Die Massen von ^{23}Na , ^{39}K und ^{41}K

VON ARNIM HENGLEIN

Aus dem Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz

(Z. Naturforschg. 6a, 745–750 [1951]; eingegangen am 6. September 1951)

Der Bau eines modernen Parabelspektrographen und einer Ionenquelle nach dem Prinzip von A. E. Shaw wird beschrieben. Die Eigenschaften der Ionenquelle im Betrieb am doppel-fokussierenden Massenspektrographen von Mattauch und Herzog werden untersucht und Präzisionsbestimmungen der Massen von ^{23}Na , ^{39}K und ^{41}K durchgeführt.

Für die Masse des ^{23}Na wurde der Wert $(22,99665 \pm 0,00008)$ ME gefunden; für die Kalium-isotope ergaben sich die Dublettwerte:

$\text{C}_2\text{H}_3\text{N} - ^{41}\text{K} (65,13 \pm 0,05) \text{ mME}$ und

$\text{C}_2\text{H}_3\text{N} - ^{39}\text{K} (47,58 \pm 0,08) \text{ mME}$.

Als Ionenquelle für die hochauflösenden Massen-spektrographen von Mattauch und Herzog¹ ist zur Präzisionsbestimmung von Isotopenmassen bisher nur die Kanalstrahlröhre verwendet worden, bei der in idealer Weise die Vorzüge leichter Bedienung, bequemer Justierung und hoher Strahlintensität vereint sind. Die Anwendung dieser Ionenquelle ist naturgemäß auf Stoffe mit genügend hohem Dampfdruck beschränkt, sowie in Sonderfällen auf Substanzen, die als Kathodenmaterial in einer Entladung leicht zerstäubbar und so in Ionenform überführbar sind. Im wesentlichen sind so die meisten Isotopengewichte bis etwa zur Massenzahl 40 gemessen worden. Massenspektrographische Dublettmes-sungen zahlreicher Isotope liegen noch nicht vor, deren Masse in einigen Fällen nur durch kernphysi-kalische Reaktionsdaten angeschlossen werden kann.

Die Entwicklung anderer Ionenquellen am doppel-fokussierenden Apparat selbst ist schwierig und zeit-raubend; z. B. erfordert die Justierung eines Ionen-strahls homogener Energie, der durch den wenige tausendstel Millimeter breiten Spalt, durch das elek-trische Ablenkfeld und die Magnetfeldblende ge-schossen werden soll, eine genaue Kenntnis der Eigen-schaften der Ionenquelle, die nur durch viele Justier-aufnahmen mühsam erhalten werden kann.

Zur bequemen Untersuchung von Ionenquellen wurde ein Parabelspektrograph gebaut, der wegen seiner Massen- und Geschwindigkeitsanalyse für die-sen Zweck besonders geeignet ist.

Parabelspektrograph und Ionenquelle

Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, das Gerät möglichst vielseitig zu bauen mit stabiler

mechanischer Ausführung, guten Justiermöglichkei-ten, dauerhaft gutem Vakuum und bequemer Bedie-nung. Die Analyse der Ionenstrahlen sollte sowohl photographisch als auch visuell durch Bildschirm er-folgen, so daß jede Verstellung an der Ionenquelle in ihrer Wirkung sofort verfolgt werden kann, ähn-lich der bequemen Analyse von Elektronenstrahlen in einem Oszillographen.

Es wurden dabei die Prinzipien verfolgt, die Ewald² bei der Neukonstruktion des doppel-fokussie-renden Massenspektrographen angewendet hat durch Verwendung massiver Stücke aus geschmiedetem Messing, Rundgummidichtungen zur Abdichtung starr verbundener und gegeneinander gleitender Teile, Simmer-Ringen für alle Bewegungsdurchfüh-rungen sowie Flachschieberventilen³ für raschen Vakuumwechsel.

Abb. 1 zeigt, stark schematisiert, links einen Vertikal-schnitt durch die Apparatur in Richtung der Längsachse, rechts einen Vertikalschnitt senkrecht zum Ionenstrahl durch den magnetischen Kreis.

Am Flachringisolator (3) ist die auf Hochspannungs-potential (etwa 20 kV) liegende Ionenquelle (2) mit Gas-zuführung (1) angeschraubt. Der Isolator wird an den Kopfteil (4) durch einen Klemmring von innen angezogen, innerhalb dessen die Kathode (3) auswechselbar angebracht ist. An den Kopfteil führen über geeignete Flansche eine Gaszuleitung (4) und ein Anschluß zur Öldiffusions-pumpe (11) sowie seitlich ein Anschluß für ein Ionisations-manometer. Die Ionen treten in den Beobachtungsraum (5–10) ein, der durch eine Öldiffusionspumpe (12) ge-trennt evakuiert wird. Die verschiebbaren und auswechsel-

¹ J. Mattauch, S.-B. Akad. Wiss. Wien **145**, 461 [1936].

² H. Ewald, Z. Naturforschg. **1**, 131 [1946].

³ H. Ewald u. H. Hintenberger, Methoden und Anwendungen der Massenspektroskopie. Weinheim 1952.

Abb. 1. Links: Vertikalschnitt (stark schematisiert) längs des Apparates, rechts: Vertikalschnitt durch den magnetischen Kreis, senkrecht zur Längsachse. Maßstab 1 : 6.

baren Blenden (5) und (7) von 0,1–0,3 mm Durchmesser dienen zur Ausübung eines feinen Strahls, der durch das magnetische und elektrische Feld (13) abgelenkt wird und in den Kassettenteil (9) gelangt, der hinten durch ein dickes Glasfenster (10) von 12 cm Durchmesser vakuumdicht abgeschlossen wird. Unmittelbar vor diesem treffen die Ionen auf einen auswechselbaren Leuchtschirm auf, wo die genaue Stelle auf einem Koordinatensystem abgelesen werden kann, das auf einem dünnen Plexiglas-scheibchen zwischen Leuchtschirm und Glasfenster eingeritzt ist. Statt des Leuchtschirms kann eine Photoplatte der Größe 9×12 cm eingesetzt werden. Als günstigster Leuchtstoff erwies sich die K 3-grün 2-Type der Leuchtstoff-GmbH., Heidelberg. Der Ionenstrom wird durch Einschieben des Auffängers (6a) gemessen, das Leuchtröhrchen (6) dient zur Vakuumprüfung. Der ganze Apparat ist kräftefrei in einem fahrbaren Gestell aufgehängt, das ferner Batterien, Schalttafel usw. trägt. Der magnetische Kreis (8) ist getrennt aufgehängt, so daß die Joche (8a) bequem über die Polschuhe (13) geschoben werden können. Der Schluß erfolgt durch den Eisenkern (8b), der die Spule trägt, und an den die Joche mit Weicheisen-schrauben angezogen werden. Die Polschuhe führen vakuumdicht durch Ölkammern (15) und elektrisch isoliert durch Hartgummizwischenflansche (16) in den Beobachtungsteil (17), wo sie sich im Abstand von 7 mm gegenüberstehen. Dadurch kann die elektrische Ablenkspannung direkt auf die Polschuhe gegeben werden. Zwei 0,2 mm dicke Ölpapierstreifen (14) verhindern einen Kurzschluß über den magnetischen Kreis.

Der untersuchten Ionenquelle liegt das Elektronenstoßprinzip zugrunde in einer Anordnung, die von Shaw zur Bestimmung der Massen der Nickelisotope⁴ mit Erfolg benutzt worden ist. In einem Öfchen aus Wolfram, Eisen oder Kupfer befindet sich das zu bestimmende Metall; Verdampfung und Ionisation erfolgen durch Beschuß des Öfchens und des austretenden Metaldampfes mit Elektronen, die einem um das Öfchen gewundenen Heizdraht entstammen. Dabei bestimmt die Leistung der zwischen Heizfaden und Öfchen beschleunigten Elektronen ziemlich scharf die Intensität des Ionenstrahles, die dadurch leicht geregelt werden kann. Um möglichst hohe Flächenintensität zu erhalten, wurden die Ionen durch eine weite Blende in einen Anodenzyylinder gezogen, der der Kathode genau zentrisch gegenüber steht und dessen fokussierende Eigenschaften von der Kanalstrahlröhre bekannt sind⁵. Diese Anordnung erwies sich hier als besonders wirksam, da alle Ionen das gesamte Potential zwischen Kathode und Anode durchlaufen und die Führung durch die Kraftlinien nicht durch Raumladungen, wie bei Kanalstrahlbetrieb, beeinträchtigt wird. Die Flächendichte des Ionenbündels, bezogen auf einen kleinen Energiebereich, war teilweise größer als bei der Kanalstrahlröhre; dadurch sind nur kurze Belichtungszeiten für die Ionenströme von Metallen nötig. Bei Verwendung von nicht angereichertem Kalium und Lithium gaben die seltenen Isotope ^{41}K und ^6Li bei 0,5 sec Belichtung bereits Linien brauchbarer Intensität.

Der Anodenzyylinder (20) wird von einem Flansch (2b) getragen, der mit Hilfe von Justierschrauben während des Betriebes gegen das Gehäuse (2) der Ionenquelle verschoben werden kann, bis der Zylinder genau auf die Kathode „zielt“. Aus Abb. 2 geht hervor, daß bereits Verstellungen von 0,1 mm eine kritische Dejustierung bedeuten. Die einzelnen Elemente der Ionisationskammer sind an Porzellanstangen befestigt, die an einem Flansch (2a) sitzen, der an den Flansch (2b) geschraubt wird, so daß eine Auswechslung oder Reinigung der Ionisationskammer mit keiner Dejustierung verbunden ist. Dieser Flansch trägt ferner eine Gaszuführung (1) und die Durchführungen für die Spannungen von Heizfaden und Öfchen.

Abb. 2. Abhängigkeit des Ionenstroms von der Dejustierung des Anodenzyinders. Kurve 1 wurde bei Kanalstrahlbetrieb mit Leuchtgas, Kurve 2 entsprechend mit der Elektronenstoßionenquelle bei gleicher Geometrie des Anodenzyinders aufgenommen. Verstellungen von 0,1 bis 0,2 mm wirken sich bei der Kanalstrahlröhre kaum aus, während bei der Elektronenstoßquelle die Intensität bereits auf 30% absinkt. Bei 0,4 mm Verstellung ist hier die Dejustierung vollständig, während der Strom der Kanalstrahlröhre erst bei mehreren mm Dejustierung gegen Null geht. Zum bequemen Arbeiten ist deshalb eine exakt laufende Einstellvorrichtung für den Anodenzyylinder nötig.

Durch Ersatz von (2a) durch einen Abschlußflansch und Benutzung der Gaszuführung (4) kann die Ionenquelle ohne Dejustierung als Kanalstrahlröhre benutzt werden. Die Öfchen waren so dimensioniert, daß 20–100 Aufnahmen ohne Nachfüllung möglich waren.

Justierung und Abbildungsfehler bei Betrieb der Ionenquelle am doppelfokussierenden Spektrographen

Jordan⁶ hat beobachtet, daß die Ausleuchtung des Spaltes durch die verschiedenen von einer Kanalstrahlentladung gleichzeitig gelieferten Ionensorten nicht gleichartig erfolgt. Er beschrieb das Ausfallen der CH_4 -Linie im Dublett $\text{CH}_4\text{-O}$ bei geringer Dejustierung des Ionenstrahls. Ähnliche Beobachtungen

⁴ A. E. Shaw, Physic. Rev. 75, 1011 [1949].

⁵ D. Kamke, Z. Physik 128, 212 [1950].

⁶ E. B. Jordan, Physic. Rev. 60, 710 [1941].

hat Ewald⁷ gemacht und auf die ernststen Fehlermöglichkeiten durch diese verschiedene Ausleuchtung hingewiesen. Er hat die Vermutung ausgesprochen, daß die Bündelung vom Entstehungsort der einzelnen Ionensorten abhängt, entsprechend ihren verschiedenen Ionisierungsspannungen und Umladungsweglängen. Daß diese Annahme gerechtfertigt war, läßt sich leicht an den Abbildungsfehlern, die mit der neuen Ionenquelle auftreten können, erkennen. Durch die geringe Winkeldivergenz der Strahlen weisen hier die Linien aller Ionen in verstärktem Maße die hohe Empfindlichkeit gegen geringe Dejustierung des Anodenzyinders auf wie die CH_4 -Ionen der Gasentladung, die ebenfalls in der Tiefe des Anodenzyinders gebildet werden.

Abb. 3. Blick in Strahlrichtung auf Kathodenschlitz k und dahinter liegenden Spalt s . Der Strahl ist als intensiver „Kern“ kleineren Durchmessers und „Streustrahlung“ mit größerem Durchmesser angedeutet.

In Abb. 3a blickt man in Richtung des Strahles, der hier vereinfacht als intensiver „Kern“ mit engem Durchmesser und Streustrahlung größeren Durchmessers gezeichnet ist, während natürlich ein kontinuierlicher Intensitätsabfall von innen nach außen im Strahl gemäß Abb. 2 vorhanden ist. Der Strahl dringt durch den engen Kathodenschlitz ($k = 0,2 \text{ mm}$) und durch den dahinter befindlichen geöffneten Spalt ($s = 0,3 \text{ mm}$). Spalt und Kathodenschlitz sind meist um einen kleinen Winkel α gegeneinander geneigt. Die Winkeldivergenz des „Kerns“ ist etwa so groß, daß er nach Passieren der Ablenkfelder bei engem Spalt l ($3/1000 \text{ mm}$) gerade eine völlige Ausleuchtung der Linie auf der Photoplatte bewirkt. In Abb. 4a ist dies schematisch noch einmal dargestellt, indem der in den Ablenkfeldern gekrümmte Strahl, der sehr nahe der horizontalen Mittelebene verläuft, in die

⁷ H. Ewald, Z. Naturforschg. **2a**, 384 [1947]; **3a**, 114 [1948].

Zeichenebene abgewickelt ist. Ohne eine Aussage über die Bahn der Ionen in der Quelle zu machen, sei zur Vereinfachung angenommen, daß „Kern“ und Streustrahlung von einem Emissionszentrum herrühren. Da die Horizontalabstände in der Zeichnung stark verkürzt sind, erscheinen die Winkel viel zu groß.

Ist jedoch der Anodenzyinder um die kleine Strecke h aus der horizontalen Mittelebene gerückt (Abb. 3b), so wird der eng gestellte Spalt (Abb. 3c

Abb. 4. a: Vollkommene Ausleuchtung der Linie durch den intensiven „Kern“ der Ionenstrahlen. b: Unvollkommene Ausleuchtung durch den „Kern“ bei vertikaler Dejustierung h des Anodenzyinders.

und 4b) nur im untersten Teil vom „Kern“ getroffen, während die Ausleuchtung im übrigen von der Streustrahlung erfolgt, d. h. es tritt ein Intensitätsabfall längs der Linie ein. Da ferner das Engstellen des Spaltes elektrisch durch Messung des Ionenstromes mit einem hinter dem Spalt einschiebbaren Auffänger erfolgt, so besteht zwischen Strom und Spaltbreite keine Proportionalität mehr; denn beim Engstellen wird die hohe Stromstärke des „Kerns“ bereits bei relativ weitem Spalt ausgeblendet (beim Übergang von Abb. 3b zu 3c). Die Folge ist häufig eine Verbreiterung aller Linien. Ein Vergleich des Strahlenganges in Abb. 4 mit dem entsprechenden Schema für das CH_4 -O-Dublett von Ewald⁷ läßt die Gleichartigkeit des Problems erkennen. An Stelle des CH_4 -Ions tritt nun der intensive „Kern“, während das O-Ion durch die „Streustrahlung“ ersetzt ist. Abb. 5 zeigt das Verhalten einer Natriumlinie bei Dejustierung des Anodenzyinders.

Im Gegensatz zur Kanalstrahlröhre liefert die Elektronenstoßquelle Ionen einheitlicher Energie. Deshalb ist eine genaue Abstimmung der Beschleunigungsspannung der Ionen und der Ablenkspannung des elektrischen Feldes aufeinander erforderlich, damit alle Teilchen nach dem elektrischen Feld genau die Bahn beschreiben, die durch die Magnetfeldblende führt.

Die Magnetfeldblende wird durch Ionen des Mittelstrahls gerade noch ausgeleuchtet, die sich um $\pm V_0 \beta$ von der mittleren Voltgeschwindigkeit V_0 unterscheiden, wobei⁸ beim $31,88^\circ$ -Feld

$$\beta = D + a_e - g_e$$

ist. Dabei ist d die Breite der Magnetfeldblende, D deren Abstand vom elektrischen Feld mit dem Krüm-

Abb. 5. Ausschnitt aus einer Na-Linie bei verschiedener Dejustierung h des Anodenzylinders (Vergr. 50-fach).

mungsradius a_e und Brennpunktsabstand g_e . Es wurde mit $d = 0,3 \text{ mm}$ bis $0,4 \text{ mm}$ und $V_0 = 18 \text{ kV}$ gearbeitet; wegen $D = 250 \text{ mm}$ und $a_e = 280 \text{ mm}$ ergibt sich für $V\beta$ ein Wert von 20 V . Die Ziehspannung darf also nicht stärker als um 40 V schwanken. Benützt man eine einfache Hochspannungsanlage, so sind deren Schwankungen so stark, daß 80% aller Ionen im elektrischen Feld stecken bleiben. Nach Bau eines Stabilisierungsgerätes, aus dem bis zu 20 kV Spannungen in Stufen von 10 V entnommen werden konnten, war eine genaue Abstimmung auf die Ablenkspannung möglich, so daß sämtliche Ionen durch das elektrische Feld geschleust wurden. In Übereinstimmung mit der Theorie hatte eine Veränderung der Beschleunigungsspannung um $V_0 \beta$ jeweils beträchtlichen Intensitätsverlust zur Folge, bei weiterer Verstellung sank auch die Intensität der Streustrahlung auf Null.

⁸ R. Herzog, Z. Physik 89, 447 [1934].

Die Eigenschaften der Ionenquelle wurden für die einzelnen Metalle jeweils am Parabelspektrographen untersucht. Der Betrieb am doppelfokussierenden Apparat erfolgte dann unter Einhalten aller zuvor ermittelten Betriebsdaten. Über Massenbestimmungen von Natrium und Kaliumisotopen wird im folgenden berichtet.

Die Masse des ^{23}Na

Das ^{23}Na ist ein Isotop, bei dem eine Präzisionsbestimmung der Masse mit der üblichen Dublett-methode für das Atomion selbst nicht möglich ist; denn es ist keine Kombination von Elementen auffindbar, die eine brauchbare Vergleichslinie bei der Massenzahl 23 gibt. Mehrere Kernreaktionen ermöglichen jedoch einen Anschluß an die bekannten Massen der Neonisotope. Die Meßgenauigkeit dieser Energietönungen ist aber zum Teil nicht groß.

Ewald⁹ hat versuchsweise die „Doppeldublett-methode“ bei einer Neubestimmung der Substandardmassen angewandt, um das schwierige Grunddublett bei der Massenzahl 6 zu umgehen. Dabei wird neben der Linie der unbekannten Masse eine Linie bekannter Masse durch eine zweite Aufnahme erzeugt, indem durch eine Verstellung der Spannung des elektrischen Ablenkfeldes Ionen einer anderen Voltgeschwindigkeit ausgesiebt werden. Ist die Spannungsänderung bekannt, so läßt sich aus dem Abstand des entstandenen „künstlichen“ Dubletts die unbekannte Masse errechnen. Die Spannungsänderung läßt sich mit der erforderlichen Genauigkeit nur auf massenspektrographischem Weg bestimmen, indem gleichzeitig ein zweites künstliches Dublett bei einer anderen Massenzahl erzeugt wird. Sind die Massen dieses Dubletts bereits bekannt, so läßt sich die Feldverstellung angeben.

Es seien M_1 , M_2 und M_3 bekannte Massen, und M_x die unbekannte. Werden bei verschiedenen Spannungen des elektrischen Feldes U und xU die Aufnahmen so durchgeführt, daß die gegenseitige Lage der Liniensysteme zu zwei künstlichen Dubletts δM_1 und δM_2 führt, wie dies in Abb. 6a gezeigt ist, so erhält man aus den Gleichungen

$$M_3^+ - x M_x^+ = \delta M_2,$$

$$x M_2^+ - M_1^+ = \delta M_1$$

für

$$M_x = \frac{M_3^+ - \delta M_2}{M_1^+ + \delta M_1} M_2^+ + m, \quad (1)$$

wobei m die Elektronenmasse ist.

⁹ H. Ewald, erscheint demnächst.

Bei exakt gleichen Verhältnissen der Massenzahlen A_i ist:

$$A_3/A_x = A_1/A_2 = W.$$

Arbeitet man mit ungleichen Verhältnissen der A_i , so daß

$$A_3/A_x = W \quad \text{und} \quad A_1/A_2 = W + w,$$

und wird $x = W + w/2$, so erhält man für

$$|\delta M_1| \approx |\delta A_1| = A_2 \cdot w/2$$

und für

$$|\delta M_2| \approx |\delta A_2| = A_x \cdot w/2.$$

Abb. 6. a: Lage der Liniensysteme bei der Doppeldublett-methode. b: Das Massenspektrum bei der Bestimmung der ^{23}Na -Masse nach der Doppeldublett-methode.

Durch die Ungleichheit der beiden Verhältnisse der Massenzahlen sind also bereits „Dubletts“ δA_1 und δA_2 gegeben, so daß die Bedingung

$$w < 0,2/A$$

grob erfüllt sein muß, damit ein Dublett-Abstand von 100 mME nicht überschritten wird. Meistens lassen sich für jedes Isotop mehrere Kombinationen von A_i finden, unter denen diejenige am geeignetsten erscheint, für die x möglichst wenig von 1 abweicht.

Abb. 6b zeigt das benutzte Liniensystem. Es gehen als Vergleichslinien ein die Massen von H, D, ^{20}Ne und ^{22}Ne . Die Feldverstellung ist mit $x = 0,953$ sehr klein. Für beide Dubletts diente als Dispersionslinie das ^{20}Ne vom ersten Liniensystem (ausgezogene Linien). Da durch das Häufigkeitsverhältnis der beiden Neonisotope das Belichtungsverhältnis gegeben war, mußte die Intensität der ODH- und Na-Ionen reguliert werden, damit intensitätsgleiche Dubletts entstanden. Die Auswertung erfolgte durch Bestim-

mung von δM_1 und δM_2 für jede Aufnahme und Einsetzen der Werte in Gl. (1). Für die Bezugsmassen wurden die neuen Werte von Ewald¹⁰ benutzt. Aus 15 Messungen ergab sich für die Masse des ^{23}Na :

$$^{23}\text{Na} = (22,99665 \pm 0,00008) \text{ ME},$$

wobei der aus den Messungen erhaltene wahrscheinliche Fehler mit einem Sicherheitsfaktor 4 multipliziert wurde.

Eine weitere Möglichkeit zur Bildung von Doppeldubletts besteht darin, durch eine Feldverstellung von $x = 1,147$ die künstlichen Dubletts $\text{O}_2^+ - x \cdot \text{N}_2^+$ und $x \cdot ^{20}\text{Ne}^+ - ^{23}\text{Na}^+$ zu erzeugen. Zur Kontrolle wurden einige dieser Dubletts ausgemessen, wobei die Ergebnisse im Streubereich der obenerwähnten Meßreihe lagen.

Ein Nachteil der Doppeldublettmethode ist es, daß keine Dublettwerte, die gegen eine Verschiebung der Substandardmassen invariant sind, angegeben werden können, sondern nur die Masse des ^{23}Na selbst. Jedoch läßt sich die Abhängigkeit der Natriummasse von einer Änderung der H-Masse angeben, da ja alle Bezugsmassen durch Dubletts an die Substandards angeschlossen sind. Tritt eine Verbesserung der H-Masse um den Wert $\pm h$ ein, so wird mit genügender Genauigkeit

$$^{23}\text{Na} = (22,99665 \pm 7,3 \cdot h) \text{ ME}.$$

Die Kaliumisotope

Massenspektrographische Dublettmessungen von ^{39}K und ^{41}K liegen noch nicht vor. Diese beiden Hauptisotope wurden gegen Linien des Acetonitrils gemessen.

Aus 17 Messungen folgt für das Dublett:

$$\text{CH}_3\text{CN}^+ - ^{41}\text{K}^+ = (65,13 \pm 0,05) \text{ mME},$$

aus 18 Messungen folgt für das Dublett:

$$\text{CHCN}^+ - ^{39}\text{K}^+ = (47,58 \pm 0,08) \text{ mME},$$

wobei wieder die wahrscheinlichen Fehler mit einem Sicherheitsfaktor 4 versehen wurden.

Herrn Prof. Dr. Mattauch danke ich für sein freundliches Interesse an dieser Arbeit. Herrn Dr. Ewald bin ich zu Dank verpflichtet für die Anregung zu dieser Arbeit und ihre Förderung.

Der Firma Leuchtstoff GmbH., Heidelberg, sei an dieser Stelle gedankt für die freundliche Überlassung zahlreicher Leuchtstoffproben.

¹⁰ H. Ewald, Z. Naturforschg. **6a**, 293 [1951].