durch die Einführung der Stäbe

$$\Delta k = L^2 \cdot \Delta B^2.$$

Dabei ist  $L$  die Diffusionslänge im Reaktor und  $\Delta B^2$  die durch das Auftreten neuer Randbedingungen bedingte Zunahme der „geometrischen Krümmung“  $B^2$ . Die Abschaltwirkung ist demnach bekannt, wenn die Wirkung der Stäbe auf die Krümmung bekannt ist.

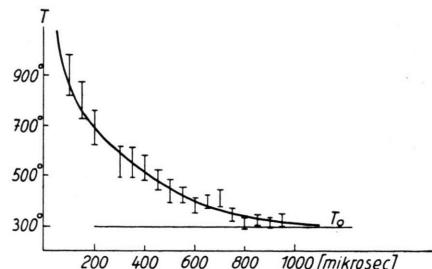


Abb. 3. Neutronentemperatur als Funktion der Zeit. Die ausgezogene Kurve ist gerechnet gemäß  $T = T_0 + a \exp(-t/t_s)$  mit  $t_s = (185 \pm 40) \mu s$ , aus  $t_s$  folgt  $\alpha_0 = 3/2 k/t_s$ .

Die Messung der Neutronentemperatur erfolgt durch Bestimmung der Transmission durch Silberbleche; eine Korrektur für die Anreicherung „kalter“ Neutronen wurde an den zu jeder Temperatur berechneten Transmissionswerten angebracht.

Der gemessene Temperaturverlauf läßt sich näherungsweise durch eine Exponentialfunktion mit

$$\alpha_0 = (0,73 \pm 0,18) \text{ eVsec/Grad}$$

darstellen. Damit ergibt sich für die Konstante  $C$ , bezogen auf die Dichte 1,6,  $C = (13,4 \pm 3,3) \cdot 10^5 \text{ cm}^4 \text{ sec}^{-1}$  in befriedigender Übereinstimmung mit dem direkt bestimmten Wert.

Herrn Professor K. WIRTZ danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit und für sein stets förderndes Interesse. Herrn Dipl.-Ing. K. WEIMER fühle ich mich zu großem Dank verpflichtet für den Entwurf weiter Teile des Neutronengenerators. Beim Aufbau der Apparatur und bei der Auswertung der Messungen haben mir Fräulein JANICE BUTTON und Herr J. COSENTINO wertvolle Hilfe geleistet.

<sup>3</sup> K. H. BECKURTS, Diplomarbeit Göttingen 1954.

In der Literatur wird nur der einfache Fall eines Stabes in der Mitte eines zylindrischen Reaktors behandelt<sup>1</sup>. Für die Praxis ist die Wirkung eines Rings von zur Mitte des zylindrischen Reaktors symmetrisch angeordneten Stäben von besonderem Interesse, die neuerdings von HÄFELE<sup>2</sup> unter wesentlicher Benutzung des Verpflanzungstheorems der Zylinderfunktionen behandelt wurde. Für einen solchen Spezialfall werden hier die Berechnungen mit dem Ergebnis von Messungen an einem Reaktormodell nach einer Impulsmethode verglichen.

Die Untersuchung wurde an einem Graphitylinder ( $R_{eff} = 49,5$  cm,  $h_{eff} = 95,7$  cm) durchgeführt, bei dem symmetrisch zur Mitte 4 Cadmiumstäbe ( $r = 14,6$  mm) in verschiedenen Mittelpunktsabständen eingeführt werden konnten. Um das Resultat unabhängig von der

<sup>1</sup> S. GLASSSTONE u. M. EDLUND, Nuclear Reactor Theory, S. 319.

<sup>2</sup> W. HÄFELE, Berichte der Reaktorgruppe Göttingen, 1956, Nr. 8 (56/41).