

Messung des Tritium-Jahresganges im Regen 1960-61 nach Isotopenanreicherung im Trennrohr¹

Von GERHARD W. ISRAËL²

Aus dem II. Physikalischen Institut der Universität Heidelberg
(Z. Naturforsch. 17 a, 925-929 [1962]; eingegangen am 25. Juli 1962)

The tritium content in rain-water collected near Cologne (Germany) varied in 1960-61 between 20-200 T.U. with the maximum in May and the minimum in November. A striking parallelism to variation of Sr-90 in rain is found. — About 10 ml of rain-water are reduced by magnesium. The tritium is quantitatively enriched by a CLUSIUS-DICKEL-column in 24 hours. A tenfold electrolytical enrichment is done beforehand when measuring tritium concentrations less than 20 T.U. The performance of the CD-column is found to be in good agreement with theory. The activity is measured by an argon-methane filled proportional counter, whose background is reduced by energy discrimination.

Die Tritium-Konzentration im Regen sowie ihre räumliche und zeitliche Veränderung ist für die Untersuchung geophysikalischer und meteorologischer Fragen von Bedeutung³⁻⁷. In den letzten Jahren wurden daher zahlreiche Tritium-Messungen an Regenproben aus allen Teilen der Erde durchgeführt. Eine Zusammenstellung dieser Messungen ist kürzlich in einer Liste der IAEA^{8,9} erschienen. — Im folgenden sind die monatlichen Mittelwerte der Tritium-Aktivität für Regenwasser, das in Sindorf bei Köln gesammelt wurde, wiedergegeben.

Da die Tritiumkonzentration des Regens nur etwa 10-1000 T.U. beträgt (1 tritium unit, T.U., bedeutet 1 Tritiumatom pro 10^{18} Wasserstoffatome), ist es erforderlich, das Tritium vor der Aktivitätsmessung anzureichern. Hierzu bieten sich hauptsächlich zwei Verfahren an, nämlich entweder Anreicherung im Wasser auf elektrolytischem Wege oder Anreicherung durch Thermodiffusion im Wasserstoff. Das hier verwendete Verfahren besteht in einer Kombination dieser beiden Möglichkeiten.

Meßmethode

Proben mit einer Tritiumaktivität von weniger als 20 T.U. werden zunächst elektrolytisch etwa zehnfach

angereichert. Bei diesem Anreicherungsgrad lässt sich der bei der Elektrolyse entstehende Tritium-Verlust selbst in Anbetracht der erheblichen individuellen Schwankungen des Tritium-Trennfaktors auf $\pm 3\%$ (maximaler Fehler) angeben, ohne daß der Trennfaktor im Einzelfall durch eine Deuterium-Messung¹⁰ ermittelt wird. Das Wasser wird anschließend über heißem Magnesium reduziert und das Tritium in einer Trennkolonne, ähnlich der von GONSIOR^{11,12} beschriebenen, um eine weitere Zehnerpotenz angereichert. Bei Regenproben, deren Aktivität mehr als 20 T.U. beträgt, kann auf die elektrolytische Anreicherung verzichtet werden; denn die unmittelbare Verarbeitung von 12 ml Wasser im Trennrohr ergibt dann bereits einen Zählereffekt von über 1 cpm.

Zum Nachweis des Tritium dient ein Proportionalzähler mit einem Durchmesser von 80 mm, einem Gesamtvolumen von 3,2 l und einem aktiven Zählvolumen von 2,0 l, ähnlich dem von MÜNNICH¹³ beschriebenen. Die Zählerfüllung besteht zu 46% aus Wasserstoff und zu 54% aus einer Mischung von Argon und Methan im Verhältnis 9 : 1. Der Gasdruck im Zähler beträgt 710 Torr. Es werden alle Impulse registriert, die einer Energie zwischen 0,3 und 13,6 keV entsprechen. Durch diese Energiediskriminierung wird erreicht, daß der Nulleffekt um die Hälfte, nämlich auf $(4,86 \pm 0,1)$ cpm, herabgesetzt wird, während 97% des Tritium-Spektrums erfaßt werden.

¹ Die Arbeit stellt einen Auszug aus der Diplomarbeit (1961) des Verfassers dar.

² Jetzt: Dozentur für Geophysik und Meteorologie der Rhein.-Westfäl. Technischen Hochschule Aachen.

³ W. F. LIBBY, J. Geophys. Res. **66**, 3767 [1961].

⁴ H. CRAIG u. D. LAL, Tellus **13**, 85 [1961].

⁵ B. BOLIN, Kernstrahlung in der Geophysik, herausgegeben von H. ISRAËL u. A. KREBS, Verlag Springer, Berlin 1962.

⁶ B. BOLIN, Proc. II. Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy **18**, 336 [1958].

⁷ F. BEGEMANN, Proc. II. Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy **18**, 545 [1958].

⁸ IAEA-List No. 1 (Jan. 1962) WP/17/1.

⁹ Diese nur in beschränkter Zahl verteilte Liste wurde mir freundlicherweise von Herrn Dr. B. GONSIOR, Institut für Kernphysik der Universität Köln, zur Verfügung gestellt.

¹⁰ H. G. ÖSTLUND u. P. E. WERNER, Tritium Symp. Wien 1961, Paper TTS/14.

¹¹ B. GONSIOR, Dissertation, Heidelberg 1960.

¹² B. GONSIOR, Z. angew. Phys. **13**, 545 [1961].

¹³ K. O. MÜNNICH, Dissertation, Heidelberg 1957.



Meßergebnisse

Tab. 1 gibt eine Zusammenstellung der durchgeführten Tritium-Messungen. Die Wasserproben wurden jeweils dem während eines Monats gesammelten Niederschlag entnommen, stellen also monatliche Mittelwerte dar. Wenn nicht anders angegeben, wurden 12 ml Wasser verarbeitet und in der Trennkolonne angereichert. Bei der Angabe „Elektrolyse“ wurden 100 ml Wasser auf etwa 10% elektrolytisch eingegengt und dann in der Trennanlage weiter angereichert.

| Entnahmestandort | Datum | Aktivität (T.U.) | Bemerkungen |
|------------------|---------------|---------------------------|-------------|
| Sindorf | März 60 | 121 \pm 3 | |
| Sindorf | Apr. 60 | 132 \pm 3 | |
| Sindorf | Mai 60 | 214 \pm 5 | |
| Sindorf | Mai 60 | 206 \pm 5 | a |
| Sindorf | Juni 60 | 161 \pm 4 | |
| Sindorf | Juli 60 | 102 \pm 3,5 | |
| Sindorf | Aug. 60 | 116 \pm 3,4 | |
| Sindorf | Sept. 60 | 99 \pm 2,7 | |
| Sindorf | Okt. 60 | 43,3 \pm 2,7 | |
| Sindorf | Nov. 60 | 23,7 \pm 2,5 | |
| Sindorf | Nov. 60 | (16,7 \pm 17,9) \pm 1 | b |
| Sindorf | Dez. 60 | 53,6 \pm 2,5 | |
| Sindorf | Jan. 61 | 58,5 \pm 2,9 | |
| Sindorf | Feb. 61 | 49,8 \pm 2,5 | |
| Sindorf | März 61 | 80 \pm 3,1 | |
| Sindorf | Apr. 61 | 125 \pm 3,4 | |
| Sindorf | Mai 61 | 120 \pm 3,4 | |
| Sindorf | Juni 61 | 212 \pm 5 | |
| Heidelberg | 3. - 5. 6. 61 | 151 \pm 4,2 | |

Tab. 1.

a Kontrollmessung

b Elektrolyse. Der angegebene Unsicherheitsbereich röhrt daher, daß nach der elektrolytischen Anreicherung keine Deuterium-Analyse vorgenommen wurde und infolgedessen der genaue Trennfaktor nicht bekannt ist.

Die bei den Messungen angegebenen Fehler beziehen sich ausschließlich auf die mittleren statistischen Zählfelder. Berücksichtigt man alle Unsicherheiten, die außerdem in die Messung eingehen, so ergibt sich ein zusätzlicher mittlerer Fehler von etwa $\pm 3\%$; diese zusätzliche Unsicherheit röhrt u. a. daher, daß die in der vorliegenden Arbeit verwendete Zählapparatur für C-14- und nicht für Tritium-Messungen dimensioniert war.

Die gesamte Anlage wurde geeicht mit dem Tritium-Standard des National Bureau of Standards mit der Zerfallsrate „ $1,33 \cdot 10^4 (\pm 1,5\%)$ Zerfälle pro sec und ml am 20. August 1954“¹⁴. Die Halb-

¹⁴ Der Tritium-Standard wurde uns freundlicherweise von Herrn Dr. F. BEGEMANN, MPI für Chemie, Mainz, zur Verfügung gestellt.

wertszeit von 12,26 a wurde der Ermittlung der zwischen Probengewinnung und Messung zerfallenen Tritium-Menge zugrunde gelegt.

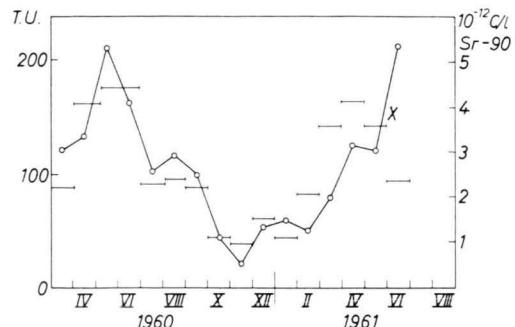


Abb. 1. Monatsmittel der Tritium- und Sr-90-Aktivität im Regen. ○ Sindorf: T im Regen, × Heidelberg: T im Regen, — Heidelberg: Sr-90 im Regen.

Abb. 1 zeigt den Jahresgang der monatlichen Mittel der Tritium-Aktivität des Regens in Sindorf. Zum Vergleich sind Mittelwerte der Sr-90-Aktivität im Heidelberger Regenwasser¹⁵ mit eingezeichnet. Im Mittel über den betrachteten Zeitraum ergibt sich, daß eine Sr-90-Aktivität von 10^{-12} Curie/Liter Regenwasser einer T-Aktivität von 39,6 T.U. entspricht. Ebenso wie LIBBY³ im Jahre 1959 für Bedford, Mass., findet man eine deutliche Parallelität zwischen den Strontium-90- und den Tritium-Messungen (Abb. 1), die darauf hinweist, daß der

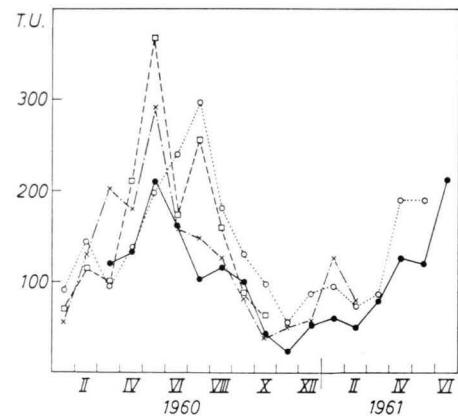


Abb. 2. Monatsmittel der Tritiumaktivität im Regen an verschiedenen Orten der nördlichen Hemisphäre. ●—● Sindorf $50^{\circ} 55' N, 6^{\circ} 49' E$; ×—× Chicago $41^{\circ} 47' N, 87^{\circ} 44' W$; ○—○ Ottawa $45^{\circ} 50' N, 76^{\circ} W$; □—□ Huddinge $59^{\circ} 14' N, 17^{\circ} 59' E$.

¹⁵ G. SCHUMANN, private Mitteilung.

Transportmechanismus von der Stratosphäre in die Troposphäre für beide Nuclide derselbe ist.

Abb. 2 gibt eine Zusammenstellung der monatlichen Tritium-Aktivität im Regen für Ottawa, Chicago, Huddinge⁸ und Sindorf. Die Übereinstimmung der Jahresgänge der verschiedenen Stationen ist sehr gut. Der Verlauf der Kurven stimmt teilweise bis in Details überein, z. B. der Frühjahrsanstieg in Sindorf und Ottawa oder die verschiedenen Maxima im Sommer 1960, von denen eines oder beide gleichzeitig an den einzelnen Stationen auftreten.

Man kann also annehmen, daß die einzelnen Schwankungen der Kurven nicht durch örtliche Einflüsse hervorgerufen werden, sondern für einen gewissen Breitenbereich charakteristisch sind. Unterschiede in den Absolutwerten zwischen den einzelnen Stationen sind zu erwarten infolge einer Breitenabhängigkeit der stratosphärischen Injektion, unterschiedlicher mittlerer Niederschlagsmenge und unterschiedlichem Anteil kontinental wiederverdampfter Feuchtigkeit.

In Tab. 2 ist das Tritium-/Sr-90-Verhältnis verschiedener Orte für 1959 bzw. 1960/61 zusammengestellt. Die Tritiumwerte von Chicago, Ottawa, Vancouver, Huddinge wurden der IAEA-Liste⁸, die Sr-90-Werte von 1959 für 30–50° nördl. Breite bei LIBBY und PALMER¹⁶ entnommen. Für das T/Sr-90-Verhältnis von Bedford, Mass., wurde der von LIBBY³ angegebene Wert eingesetzt.

Das T/Sr-90-Verhältnis 1960/61 für Sindorf ist etwa dasselbe wie 1959 für Chicago, Ottawa und Huddinge, während die Absolutwerte für den Tritium- bzw. Sr-90-Gehalt 1960 an allen Orten um etwa den Faktor 3 kleiner sind. Die Invarianz des Verhältnisses ist aber zu erwarten bei der Annahme,

daß Tritium und Sr-90 dieselbe stratosphärische Verweilzeit haben.

Apparaturbeschreibung

a) Die Elektrolyse

Abb. 3 zeigt die zur Elektrolyse verwendete Zelle. Die beiden Elektroden bestehen aus Platinblechen von je 20 cm² Oberfläche, deren Abstand durch zwei Teflonstreifen auf 2,5 mm gehalten wird. Nach Beendigung der Elektrolyse sind noch 10 cm² der Elektroden mit Elektrolyt bedeckt. Der OHMSche Widerstand wird dadurch genügend klein gehalten, und damit verhindert, daß sich der Elektrolyt zu stark erwärmt. Als Stromzuführung dienen zwei Platindrähte, die an den Elektroden angeschweißt und auf der anderen Seite in Glas eingeschmolzen sind.

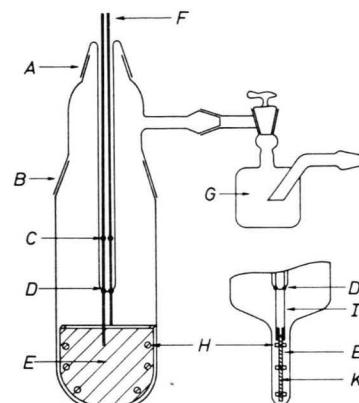


Abb. 3. Elektrolysezelle. A, B Schliffverbindungen, C Schweißstelle Cu-Pt, D Pt-Glasdurchführung, E Pt-Elektrode, F Stromzuführung (Cu), G Wassergefäß, H Teflon-Schrauben, I Pt-Stromzuführung, K Teflon-Streifen.

Bei der Elektrolyse werden im allgemeinen 100 cm³ Wasser zu 90% zersetzt. Als Elektrolyt dienen 2 g wasserfreies Na₂SO₄. Die Zersetzung erfolgt bei einem Querstrom von 5 A, der durch einen Vorwiderstand auf 10% stabilisiert ist. Die Temperatur des Elektrolyten,

| T-Werte von: | Chicago | Bedford (Mass.) | Ottawa | Vancouver | Huddinge (Stockholm) | Sindorf |
|---|---------|-----------------|---------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------|
| Geogr. Breite: | 42° N | 42° N | 46° N | 49° N | 59° N | 51° N |
| Sr-90-Werte von: | | | (30 – 50° nördlicher Breite) | | | Heidelberg |
| Zeitintervall: | | | (Januar 1959 bis November 1959) | | | März 1960 – Juni 1961 |
| T/Sr-90-Verhältnis in T.U./(10^{-12} C/l): | 35 | 8,3 | 53 | 26 | 41,3 | 39,6 |

Tab. 2.

¹⁶ W. F. LIBBY u. C. E. PALMER, J. Geophys. Res. **65**, 3307 [1960].

der mit Leitungswasser von 12°C gekühlt wird, steigt nicht über 22° an. Ein Gefäß („Wassergefäß“ Abb. 3), das ebenfalls mit Leitungswasser gekühlt ist, wird dem Elektrolysegefäß vorgeschaltet, um den Wasserverlust infolge Verdunstung und Mitreißen kleiner Tröpfchen bei der Elektrolyse auf etwa 2% zu reduzieren. Nach Beendigung der Elektrolyse wird das Wasser aus der Zelle in das Wassergefäß überdestilliert, in der Reduktionsanlage verarbeitet und in der Trennanlage weiter angereichert.

Der Tritium-Trennfaktor β der Elektrolysezelle wurde aus der Anreicherung einer Probe bekannten Tritium-Gehaltes mehrfach bestimmt. Er ergab sich zu $11,0 < \beta < 17,0$. Dies liegt in dem Bereich $8,4 < \beta < 21$, wie er von KAUFMANN und LIBBY¹⁷ angegeben wird. Aus der ermittelten Variationsbreite des Trennfaktors β ergibt sich für die elektrolytische Zersetzung von 90% der Ausgangslösung ein Tritiumverlust von 13–19%. Der Tritiumgehalt einer Probe lässt sich also auf $\pm 3\%$ (maximaler Fehler) genau angeben, selbst wenn man auf Deuteriumanalysen verzichtet.

b) *Die Reduktionsanlage*

Der Vakuumteil der Reduktionsanlage (Abb. 4) ist in Glas ausgeführt und kann über die Hähne H_3 und H_4 evakuiert werden. Die zu verarbeitende Wasser-

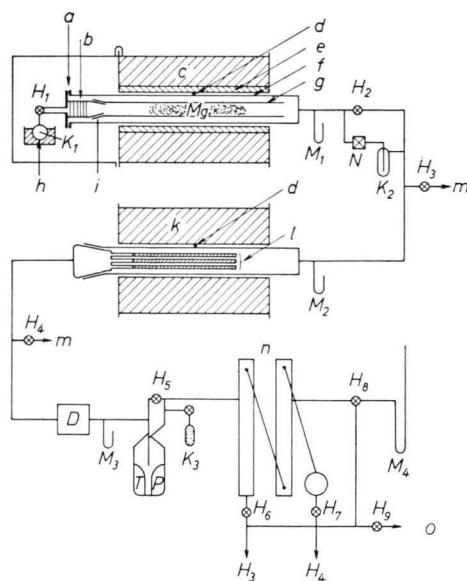


Abb. 4. Reduktionsanlage. K_1 Kölbehnen für Wasserprobe, K_2 Ausfrierfalle, K_3 Kohlefalle, N Nadelventil, $M_1 \dots M_4$ Quecksilbermanometer, $H_1 \dots H_9$ Hähne, TP Töplerpumpe, D Quecksilberdiffusionspumpe, a Metallflansch, b Stahlbelag, c Reduktionsofen, d Thermoelement, e Eisenrohr, f Supremaxrohr, g Edelstahlrohr, h Wasserbad, i Metallschliff, k Palladiumofen, l Palladiumrohr, m zum Pumprechen, n Trennanlage, o zum Pumpstand.

¹⁷ S. KAUFMANN U. W. F. LIBBY, Phys. Rev. **93**, 1337 [1954].
¹⁸ G. URRY U. W. H. URRY, Rev. Sci. Instrum. **27**, 819 [1956].

menge, im allgemeinen 12 mL, befindet sich im Kölchchen K₁, das durch ein Wasserbad auf einer Temperatur von 50 °C gehalten wird. Die Reduktion verläuft quantitativ bei 620 °C an Magnesiumspänen, bei einer Wasserstoffproduktion von etwa 5 Normalliter/Stunde. Die Reaktion selbst findet in einem Edelstahlrohr statt, um das Supremaxrohr vor der Einwirkung von erhitztem MgO zu schützen. Der gebildete Wasserstoff gelangt über ein Regulierventil N und eine mit flüssiger Luft gekühlte Ausfrierfalle K₂ zur Reinigung durch ein Palladiumventil. Die Ausfrierfalle verhindert, daß im Falle etwa nicht quantitativ verlaufender Reaktion sich Wasserdampf vor dem Palladiumventil ansammelt und dessen Durchlässigkeit verringert. Nach der Reinigung gelangt der Wasserstoff über eine Quecksilberdiffusionspumpe D in eine automatische Töplerpumpe TP nach URRY und URRY¹⁸, die ihn in die Trennanlage befördert. Die Manometer M₁–M₄ dienen zur Überwachung des Wasserstoffdruckes an den verschiedenen Stellen der Anlage.

c) *Die Trennanlage*

Die Trennanlage besteht aus zwei durch Konvektionsleitungen in Serie geschalteten Trennrohren von je 220 cm Länge und einem Vorratskolben von 12 l Inhalt. Die Konstruktion der Trennrohre wurde im wesentlichen von GONSIOR¹² übernommen. Die Anreicherung erfolgt bei einem Wasserstoffdruck von 740 Torr und einer Heizdrahttemperatur von 520 °C. Nach 24-stdg. Trennung ist das Gleichgewicht, d. h. maximale Anreicherung, erreicht und es befinden sich dann 93,6% der gesamten Tritium-Menge im letzten Trennrohr. Aus der theoretischen Abhängigkeit des Trennfaktors von Druck und Temperatur ergibt sich, daß unter den angegebenen Betriebsbedingungen die Tritium-Menge im letzten Trennrohr sich erst um 1% ändert, wenn entweder eine Druckänderung von 3% im Trennrohr vorliegt oder die Temperatur des Heizdrahtes um 25 °C bzw. des Kühlmantels um 9 °C geändert wird. Bei den durchgeführten Messungen beträgt die sich hieraus ergebende Unsicherheit höchstens 0,6%. Der Wasserstoff des letzten Trennrohres wird in die Zählapparatur gefüllt und dort seine Tritium-Aktivität bestimmt.

d) Der Trennfaktor

Der Trennfaktor und dessen Druckabhängigkeit im Bereich von 550–740 Torr wurde experimentell unter Verwendung eines Tritium-Standards ermittelt. Die theoretische Berechnung des Trennfaktors erfolgte nach der Theorie von JONES und FURRY¹⁹. Den Berechnungen wurden die von diesen Autoren numerisch für ein MAXWELL-Gas ermittelten Korrekturfaktoren k_c , k_d und h zugrunde gelegt. Der Thermodiffusionsfaktor für ein H_2 –HT-Gemisch wurde von SCHIRDEWAHN, KLEMM und WALDMANN²⁰ experimentell zu $\alpha = 0,11$ bei $230^\circ C$

¹⁹ R. C. JONES u. W. H. FURRY, Rev. Mod. Phys. **18**, 151 [1946].

²⁰ R. L. JONES u. W. H. STANLEY, Proc. Roy. Soc. (Phys. Chem.) **101** [1956].
J. SCHIRDEWAHN, A. KLEMM u. L. WALDMANN, Z. Naturforschg. **16a**, 133 [1961].

Drahttemperatur ermittelt. Da experimentell nur dieser eine Wert vorliegt und über dessen Temperaturabhängigkeit nichts bekannt ist, wurde für die Berechnungen dieser Wert verwendet, obwohl die Drahttemperatur im vorliegenden Fall rund 300 °C höher lag.

Der Vergleich zwischen Theorie und Experiment ergab, daß die theoretischen Trennfaktoren und deren Druckabhängigkeit bis auf etwa 10% mit den gemessenen übereinstimmen. Im Gegensatz hierzu fanden andere Autoren^{21, 22} einen experimentellen Trennfaktor, der wesentlich kleiner war als der nach der Theorie zu erwartende. Diese Diskrepanz dürfte im wesentlichen darauf zurückzuführen sein, daß die damals bekannte theoretische Abschätzung des Thermodiffusionsfaktors von $\alpha = 0,15 - 0,18$ zu hoch liegt.

GROVE und Mitarbeiter²³ haben für ein Gemisch, bestehend aus 50% H₂ und 50% He, die Korrektur-

faktoren $\alpha \cdot h$, k_c und k_d experimentell ermittelt. Die Verwendung dieser Faktoren im vorliegenden Falle ergab Trennfaktoren, die wesentlich kleiner waren als die experimentell gemessenen. Auch wurde der qualitative Verlauf der Druckabhängigkeit des Trennfaktors nicht wiedergegeben.

Herrn Prof. Dr. O. HAXEL danke ich für die wohlwollende Förderung dieser Arbeit und sein ständiges Interesse. — Herrn Dr. K. O. MÜNNICH danke ich für viele wertvolle Ratschläge und zahlreiche Diskussionen. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. BRINKMAN, Bonn, für die freundliche Überlassung der Sindorfer Regenwasserproben. — Die Durchführung der Arbeiten wurde von der Heidelberger Akademie der Wissenschaften und der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit Geldmitteln gefördert.

²¹ E. ALMQUIST, K. W. ALLEN u. J. H. SANDERS, Rev. Sci. Instrum. **26**, 649 [1955].

²² C. BOORMAN u. H. KRONBERGER, Proc. Int. Symp. on Isotope Separation 1958.

²³ G. R. GROVE, K. W. FOSTER u. R. E. VALLEE, Proc. Int. Symp. on Isotope Separation 1958.

NOTIZEN

Zur transversalen Überführung in flüssigen Metallen

Von A. KLEMM

Max-Planck-Institut für Chemie (Otto-Hahn-Institut), Mainz (Z. Naturforsch. **17a**, 929—930 [1962]; eingeg. am 10. September 1962)

H. KNOF¹ hat seinerzeit an unserem Institut Experimente angestellt, um nachzuweisen, daß die Partner einer flüssigen Metallegierung (Goldamalgam) senkrecht zu gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern relativ zueinander wandern (transversale Überführung). Später haben KNOF² von USA aus und FIKS³ physikalische Betrachtungen zu diesem Vorgang publiziert. Während KNOF versucht, den Effekt mit der magnetischen Widerstandsänderung in Zusammenhang zu bringen, hält ihn FIKS für eine Wirkung des HALL-Feldes und des transversalen Druckgradienten. Da das HALL-Feld im Experiment durch die Elektroden mehr oder weniger kurzgeschlossen ist, sollte man auch den transversalen Elektronenstrom berücksichtigen. In der vorliegenden Notiz wird die Phänomenologie von FIKS durch Hinzunahme des transversalen Elektronenstromes erweitert, und es wird das Ergebnis mit dem experimentellen Befund von KNOF verglichen.

In der Flüssigkeit seien in x -Richtung die Stromdichte i_x und in z -Richtung das Magnetfeld H_z angelegt. Dann wirkt auf die Flüssigkeit in y -Richtung indirekt die LORENTZ-Kraft pro Volumeneinheit

$$K_L = -i_x H_z, \quad (1)$$

und diese bewirkt, wenn die Flüssigkeit ruht, den transversalen Druckgradienten

$$dp/dy = -i_x H_z. \quad (2)$$

Die Ionenarten 1 und 2, aus denen die Flüssigkeit, abgesehen von den Elektronen, besteht, sind dann folgenden in y -Richtung wirkenden partiellen Volumenkräften ausgesetzt:

1. Kräfte infolge des transversalen Elektronenstromes und des HALL-Feldes:

$$K_{L1} = -c_1 L_1 i_x H_z, \quad (3)$$

$$K_{L2} = -c_2 L_2 i_x H_z. \quad (4)$$

Für diese Kräfte gilt

$$K_{L1} + K_{L2} = K_L, \quad (5)$$

und man hat deshalb

$$c_1 L_1 + c_2 L_2 = 1. \quad (6)$$

c_1 und c_2 sind die Molkonzentrationen der Ionenarten. Es sei

$$c = c_1 + c_2 \quad \text{und} \quad \bar{L} = 1/c. \quad (7), (8)$$

2. Kräfte infolge des transversalen Druckgradienten:

$$K_{P1} = -c_1 V_1 dp/dy, \quad (9)$$

$$K_{P2} = -c_2 V_2 dp/dy. \quad (10)$$

Hier ist

$$K_{P1} + K_{P2} = -dp/dy, \quad (11)$$

und deshalb

$$c_1 V_1 + c_2 V_2 = 1. \quad (12)$$

¹ H. KNOF, Z. Naturforsch. **15a**, 745 [1960].

² H. KNOF, Z. phys. Chem., N.F. **32**, 91 [1962].

³ V. B. FIKS, Soviet Phys.-Solid State **3**, 2094 [1962].