

Über die Halbwertszeit des langlebigen ^{26}Al

Von R. A. RIGHTMIRE * und T. P. KOHMAN

Department of Chemistry, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A.

und H. HINTENBERGER

Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, Deutschland

(Z. Naturforsch. 13 a, 847–853 [1958]; eingegangen am 25. Juli 1958)

Die spezifische Aktivität des langlebigen isomeren Grundzustandes des ^{26}Al wurde gemessen und daraus die Halbwertszeit ermittelt. Die ^{26}Al -Probe wurde durch Bestrahlung von reinstem Magnesium im Zyklotron des Oak Ridge National Laboratory mit Protonen erzeugt und chemisch ohne Träger abgetrennt. Die spezifische Aktivität einer Lösung dieser Probe wurde mittels eines 4- π -GEIGER-Zählers gemessen, wobei ein Verzweigungsverhältnis von 84,6% zu 15,4% zwischen Positronenemission und Elektroneneinfang angewendet wurde. Die Konzentration des vorhandenen ^{26}Al ist massenspektrometrisch mit Hilfe der Isotopenverdünnungsmethode bestimmt worden, wobei ^{27}Al als Verdünnungsmittel verwendet worden ist. Die Messungen ergaben einen Wert von $(7,38 \pm 0,29) \cdot 10^5$ a für die Halbwertszeit des langlebigen ^{26}Al .

Die Radioaktivität des langlebigen Grundzustandes des ^{26}Al ist zuerst 1954 beobachtet worden¹, nachdem sowohl experimentelle Beobachtungen als auch theoretische Überlegungen zur Vermutung führten, daß ein bisher unbekanntes langlebiges Isomer zu dem bekannten ^{26}Al mit 7 Sekunden Halbwertszeit existieren könnte. Inzwischen ist dieses langlebige Radio-Aluminium von mehreren Forschern beobachtet und näher charakterisiert worden^{2–6}. Kürzlich ist überdies das vollständige Zerfallschema dafür ausgearbeitet worden⁷. Danach zeigt ^{26}Al (dieses Symbol soll in dieser Arbeit fernerhin für das langlebige Isomer verwendet werden) einen komplexen Zerfall, wobei $(84,6 \pm 1,8)\%$ der Zerfälle mit Positronenemission und $(15,4 \pm 1,8)\%$ mit Elektroneneinfang verbunden sind.

Die erste Voraussage über die Halbwertszeit auf Grund theoretischer Überlegungen ist von STÄHELIN⁸ gemacht worden, der einen Wert von $\sim 10^8$ a dafür abschätzte. Seiner Berechnung lag für die Zerfallsenergie der Wert 2,3 MeV zugrunde, der sich jedoch

später als falsch erwies. Nach dem Bekanntwerden des richtigen Wertes von 4,0 MeV haben MOSZKOWSKI und PEASLER⁹ sowie KLUYVER, VAN DER LEUN und ENDT¹⁰ für die Halbwertszeit 10^4 bis 10^6 bzw. $\sim 4 \cdot 10^4$ a angegeben.

Schon bei der ersten Darstellung des langlebigen ^{26}Al folgte aus der Ausbeute der Reaktionen $^{25}\text{Mg}(\text{d}, \text{n})^{26}\text{Al}$ und $^{26}\text{Mg}(\text{d}, 2\text{n})^{26}\text{Al}$, daß die Halbwertszeit in der Größenordnung 10^6 a liegen muß¹. Ein sorgfältiger Vergleich der ^{26}Al -Aktivität mit der bei derselben Bestrahlung gleichzeitig durch $^{24}\text{Mg}(\text{d}, \alpha)^{22}\text{Na}$ entstehenden ^{22}Na -Aktivität führte zu einer Halbwertszeit von ungefähr $1,1 \cdot 10^6$ a¹¹ für ^{26}Al . Ein ähnlicher Vergleich der bei den Reaktionen $^{26}\text{Mg}(\text{p}, \text{n})^{26}\text{Al}$ und $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \alpha)^{22}\text{Na}$ entstehenden Aktivitäten ergab $0,8 \cdot 10^6$ a¹². Da bei diesem Bestimmungsverfahren jedoch Annahmen gemacht werden mußten, die nur in grober Näherung gültig sind, kann aus diesen Versuchen nur gefolgert werden, daß die Halbwertszeit ungefähr $1 \cdot 10^6$ a sein muß mit einem Unsicherheitsfaktor von unge-

* z. Zt.: Physical and Chemical Research Laboratory, Standard Oil Company of Ohio, Cleveland, Ohio, USA.

¹ J. R. SIMANTON, R. A. RIGHTMIRE, A. L. LONG u. T. P. KOHMAN, Phys. Rev. **96**, 1711 [1954].

² T. H. HANDLEY u. W. S. LYON, Phys. Rev. **99**, 755 [1955].

³ M. T. LAUBITZ, Proc. Phys. Soc., Lond. A **68**, 1033 [1955].

⁴ R. T. JOHNSON u. R. D. MOFFAT, Bull. Amer. Phys. Soc. (II) **2**, 230 A [1957].

⁵ J. M. FERGUSON u. R. D. EVANS, Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Nuclear Science, Progress Report, 31 May 1956, S. 164 (erwähnt von P. M. ENDT u. C. M. BRAAMS, Rev. Mod. Phys. **29**, 683 [1957]); J. M. FERGUSON, Bull. Amer. Phys. Soc. (II) **2**, 395 A [1957].

⁶ P. S. FISHER, D. W. HADLEY u. G. SPEERS, Phil. Mag. (8) **3**, 163 [1958].

⁷ R. A. RIGHTMIRE, J. R. SIMANTON u. T. P. KOHMAN, in Vorbereitung [1958].

⁸ P. STÄHELIN, Helv. Phys. Acta **26**, 691 [1953].

⁹ S. A. MOSZKOWSKI u. D. C. PEASLEE, Phys. Rev. **93**, 455 [1954].

¹⁰ J. C. KLUYVER, C. VAN DER LEUN u. P. M. ENDT, Phys. Rev. **94**, 1795 [1954].

¹¹ R. A. RIGHTMIRE, T. P. KOHMAN u. A. J. ALLEN, J. Appl. Radiation Isotopes **2**, 274 [1957].

¹² R. A. RIGHTMIRE, U.S. Atomic Energy Commission Document NYO-6633 [1957]; T. P. KOHMAN, R. A. RIGHTMIRE, W. D. EHmann u. J. R. SIMANTON, Proc. Int. Conf. Radioisotopes in Scientific Research (UNESCO, Paris, September 1957), im Druck [1958].



fähr 2 (s. Zit.¹²). Vergleiche ähnlicher Art zwischen ^{26}Al und ^{22}Na in mit 15 MeV Deuteronen bestrahltem Magnesium, auch zwischen ^{26}Al in Magnesium- und ^{34}Cl in Schwefel-Targets, führten FISHER, HADLEY und SPEERS⁶ zu Halbwertszeiten von $(1,3 \pm 4,6) \cdot 10^6$ a.

Kürzlich ist es FISHER et al.⁶ gelungen, ^{26}Al massenspektrometrisch nachzuweisen und dadurch mit Hilfe einer spezifischen γ -Aktivitätsmessung die Halbwertszeit zu $(8 \pm 2) \cdot 10^5$ a zu bestimmen.

Aus verschiedenen Gründen ist eine genaue Kenntnis der Halbwertszeit des ^{26}Al wünschenswert. ^{26}Al ist das einzige bisher bekannte Nuklid, das einen zweifach-verbotenen Übergang mit Positronenemission aufweist. Außerdem ist das langlebige ^{26}Al neuerdings auch in Meteoriten und Tektiten als Folgeprodukt von Kernreaktionen, die durch die kosmische Strahlung in diesen Körpern ausgelöst werden, nachgewiesen worden¹³. Es ist notwendig, um aus den Aktivitäten solcher Nuklide Aussagen über die Falldaten bestimmter Meteoriten und Gruppen von Tektiten zu machen, relativ genaue Werte der betreffenden Halbwertszeiten zu kennen.

Wir haben deshalb den Versuch unternommen, die ^{26}Al -Halbwertszeit durch eine Messung der spezifischen Aktivität dieses Nuklids möglichst genau zu ermitteln. Wegen der unvermeidlichen Verunreinigungen des Targetstoffes, aus dem ^{26}Al durch Protonen- oder Deuteronenbestrahlung im Zyklotron erzeugt wird, enthalten alle ^{26}Al -Proben viel mehr ^{27}Al als ^{26}Al . Es mußte daher der ^{26}Al -Gehalt der Aluminiumproben, die aus der bestrahlten Ausgangsstoff gewonnen wurden, massenspektrometrisch bestimmt werden. Es gibt hierfür zwei Möglichkeiten:

1. den Gesamtgehalt an Aluminium in der Probe, deren Aktivität gemessen wurde, chemisch zu bestimmen und die Isotopenhäufigkeiten zu messen;
2. den ^{26}Al -Gehalt in einer Probe, deren Aktivität gemessen wurde, durch eine massenspektrometrische Verdünnungsanalyse unter Verwendung von ^{27}Al als Verdünnungsmittel zu bestimmen.

Wegen der bekannten großen Schwierigkeiten quantitativer Aluminium-Bestimmungen kleiner Proben haben wir, als wesentlich genauer, den zweiten Weg gewählt.

Bei einem Vorversuch konnte an einer aus einem mit Deuteronen bestrahlten Magnesiumtarget gewon-

nenen Aluminium-Probe ^{26}Al massenspektrometrisch nachgewiesen werden. Die Häufigkeit, mit der das ^{26}Al im Vergleich zum ^{27}Al in der Probe vorhanden war, betrug $1 : 3350$, woraus sich, nach einer Isotopenverdünnungsanalyse, zusammen mit der gemessenen Aktivität, ein vorläufiger Wert für die Halbwertszeit von $(6 \pm 3) \cdot 10^5$ a ergab¹². Dieses Ergebnis ermutigte uns, nach diesem Verfahren eine genauere Bestimmung der Halbwertszeit mit einer stärker angereicherten Probe, die zu genaueren Isotopenhäufigkeitsmessungen besser geeignet war, zu versuchen.

A. Herstellung der ^{26}Al -Probe

Die für die eigentlichen Messungen benutzte ^{26}Al -Probe ist durch Protonenbestrahlung des reinsten erhältlichen Magnesiummetalls im Zyklotron des Oak Ridge National Laboratory in Oak Ridge, Tennessee, USA, erzeugt worden. Der Ausgangsstoff war „ASTM high-purity“ Magnesiummetall, hergestellt von der Dow Chemical Company, Midland, Michigan, USA, mit einer nominellen Aluminiumverunreinigung von 0,003%. Das Target war eine Platte aus diesem Stoff mit den Abmessungen $30 \times 23 \times 1 \text{ cm}^3$, in die in Längsrichtung Kühlwasserkanäle gebohrt waren. Eine Seite der Platte wurde innerhalb des Zyklotrons mit dem zirkulierenden Strahl von 20,8 MeV Protonen bestrahlt. Der Protonenstrom betrug $925 \pm 45 \mu\text{A}$, die Bestrahlungsdauer 10 Stunden.

Mittels 6-n. Salzsäure wurden ungefähr 1 g Magnesium von der bestrahlten Oberfläche abgelöst, in denen der weitaus größte Teil des durch Bestrahlung entstandenen ^{26}Al und ^{22}Na enthalten war. Das ^{26}Al wurde dann mit Hilfe eines trägerfreien Abscheideverfahrens, das an anderer Stelle beschrieben worden ist¹¹, isoliert. Es wurden dabei alle Spuren des in überwältigender Menge vorhandenen ^{22}Na sowie des Magnesiums und anderer aktiver und inaktiver Verunreinigungen beseitigt. Das ^{26}Al war schließlich in 12 ml verdünnter HNO_3 vorhanden, die eine gesamte Aluminiumkonzentration von schätzungsweise $40 \mu\text{g ml}^{-1}$ hatte.

B. Radioaktivitätsmessung

Zur Messung der absoluten Aktivität der ^{26}Al -Lösung wurde ein 4 π -GEIGER-Zähler verwendet, der an anderer Stelle beschrieben worden ist¹². In diesem wurde das Präparat auf 14 Collodium-Folien verteilt, die sich über 14 runden Öffnungen mit $13 \text{ mm } \phi$ in der Zwischenplatte des Doppelzählrohrs befinden. Wegen der Schwierigkeiten des quantitativen Nachweises der sehr weichen Auger-Elektronen, deren Emission mit dem Elektroneneinfang verbunden ist, wurde die Aktivitäts-

¹³ W. D. EHMANN, U. S. Atomic Energy Commission Document NYO-6634 [1957]; T. P. KOHMAN u. W. D. EHMANN, Proc. Int. Conf. Radioisotopes in Scientific Research

(UNESCO, Paris, September 1957), im Druck [1958]; W. D. EHMANN u. T. P. KOHMAN, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck [1958].

messung auf die Zählung der Positronen beschränkt. Dazu wurde die Zwischenplatte einschließlich dem Präparat auf beiden Seiten mit absorbierenden Folien bedeckt. Schon durch die dünne davon (aluminisierte „Mylar“-Plastik von $0,97 \text{ mg cm}^{-2}$ Dicke) wurden alle AUGER-Elektronen und fast alle RÖNTGEN-Strahlen absorbiert. Die absolute Positronenemissions-Rate wurde durch Extrapolation der Zählratenkurve auf die Absorberdicke Null erhalten.

Von der oben beschriebenen Lösung wurden zwei Proben zur 4π -Zählung herangezogen. Jede wurde mit einer durch Wiegen ihres Quecksilberinhalts kalibrierten Pipette möglichst gleichmäßig auf 8 bis 10 der Folien verteilt, danach wurde die Pipette zweimal mit destilliertem Wasser, das dann auf den restlichen Folien verteilt wurde, ausgespült. Die Lösung wurde dann über Nacht getrocknet und das $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ durch Erhitzen mit der Ultratrolampe in Al_2O_3 übergeführt.

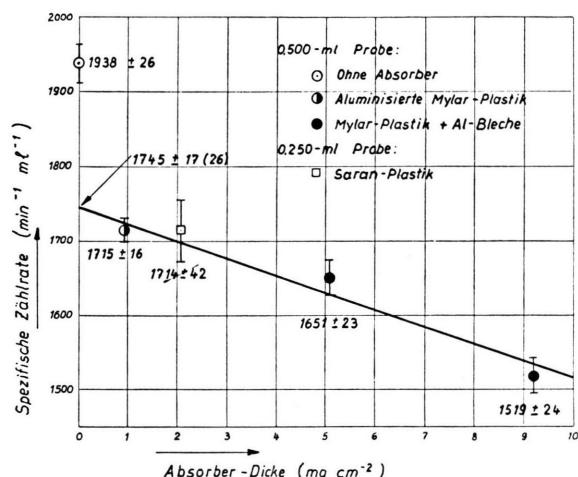


Abb. 1. Zählrate im 4π -GEIGER-Zählrohr als Funktion der Absorberschichtdicke. Die Zählrate für die Absorberschichtdicke Null, durch Extrapolation ermittelt, gibt die absolute Positronenemissionsrate. Die Überhöhung des ohne Absorber gemessenen Wertes ist dem Zerfall durch Elektroneneinfang zuzuschreiben.

Die Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt. Die günstigste Gerade durch alle Punkte wurde durch Ausgleichsrechnung ermittelt. Ihr Schnittpunkt mit der Achse für die Absorberdicke Null ergibt als spezifische Positronenemissions-Rate der Lösung 1745 ± 17 Teilchen $\text{min}^{-1} \text{ ml}^{-1}$. Angegeben ist der mittlere Fehler, der aus den mittleren Fehlern der Meßpunkte stammt. Da es nicht ganz sicher ist, daß die Absorptionskurve eine Gerade sein soll, fügen wir noch einen Fehler dazu; diese Extrapolations-Unsicherheit schätzen wir zu 1,0%. Die Dicke der Kollodiumunterlage ($\sim 8 \mu\text{g cm}^{-2}$) und der Al_2O_3 -Schicht (~ 60 bzw. $\sim 30 \mu\text{g cm}^{-2}$) verursacht einen Absorptionsfehler von etwa 0,1%, wie aus der in

Abb. 1 dargestellten Absorptionskurve geschlossen werden kann. Wir haben daher die gemessene Zählrate noch um 0,1% erhöht. Um etwaige Fehler, die bei der Volumenmessung, beim Ausspülen der Pipette usw. hereinkommen zu berücksichtigen, nehmen wir noch einen weiteren Fehler von 0,5% an. Wenn alle Fehler quadratisch addiert werden, ergibt sich für die spezifische Positronenemissions-Rate der Lösung

$$1747 \pm 26 \text{ Positronen } \text{min}^{-1} \text{ ml}^{-1}.$$

Um daraus die spezifische ^{26}Al -Aktivität der Lösung einschließlich des Elektroneneinfangs zu erhalten, muß man noch durch den Positronenverzweigungsanteil ($0,864 \pm 0,018$) dividieren. Das ergibt schließlich

$$2065 \pm 54 \text{ Zerfälle } \text{min}^{-1} \text{ ml}^{-1}.$$

C. Isotopenverdünnung

Als Verdünnungsmittel steht nur ^{27}Al , das gewöhnliche Element Aluminium, zur Verfügung. Zwei Proben von reinstem Aluminium-Metall wurden zu 406,72 bzw. 414,12 mg gewogen. Jede wurde in HCl gelöst und auf ein Volumen von 1000 ml gebracht. Die zwei ^{27}Al -Lösungen „A“ und „B“ enthielten danach 406,72 bzw. 414,12 $\mu\text{g}^{27}\text{Al ml}^{-1}$.

Die unverdünnten bzw. verdünnten Proben wurden folgenderweise in Pyrex-Glas-Röhrchen hergestellt:

Probe I (unverdünnt):	1,000 ml $^{26}\text{-Al-Lösung}$;
Probe II (unverdünnt):	1,000 ml $^{26}\text{-Al-Lösung}$;
Probe III (einmal verdünnt):	0,500 ml $^{26}\text{-Al-Lösung}$, + 0,0500 ml $^{27}\text{-Al-Lösung-A}$;
Probe IV (einmal verdünnt):	0,500 ml $^{26}\text{-Al-Lösung}$, + 0,0500 ml $^{27}\text{-Al-Lösung-B}$;
Probe V (zweimal verdünnt):	0,500 ml $^{26}\text{-Al-Lösung}$, + 0,1000 ml $^{27}\text{-Al-Lösung-A}$;
Probe VI (zweimal verdünnt):	0,500 ml $^{26}\text{-Al-Lösung}$, + 0,1000 ml $^{27}\text{-Al-Lösung-B}$.

Zu jedem Röhrchen wurden $\sim 10 \mu\text{l}$ 18-m. H_2SO_4 zugesetzt. Nach Mischung wurden durch zunehmendes Erwärmen mittels Wasserbad und Infrarotlampe Wasser, HCl, HNO_3 und überschüssiges H_2SO_4 verdampft, so daß nur $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ als trockener Rückstand am Boden des Röhrchens übrig blieb. Dann wurden die Proben von Pittsburgh nach Mainz geschickt.

D. Der massenspektroskopische Nachweis von ^{26}Al und die Isotopenhäufigkeitsmessungen

Die Isotopenhäufigkeiten sind mit einem 60° -Sektorfeld-Massenspektrometer aus Edelstahl, das an anderer Stelle genauer beschrieben werden wird, im Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz gemessen worden. Zum

Ionennachweis konnte wahlweise ein Auffänger oder ein Cu-Be-Sekundäremissionsvervielfacher, mit dem Ionenströme in der Größenordnung 10^{-18} A gemessen werden konnten, verwendet werden. Die Ionen wurden auf thermischem Wege in einer Dreibändchen-Ionenquelle erzeugt, von der jedoch bei den eigentlichen Messungen nur das Mittelbändchen benutzt wurde. Während Vorversuche zeigten, daß von einem Wolframbändchen, das mit einer dünnen Schicht von einem Gemisch aus Borax und Aluminiumsulfat bedeckt ist, zwar Al^+ - und AlO^+ -Ionen emittiert werden, die Ionenausbeute für die geplante Untersuchung aber zu gering war, konnte von einem Wolframbändchen, auf dem ein Tropfen reiner $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -Lösung eingedampft wurde, eine stabile und genügend intensive Emission von Al^+ -Ionen erhalten werden. Mit etwa $5 \cdot 10^{-6}$ g Aluminium auf dem Bändchen konnten vom Al^+ am Endschlitz des Massenspektrometers durch mehrere Stunden Ionenströme in der Größenordnung von 10^{-13} A erhalten werden. Für kürzere Zeiten erhält man auch größere Ströme.

Außer den Al^+ -Ionen emittierte das Bändchen auch Alkalionen. Die Alkalionenemission setzte schon vor der Al^+ -Emission ein, trat aber bei höherem und längerem Heizen des Bändchens gegenüber der Emission von Aluminiumionen zurück. Mit etwa 1000-fach oder 10 000-fach geringerer Intensität konnten auch noch einige andere Massenlinien beobachtet werden. So war fast stets eine schwache Linie bei der Masse 25 beobachtbar, die schon vor dem Einsetzen der Aluminiumemission auftrat und deren Intensität in keinem Zusammenhang mit der Aluminiumlinie stand. Auch bei der Masse 24 ist manchmal bei starker Bändchenheizung eine schwache Linie beobachtet worden, dagegen war die Masse 26 in der Regel von Störlinien frei. Zuweilen sind auch schwache Linien beobachtet worden, die nicht genau bei ganzen Massenzahlen lagen und deren Lage sich etwas mit den an den Elektroden des Beschleunigungssystems liegenden Spannungen verschieben ließen und die offenbar durch Elektronenstoß von Elektronen, die im Ionenstrahl in die Ionenquelle zurücklaufen, verursacht wurden¹⁴.

Bei der Masse 26 konnte an gewöhnlichen Aluminiumproben auch bei intensiver $^{27}\text{Al}^+$ -Emission keine Linie festgestellt werden. Die Existenz eines natürlichen Aluminiumisotops der Masse 26 mit einer größeren Häufigkeit als $10^{-3}\%$ konnte auf diese Weise sicher ausgeschlossen werden. WHITE, COLLINS und ROURKE¹⁵ haben eine obere Grenze von

¹⁴ C. D. HESS, G. W. WETHERILL u. M. G. INGHAM, Rev. Sci. Instrum. **22**, 838 [1951].

¹⁵ F. A. WHITE, T. L. COLLINS u. F. M. ROURKE, Phys. Rev. **101**, 1786 [1956].

$1,5 \cdot 10^{-4}\%$ angegeben. Dagegen wurde sowohl an dem mit dem Pittsburgher Zyklotron als auch an den mit Hilfe des Zyklotrons in Oak Ridge, aus Magnesium hergestellten Aluminiumproben bei der Masse 26 eine Linie festgestellt, deren Intensität stets proportional war zur Intensität der Linie der $^{27}\text{Al}^+$ -Ionen. Das $^{27}\text{Al}^+$ war ein unvermeidlicher Begleiter des durch Kernreaktionen hergestellten ^{26}Al und seine Intensität überstieg die Intensität der ^{26}Al -Linie in allen Proben um 3 bis 4 Zehnerpotenzen.

Bei den Isotopenhäufigkeitsbestimmungen wurden durch Veränderungen des Magnetfeldes abwechselnd die ^{26}Al - und die ^{27}Al -Ionen im Massenspektrometer mit dem Multiplier gemessen. Die Intensität der Ionenströme stieg zu Beginn der Messungen in der Regel etwas an, blieb dann eine Zeitlang verhältnismäßig gut konstant, um dann wieder abzufallen, so daß als Funktion der Zeit die Ausschläge etwa den in Abb. 2 dargestellten Verlauf zeigten. Um ein stärkeres Absinken der Intensität zu verhindern, wurde zwischen zwei Meßreihen der Bändchenheizstrom meist etwas erhöht.

Um den Einfluß der Veränderungen des Ionenstromes auf die Meßresultate möglichst auszuschalten, wurden bei der Auswertung der erste und dritte Ausschlag gemittelt und mit dem zweiten verglichen; dann der zweite und vierte Ausschlag gemittelt und mit dem dritten verglichen usf. Allgemein wurde der $(k-1)$ -te und der $(k+1)$ -te Ausschlag gemittelt und mit dem k -ten Ausschlag verglichen. (Siehe Abb. 2.) 15 bis 20 Ausschläge wurden zu einer

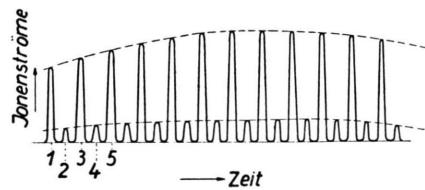


Abb. 2. Massenspektrometerausschläge bei den Linien von ^{26}Al und ^{27}Al als Funktion der Zeit während einer Meßreihe (schematisch). Um den Einfluß des zeitlichen Gangs der Intensität möglichst auszuschalten, wurde der $(k-1)$ -te und $(k+1)$ -te Ausschlag gemittelt und mit dem k -ten Ausschlag verglichen.

Meßreihe zusammengefaßt und in der beschriebenen Weise die einzelnen gemessenen Isotopenhäufigkeitsverhältnisse $M_k'' = [^{27}\text{Al}] / [^{26}\text{Al}]$ berechnet. Aus diesen Verhältnissen wurde dann für jede Meßreihe das arithmetische Mittel M_j' gebildet und dazu nach den Regeln für die Bestimmung des mittleren Fehlers ein Fehler σ'_{M_j} ermittelt, der jedoch in Wirklich-

der Gleichung

$$\sigma_{[N_{26}]}^2 = \sum \left(\frac{\partial [N_{26}]}{\partial M_i} \sigma_i \right)^2$$

der mittlere Fehler $\sigma_{[N_{26}]}$ der ^{26}Al -Konzentration $[N_{26}]$ zu:

$$\sigma_{[N_{26}]} = 0,0193 \cdot 10^{15} \text{ Atome ml}^{-1}.$$

Bei massenspektroskopischen Messungen muß man auch mit systematischen Fehlern rechnen, wodurch die in einem bestimmten Instrument gemessenen Häufigkeitsverhältnisse um einen Faktor

$$\varrho = \frac{(N_{27}/N_{26})_{\text{gemessen}}}{(N_{27}/N_{26})_{\text{richtig}}} \neq 1$$

gefälscht werden, wobei sich ϱ aus verschiedenen Faktoren $\varrho_1, \varrho_2, \varrho_3 \dots$ zusammensetzen kann. Allgemein schätzt man die Unsicherheit, die durch einen solchen Instrumentenfaktor in den Absolutwerten der Häufigkeitsverhältnisse entsteht, auf 1% ($\varrho_1 = 1,00 \pm 0,01$). Wir haben außerdem am Eingang des Verstärkers für ^{26}Al und ^{27}Al verschiedene Hochohmwiderrände benutzt, deren Widerstandsverhältnis nur auf 1% genau bekannt ist ($\varrho_2 = 1,00 \pm 0,01$). Des weiteren zeigt der Multiplier eine massenabhängige Empfindlichkeit, die durch einen Faktor $\varrho_3 = \sqrt{26/27} = 0,981 \pm 0,010$ charakterisiert ist¹⁶. Darüber hinaus muß bei der Messung auch die Linearität zwischen Eingangs- und Ausgangstrom des Multipliers vorausgesetzt werden, die nicht genauer als auf etwa 2% erfüllt angesehen werden dürfte ($\varrho_4 = 1,00 \pm 0,02$). Damit erhalten wir schließlich

¹⁶ M. J. HIGATSBERGER, H. L. DEMOREST u. A. O. NIER, J. Appl. Phys. **25**, 883 [1953].

für den Faktor, mit dem die Meßergebnisse zu korrigieren sind:

$$\varrho = \varrho_1; \varrho_2; \varrho_3; \varrho_4 = 0,981 \pm 0,027.$$

Damit wird

$$[N_{26}] = (1,157 \pm 0,035) \cdot 10^{15} \text{ Atome ml}^{-1}.$$

Zusammen mit dem in Abschnitt B angegebenen Wert

$$[r_{26}] = (2,065 \pm 0,054) \cdot 10^3 \text{ Zerfälle min}^{-1} \text{ ml}^{-1}$$

für die spezifische Aktivität der Lösung ergibt das für die Zerfallskonstante des ^{26}Al

$$\lambda_{26} = \frac{[r_{26}]}{[N_{26}]} = (1,785 \pm 0,071) \cdot 10^{-12} \text{ min}^{-1},$$

die spezifische Aktivität dieses Nuklids

$$S_{26} = \frac{\lambda_{26} n^0}{\alpha_{26}} = (6,64 \pm 0,26) \cdot 10^8 \text{ Zerfälle sec}^{-1} \text{ g}^{-1}$$

und die Halbwertszeit desselben

$$H_{26} = \frac{\ln 2}{\lambda_{26}} = (7,38 \pm 0,29) \cdot 10^5 \text{ Jahre.}$$

Wir danken Professor A. J. ALLEN (University of Pittsburgh), Dr. J. A. MARTIN und Mr. J. L. NEED (Oak Ridge National Laboratory) für die Durchführung der Zyklotronbestrahlungen zur Herstellung starker ^{27}Al -Proben. Außerdem möchten wir Herrn MEHNERT und Fräulein BRAUM (Max-Planck-Institut für Chemie) für ihre Mithilfe bei den Isotopenhäufigkeits-Messungen danken. Ferner möchte der eine von uns (T. P. K.) für die Gastfreundschaft danken, die er während der Niederschrift dieser Arbeit als Senior Postdoctoral Fellow der U.S. National Science Foundation im Max-Planck-Institut für Chemie empfangen hat. Der Teil der Arbeit, der im Carnegie Institute of Technology durchgeführt wurde, ist von der U.S. Atomic Energy Commission unterstützt worden.