

Der Aktivierungsquerschnitt von Argon-40 für thermische Neutronen

Von W. KÖHLER

Aus dem Laboratorium für Technische Physik der Technischen Hochschule München
(Z. Naturforsch. 18 a, 1339—1344 [1963]; eingegangen am 3. Oktober 1963)

Zwischen dem Aktivierungsquerschnitt von Argon-40 (99,6% des natürlichen Argons) und dem totalen Wirkungsquerschnitt von Argon bestand eine größere Diskrepanz. Aus diesem Grunde wurde eine Neubestimmung des Aktivierungsquerschnittes von A⁴⁰ durchgeführt.

Auf einer sich drehenden Bestrahlungsanordnung wurden Argon-, Gold- und Natriumproben gleichzeitig im Neutronenfeld des Forschungsreaktors München bestrahlt und die Aktivität der Proben mit einem γ -Zählrohr (Methandurchflußproportionalzählrohr mit Bleikathode) verglichen.

Mit Gold als Vergleichssubstanz ($\sigma_0 = 98,8$ barn) ergab sich der Aktivierungsquerschnitt für A⁴⁰ zu $(0,63 \pm 0,02)$ barn. Falls Natrium als Vergleichssubstanz benutzt wird, ergibt sich eine gute Übereinstimmung nur dann, wenn der in der Literatur angegebene Absorptionsquerschnitt $\sigma_{\text{abs.}}(\text{Na}^{23}) = 0,505$ barn verwendet wird.

In einem getrennten Versuch wurde daher auch eine Bestimmung des Aktivierungsquerschnittes von Natrium durchgeführt und eine Übereinstimmung innerhalb der Fehlergrenzen mit dem Absorptionsquerschnitt erzielt.

Der gemessene Aktivierungsquerschnitt von Argon-40 (plus den Wirkungsquerschnitten der weniger häufigen Isotope) stimmt innerhalb der Fehlergrenzen mit dem nach anderen Methoden ermittelten totalen Wirkungsquerschnitt für Argon überein.

Auf Grund der Messungen des totalen Wirkungsquerschnittes von festem Argon mit sehr langsamem Neutronen¹ ergibt sich nach Extrapolation gemäß dem $1/v$ -Gesetz ein totaler Wirkungsquerschnitt $\sigma_a = 0,61 \pm 0,03$ barn für Neutronen von 2200 m/s Geschwindigkeit (0,025 eV). Innerhalb der Fehlergrenzen stimmt dieser Wert mit den Werten aus Absorptionsmessungen² ($\sigma_a = 0,66 \pm 0,04$ barn) und aus Pile-Oszillator-Messungen³ ($\sigma_a = 0,62 \pm 0,04$) überein. Als Mittelwert dieser drei Messungen ergibt sich der Absorptionsquerschnitt von Argon zu $0,63 (\pm 0,04)$ barn. Das Element Argon besteht zu 99,6% aus dem Isotop mit der Massenzahl 40. Der Absorptionsquerschnitt sollte daher im wesentlichen vom Wirkungsquerschnitt dieses Isotopes bestimmt werden. Der Beitrag der beiden weniger häufigen Isotope zum Gesamtwirkungsquerschnitt beträgt nur $0,02 \pm 0,04$ barn (A³⁶: 0,337%, $\sigma_a = 5,9 \pm 1,0$ barn⁴, A³⁸: 0,063%; $\sigma_a = 0,8 \pm 0,2$ barn⁵). Die nach Abzug dieses Anteils verbliebenen 0,61 barn sollten mit dem Aktivierungsquerschnitt von A⁴⁰ identisch sein. Der von KATCOFF angegebene Wert von $\sigma_{\text{akt.}} = 0,53 \pm 0,03$ barn⁶ liegt aber außerhalb der Fehlergrenzen beider Messungen. Eine Erklärung dieser

Diskrepanz durch einen Beitrag von (n,p)- bzw. (n, α)-Reaktionen zum Absorptionsquerschnitt ist sehr unwahrscheinlich. Aus den Untersuchungen über die Reaktionen A³⁶(n, α)S³³, N¹⁴(n,p)C¹⁴, O¹⁷(n, α)C¹⁴ mit thermischen Neutronen⁷ ist zu entnehmen, daß der Wirkungsquerschnitt für eine (n, α)- oder (n,p)-Reaktion für A⁴⁰ kleiner als 1 mb ist, da $\sigma_{n,\alpha}(\text{A}^{36}) = 5,5$ mb ist.

Aus diesem Grunde wurde eine Neubestimmung des Aktivierungsquerschnittes von Argon-40 angelegt und am Forschungsreaktor München durchgeführt.

Durchführung der Messungen

Die Ermittlung des Wirkungsquerschnittes für die Reaktionen A⁴⁰(n, γ)A⁴¹ durch eine Bestrahlung im Neutronenfeld des Reaktors setzt sich zusammen aus der Bestimmung des Neutronenflusses am Ort der Bestrahlung und der induzierten Aktivität am Ende der Bestrahlungszeit bzw. nach einer gewissen Wartezeit. Da der Neutronenfluß durch das Einbringen der Probe mit Umhüllung und Halterung gestört wird, ist es zweckmäßiger, an Stelle der Flußmes-

¹ T. SPRINGER u. W. WIEDEMANN, Z. Naturforsch. 15 a, 828 [1960].

² D. J. HUGHES u. R. B. SCHWARTZ, BNL 325 [1958].

³ F. C. W. COLMER u. D. J. LITTLER, Proc. Phys. Soc., Lond. A 63, 1175 [1950].

⁴ G. E. MCMURTRIE u. D. P. CRAWFORD, Phys. Rev. 77, 840 [1950].

⁵ A. O. NIER, Phys. Rev. 77, 789 [1950].

⁶ S. KATCOFF, Phys. Rev. 87, 886 [1952].

⁷ G. C. HANNA, D. B. PRIMEAU u. P. R. TUNNICLIFFE, Canad. J. Phys. 39, 1784 [1961].



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.

sung einen Aktivierungsvergleich mit Substanzen bekannten Wirkungsquerschnittes durchzuführen. Hierfür wäre es erforderlich, beide Proben am gleichen Ort zu gleicher Zeit zu bestrahlen. Diese Forderung kann natürlich nicht erfüllt werden, wohl aber die gleichwertige Bestrahlung zur gleichen Zeit und im Mittel am gleichen Ort. Die Sonden wurden deshalb auf einer sich drehenden Bestrahlungsanordnung⁸ in gleichem Abstand von der Drehachse befestigt und im Wasserbecken des FRM in etwa 12 cm Abstand von der Oberfläche des Graphitreflektors bestrahlt. Für die Anordnung war es erforderlich und für die Berechnung bzw. Abschätzung der Korrekturen für Neutronenselbstabschirmung f_s und Flußstörung f_ϕ günstig, daß die Proben etwa die gleiche Form haben. Diese Korrekturen sind bekanntlich von der geometrischen Form der Proben abhängig.

Die Absorption der Neutronen in der Probe führt zu einer Selbstabschirmung und damit zu einer geringeren spezifischen Aktivierung größerer Proben. Diese Selbstabschirmung ist sowohl von der geometrischen Anordnung (Scheibe, Kugel, Zylinder etc.) als auch vom Gesamtabsorptionsquerschnitt der Probe abhängig. Die Berechnung des Korrekturfaktors f_s wurde vor allem für kreisförmige Sonden, wie sie für Flußmessungen üblich sind, durchgeführt⁹.

Bei anderer Geometrie führt man oft die dimensionsfreie Größe

$$\tau = \frac{2V}{S} N \sigma_0 \quad \text{ein}^{10}.$$

V = Volumen der Probe,

S = Oberfläche der Probe,

N = Anzahl der Atome pro Volumeneinheit,

σ_0 = Wirkungsquerschnitt für $v_0 = 2200 \text{ m/s}$.

Für kleine τ ergeben sich nach STEWART und ZWEIFEL¹⁰ folgende Näherungen:

$$f_{\text{Platte}} \approx 1 - 0,46, \quad (1a)$$

$$f_{\text{Kugel}} \approx 1 - \frac{9}{8}, \quad \text{für } \tau \lesssim 0,05 \quad (1b)$$

$$f_{\text{Zylinder}} \approx 1 - 4/3. \quad (1c)$$

Für $\tau \ll 1$ wird $f_s = 1$.

⁸ G. WOLF, Nukleonik **2**, 255 [1961]; siehe auch Kerntechnik **3**, 543 [1961].

⁹ K. WIRTH u. K. H. BECKURTS, Elementare Neutronenphysik, Springer-Verlag, Berlin 1958, S. 121 ff. und dort zitierte Literatur.

¹⁰ J. C. STEWART u. P. F. ZWEIFEL, Genfer Berichte 1958, **16**, 650 (P 631).

Die Flußstörung f_ϕ hängt natürlich von dem in der Nähe der Probe vorhandenen Moderator ab (s. Anm. ⁹, S. 129 ff.). Für kugelförmige Proben und H_2O -Moderator kann die Korrektur einem Diagramm von MORZEK¹¹ entnommen werden. Nach diesem Diagramm ist auch eine Abschätzung der Korrektur für andere geometrische Verhältnisse möglich.

Im Strahlungsfeld des Reaktors sind auch Neutronen vorhanden, die nicht dem thermischen Energiebereich angehören. Da die Wirkungsquerschnitte der meisten (n,γ) -Reaktionen – wenn man von dem Gebiet möglicher Resonanzen absieht – einen Verlauf proportional zu $1/\sqrt{E}$ (E = Neutronenergie) haben und der thermische Fluß in Reaktoren mit Moderator wesentlich größer als der epithermische ist, überwiegt bei den meisten Isotopen die Aktivierung durch thermische Neutronen. Der Beitrag der epithermischen Neutronen zur Gesamtaktivität muß experimentell ermittelt werden.

Der Verlauf des Neutronenfluxes pro Energieintervall kann in dem für (n,γ) -Reaktionen maßgeblichen Energiebereich durch folgende Darstellung beschrieben werden¹²⁻¹⁴:

$$\varphi(E) dE = \Phi_M \frac{E}{E_T} \exp \left\{ -\frac{E}{E_T} \right\} \frac{dE}{E_T} + \Phi_{\text{epi}} \Delta(E) \frac{dE}{E}, \quad (2)$$

$$\Phi_M \equiv n_{\text{th}} \bar{v},$$

n_{th} = Dichte der thermischen Neutronen,

\bar{v} = mittlere Geschwindigkeit der thermischen Neutronen,

E_T = wahrscheinlichste Energie der thermischen Neutronen,

Φ_{epi} = epithermischer Neutronenfluß pro Lethargieintervall,

$\Delta(E)$ = „joining function“. Sie beschreibt den stetigen Übergang des $1/E$ -Bremsspektrums in das thermische Neutronenfeld und schneidet den $1/E$ -Fluß zwischen 0,1 und 0,4 eV ab.

Aus den späteren Messungen wird ersichtlich, daß eine genauere Kenntnis dieses Übergangsgebietes nicht erforderlich ist. Eine ausführliche Diskussion von Gl. (2) wird z. B. von ALBERT durchgeführt¹⁴.

Unter Vernachlässigung der Störungen ergibt sich

¹¹ P. MORZEK, Kernenergie V, 839 [1962].

¹² C. H. WESTCOTT, W. H. WALKER u. T. K. ALEXANDER, Genfer Berichte 1958, **16**, 70 P 202.

¹³ K. JIRLOW u. E. JOHANSSON, J. Nucl. Energy A **11**, 101 [1960].

¹⁴ D. ALBERT u. K. FÄHRMANN, Kernenergie **4**, 753 [1961].

die Aktivierung eines Isotopes zu:

$$A = N V \int_0^{\infty} \sigma_{n,\gamma}(E) \varphi(E) dE, \quad (3)$$

$\sigma_{n,\gamma}(E)$ = Wirkungsquerschnitt der (n,γ)-Reaktion in Abhängigkeit von der Energie.

Mit (2) kann Gl. (3) folgendermaßen geschrieben werden:

$$A = N V [\Phi_{th} \sigma_0 f_{\phi} f_s + \Phi_{epi} I_{eff}] \quad (4)$$

$$\Phi_{th} = n_{th} v_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\pi} \bar{v} n = \frac{1}{2} \sqrt{\pi} \Phi_M,$$

v_0 = wahrscheinlichste thermische Neutronengeschwindigkeit,

$$\sigma_0 = \sigma(v_0),$$

I_{eff} = effektives Resonanzintegral (Berücksichtigung der Selbstabschirmung).

Infolge des speziellen Verlaufs des Neutronenabsorptionsquerschnittes von Cadmium ist es näherungsweise möglich, die Aktivierung durch epithermische Neutronen getrennt von der thermischen + epithermischen Aktivierung zu messen. Das Cadmiumisotop $^{231}_{48}\text{Cd}$ hat bei 0,178 eV eine starke Absorptionsresonanz, wodurch Cadmium in einer Stärke von 0,5 ÷ 1 mm für thermische Neutronen praktisch undurchlässig wird. Oberhalb 0,178 eV fällt der Absorptionsquerschnitt stark ab, so daß der epithermische Fluß nur wesentlich geschwächt wird. Die effektive Abschneideenergie (E_{Cd}) ist von der Cadmiumdicke, der geometrischen Anordnung und vom Verhältnis des epithermischen Flusses zum thermischen Fluß abhängig¹⁵⁻¹⁷ und liegt zwischen 0,4 und 0,7 eV (siehe auch¹⁸). Da andererseits die „joining function“ das epithermische Spektrum zwischen 0,1 und 0,4 eV abschneidet, werden auch epithermische Neutronen vom Cadmium absorbiert. Eine unter Cadmium gemessene epithermische Aktivierung ist daher nicht mit der Resonanzaktivierung – zweites Glied von Gl. (4) – identisch.

Wenn das Isotop in diesem Übergangsgebiet keine Resonanz hat, so beträgt der Unterschied jedoch nur einige Prozent. Bei der Bestimmung des thermischen Neutronenflusses oder eines thermischen Aktivierungsquerschnittes sind daher stets zwei Bestrahlungen erforderlich. Die gewählte Bestrahlungsvorrichtung (sich drehende Scheibe) ermöglicht, daß auf ihr eine gleichzeitige Bestrahlung von in Cadmium

verpackten Sonden ohne Störung der nicht bedeckten möglich ist. Der Abstand zwischen den Proben mit bzw. ohne Cadmium beträgt etwa 10 cm.

Das Argon (Firma L i n d e : 99,95% Argon) wurde in einer Quarzampulle eingefroren und die Ampulle abgeschmolzen¹⁹. Die Mengenbestimmung erfolgte durch Wägung (Quarzampulle: 7 g, Argon: 300 mg). Als Vergleichssubstanzen wurde Gold in Form von Draht ($r = 0,05$ mm) und Natrium als Natriumfluorid (verpackt in einer kleinen Polyäthylenampulle) verwendet.

Die Proben wurden in die üblichen Aluminiumbestrahlungskapseln verpackt und in senkrechter Stellung zwischen zwei Aluminiumscheiben auf dem Drehsteller montiert, wodurch sich die genaue Lage der Proben gegeneinander ergab. Für die Quarzampulle war die Al-Kapsel gleichzeitig ein mechanischer Schutz. Bei Bestrahlungszeiten von 1 ÷ 2 Stunden konnte der Fehler beim Entfernen des Drehstellers (~ 10 sec Stillstand) bei voller Reaktorleistung vernachlässigt werden. Das Einsetzen erfolgte vor dem Starten des Reaktors.

Für die Messung sollte die Argonmenge so groß sein, daß der Fehler bei der Gewichtsbestimmung unter 1% liegt. Dies ergab aber eine relativ große Probe (max. Länge: 8 cm). Um den Fehler bei der Bestrahlungszeit klein zu machen, waren für diese Bestrahlungsanordnung Bestrahlungszeiten von mindestens einer Stunde erforderlich. Die Mengen der Vergleichspräparate konnten so gewählt werden, daß ebenfalls Aktivitäten zwischen 0,1 und 10 mC erzeugt wurden.

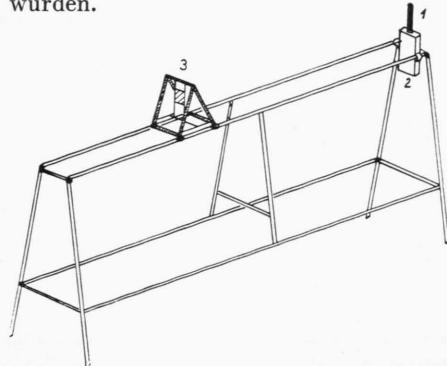


Abb. 1. Zählanordnung. 1 Zählrohr mit Methanzuleitung, 2 Vorverstärker mit den erforderlichen Anschlüssen, 3 Wagen mit Präparathalterung.

¹⁵ G. D. HICKMANN u. W. B. LENG, Nucl. Sci. Eng. **12**, 523 [1962].

¹⁶ R. W. STONGHTON, S. HALPERIN u. M. P. LIETZKE, Nucl. Sci. Eng. **6**, 441 [1959].

¹⁷ S. DEBENEDETTI u. U. FARINELLI, CNEN, Ispra (private Mitteilung).

¹⁸ H. GOLDSTEIN, J. A. HARVEY, S. S. STORY u. C. H. WESTCOTT, EANDC-12 [1961].

¹⁹ A. SÜSS, F. BAUMGÄRTNER u. A. MANNL, Atompraxis **6**, 2 [1960].

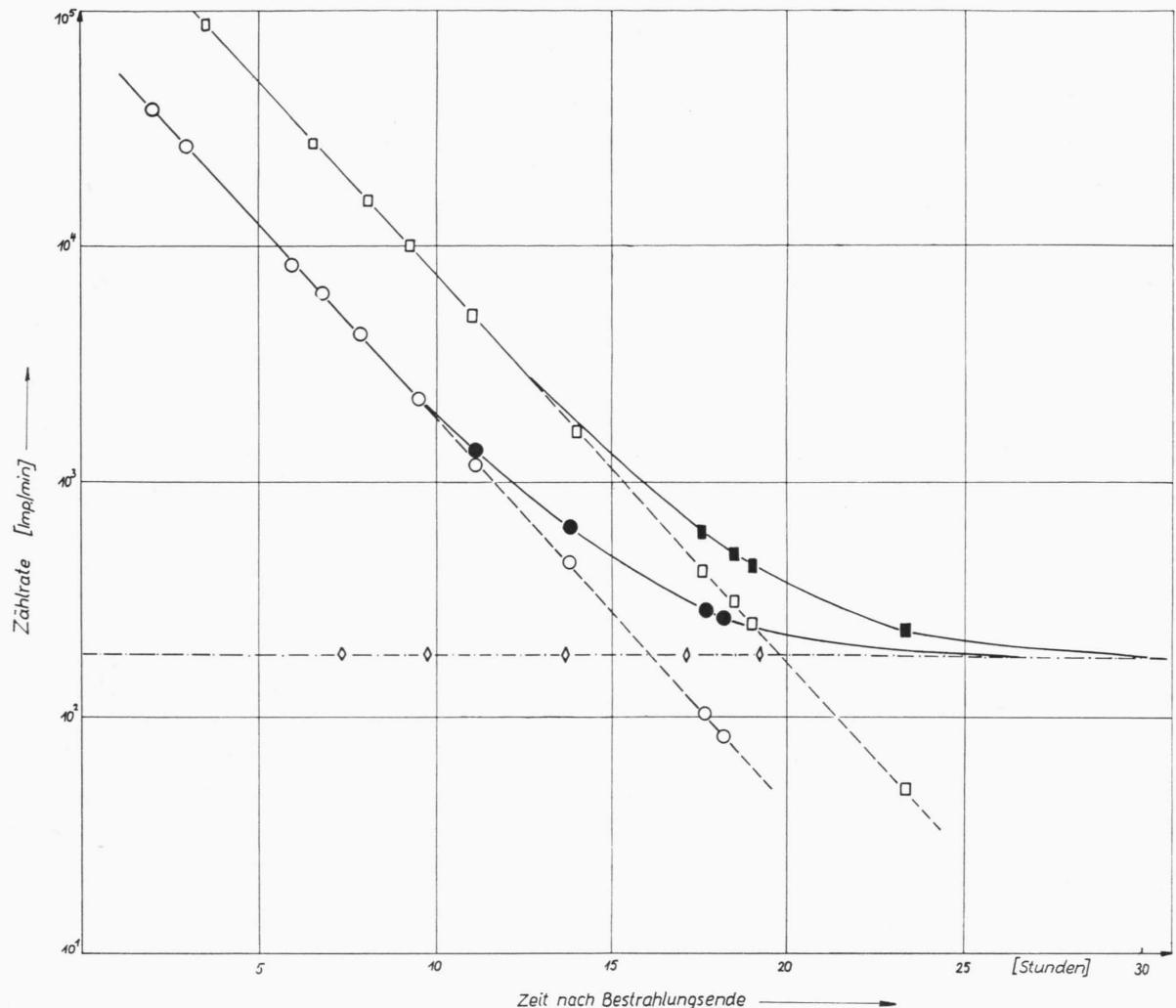


Abb. 2. Zeitlicher Verlauf der Zählrate der bestrahlten Argonampulle. ○ Abstand Präparat : Zählrohr 100 cm, □ Abstand Präparat : Zählrohr 50 cm, ⬤ Nulleffekt. Ausgefüllte Zeichen: Zählrate ohne Abzug des Nulleffektes.

Da die erzeugten Isotope A^{41} , Au^{198} , Na^{24} energiereiche γ -Strahlen aussenden, konnte die Aktivität aller Präparate mit der gleichen Zählanordnung (Abb. 1) bestimmt werden.

Die Präparathalterung auf dem Wagen ist der Form der Präparate angepaßt und gewährleistet eine reproduzierbare Lage der Präparate gegenüber dem Zählrohr. Der Wagen mit der Präparathalterung läuft auf Schienen, wodurch der Abstand der Präparate vom Zählrohr verändert werden könnte. Die Mehrzahl der Messungen wurde mit einem Präparatabstand von 100 cm von der Zählrohrmitte durchgeführt, nur einige wenige mit geringem Abstand. Bei einem Abstand von 100 cm ist die Nach-

weiswahrscheinlichkeit über die Ausdehnung der Präparate konstant (experimentell mit kleinen Präparaten geprüft).

Der Vorverstärker mit dem Zählrohr war auf der Bank so montiert, daß die Mitte des Zählrohrs in gleicher Höhe wie das Präparat ist.

Das Zählrohr ist ein Methandurchflußproportionalzähler mit Bleikathode (Länge: 80 mm, Bleiwandstärke: 0,2, Al-Wandstärke: 12 mm). Die Empfindlichkeit ist von der Energie der γ -Strahlung abhängig²⁰. Für die üblichen Messungen mit diesem Zählrohr wurden sogenannte Eichfaktoren experi-

²⁰ H. MAIER-LEIBNITZ, Z. Naturforsch. I, 243 [1946].

mentell bestimmt²¹. Diese Eichfaktoren sind das Verhältnis der Impulsrate für den vorgegebenen Abstand zur Aktivität und sind bei monoenergetischen γ -Strahlen proportional zur Empfindlichkeit. Für diese Arbeit wurden die Eichfaktoren von Au^{198} , Na^{24} und A^{41} benötigt. Für die ersten beiden Isotope wurden sie experimentell bestimmt. Hierfür wurden entsprechende Au^{198} - und Na^{24} -Präparate hergestellt (1–10 mC), am γ -Meßstand ausgemessen und anschließend aufgelöst. Die Unterteilung der Lösung für die Absolutbestimmung nach der β - γ -Methode⁸ erfolgte gravimetrisch.

Der Eichfaktor für A^{41} ($E_\gamma = 1,29$ MeV; 99,1%) wurde aus den Eichfaktoren für Co^{60} ($E_\gamma = 1,17$ MeV; 100% und 1,33 MeV 100%) und V^{52} ($E_\gamma = 1,4$ MeV; 100%) interpoliert. Bei jeder Bestrahlungsreihe wurden die Proben im Verlauf von 2 Tagen mehrmals gemessen.

Die Abb. 2 zeigt eine derartige Meßreihe für ein Argonpräparat. In den Zeiten zwischen den eingezeichneten Meßpunkten erfolgte die Messung der Gold- und Natriumproben. Aus dem Verlauf der Abfallkurven ergibt sich, daß keine meßbaren Störaktivitäten vorhanden waren.

Ergebnisse

Den Beitrag der epithermischen Aktivierung gibt man üblicherweise als sog. Cadmiumverhältnis R_{Cd} an.

$$R_{Cd} = \frac{A_{\text{ohne Cd}}}{A_{\text{mit Cd}}} = \frac{A_{\text{therm}} + A_{\text{epi}}}{A_{Cd}}. \quad (5)$$

Für diese Versuche wurden nicht die Aktivierungsverhältnisse, sondern die Zählratenverhältnisse ohne Berücksichtigung der Selbstabschirmung ermittelt, da bereits diese Größe die Korrektur für Gl. (4) ergibt.

Das Cadmium(-zählraten)verhältnis für Na^{23} betrug für die Bestrahlungsposition 105. Bei diesem Verhältnis kann der Unterschied zwischen A_{epi} und A_{Cd} vernachlässigt werden. Ein ähnlich hohes Cadmiumverhältnis ergab sich für A^{40} : 175. Dieses Cadmiumverhältnis für A^{40} konnte aus geometrischen Gründen nicht mit einer Quarzampulle bestimmt werden. Hierfür wurde eine Argoneinschlußverbindung [$3 C_6H_6(OH)_2 \cdot 0,14 A$] mit gleichgro-

ßem Gesamtabsorptionsquerschnitt in Polyäthylen Ampullen ohne bzw. mit Cadmium bestrahlt. Der Einfluß der Polyäthylenumhüllung unter dem Cadmiumblech kann bei diesem hohen Cadmiumverhältnis vernachlässigt werden. (Meßwert für Gold: 1,4% der thermischen Aktivierung.)

Als Mittelwert von drei Meßserien ergab sich für die Golddrähte ein Cadmiumverhältnis von $25,5 \pm 1,1$ [dies entspricht $3,9 (\pm 0,4)\%$ epithermische Aktivierung bei dem unbedeckten Draht]. Die Wandstärke der Cd-Umhüllung war 0,5 mm. Aus herstellungstechnischen Gründen war sie jedoch an einigen Stellen doppelt so stark. Für 0,5 mm starkes Cadmium ergibt sich nach BROSE²² eine Schwächung von 10^{-4} und eine Cadmiumgrenzenergie von 0,55 eV. Um den Einfluß der Cadmiumstärke auf die epithermische Aktivierung durch die Veränderung der Cadmiumgrenze zu untersuchen und eine Abschätzung der Differenz $A_{\text{epi}} - A_{Cd}$ ermöglichen, wurden je 5 Stück 20 μ starke Goldfolien mit 0,5 mm bzw. 1,0 mm Cd-Dosen in dieser Position bestrahlt (Abscheideenergie für 1,0 mm Cd: 0,67 eV). Die Differenz der Mittelwerte der Zählraten war 3%, dies entspricht 1,2% Unterschied für die thermische Aktivierung. Von gleicher Größenordnung ist auch die Differenz von A_{epi} und A_{Cd} ²³ und kann deshalb bei der Ermittlung von A_{th} vernachlässigt werden.

Die Störungen bei der Aktivierung liegen für alle Substanzen (+ Umhüllung) unter 1% mit Ausnahme von Gold und der für alle Meßproben gleichartigen Aluminiumumhüllung.

Die Selbstabschirmung der verwendeten Golddrähte ergibt sich nach Gl. (1 c) zu $f_s = 0,963$; aus der graphischen Darstellung (exakte Berechnung)¹⁰ zu $f_s = 0,970$. Auf Grund der experimentellen Werte für die Kobaltdrähte bei einer Bestrahlung im Wasser berechnet sich nach den Messungen von HOGG²⁴ für diese Golddrähte die gesamte Korrektur zu 0,97 nach den Messungen von EASTWOOD und WERNER²⁵ zu $0,962 \pm 0,01$. Für die Auswertung dieser Messungen wurde der Wert von $0,965 \pm 0,01$ verwendet.

Der Beitrag der Polyäthylen- bzw. Quarzampullen zur Zählrate der Na^{24} - bzw. A^{41} -Aktivität wurde durch Vergleichsmessungen ermittelt und konnte vernachlässigt werden. Aus diesem Grund verblieben das pulverförmige Na und das gasförmige Ar-

²¹ W. KÖHLER, Ein Beitrag zur Energieabhängigkeit eines γ -Zählrohrs mit Pb-Kathode (unveröffentlicht).

²² M. BROSE, Dissertation, Karlsruhe 1962.

²³ W. PÖNITZ, Kernforschungszentrum Karlsruhe, private Mitteilung, siehe auch²².

²⁴ C. H. Hogg, IDO 16 538.

²⁵ T. A. EASTWOOD u. R. P. WERNER, Nucl. Sci. Eng. **13**, 385 [1962].

gon zur Aktivitätsbestimmung in der Verpackung.

Aus der in Abb. 2 wiedergegebenen Abfallkurve der Argonampulle ist zu entnehmen, daß bis etwa 10 Stunden nach dem Bestrahlungsende kein merklicher Beitrag vom Quarz vorhanden war. Die 1,29 MeV- γ -Strahlung von A^{41} wird durch die Ampulle um 3% geschwächt. Die Zählraten wurden entsprechend korrigiert.

Durch Kombination von Gl. (4) für Argon und eine Vergleichssubstanz (Gold oder Natrium) ergibt sich der gesuchte Wirkungsquerschnitt zu

$$\sigma_{n,\gamma}(A^{40}) = \sigma_2 \frac{A_1(t_B) N_2(1 - \exp\{-\lambda_2 t_B\})}{A_2(t_B) N_1(1 - \exp\{-\lambda_1 t_B\})}, \quad (6)$$

Index 1 = Argon, 2 = Gold bzw. Natrium,

$A(t_B)$ = Aktivität pro mg Substanz am Endpunkt der Bestrahlung (korrigiert für Wartezeit, für epithermische Aktivierung und Flußdepression),

t_B = Bestrahlungszeit,

λ = Zerfallskonstante,

N_i = Anzahl der Atomkerne pro mg Substanz.

Für die Auswertung von Gl. (6) wurden folgende Halbwertszeiten verwendet:

Gold-198: $T_{1/2} = 2,69$ Tage,

Natrium-24: $T_{1/2} = 14.97$ Stunden,

Argon-41: $T_{1/2} = 110$ Minuten.

Aus den drei Meßserien mit Gold ($\sigma_{n,\gamma} = 98,8$ barn²⁶⁻²⁸) ergibt sich als Mittelwert der Aktivierungsquerschnitt von Argon-40 zu

$$\sigma_{n,\gamma}(A^{40}) = 0,63 \pm 0,02 \text{ barn.}$$

Der angegebene Fehler ist das quadratische Mittel der Fehler bei der Bestrahlung (Lokalisierung am Sollkreis), bei der Ermittlung der spezifischen Aktivität am Endpunkt der Bestrahlung (Zerfallsrate, Energieabhängigkeit bzw. Eichung der Zählanordnung) und den Fehlern bei der Korrektur für Flußdepression und nichtthermische Aktivierung. Dieser Fehler ist wesentlich größer als die mittlere Abweichung der Einzelwerte ($\sim 1,2\%$).

Als zweite Bezugssubstanz wurde Natrium verwendet. Mit dem Wert²⁹ für

$$\sigma_{\text{akt}} = 0,524 \pm 0,01 \text{ barn}$$

²⁶ P. A. EGGLESTAFF, J. Nucl. Energy 5, 41 [1957].

²⁷ G. T. GOULD, T. I. TAYLOR, B. M. RUSTAD, E. MELKONIAN u. W. W. HAVENS, Bull. Amer. Phys. Soc. (II) 2, 42 [1957]; Nucl. Sci. Eng. 8, 453 [1960].

²⁸ H. TEUTSCH, N. MATEESCU u. P. TIMIS, Nukleonik 4, 165 [1960].

²⁹ P. DELATTRE u. A. PROSDOCIMI, EUR 88 f., 1962.

³⁰ L. KOESTER, private Mitteilung.

³¹ G. WOLF, private Mitteilung.

($\sigma_a = 0,63 \pm 0,04$ barn).

ergäbe sich

$$\sigma_{n,\gamma}(A^{40}) = 0,66 \pm 0,02 \text{ barn.}$$

Dieser Wert ist wesentlich höher als der auf Gold bezogene. Eine bessere Übereinstimmung [$\sigma(A^{40}) = 0,63$ barn] erhält man, wenn in Gl. (6) der Absorptionsquerschnitt für Natrium eingesetzt wird [$\sigma_{\text{abs}}(\text{Na}^{23}) = 0,505$ barn²].

In einem zusätzlichen Bestrahlungsversuch wurde darum ein Vergleich von Gold und Natrium durchgeführt. Hierbei wurden die verwendeten Präparate ohne physikalische oder chemische Aufarbeitung in der β - γ -Meßanordnung ausgemessen. Auf diese Weise sollten die möglichen systematischen Fehler ausgeschlossen werden, die beim Unterteilen von sehr kleinen aktiven Mengen³⁰ bzw. beim Auflösen von Natrium in einem Gefäß, anschließender Unterteilung und Bestrahlung⁸ möglich sind³¹⁻³³.

Diese Messung ergab für Natrium:

$$\sigma_{\text{akt}}(\text{Na}^{23}) = 0,50 \pm 0,02 \text{ barn.}$$

in guter Übereinstimmung mit einer neueren Pile-Oszillator-Messung $\sigma_{\text{abs}}(\text{Na}^{23}) = 0,515$ barn³⁴ und dem Aktivierungsquerschnitt einer russischen Arbeit $\sigma_{\text{akt}}(\text{Na}^{23}) = 0,51$ barn (zitiert in³⁵). Der in³⁵ angegebene Wert wurde auf $\sigma(\text{Au}^{197}) = 98,8$ barn bezogen. Eine Messung des Absorptionsquerschnitts mit einer gepulsten Quelle durch MEADOWS und WHALEN ergab dagegen einen Wert von $0,47 \pm 0,06$ barn³⁶. Der ermittelte Aktivierungsquerschnitt für A^{40} von 0,63 barn ergibt zusammen mit dem Anteil der beiden weniger häufigen Isotope (0,02 barn) innerhalb der Fehlergrenzen eine Übereinstimmung mit dem Mittelwert des totalen Wirkungsquerschnittes von Argon auf Grund anderer Meßmethoden ($\sigma_a = 0,63 \pm 0,04$ barn).

Für die Anregung dieser Arbeit möchte ich Herrn Professor Dr. H. MAIER-LEIBNITZ und Herrn Dr. habil. T. SPRINGER recht herzlich danken. Herrn Dr. habil. F. BAUMGÄRTNER und Herrn Götz (Institut für Radiochemie) danke ich für die Mithilfe bei der Herstellung der Argonpräparate und Frau K. RAUERT für die Mithilfe bei den Messungen.

³² H. STÄRK, Institut für Radiochemie, Technische Hochschule München, private Mitteilung.

³³ G. AUMANN, Dissertation, München (noch nicht abgeschlossen).

³⁴ J. N. ANNO, R. G. JUNG u. J. W. CHASTAIN, BMI 1262 [1958].

³⁵ N. E. BREZHNEVA u. S. N. OZIRANER, IAEA Review Series No. 15, Wien 1961.

³⁶ J. W. MEADOWS u. J. F. WHALEN, Nucl. Sci. Eng. 9, 132 [1961].