

Überreicht vom Verfasser

Sonderdruck
aus „*Physikalische Zeitschrift*“, 42. Jahrg., 1941, Heft 4/5, S. 74–79
Verlag von S. Hirzel, Leipzig C I
Printed in Germany

Neuere Ionenquellen

Von

H. Korsching

Neuere Ionenquellen

Von H. Korsching

Vor einigen Jahren ist in dieser Zeitschrift im Zusammenhang mit anderen Fragen über Ionenquellen berichtet worden (1). Da in der Zwischenzeit einerseits neue Konstruktionsprinzipien, andererseits leistungsfähige Variationen schon angegebener Anordnungen veröffentlicht wurden, erscheint es wünschenswert, die inzwischen erreichten Resultate zusammenzustellen. Die beiden Anwendungsbereiche, die im Vordergrund des Interesses stehen, sind einmal die Massenspektroskopie, dann das Gebiet der Kernumwandlungsprozesse. Während für Kernumwandlungen Protonen-, Deuteronen- und Heliumionenquellen in Frage kommen, erfordert die Massenspektroskopie Ionenquellen universeller Brauchbarkeit, deren Intensität aber klein sein kann, sofern man sich nicht die Aufgabe

einer präparativen Isotopentrennung stellt. Nun ist aber gerade die Herstellung wägbarer Mengen reiner Isotope ein Ziel, das vielfach erstrebt und auch teilweise verwirklicht worden ist. Während aber in der reinen Massenspektroskopie kein ausgesprochenes Bedürfnis nach extrem starken Ionenquellen besteht, sind solche für Kernumwandlungen verschiedentlich gebaut worden. Man wird sich bei der Entwicklung derartiger Apparaturen, die der Herstellung von reinen Isotopen mittels eines Massenspektrographen dienen sollen, an die für starke Intensitäten erprobten Konstruktionen anlehnen. Mit dem Problem einer brauchbaren Ionenquelle eng verknüpft ist das der Ionenoptik. Je stärker die erzeugten Ionenströme sind, desto störender macht sich der Raumladungseffekt bemerkbar und erschwert die Fokussierung.

Für eine Gruppe von Elementen, nämlich die Alkalimetalle, existiert eine Reihe starker Quel-

len, die auf der Kunsman-Anode beruhen und eine ausreichende Lösung dieses Problems bedeuten. In dem oben zitierten Bericht ist die betreffende Literatur ausführlich angegeben. Es braucht deshalb an dieser Stelle nicht darauf eingegangen zu werden. Im folgenden werden nun an Hand einiger wichtiger Arbeiten verschiedene Konstruktionsprinzipien erläutert.

Kanalstrahlrohr

Die älteste Art der Ionenerzeugung ist die Kanalstrahlmethode. Zwischen zwei gegenüberstehenden Elektroden brennt bei einem Druck von etwa 10^{-3} mm Hg eine Entladung mit einer Spannung, die gewöhnlich 5–20 kV beträgt. Die in dem Entladungsraum gebildeten positiven Ionen fliegen auf die Kathode zu und können durch einen sie durchsetzenden Kanal den Entladungsraum verlassen. Während bei den ersten Anordnungen die Elektroden mehr oder minder plattenförmig ausgebildet waren und der Entladungsraum sonst durch irgendein geeignetes Isoliermaterial begrenzt wurde, haben zum erstenmal Oliphant und Rutherford (2) ein Kanalstrahlrohr gebaut, bei dem alle der Entladung ausgesetzten Teile aus Metall bestehen. In der röhrenförmigen Kathode, die unten in einem beiderseits konkaven Stahlblock endet, in dem sich die Kanalbohrung befindet, hängt konzentrisch die Anode als unten offene Röhre. Der Abstand zwischen beiden Röhren ist so klein, daß sich dazwischen keine Entladung ausbilden kann. Bei einer Stromstärke von 20 mA im Rohr wird der aufgefangene Ionenstrom zu etwa 1 mA angegeben. Nach einer gewissen Einbrennzeit, während der der Ionenstrahl hauptsächlich aus Molekülonen besteht, enthält der Strahl zum überwiegenden Teil Protonen. Bouwers, Heyn und Kuntke (3), die eine abgeänderte Form des Rohres benutzen, erhalten in der Hauptsache Wasserstoffmolekülonen. Bothe und Gentner (4) bekommen mit einem Oliphant-Rutherford-Rohr etwa 65 Proz. Wasserstoffatomionen, wobei der Strom bis zu 25 μ A betrug.

Eine sehr leistungsfähige Form der Kanalstrahlröhre ist von Hailer (5) entwickelt worden (Fig. 1). Unter Benutzung einer Anodenblende, die als elektrostatische Linse wirkt und dicht über der Kathode angeordnet ist, wird der Ionenstrahl auf den Kanal der Kathode konzentriert. Beide Elektroden sind wassergekühlt. Der dem Kanal der Kathode benachbarte Teil ist wegen der großen thermischen Beanspruchung aus Molybdän. In Fig. 2 ist der nutzbare Ionenstrom in Abhängigkeit der Entladungsstromstärke für eine bestimmte Spannung aufgetragen. Die Anodenblende darf nicht zu klein

sein, da sonst bei vorgegebener Spannung der Gasdruck im Rohr zu groß sein müßte und somit im Nachbeschleunigungsraum das erforderliche

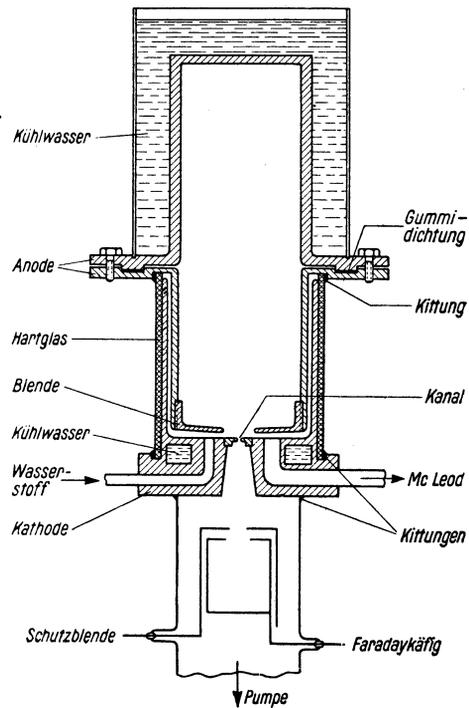


Fig. 1. Kanalstrahlrohr nach Hailer.

Hochvakuum zu schwierig zu erreichen wäre. Für den in der graphischen Darstellung angegebenen Punkt mit etwa 1,4 mA beträgt der Gasdruck im Kanalstrahlrohr 0,18 mm Hg. In der oben zitierten Arbeit stellt Hailer auch eine Reihe von Versuchen an, die den Zweck haben, den Entladungsmechanismus einer derartigen Gasentladung zu klären. Er zeigt unter

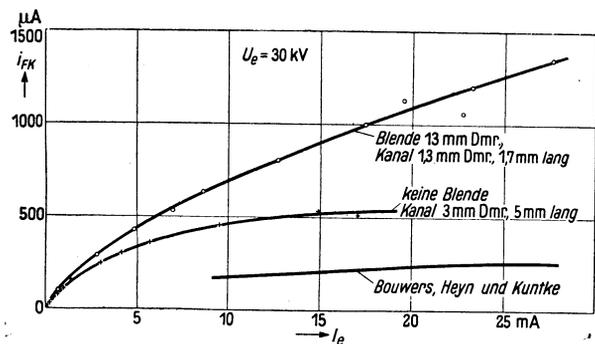


Fig. 2. Ionenausbeute als Funktion der Entladungsstromstärke.

anderem, daß im Gegensatz zu einer gewöhnlichen Glimmentladung Ionisation durch Ionenstoß im Gasraum stattfindet und daß man, ohne die Entladung zu stören, den gesamten Ionen-

strahl bei genügend weitem Kathodenkanal entnehmen kann. Der Ionenstrom besteht hier zu 30 Proz. aus Protonen.

Allen Kanalstrahlrohren ist eigentümlich, daß die Energie der Ionen sehr stark inhomogen ist, da sie entsprechend ihrem Ursprungsort sehr unterschiedliche Potentialdifferenzen durchlaufen haben.

Bogenentladung mit fremdgeheizter Kathode

Auf der Möglichkeit der Ionenbildung durch Elektronenstoß beruhen eine ganze Anzahl wichtiger Quellen. Allen ist gemeinsam, daß sie eine fremdgeheizte Kathode besitzen, die die erforderlichen Elektronen emittiert.

Crane, Lauritsen und Soltan (6) konstruierten eine Anordnung, bei der unter einer wassergekühlten Anode sich die Glühkathode befindet. Darunter wieder ist ein düsenförmiger Kanal angeordnet, gegen den die gebildeten Ionen beschleunigt werden. Der Druck ist 10^{-2} bis 10^{-3} mm Hg. Bei einer Spannung von 1000 Volt und mit 0,5 A Bogenstrom wird ein Ionenstrom von $200 \mu\text{A}$ erreicht.

Zu einer beachtlichen Vollkommenheit ist der Niedervoltbogen von Lamar und Luhr (7) entwickelt worden. Die Glühkathode ist in einem kastenförmigen Raum eingeschlossen, dessen oberer Deckel die Anode ist, während der übrige Teil, der negativ gegen die Kathode gehalten wird, in der Mitte der unteren Fläche eine durch ein Drahtnetz verschlossene Öffnung trägt, durch die die erzeugten Ionen heraustreten können. Der größte Teil der positiven Ionen trifft nun auf die untere Hälfte des Kastens auf und gibt, weil der Akkommodationskoeffizient für Wasserstoffionen klein ist, den größten Teil seiner Energie im Gasraum ab. Dadurch wird eine Dissoziation der Wasserstoffmoleküle bewirkt, und somit steigt die relative Ausbeute an Atomionen. Voraussetzung dafür ist aber, daß die negative Hilfselektrode nicht rotglühend wird und ihre adsorbierte Gasschicht verliert, was die Rekombination des atomaren Wasserstoffes begünstigen würde. Bei geeigneten Potentialen von Anode und Hilfselektrode besteht der Ionenstrom zu 98 Proz. aus Protonen. Aus wiedergegebenen Massenspektrogrammen ist außerdem ersichtlich, daß die Häufigkeit der H_3^+ -Ionen die der H_2^+ -Ionen um ein Vielfaches übertrifft. Der maximale Ionenstrom beträgt 0,5 mA bei einer Stromdichte von 8 mA pro cm^2 . Der Wasserstoffdruck ist aber ziemlich hoch, nämlich 0,3 bis 0,4 mm Hg. Aus dem erforderlichen hohen Druck ergibt sich der Nachteil dieser Quelle, bestehend

in den großen Anforderungen, die an die Pumpapparatur gestellt werden müssen, um im Beschleunigungsteil Hochvakuum zu erhalten.

Im Gegensatz hierzu hat Scott (8) eine Anordnung beschrieben, die bei sehr kleinen Drucken arbeitet. Sie ist in Fig. 3 wiedergegeben.

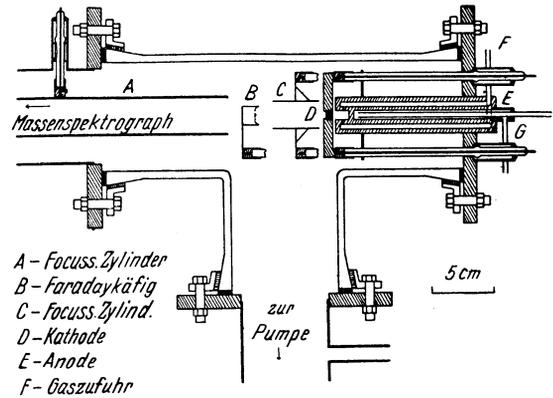


Fig. 3. Ionenquelle nach Scott.

Die wassergekühlte Anode besitzt eine zylindrische Vertiefung in die durch dünne Bohrungen der zu ionisierende Wasserstoff strömt. Dicht davor und konzentrisch dazu sitzt die Kathode, die bei einem Potential von 800 Volt gegen die Anode bis zu 600 mA Elektronenstrom emittieren kann. Der Gasdruck beträgt $3 \cdot 10^{-4}$ bis 10^{-5} mm Hg. Der maximale Ionenstrom ist 4 mA. Dabei ist aber die Fokussierung nicht mehr vollständig. Vielmehr wird eine glatte Fokussierung nur bis $100 \mu\text{A}$ bewerkstelligt. Er untersucht massenspektrographisch die Zusammensetzung des Ionenstrahls und findet eine Zunahme des Protonenanteils bei abnehmendem Druck mit konstant gehaltener Elektronenenergie und Elektronenemission. Der Protonenstrom beträgt bis zu 60 Proz. der Gesamtintensität.

Kapillarbogen

Um zu einer Ionenquelle zu gelangen, die einen möglichst kleinen Gasverbrauch zeigt und die es gestattet, in dem Raum, in dem die Ionen nachbeschleunigt und fokussiert werden, leicht ein gutes Vakuum zu erreichen, haben Tuve, Dahl und Hafstad (9) auf Anregung von Mohler einen Bogen konstruiert, bei dem der mittlere Teil der Entladung durch eine Stahlkapillare eingengt ist. In ihrer Mitte trägt die Kapillare eine seitliche Bohrung, durch die die Ionen aus dem Bogenplasma herausgezogen und fokussiert werden können. Der zwischen Glühdraht und Stahlanode übergehende Bogen brennt bei einer Spannung von 55 Volt, einem Druck

von etwa $2 \cdot 10^{-3}$ mm Hg und liefert bei einem Durchmesser der seitlichen Anbohrung von 1 mm maximal 1,5 mA Ionenstrom. Die Ausbeute an Wasserstoffatomionen ist 20–30 Proz.

Eine Modifikation des Kapillarbogens (Fig. 4) haben Lamar, Samson und Compton (10)

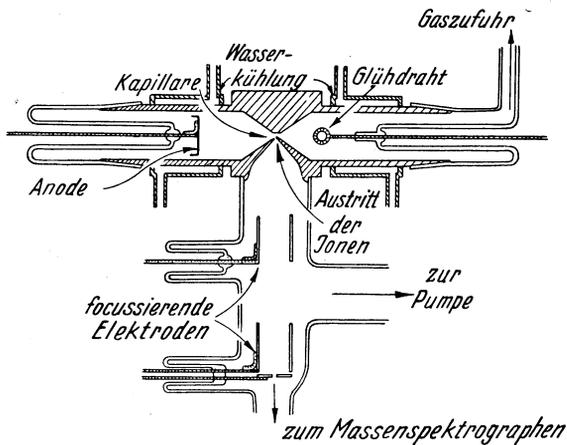


Fig. 4. Kapillarbogen nach Lamar, Samson und Compton.

entwickelt, die dadurch charakterisiert ist, daß die gebildeten Ionen nicht durch ein Hilfsfeld herausgezogen werden, sondern einfach herausdiffundieren. Dieser Umstand erleichtert auch die Fokussierung des Ionenstroms, der hierbei bis zu 4,2 mA stark ist und in einem Strahl von 12 mm Durchmesser konzentrierbar ist.

Eine weitere leistungsfähige Anordnung stammt von Zinn (11), sie ist in Fig. 5 wieder-

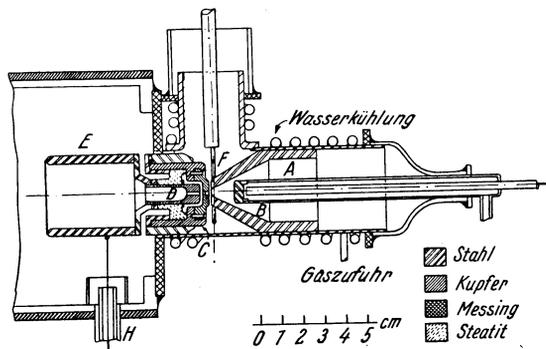


Fig. 5. Kapillarbogen nach Zinn.

gegeben. Zwischen der ringförmigen Glühkathode *F* und der Anode *A* brennt durch ein enges Loch des Stahlkörpers *B* der Bogen mit einer Spannung von 100 Volt. Dicht davor sind zwei Zylinder *C* und *D* angeordnet, die in der Mitte eine enge Bohrung tragen. *D* ist von *C* isoliert. Zwischen beiden Teilen werden Spannungen bis zu 10 kV angelegt. Durch die 1 mm

große Bohrung von *D* wurde ein Strom von 4,3 mA erzielt. Bei Verwendung von Wasserstoff sind davon 15–20 Proz. Protonen.

Ionenerzeugung durch Kreuzen von Elektronen- und Atomstrahl

Es sei jetzt auf ein Prinzip eingegangen, bei dem ein Atomstrahl mit einem Elektronenstrahl gekreuzt wird. Die an dem Treffpunkt gebildeten Ionen werden senkrecht zu den beiden anderen Richtungen herausgezogen. In aller Ausführlichkeit hat zuerst R. Planiol (12) diese Anordnung behandelt: Fig. 6 zeigt eine schematische Zeichnung derselben. Er stellt sich gleichzeitig die Aufgabe, die Intensität der Ionenquelle möglichst groß zu gestalten. Da einerseits die gebildeten Ionen aus dem Atomstrahl durch ein elektrisches Feld herausgezogen werden müssen, andererseits der Elektronenstrahl nicht zerstört werden soll, wird dieser durch ein der Strahlrichtung der Elektronen paralleles magnetisches Feld von etwa 800 Gauß geführt, wie das z. B. auch schon Bleakney (13) getan hat. Der Glühdraht ist aus Wolfram und in der Form einer ebenen Spirale gewickelt. Im Abstand von etwa 5 mm befindet sich das Beschleunigungsgitter. Es werden verschiedene Arten desselben ausprobiert, darunter auch eins, dessen Stäbe von Wasser durchflossen werden. Zur Herstellung

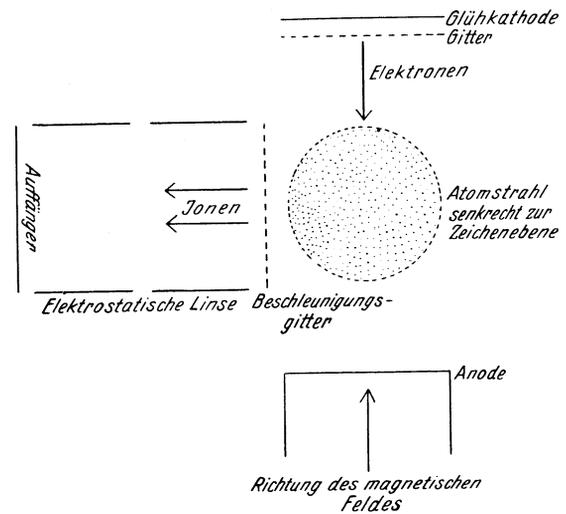


Fig. 6. Schematisches Bild der Ionenquelle nach Planiol.

des Atomstrahls wird in einem Ofen Kadmium verdampft. Bei einer Elektronenenergie von einigen hundert Volt und einer Emission von 300 mA bekommt er 600 μ A Ionenstrom, den er auch einigermaßen fokussieren kann. Allerdings ist nicht ganz klar ersichtlich, inwieweit Sekundärelektronenemission das Resultat etwas zu

groß erscheinen läßt. Zwar kann er bis 80 mA Ionenstrom mit seiner Apparatur erreichen, aber die bei so starken Strömen ungeheuer störende Raumladung erschwert das Arbeiten sehr, weil man zu unbequem hohen Spannungen (30 kV) greifen muß, um einigermaßen die Zerstreuung der Ionen zu verhindern. Eine massenspektroskopische Untersuchung der erhaltenen Ionen wird leider nicht durchgeführt. Er benutzt seine Apparatur auch für Wasserstoff und andere Gase. Das ist aber vielleicht nicht so interessant, weil dabei gerade der Vorteil dieser Anordnung, alle Arbeitsvorgänge im Hochvakuum vor sich gehen zu lassen, entfällt.

Eine Quelle, die ähnlich arbeitet, haben Sampson und Bleakney (14) gebaut. Der Ofen besteht aus einem V-förmigen Wolframschiffchen, auf dem Metalle wie *Co*, *Pt*, *Ir* verdampft werden. Dicht über dem Ofen befindet sich ein Kästchen aus Tantalblech, das oben und unten durch ein Platinnetz abgeschlossen ist. Von unten her tritt Metalldampf ein, während durch das obere Netz ein Elektronenstrahl eingeschossen wird. Die in dem feldgeschützten Raum entstandenen Metallionen können durch einen seitlichen doppelten Spalt, der ein Übergreifen der Beschleunigungsspannung auf den Ionenerzeugungsraum verhindert, diesen verlassen. Somit ist die Geschwindigkeit der entstandenen Ionen sehr homogen. Die Ionenstromstärke ist klein entsprechend der Verwendung zur Untersuchung der Häufigkeit der Isotope. Sie mag von der Größenordnung $0,1 \mu\text{A}$ sein.

Ionenerzeugung durch oszillierende Elektronen

Auf Anregung von L. P. Smith (15) ist eine Ionenquelle konstruiert worden, bei der die Ionisation durch hin und her pendelnde Elektronen bewirkt wird. In der wiedergegebenen Fig. 7 sind die Lochblenden Nr. 1, 2 und 3 positiv gegen die Kathode, die Platten Nr. 4, 5, 6 sind negativ gegen Kathode, und zwar bis zu einigen hundert Volt. Die von der oxydbedeckten Nickelkathode emittierten Elektronen werden nun durch ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien coaxial zu dem Lochblendensystem laufen, geführt, durch die Platten 1, 2, 3 beschleunigt, durch 4, 5, 6 gebremst und dann in entgegengesetztem Sinne beschleunigt und kehren in Kathodennähe zurück, worauf sich der Prozeß wiederholen kann. Zwischen den Blechen 2 und 3 wird Wasserstoffgas zugeführt. Der Gasdruck beträgt etwa $6 \cdot 10^{-4} \text{ mm Hg}$. Die durch Elektronen und Ionen hervorgerufene Raumladung bewirkt nun, daß von einem gewissen Punkt an, der zwischen den Lochblenden 2 und 3 liegt, die durch Elektronenstoß

gebildeten Ionen in Richtung der Platten 4, 5, 6 beschleunigt werden. Von dem Umkehrpunkt der Elektronen ab werden die Ionen divergieren, weil die kompensierende Raumladung der Elektronen fortfällt. Der Verfasser zeigt, daß man

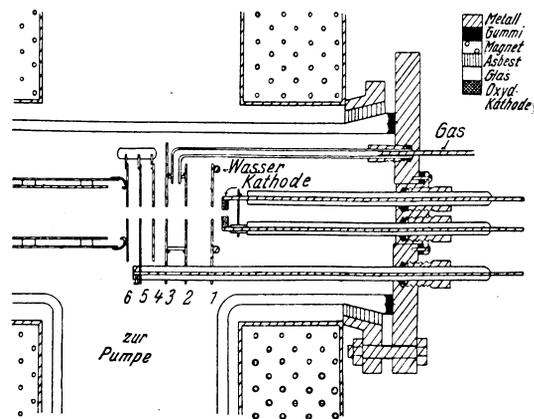


Fig. 7. Ionenerzeugung durch oszillierende Elektronen. Zeichnung in $\frac{1}{4}$ natürlicher Größe.

auch dann ein paralleles Ionenbündel erhalten kann, wenn man durch ein geeignetes radiales Feld das von der Ionenraumladung herrührende radiale Feld aufhebt. In der folgenden Tabelle ist der Ionenstrom in Abhängigkeit von der Potentialdifferenz zwischen Platte 1 und Kathode sowie von der Elektronenemission gegeben.

Potentialdifferenz in Volt zwischen Platte 1 und Kathode	Elektronenemission mA	Ionenstrom mA
36	1,2	0,02
40	3,2	0,07
46	20	0,50
52	50	1,3
60	200	4,0
64	450	12
65	3000	150

Schlußbetrachtung

Betrachten wir nun zusammenfassend die verschiedenen Möglichkeiten der Ionenerzeugung, so läßt sich betreffs der Ionenquellen für Kernumwandlungen sagen, daß sie eine Entwicklungsstufe erreicht haben, die einen vorläufigen Abschluß darstellt. Die Inhomogenität der Energie der im Kanalstrahlrohr erzeugten Ionen, die einige tausend Volt beträgt, spielt bei der großen für die Nachbeschleunigung angewandten Spannung keine Rolle.

Man könnte nun alle für Kernumwandlungen gebauten Quellen auch für massenspektroskopische Zwecke verwenden, indem man eine gasförmige Verbindung des Elements benutzt, von

dem man Ionen erzeugen will. Solche Verbindungen mit genügend großem Dampfdruck bei Zimmertemperatur gibt es bei fast allen Elementen. Störend dabei ist, daß alle möglichen Bruchstücke des jeweiligen Moleküls als Ionen auftreten. Bei vielen Elementen sind außerdem gerade die Halogenverbindungen die einzigen, die leicht flüchtig sind; diese aber sind besonders unangenehm durch das in der Entladung gebildete Halogen, das auf die Apparatur korrodierend wirkt. Im Gegensatz hierzu liefert das Verfahren von gekreuztem Elektronen- und Atomstrahl ein sauberes, nur im Hochvakuum arbeitendes Verfahren. Es ist immer benutzbar, wenn man von dem betreffenden Element einen Atomstrahl erzeugen kann. Man kann nun, wenn auch mit einiger Anstrengung, Öfen herstellen, die es gestatten, fast alle Metalle, mit wenigen Ausnahmen wie *Mo*, *W*, zu verdampfen. Im oben genannten Bericht von Ritschl (1) ist z. B. eine Anordnung zitiert, die es ermöglicht, mit Eisen einen Atomstrahl zu erzeugen. An Hand der Dampfdruckkurven kann man von Fall zu Fall die erforderliche Ofentemperatur feststellen.

Literaturverzeichnis

- 1) R. Ritschl, Physik. Zeitschr. **38**, 141, 1937.
- 2) M. Oliphant und Lord Rutherford, Proc. Roy. Soc. **141**, 259, 1933.
- 3) A. Bouwers, F. Heyn und A. Kuntke, Physica **4**, 153, 1937.
- 4) W. Bothe und W. Gentner, Zeitschr. f. Phys. **104**, 685, 1937.
- 5) C. Hailer, Veröffentlich. aus d. Siemenskonzern **17**, 3. Heft, 115, 1938.
- 6) H. R. Crane, C. C. Lauritsen und A. Soltan, Phys. Rev. **45**, 507, 1934.
- 7) E. S. Lamar und O. Luhr, Phys. Rev. **46**, 87, 1934.
- 8) G. W. Scott, Phys. Rev. **55**, 954, 1939.
- 9) M. A. Tuve, O. Dahl und L. R. Hafstad, Phys. Rev. **48**, 241, 1935.
- 10) E. S. Lamar, E. W. Samson und K. T. Compton, Phys. Rev. **48**, 886, 1935.
- 11) W. H. Zinn, Phys. Rev. **52**, 655, 1937.
- 12) R. Planiol, Compt. Rend. **200**, 539 und 730, 1935; Ann. d. Phys. **9**, 177, 1938.
- 13) W. Bleakney, Phys. Rev. **34** I, 157, 1929.
- 14) M. B. Sampson und W. Bleakney, Phys. Rev. **50**, 732, 1936.
- 15) A. T. Finkelstein, Rev. Scient. Instr. **11**, 94, 1940.

Berlin-Dahlem, Max Planck-Institut.

(Eingegangen am 6. März 1941.)