

Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab.

Mathematisk-fysiske Meddelelser. **XVIII**, 13.

UNTERSUCHUNGEN ÜBER
NIEDERSpannungs-IONENQUELLEN

VON

J. M. LYSHEDE



KØBENHAVN
EJNAR MUNKSGAARD

1941

INHALT

	Seite
1. Einleitung	3
2. Die Niederspannungsbogen-Diffusions-Ionenquelle	6
a) Aufsammlung und Analyse von Ionenstrahlen	7
b) Der Wechselstrombogen	12
c) Anwendungen der Niederspannungsbogen-Diffusions-Ionenquelle	14
3. Niederspannungsbogen-Ionenquellen mit Hilfselektrode	14
a) Kalorimetrische Ausbeutemessung	20
b) Messergebnisse	22
4. Niederspannungs-Ionenquellen mit unselbständiger Entladung	26
5. Diskussion der Ionenquellentypen	30
6. Zusammenfassung	33
Literatur	35

1. Einleitung.

Parallel mit der Entwicklung der Hochspannungsanlagen verschiedener Typen während der letzten zehn Jahre geht eine Entwicklung jener Apparate, die in Verbindung mit diesen Hochspannungsanlagen in Anwendung kommen. Es handelt sich hierbei u. a. auch um Apparate zur Bildung grosser Mengen von Wasserstoffionen, die zur Beschiessung von Atomkernen verwendet werden.

Bei den ersten Versuchen von COCKCROFT und WALTON (1) wurde ein Kanalstrahlrohr mit Wasserstoff oder Deuterium verwendet; die damit erreichten Ausbeuten betragen jedoch nur wenige Mikroampere (μA).

Diese Kanalstrahl-Ionenquelle oder Hochspannungs-Ionenquelle, wie sie im Hinblick auf die zum Betriebe erforderlichen hohen Spannungen (etwa 50000 Volt) auch genannt wird, ist im Laufe der Zeit bedeutend verbessert worden; Physiker, die jetzt mit solchen Quellen arbeiten, geben an, dass sie Ionenströme bis zu 1,5 mA erzielt haben. Die erste wirklich starke Ionenquelle dieser Art verdanken wir OLIPHANT und RUTHERFORD (2).

Bei der zweiten Art von Ionenquellen, der Niederspannungs-Ionenquelle, die besonders in Amerika in Verbindung mit den elektrostatischen Hochspannungsanlagen zur Anwendung gelangt, werden die Ionen bei ziemlich niedrigen Spannungen gebildet. Ein Glühdraht,

der sich in einer Wasserstoffatmosphäre befindet, emittiert Elektronen, die auf eine Spannung von höchstens einigen hundert Volt beschleunigt werden. Durch Zusammenstöße mit den Wasserstoffmolekülen werden diese ionisiert, und die Ionen müssen dann auf irgend eine Weise entfernt werden. Hierzu kann man eine negative Elektrode verwenden, welche die Ionen wegzieht und durch die hindurch die Ionen in einen Raum hinauswandern können, in dem der Druck so niedrig ist, dass dort Elektroden, zwischen welchen sehr hohe Spannungen liegen, angebracht werden können, ohne dass eine Entladung eintritt. In diesem Raume findet dann die eigentliche Beschleunigung der Ionen statt.

Wenn der Druck in der Nähe des Glühdrahts sehr klein ist (etwa $1 \mu\text{b} = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ mm Hg}$), kann der Spannungsfall Anode—Glühdraht einige hundert Volt betragen. Die Öffnung in der negativen Hilfselektrode kann dann zwar ziemlich gross sein, die Ionendichte ist dafür aber nicht besonders hoch. Daher ist diese Ionenquelle bisher den anderen unterlegen. Wie es sich später gezeigt hat, kann man durch eine besondere Konstruktion der elektrischen Linsensysteme eine bessere Ausnützung der gebildeten Ionen erzielen (sodass diese Ionenquelle doch ziemlich kräftig wird) und diese Ionenquelle dadurch wesentlich verbessern.

Bei etwas höherem Druck in der Nähe des Glühdrahts (etwa $50 \mu\text{b}$) bekommt die Entladung den Charakter einer Bogenentladung mit einem Spannungsfall von 50 bis 100 Volt. Lässt man diese Entladung in einer kleinen Verengung zwischen der Anode und der Kathode brennen, wird die Stromdichte und damit die Ionendichte an dieser Stelle sehr gross. Es ist dann das Gegebene, hier die negative

Elektrode anzubringen, die die Ionen aus der Entladung wegziehen soll. Da der Druck auf der Hochvakuumseite nur etwa $0,1 \mu\text{b}$ betragen darf, muss die Öffnung in der Hilfselektrode sehr eng sein (etwa 5 mm lang und 1 mm im Durchmesser).

Bei einer anderen Art von Niederspannungsbogen-Ionenquellen werden die Ionen durch Diffusion aus der Entladung entfernt. Durch eine kleine Öffnung (0,5—2 mm im Durchmesser) im engsten Teil des Bogenraumes diffundieren die Ionen in den Hochvakuumraum, in dem negative Elektroden angebracht sind, welche die Ionen aus dem Bereich der Öffnung wegziehen. Bei beiden genannten Typen von Niederspannungsbogen-Ionenquellen sollen die zu erreichenden Ausbeuten einige mA betragen, d. h. etwas grösser sein als jene, welche für die Kanalstrahl-Ionenquellen angegeben werden. In einer Bogenentladung werden jedoch verhältnismässig mehr Molekül-Ionen gebildet, sodass die Protonenausbeute der besten Ionenquellen beider Typen ungefähr gleich ist. Es kommt jedoch noch hinzu, dass es von besonderer Wichtigkeit ist, die grossen Ionenausbeuten bei möglichst geringem Wasserstoffverbrauch zu erzielen; besonders deshalb, weil ein grosser Wasserstoffverbrauch eine sehr starke Pumpanlage erfordert, damit der Hochvakuumdruck auf etwa $0,1 \mu\text{b}$ gehalten werden kann. Wie aus der Literatur hervorgeht, dürften die Niederspannungs-Ionenquellen im Hinblick auf den Wasserstoffverbrauch am ökonomischsten sein.

Die Untersuchungen über Niederspannungs-Ionenquellen sind so mannigfaltig, dass eine vergleichende Diskussion nicht ohne Interesse sein dürfte. Das bearbeitete Material erweckte den Eindruck, dass eine Ionenquelle, die nach dem Bogenprinzip in richtiger Weise konstruiert ist,

auf Grund der entstehenden Ionenmenge allen anderen Ionenquellen — auch der Kanalstrahl-Ionenquelle — überlegen sein müsste. Das Hauptproblem besteht darin, diese Ionen aus der Entladung zu entfernen.

Die erwähnten Probleme scheinen eine eingehende Untersuchung der bestehenden Typen von Ionenquellen zu rechtfertigen.

2. Die Niederspannungsbogen-Diffusions-Ionenquelle.

Ionenquellen des Niederspannungsbogentypus wurden zuerst von TUVE, DAHL und HAFSTAD (15) gebaut, und ihre Ionenquelle wurde dann zum Modell für zahlreiche andere. Bei einem dieser Apparate fehlt die Hilfselektrode im Entladungsraum: die Ionen werden durch Diffusion durch ein kleines zirkulares Loch aus dem Bogen entfernt. Da diese Ionenquelle die einfachste Bauart darstellt, soll sie hier zuerst untersucht werden. LAMAR, SAMSON und COMPTON (21) bauten die erste Ionenquelle dieses Typus, und sie dient als Vorbild für die hier verwendete.

Ein Stahlblock ist von zwei einander gegenüberliegenden Seiten mit konischen Ausbohrungen versehen, die in der Mitte durch einen zylindrischen Kanal mit einem Durchmesser von 3—4 mm verbunden sind. Auf der einen Seite des Kanals wird eine Glühkathode (Oxyd- oder Wolframkathode) angebracht, auf der andern Seite sitzt die Anode. Die von dem Glühdraht emittierten Elektronen bewirken, dass eine Entladung zur Anode gezündet werden kann, wenn erst eine Entladung zwischen der Kathode und den benachbarten Wänden einige Ionen im Raum gebildet hat. Es kann zuweilen schwierig sein, die Entladung durch die »Kapillare« zu zünden; in der Literatur sind daher verschiedene Zündungsmethoden beschrieben. Wenn die Ver-

engung nicht weniger als 4 mm beträgt, macht das Zünden jedoch keine Schwierigkeiten. Die Entladung hat Bogencharakter, da der Spannungsfall 50—70 Volt beträgt. Der Wasserstoff wird durch ein Nadelventil zugeführt, sodass der Druck nicht über 20—100 μb steigt. In der Verengung zwischen Anode und Kathode kann die Stromdichte sehr gross werden, und deshalb ist hier eine kleine Öffnung (1 mm im Durchmesser) angebracht, durch welche die in der Entladung gebildeten Ionen diffundieren können. Durch diese Öffnung strömen auch die Wasserstoffmoleküle, und, da der Druck auf der anderen Seite ziemlich niedrig sein muss (0,1 μb), wird die Luft mit Hilfe einiger Öldiffusionspumpen ausgepumpt. In diesem Raume befinden sich ferner die Elektroden, die auf Grund ihrer hohen negativen Spannung die Ionen von der Diffusionsöffnung wegziehen und in ein enges Strahlenbündel konzentrieren sollen.

a) Aufsammlung und Analyse von Ionenstrahlen.

Das Ionenstrahlenbündel wird mittels eines elektrischen Linsensystems auf eine bestimmte Stelle des Apparates fokussiert, und hier wird eine Sammelelektrode, d. h. ein mit einer Blende versehener Faraday-Käfig, angebracht. Die Blende soll dafür sorgen, dass die sekundären Elektronen nicht verloren gehen. Um dies zu erreichen, hat die Spannung des Käfigs relativ zur Spannung der Blende einen kleinen positiven Wert. Dass eine schwache negative Spannung am Käfig (relativ zur Blende) den Strom zum Faraday-Käfig nicht wesentlich verändert, beweist die einwandfreie Wirkungsweise des Käfigs. Der Strom, der im Faraday-Käfig fokussiert werden kann, ist nicht der totale Ionenstrom, der vielmehr möglichst nahe der Diffusionsöffnung gemessen werden sollte. LAMAR, SAMSON und

COMPTON benützen die Elektrode II (Fig. 1) als Sammel-
elektrode, indem sie sie mit einem Boden versehen und im

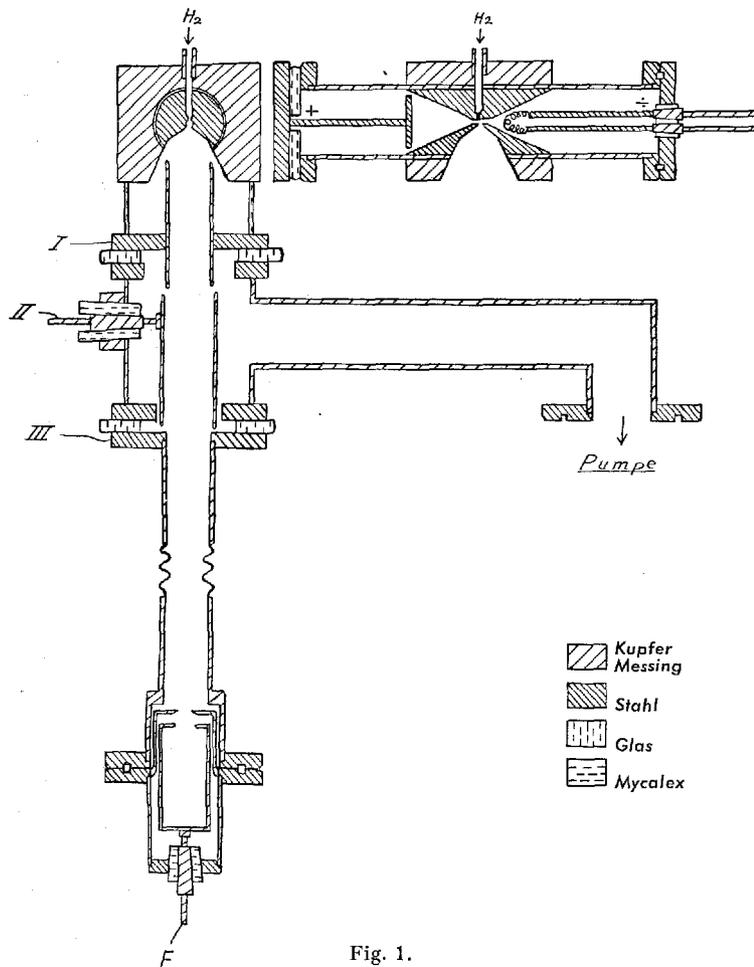


Fig. 1.

Verhältnis zur Elektrode I positive Spannung an sie anlegen,
die wie eine Bremsspannung auf die die Elektrode II verlas-
senden sekundären Elektronen wirkt. Gegen diese Anordnung
können jedoch wesentliche Einwände erhoben werden:

Elektrode I ist verhältnismässig offen, sodass ein Durchgriff der Niveauflächen mit geringer negativer Spannung von der Ionenquelle (geerdet) durch I bis II stattfinden kann, wodurch das Bremsfeld zwischen I und II völlig ausser Funktion gesetzt wird. Die sekundären Elektronen werden II verlassen und durch I zum Ausgangspunkt der Ionen zurückwandern. Dieser Effekt kann durch die Anbringung eines »Hutes« auf der Elektrode I verringert werden: man erreicht hierdurch, dass die Elektrode näher an die Diffusionsöffnung heranreicht und gleichzeitig enger wird, wodurch die Möglichkeiten für einen Durchgriff verringert werden. Der folgende Versuch beweist, dass der Durchgriff minimal war:

Die Spannung der Elektrode I wurde konstant gehalten, während die Spannung der Elektrode II zwischen einem kleinen positiven und einem kleinen negativen Wert relativ zur Elektrode I variiert wurde. Diese Veränderung der Spannung sollte auf die Anzahl der von der Diffusionsöffnung entfernten Ionen keinen merkbaren Einfluss ausüben, wohl aber auf den Strom zur Elektrode II, je nachdem ob die sekundären Elektronen von II gebremst oder nach Elektrode I hin beschleunigt werden. Der zu Elektrode I gehörige Strom sollte dann in dem Maasse vermindert werden wie der Strom zur Elektrode II steigt. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, fiel der Versuch jedoch ganz anders aus.

Die erste Spalte gibt den Bogenstrom, die zweite und dritte geben die negativen Spannungen der beiden Elektroden, die vierte und fünfte zeigen die entsprechenden gemessenen Ionenströme (sekundäre Elektronen mitgerechnet), und in der sechsten Spalte ist die Summe dieser Ströme errechnet. Für einen gegebenen Wert der Spannung I sollte man

Tabelle 1.

Bogenstrom Amp.	Spannung I Volt	Spannung II Volt	Strom I μ A	Strom II μ A	Total μ A
0,4	8000	8050	124	170	294
0,4	8000	8000	108	105	213
0,4	8000	7950	76	60	136
0,4	6000	6050	112	140	252
0,4	6000	6000	88	93	181
0,4	6000	5950	60	52	112
0,4	4000	4050	84	115	199
0,4	4000	4000	76	76	152
0,4	4000	3950	48	45	93
0,4	2000	2050	52	77	129
0,4	2000	2000	48	52	100
0,4	2000	1950	44	40	84

erwarten, dass die Totalsumme von der Spannung II unabhängig sei; das ist aber, wie aus der Tabelle zu ersehen, keineswegs der Fall. Wenn sekundäre Elektronen Gelegenheit bekommen, von der Elektrode II wegzuwandern, tragen sie zur Steigerung des Totalstromes bei und müssen folglich zum Ausgangspunkt der Ionen zurückkehren. Die letzte Spalte der Tabelle zeigt daher, in wie hohem Grade die sekundären Elektronen die gemessenen Ionenströme zu verfälschen vermögen. Dass kein wesentlicher Durchgriff vorliegt, geht daraus hervor, dass die in der dritten, sechsten, neunten und zwölften horizontalen Reihe angegebenen Ausbeuten sich nicht wesentlich änderten, wenn die Gegenspannung (Spannung I—Spannung II) noch weiter auf 200 Volt erhöht wurde.

Wie aus diesen vier Messreihen hervorgeht, gibt der Strom zur Elektrode II einen Wert für die Ionenausbeute, der sicher nicht zu gross ist; es besteht hingegen die Möglichkeit, dass er zu klein ist, weil ein Teil der in der Elek-

trode I ausgelösten sekundären Elektronen von dem Felde zur Elektrode II gezogen wird. Wenn kein Bremsfeld da ist, wird das Gegenteil der Fall sein. Selbst wenn der Totalstrom zu den beiden Elektroden als Ionenausbeute angesehen wird, kommt man zu Werten, die nicht ganz den von LAMAR, SAMSON und COMPTON angegebenen Ausbeuten entsprechen. Um die Grundlage für einen Vergleich zu erhalten, soll eine Umrechnung auf gleich grosse Ionenquellen, z. B. mit 4 mm Kapillare, 1 mm Diffusionsöffnung und einem Bogenstrom von 1 Amp., vorgenommen werden.

Die drei ersten Reihen der Tabelle 1 zeigen nach einer Multiplikation mit 2,5, dass die Ionenausbeute einer solchen Ionenquelle zwischen 200 und 750 μA liegen muss, während LAMAR, SAMSON und COMPTON den Wert von 1 mA angeben. Es scheint durch alle Untersuchungen über diesen Ionenquelle-Typus bestätigt, dass eine solche Umrechnung erlaubt ist. Dass selbst der grösste meiner Werte nicht den Wert von 1 mA erreicht, erklärt sich daraus, dass die offene Form der Elektrode II grössere Möglichkeit für die Aussendung sekundärer Elektronen bietet als die geschlossenere Form (mit »Hut«), selbst dann, wenn eine kleine Bremsspannung im ersteren Falle vorhanden ist. Die wahre Ausbeute geben diese Zahlen wahrscheinlich nicht an; diese muss zwischen den beiden genannten Zahlen (200 und 750 μA) liegen. Eine genauere Untersuchung der Ausbeutemessungen folgt anschliessend an die Diskussion der zweiten Form der Niederspannungsbogen-Ionenquellen (S. 17—24).

Bei passenden Spannungen an dem System zylindrischer Elektronenlinsen, z. B. bei den im Zusammenhang mit Tabelle 2 besprochenen Spannungen, ist es möglich, die

Ionen oder einen wesentlichen Teil derselben auf einen ganz kleinen Fleck (weniger als 0,5 mm im Durchmesser) zu konzentrieren. Lässt man die Ionen eine Öffnung im Faraday-Käfig passieren, kann die bei der Fokussierung erfasste Ionenzahl gemessen werden. Sie macht, wie sich zeigt, einen sehr bedeutenden Teil (wahrscheinlich 50—70 v. H.) sämtlicher Ionen aus.

Um eine Analyse des Strahlenbündels zu ermöglichen und hiermit den Anteil von Protonen an den Ionen (sowie die Zahl der zusammengesetzten Ionen H_2^+ und H_3^+) zu bestimmen, lässt man den fokussierten Strahl durch ein Magnetfeld gehen. An dieser Stelle besteht das Rohr aus einem Tombak-Balg, sodass der untere Teil des Apparates relativ zum oberen Teil gedreht werden kann.

Mit diesem einfachen Massenspektrographen war es möglich festzustellen, dass ungefähr 10 v. H. der Ionen Protonen, 50—60 v. H. zusammengesetzte Wasserstoffionen, und der Rest Ionen von Verunreinigungen in der Entladung waren. Die hier beschriebenen Messungen zeigen völlige Übereinstimmung mit den Messungen von LAMAR, SAMSON und COMPTON.

b) Der Wechselstrombogen.

Da die Aufstellung einer Niederspannungs-Ionenquelle sehr vereinfacht würde, wenn es möglich wäre, sie mit Wechselstrom zu betreiben, wurde die Möglichkeit für die Errichtung einer solchen Anlage untersucht. Die Versuche fielen recht günstig aus, da die Ionenausbeute der effektiven Stromstärke einigermaßen proportional ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

In dieser Tabelle geben die erste, zweite und dritte Spalte die Stromstärken zu den drei ersten Elektroden im

Tabelle 2.

	Strom I μA	Strom II μA	Strom III μA	Ionen- strom μA	Total μA
Gleichstrom 1,15 Amp.	92	-40	100	68	220
Wechselstrom mit Glühdraht auf einer Seite					
0,57 Amp.	46	-12	50	36	120
0,50 „	50	-14	52	34	122
Wechselstrom mit Glühdraht auf beiden Seiten					
0,75 Amp.	72	-32	82	41	163

Hochvakuumraum (vergl. Fig. 1); die vierte Spalte gibt den Strom zum Faraday-Käfig, und in der fünften Spalte ist die Summe der vier ersten Stromstärken berechnet. Die erste (horizontale) Reihe gibt die Ionenausbeute bei Gleichstrom im Bogen, die zweite und dritte geben die entsprechenden Ausbeuten, wenn der Bogen mit Wechselspannung betrieben wird und wenn der Glühdraht auf der einen bzw. anderen Seite der »Kapillare« angebracht ist. In der vierten Reihe sind die Ausbeuten für einen Bogen angegeben, der mit Wechselstrom betrieben wird und bei dem auf beiden Seiten der »Kapillare« ein Glühdraht angebracht ist. Die Spannungen wurden konstant gehalten, sodass Spannung I und III: —8000 Volt, Spannung II: —2000 Volt, und die Spannung des Faraday-Käfigs etwa —7950 Volt betrug. Es geht aus der Tabelle hervor, dass die Ausbeute der effektiven Stromstärke einigermaßen proportional ist, unabhängig davon, ob Gleichstrom oder Wechselstrom verwendet wurde. Dass Strom II negativ ist, bedeutet, dass Elektrode II mehr sekundäre Elektronen als positive Ionen erhält.

c. Anwendungen der Niederspannungsbogen-Diffusions-Ionenquelle.

Obwohl diese Ionenquelle was die Ausbeuten anbetrifft den Erwartungen nicht ganz entsprochen hat, besitzt sie doch gewisse Vorteile, sodass ihre Bedeutung nicht unterschätzt werden darf. Berechnet man die Ionenausbeute im Verhältnis zur zugeführten Wasserstoffmenge, so ist die Ausbeute verglichen mit der einer Hochspannungs-Ionenquelle garnicht gering. Zieht man ausserdem die aufgewandte Energie in Betracht, so liegen die Verhältnisse noch günstiger.

Wie bereits früher erwähnt, ist es möglich, die Ionen auf einen ganz kleinen Fleck (weniger als 0,5 mm im Durchmesser) zu fokussieren, und die Flecken, auf welchen die Ionen verschiedener Massen nach der Ablenkung im Magnetfelde konzentriert sind, sind nicht viel grösser. Bei der Verwendung dieser Ionenquelle in einem Massenspektrographen kann man daher ein gutes Auflösungsvermögen sowie eine bedeutende Intensität erreichen. Hierin wird möglicherweise die wichtigste Anwendung dieser Ionenquelle in Zukunft liegen. Schliesslich hat es sich gezeigt, dass sie sich mit nur kleinen Änderungen als Ionenquelle zum Cyclotron (25, 26) vorzüglich eignet, da sie eine viel grössere Intensität als die üblicherweise verwendeten Ionenquellen zu liefern vermag.

3. Niederspannungsbogen-Ionenquelle mit Hilfselektrode.

Bei einer zuerst von TUVE, HAFSTAD und DAHL (15) beschriebenen Ionenquelle, die auch wesentlich zur Weiterentwicklung der oben beschriebenen Ionenquelle beigetragen hat, wird eine Hilfselektrode auf ziemlich hoher negativer Spannung verwendet; diese wird isoliert in der Nähe des engsten Teiles der Bogenentladung (»Kapillare«) ein-

geführt. Bei einer besonderen Konstruktion, die von ZINN (18) angegeben wurde, liegt die Verengung anders, und diese Methode wurde bei der Konstruktion der Ionenquelle II bevorzugt (Fig. 2). Die Anode liegt im Innern eines konischen Stahlblocks S. Auf der Aussenseite befindet sich die aus zwei gedrehten Nickeldrähten (0,5 mm im Durchmesser) hergestellte und zu einem Kreis gebogene Glüh-

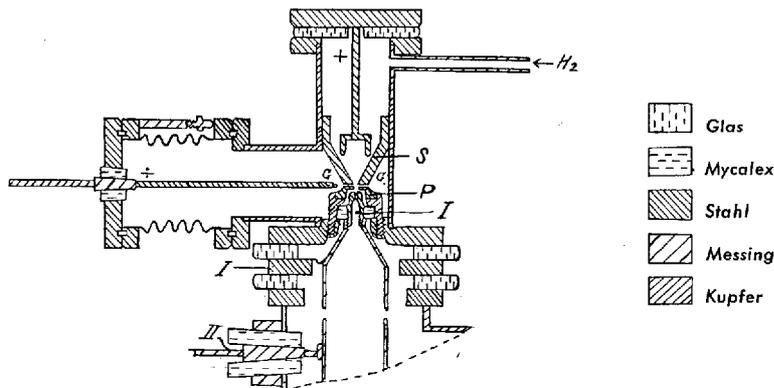


Fig. 2.

kathode, die den aus einer Mischung von $BaCO_3$ und $SrCO_3$ bestehenden, elektronenemittierenden Stoff trägt. In derselben Ebene wie der Glühdraht endet der Stahlblock in einer ebenen Platte mit einer Öffnung zur Anode. Die Entladung brennt von der Anode durch diese Öffnung zur Kathode. Gegenüber dem Loch im Stahlblock liegt eine Stahlplatte P, die mit einer entsprechenden Bohrung versehen ist. Hinter dieser Platte sitzt die Hilfelektrode I, welche die Ionen aus der Entladung entfernen soll. Die Elektrode I ist mit einem Kanal von 5 mm Länge und 1 mm Durchmesser versehen, durch den die Ionen in den Hochvakuumraum wandern können. In der Aufstellung Fig. 2 werden die positiven Ionen gegen diese Hilfelektrode gerichtet,

und es läge zunächst nahe zu vermuten, dass man aus diesem Grund grössere Ausbeuten sollte erzielen können als mit der Ionenquelle von TUVE, HAFSTAD und DAHL. Bei näherer Betrachtung scheint es jedoch sehr unwahr-

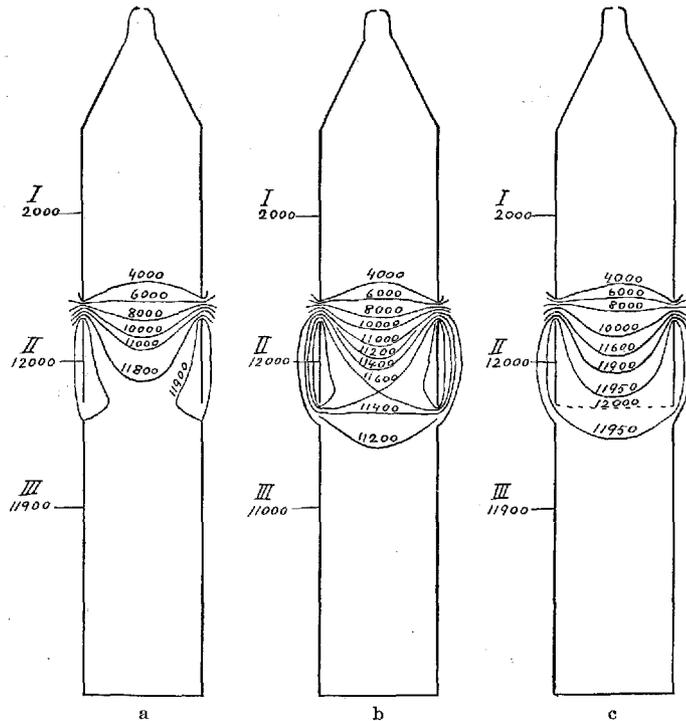


Fig. 3.

scheinlich, dass diese Bewegung der Ionen von Einfluss auf die Ausbeute ist, da die Ionen in einer Bogenentladung ein Plasma bilden, in dem die richtungbestimmende Bewegung im Verhältnis zur Bewegung der einzelnen Ionen — verursacht von zufälligen Feldern im Innern des Plasmas — sehr langsam ist. ZINN gibt an, Ausbeuten bis zu 4,5 mA gemessen zu haben, während TUVE, HAFSTAD und DAHL Ausbeuten von 1,5 mA berichten.

Das Prinzip der Messungen von ZINN geht aus Fig. 3a hervor. Elektrode I ist die Hilfselektrode, die auf 2000 Volt negativer Spannung gehalten wird, Elektrode II ist auf mehreren tausend Volt negativer Spannung, und die Sammel-elektrode III ist einige hundert Volt positiv im Verhältnis zu II. Hierdurch sollte es verhindert werden, dass die von III ausgelösten sekundären Elektronen zu einer der anderen Elektroden hinüberwandern, denn sie werden von dem Gegenfeld gebremst und dadurch zurückgehalten. ZINN findet, dass die gemessene Ausbeute stark von der Spannung auf II abhängt, da grosse Ausbeuten erst bei hohen Werten dieser Spannung erzielt werden. Dieses Ergebnis wird dahingehend gedeutet, dass die hohen Spannungen notwendig sind, um die Ionen auf der Öffnung des Faraday-Käfigs konzentrieren zu können. Eine natürlichere Erklärung ist die, dass die Bremsspannung bei grossen Spannungen auf II nicht genügt, um die sekundären Ionen zurückzuhalten, da die Niveaulächen mit numerisch kleinerer Spannung als Spannung III von I durch II tief in das Innere von III durchgreifen können, sodass die sekundären Elektronen nicht gebremst, sondern vielmehr von III zurück zu I beschleunigt werden.

Ob diese Möglichkeit wirklich besteht, lässt sich durch eine Bestimmung des Verlaufes der Niveaulächen in einem Schnitt durch ein Modell des Linsensystems untersuchen. Das Modell wird mit der Schnittfläche auf der Oberfläche einer Flüssigkeit (Leitungswasser) angebracht, und dann werden Wechselspannungen an die Elektroden angelegt, deren effektive Werte sich ebenso zu einander verhalten wie die Spannungen an den Elektroden des Apparates. Die Niveaulächen werden nunmehr mittels einer Elektrode abgetastet, die durch einen Verstärker nebst Lautsprecher

mit einer gleichmässig regulierbaren Wechselfspannung in Verbindung steht. Wenn die Elektrode an der Flüssigkeitsoberfläche Punkte dieser Spannung trifft, sinkt der Ton im Lautsprecher auf ein Minimum. Die Punkte wurden mittels eines Pantographen markiert. Durch Drehung dieser Niveauebenen um die Achse des Apparates erhält man ein Bild von dem Verlauf der Niveauebenen innerhalb des Apparates. Durch diese Messungen wurde die Annahme, dass die sekundären Elektronen für die anscheinend so günstigen Ergebnisse verantwortlich zu machen sind, vollauf bestätigt. Fig. 3a zeigt den Verlauf der Niveauebenen. Fig. 3b gibt den Verlauf der Niveauebenen, wenn die Gegenspannung gross genug ist, um die ausgelösten sekundären Elektronen zu bremsen. In diesem Fall zeigt das Bild einen »Sattelpunkt«, von dem aus der numerische Wert der Spannung nach beiden Seiten hin abnimmt. Sekundäre Elektronen müssen diesen Punkt (oder eine noch höhere Spannung) überschreiten, um nach I hinüberkommen zu können, und dies wird nicht gelingen, wenn die Spannung des Sattelpunktes 50—100 Volt über der Spannung von III liegt; ZINN verwendet diese Potentialverteilung jedoch nicht. Fig. 3c zeigt eine andere Methode, die sekundären Elektronen von III zu bremsen: Elektrode II wird mit einem grobmaschigen Netz geschlossen, während die Elektroden Spannungen im übrigen dieselben Werte haben wie in Fig. 3a. Das Netz braucht nicht besonders fein zu sein, um zu verhindern, dass die Niveauebenen niedriger Spannungen nach Elektrode III durchgreifen.

Auf die letztgenannte Weise ist es möglich, sekundäre Elektronen durch bedeutend niedrigere Bremsspannung als die bei Methode 3b benutzte zu bremsen. Es kann allerdings eingewendet werden, dass auf dem Drahtnetz sekun-

däre Elektronen ausgelöst werden können, die zusammen mit den positiven Ionen von III aufgesammelt werden und dadurch zu einer Verminderung der gemessenen Ionenausbeute beitragen. Die Erfahrung lehrt uns aber, dass viele sekundäre Elektronen auch ohne Verwendung des Netzes von den inneren Oberflächen der Elektroden ausgelöst werden. Bei einer Versuchsreihe mit der Aufstellung Fig. 3b wurde zum Beispiel eine Zeit lang eine (nicht besonders grosse) Ausbeute gemessen, die aber stetig abnahm, bis sie schliesslich fast ganz verschwand. Wie es sich später herausstellte, war die Elektrode II mit einer blanken, von Kathodenzerstäubung herrührenden Metallschicht überzogen; nachdem diese Schicht entfernt worden war, zeigte sich wieder die ursprüngliche grössere Ausbeute. Die fremde Metallschicht wies also offenbar eine besonders starke Elektronenemission auf; man kann aber aus dem Versuch schliessen, dass selbst unter normalen Verhältnissen bedeutende Mengen sekundärer Elektronen von II ausgelöst werden. Die Elektroden sollten daher aus Metallen mit kleiner oder jedenfalls nur geringer sekundärer Elektronenemission bei Bombardierung mit positiven Ionen hergestellt werden. Es wurde versucht, die Elektroden innen mit einer Schicht kolloidaler Kohle (Aquadag) zu überziehen. Das hat zwar etwas geholfen, jedoch nicht soviel wie zu wünschen wäre.

Die sekundären Elektronen sind somit bei der Messung der Ionenausbeute von sehr grosser Bedeutung. Bei der Anwendung einer Bremsspannung vor der Sammelelektrode werden sie die gemessenen Ausbeuten verringern; fehlt aber diese Bremsspannung, werden sie die Ausbeuten vergrössern, und man kann mit Sicherheit nur soviel sagen, dass die wirklichen Ausbeuten zwischen diesen beiden Werten liegen, wovon der letztere mindestens dreimal

so gross wie der erstere und gelegentlich dreissigmal so gross ist. Wenn die Metalloberflächen mit Aquadag überzogen sind, scheint dieses Verhältnis ziemlich klein zu sein (etwa 3).

a) Kalorimetrische Ausbeutemessung.

Die elektrische Messung der Ionenausbeute ist also recht schwierig, und es würde von Vorteil sein, noch eine Methode zu verwenden, die von anderen Faktoren abhängig ist. Als solche wurde eine Messung der von dem Ionenstrom durch Bombardierung der Sammelelektrode entwickelten Wärmemenge gewählt. Die Elektrode sollte dann, um die Genauigkeit der Messungen zu steigern, leicht und aus Kupfer hergestellt sein, damit der Temperatenausgleich so schnell wie möglich stattfindet. Auf der Aussenseite dieser Elektrode ist ein kleiner Behälter angebracht, in den ein Thermometer eingetaucht wird. Die Temperatursteigerung durch Ionenbombardement wird mit der durch Zufuhr einer bekannten Wärmemenge hervorgerufenen Temperatursteigerung verglichen. Auf Grund solcher Messungen ist es möglich, die Stromstärke zu berechnen, wenn die Spannung bekannt ist. Damit diese Berechnung erlaubt sein soll, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

1) Der Ionenstrom im Hochvakuum darf in keiner Richtung infolge einer Ionisierung der Luftreste wesentlich geändert werden;

2) alle Ionen, die auf die Sammelelektrode auftreffen, müssen ihre totale Energie ausschliesslich als Wärme abgeben.

Die unter 1) angeführte Bedingung ist so weit wie überhaupt möglich erfüllt (der Druck ist geringer als $0,1 \mu\text{b}$).

Zusammenstösse zwischen den Ionen und den Molekülen der Luftreste sind so selten, dass man eine möglicherweise hiervon herrührende Stromänderung ganz vernachlässigen darf.

Für die Erfüllung der Bedingung 2) liegen die Verhältnisse weniger günstig. Die Spannungen der Elektroden sollen so gewählt werden, dass nur Ionen aber keine sekundären Elektronen die Sammelelektrode treffen; statt dessen verlässt aber eine grosse Anzahl sekundärer Elektronen diese Elektrode und nimmt einen Teil der zugeführten Energie mit sich, wodurch die Wärmeentwicklung etwas zu klein gemessen wird. Der berechnete Ionenstrom gibt also eine untere Grenze an. Ein anderer Teil der Energie wird verbraucht, da die Ionen dort, wo sie die Elektrode treffen, eine Kathodenzerstäubung hervorrufen. Die auf diese Weise verschwindenden Energiemengen machen jedoch kaum einen beträchtlichen Teil der Ionenenergie aus, sodass man annehmen darf, dass der berechnete Ionenstrom nur wenig unter dem wirklichen Wert liegt. Was die sekundären Elektronen betrifft, so kann man grob folgendermassen rechnen: Jedes Ion löst weniger als 10 Elektronen aus, deren Geschwindigkeiten (in der entgegengesetzten Richtung wie die des Ions) einer Spannung von weniger als 50 Volt entsprechen. Die Elektronen bewirken also eine Energieverminderung von weniger als 500 Elektronenvolt pro Ion, während die gesamte Energie pro Ion 5—8000 Elektronenvolt beträgt. Der Energieverlust ist also kleiner als 10 v. H. Durch eine ähnliche näherungsweise Berechnung kann der Energieverlust durch Kathodenzerstäubung auf 15 v. H. geschätzt werden, und die aus den Kalorimetermessungen bestimmte Ausbeute scheint deshalb mit einem Fehler behaftet zu sein, der unter 25 v. H. liegt.

Die Abhängigkeit des elektrisch gemessenen Ionenstroms von der Bremsspannung geht aus der Kurve Fig. 4 hervor. Die kalorimetrischen Messungen scheinen zu zeigen, dass der gemessene Ionenstrom bei einer Bremsspannung von wenigen Volt den richtigen Wert annimmt; die Ionenausbeuten sind von den von ZINN angegebenen Werten weit

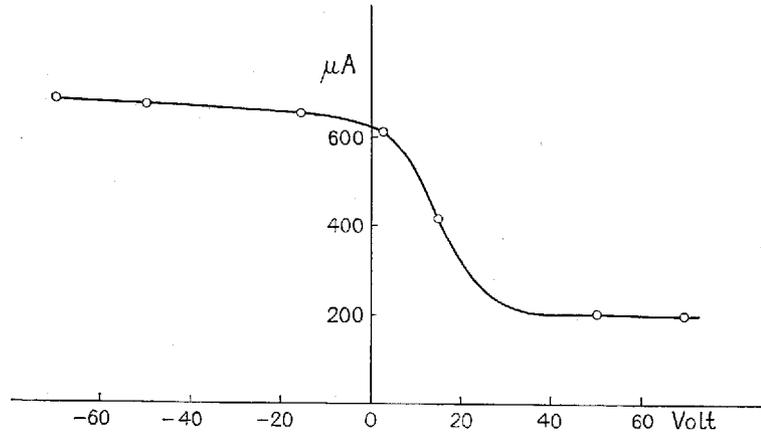


Fig. 4.

entfernt. ZINNS Werte entsprechen vielmehr beinahe dem Maximalwert in Fig. 4, was mit den oben erwähnten Betrachtungen über die Messmethode von ZINN völlig in Übereinstimmung ist.

b) Messergebnisse.

Mit wachsender Stromstärke im Bogen wächst auch der Ionenstrom. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Ergebnisse als Funktion des Bogenstroms und der Spannung der Hilfselektrode.

Die Zahlen für die Ionenströme geben die elektrischen Ausbeuten in μA an, und zwar die Minimumwerte, mit Ausnahme der beiden in Klammern angeführten Zahlen, die die entsprechenden Maximumwerte sind. Diese Tabelle

Tabelle 3.

Bogenstrom Amp	Spannung der Hilfselektrode (Volt)						
	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
0,4	20	45	50	58	58	62	55
1,0	10	48	90	125 (300)	135	140	140
1,4	6	30	100	150	175 (500)	190	185

zeigt dieselbe Abhängigkeit des Ionenstroms vom Bogenstrom und der Elektrodenspannung wie die entsprechende Tabelle bei ZINN; die Zahlenwerte sind jedoch viel kleiner als die Werte von ZINN.

ZINN untersuchte den Einfluss der Grösse der Öffnung der Stahlplatte, die den Bogenraum von der Hilfselektrode trennt, und erhielt bei grösserer Öffnung kräftigere Ströme; gleichzeitig wurde aber der Strom zur Hilfselektrode soviel stärker, dass der zur Lieferung der Spannung benutzte Apparat den notwendigen Effekt nicht leisten konnte. Diese Erfahrungen wurden zwar durch eine entsprechende Änderung der Ionenquelle II bestätigt, jedoch mit einem Vorbehalt betreffend die Grösse der Ausbeute: ZINN fand eine Ausbeute von 2 mA bei einem Bogenstrom von 0,4 Amp., während ich bei der Nachprüfung einen Wert zwischen 425 und 980 μ A fand; die kalorimetrische Messung ergab einen Wert von 750 μ A. Bei einem Bogenstrom von 0,5—0,6 Amp. konnte das verwendete Spannungsaggregat den notwendigen Effekt bei einer Spannung von etwa 10000 Volt gerade liefern; die Ausbeute wurde elektrisch zu zwischen 650 und 2800 μ A, kalorimetrisch zu 980 μ A gemessen. Die wahrscheinlichste Ausbeute liegt bei etwa 1 mA. Wenn auch die Messungen von ZINN zu grosse Werte ergeben haben, ist die Ausbeute doch so erheblich, dass diese Ionenquelle was die Stromleistung anbetrifft den

anderen Typen überlegen ist, zumal der genannte Strom bei sehr geringem Wasserstoffverbrauch (etwa 10 $\mu\text{l}/\text{sec}$) erzeugt wird. TUVE, HAFSTAD und DAHL haben mit ihrer Kapillar-Ionenquelle bei einem etwas geringeren Wasserstoffverbrauch einen Ionenstrom von etwa 1,5 mA gemessen; es geht jedoch aus der Konstruktion ihrer Apparatur hervor, dass sie über den gewaltigen Einfluss eines Spannungsdurchgriffes auf die sekundären Elektronen und damit auf die gemessenen Ausbeuten nicht ganz im klaren gewesen sind. Nur wenige Zentimeter von der Mündung der Sammelelektrode befinden sich Metallteile auf der Spannung 0, und dies muss unweigerlich dazu führen, dass Niveauflächen geringer Spannung tief in diese Elektrode hinübergreifen.

Auch die Ionenquelle II konnte mit Wechselstrom betrieben werden; um aber die Zündung bei jeder Periode zu gewährleisten, muss die Spannung etwas höher als die des Gleichstrombogens sein (3—400 Volt sind notwendig). Die Ausbeuten werden natürlich etwas geringer, doch wird die in dieser Weise betriebene Ionenquelle sehr intensiv: bei 0,4 Amp. wurde eine Ausbeute von 300 μA gemessen.

Bei der Besprechung seiner Ionenquelle gibt ZINN an, dass sie wahrscheinlich durch Strahlungsabgabe an die umgebende Luft gekühlt werden kann. Meine Erfahrungen mit der Kühlung der Glühkathode haben zu ähnlichen Überlegungen geführt. Die Wärme der Glühkathode liess sich leicht durch Anbringung von zwei grossen Kupferscheiben, die eine grosse Strahlungsoberfläche bilden, auf die Zuleitungen ableiten. Ein Versuch, auf diese Weise mehrere hundert Watt zu entfernen, zeigte aber, dass die dazu notwendige Oberfläche so gross sein müsste, dass diese Methode praktisch undurchführbar wird. Es hat dagegen

wesentlich geholfen, einen Luftstrom an der Oberfläche entlang zu blasen. Die Kühlung mittels eines Luftstroms scheint deshalb nicht unmöglich zu sein.

Ein Kühlmantel wurde gebaut, und zwar nach denselben Prinzipien wie der von Philips bei der Kühlung von Senderöhren verwendete. Die Probleme liegen allerdings verschiedenartig, da bei den Senderöhren etliche kW bei einer erlaubten Temperatursteigerung von etwa 100° entfernt werden sollen, während die bei der Ionenquelle abzuleitende Wärmemenge höchstens einige hundert Watt ausmacht, die erlaubte Temperatursteigerung hingegen im Hinblick auf das zur Dichtung des Apparates verwendete Abdichtungsmittel (Apiezon Q) nur 10° beträgt. Der Kühlmantel besteht aus einem Kupferblock mit tiefen Rillen, sodass die Berührungsfläche mit der rasch durchströmenden Luft sehr gross wird. Die Rillen sind 2 mm breit, und ihre Anzahl bestimmt die Geschwindigkeit des Luftstroms. Die weggeführte Wärmemenge kann, wenn die Strömung turbulent ist, aus der Formel

$$Q = \frac{\alpha \cdot F \cdot (t - t_1)}{1 + 30 \cdot \alpha \cdot \frac{F}{q}}$$

bestimmt werden. Hierbei ist

α = die Wärmeübergangszahl, die für turbulente Strömung $7,12 \cdot 10^{-3} \cdot v^{0,78}$ kW/m² beträgt, wobei v die Geschwindigkeit des Luftstroms ist;

F = die Berührungsfläche des Luftstroms mit dem Kühlmantel (m²);

$t - t_1$ = die erlaubte Temperatursteigerung; und

q = der Luftstrom (kg/min).

Zur Kühlung der Ionenquelle wurde ein Kupferblock verwendet (12 cm lang, 14 cm im Durchmesser), der seiner ganzen Länge nach von 52 vier cm tiefen Rillen durchschnitten war. Der Block war in sich geschlossen, sodass die Luft an dem einen Ende einströmt, den ganzen Block entlang streicht und ihn am anderen Ende verlässt.

Diese Kühlmethode hat gegenüber der Ölzirkulationskühlung, die bei Hochspannungsapparaten üblich ist, grosse Vorteile. Die zum Betrieb eines Ventilators notwendige Energie ist viel kleiner als die von einer Ölzirkulationspumpe benötigte. Wird der Ventilator direkt über der Ionenquelle angebracht, kann man mit einem kleinen Modell, das weniger als 100 Watt erfordert, auskommen; meist wird man es jedoch vorziehen, den Ventilator auf den Boden zu stellen und die Luft durch ein Rohr zur Ionenquelle hinaufzublasen, obwohl diese Methode einen etwas kräftigeren Ventilator erfordert. Ein weiterer Vorteil dieser Art Kühlung liegt darin, dass man das Risiko eines Bruches der Ölleitung ausschliesst.

4. Niederspannungs-Ionenquellen mit unselbständiger Entladung.

Es gibt, wie bereits erwähnt, noch einen Typus von Niederspannungs-Ionenquellen, bei dem die Entladung unter etwas niedrigerem Druck stattfindet, so dass sie nicht eigentlich zu einer Bogenentladung wird, sondern nur zu einer durch Beschleunigung der von dem Glühdraht emittierten Elektronen hervorgebrachten Ionisierung. Der Kanal zwischen Entladungsraum und Hochvakuumraum kann hierbei einen Durchmesser von einigen Millimetern haben, weil der Druckunterschied zwischen den beiden Räumen

nicht besonders gross zu sein braucht. Die allgemeine Erfahrung mit dieser Ionenquelle lehrt uns jedoch, dass die erzielte Ausbeute nicht mit der der Niederspannungsbogen-Ionenquellen Schritt halten kann. Durch einen Ausbau der Anlage, der die elektronen- und ionenoptischen Probleme besonders berücksichtigt, gelang es SCOTT (12), die Ausbeute bedeutend zu erhöhen. Eine Ionenquelle dieser Art (Ionenquelle III) wurde deshalb ausprobiert:

Die Anode besteht aus einem mit einer zylindrischen Ausbohrung versehenen massiven Stahlblock. Gegenüber dieser Ausbohrung befindet sich eine ebenfalls zylindrische Glühkathode, von der aus die Elektronen zu der Anode hinübergezogen werden. Etwas unterhalb der Kathode sitzt eine zweite, im Verhältnis zur Glühkathode negative Elektrode. Diese drei Elektroden gemeinsam bilden ein elektronenoptisches System. Von dem Glühdraht ausgehend werden die Elektronen auf den Boden des Anodenzylinders fokussiert, wo dann auch der Wasserstoff zugeführt wird. An dieser Stelle wird der Wasserstoff ionisiert, und die Ionen werden von demselben elektronenoptischen System durch den Glühdraht fokussiert, passieren die nächste Elektrode und erreichen die Sammelelektrode. Wenn die Fokussierung vollständig ist, werden auf diese Weise alle in dem Entladungsraum gebildeten Ionen aus diesem weggezogen und auf der Sammelelektrode gemessen, — im Gegensatz zu den Verhältnissen bei einem Niederspannungsbogen. Ein Mangel der neuen Ionenquelle besteht darin, dass der Druck im Entladungsraum von derselben Grössenordnung sein soll wie im Hochvakuum, wo er $0,2 \mu\text{b}$ nicht übersteigen darf. Bei diesem Druck ist jedoch die mittlere Weglänge der Elektronen gross verglichen mit den Apparatdimensionen, sodass nicht alle

Elektronen Ionen bilden. Wird der Druck erhöht, sodass mehr Ionen gebildet werden, wird die mittlere Weglänge dieser Ionen so klein, dass es unmöglich wird, sie in einer Hochspannungsanlage auszunützen.

SCOTT fand, dass die Ionenausbeute dieser Quelle mit dem Druck stark ansteigt; gleichzeitig zeigte es sich aber auch, dass die Ionen bei hohem Druck zu einem wesentlichen Teil aus H_3^+ - und H_2^+ -Ionen bestanden, während sie bei niedrigem Druck hauptsächlich aus Protonen bestanden. Die grossen Ionenausbeuten bei hohen Drucken waren daher nicht so wertvoll, und ferner kommt der oben erwähnte Einwand betreffend die kurze Weglänge noch hinzu. Bei sehr niedrigem Druck (etwa $0,01 \mu b$) wird ein beträchtlicher Teil der Ausbeute zu Protonen, aber die gesamte Ausbeute ist dafür sehr gering. Bei etwa $0,1 \mu b$ werden etwa 10 v. H. Protonen gebildet, und SCOTT behauptet dabei eine Ionenausbeute von etwa $600 \mu A$ erreicht zu haben. Bei höherem Druck kann die Ausbeute einige mA betragen, aber nur mit wenigen Protonen. Bei $0,02 \mu b$ fand SCOTT dagegen $100 \mu A$ mit einem Protonenverhältnis von 50 v. H.

Die Ionenquelle II kann leicht in III umgewandelt werden, indem der oben beschriebene Stahlkegel durch eine zylindrische Stahlanode ersetzt und die Form des Glühdrahtes etwas verändert wird; die Teile, die die Elektrode I (Fig. 2) tragen, werden entfernt, sodass die neue Elektrode I in etwas grösserem Abstand von der Ionenquelle eingesetzt werden kann. Wo SCOTT $600 \mu A$ gemessen hat, ergab die Nachprüfung Werte, die — elektrisch und in derselben Weise gemessen wie früher — zwischen 150 und $500 \mu A$ lagen. SCOTTS Wert von $100 \mu A$ entspricht 30 — $105 \mu A$, wobei $70 \mu A$ bereits unbedingt als oberer Wert

angesehen werden muss. Der Wasserstoffverbrauch betrug bei dem letztgenannten Versuch $7 \mu\text{l}/\text{sec}$. Wird mit einem Protonenverhältnis von 50 v. H. gerechnet, bekommt man $35 \mu\text{A}$ Protonen bei einem Wasserstoffverbrauch von $7 \mu\text{l}/\text{sec}$. Bei der Ionenquelle II wurden 10 v. H. bei $1000 \mu\text{A} = 100 \mu\text{A}$ Protonen bei einem Wasserstoffverbrauch von $10 \mu\text{l}/\text{sec}$ gefunden, sodass diese Ionenquelle im Hinblick auf den Wasserstoffverbrauch noch immer als die ökonomischste angesehen werden muss, was auch aus der tabellarischen Zusammenstellung (S. 32) zu ersehen ist.

Nach Abschluss dieser Untersuchungen ist die Beschreibung noch einer weiteren Variation der Ionenquelle III (13) erschienen, bei der man mittels elektronenoptischer Systeme dafür sorgt, dass jedes Elektron immer wieder hin und zurück läuft bis es auf ein Molekül trifft und dieses ionisiert. Dadurch bekommen alle Elektronen Gelegenheit Ionen zu bilden, und die Ionen, die auf der der Entladung abgewandten Seite des Sattelpunktes gebildet werden, können von der Entladung entfernt und von einer Sammelelektrode aufgesammelt werden. Theoretisch müsste das die Hälfte aller Ionen sein, und die angegebenen Ionenausbeuten liegen auch beträchtlich über den bisher gefundenen. Nach dem Aussehen des Apparates und den Erfahrungen aus der vorliegenden Arbeit zu schliessen, ist es doch sehr wahrscheinlich, dass sogar wesentliche Beiträge zur Ionenausbeute von sekundären Elektronen herühren. Selbst wenn der angegebene Ionenstrom (150 mA) um einen Faktor 20 vermindert wird, ist die Ausbeute dennoch viel grösser als die der anderen Ionenquellen. Die Schwierigkeiten beim Betrieb dieser Ionenquelle bestehen wahrscheinlich in der Wahl der richtigen Linsenspannungen. Diese Ionenquelle ist möglicherweise besser

als irgend eine andere; da sie aber nicht mehr durchgeprüft werden konnte, ist sie in der folgenden Diskussion nicht berücksichtigt.

5. Diskussion der Ionenquellentypen.

Die Ergebnisse der Messungen mit den drei Niederspannungs-Ionenquellentypen sollen hier untereinander und auch mit den Ergebnissen der Hochspannungs-Ionenquellen verglichen werden, die einer ebenso kritischen wie erfolgreichen Arbeit von C. HALLER entnommen sind.

Ionenquelle I.

Der Wasserstoffstrom wurde zu $10 \mu\text{l}/\text{sec}$ gemessen. (Diffusionsöffnung $0,5 \text{ mm}$ im Durchmesser). Der grösste Ionenstrom wurde bei $5,6 \text{ Amp.}$ zu einem Wert zwischen 200 und $600 \mu\text{A}$ gemessen (elektrische Messung). Das wahrscheinlichste Ergebnis ist wohl $400 \mu\text{A}$.

Der Ionenstrom bei 1 Amp. , wobei der relative Verbrauch an elektrischer Energie am geringsten ist, betrug etwa $150 \mu\text{A}$.

Das Protonenverhältnis wurde zu 10 v. H. bestimmt.

Effekt bei 1 Amp. Bogenstrom $= 1 \cdot 60 + 8 \cdot 3 = 84$ Watt (Bogen + Glühdraht).

Ionenquelle II.

Der Wasserstoffstrom wurde zu $11 \mu\text{l}/\text{sec}$ gemessen.

Der grösste Ionenstrom $= 1000 \mu\text{A}$.

Das Protonenverhältnis $= 10 \text{ v. H.}$

Effekt bei $0,6 \text{ Amp.}$ Bogenstrom $= 0,6 \cdot 60 + 8 \cdot 3 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 8000 = 100$ Watt (Bogen + Glühdraht + Hochspannungselektrode).

Ionenquelle III.

Der Wasserstoffstrom wurde zu $7 \mu\text{l}/\text{sec}$ gemessen.

Die Ausbeute liegt zwischen 30 und $100 \mu\text{A}$ und wird auf höchstens $70 \mu\text{A}$ geschätzt.

Das Protonenverhältnis wurde nicht gemessen, sondern den Messungen von SCOTT entnommen, der den Wert 50 v. H. angibt.

Effekt bei einem Strom von 50 mA und einer Spannung von $420 \text{ Volt} = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 420 + 8 \cdot 3 = 45 \text{ Watt}$ (Entladung + Glühdraht).

HAILERS Hochspannungs-Ionenquelle.

Der Wasserstoffstrom ist in HAILERS Abhandlung leider nicht angegeben und muss deshalb aus den Dimensionen des Apparates und dem Druck im Entladungsraum berechnet werden. Diese Berechnung kann aber schon um deswillen nicht besonders zuverlässig sein, weil sie auf der Voraussetzung beruht, dass die Temperatur im Entladungsraum gleich der Zimmertemperatur ist, eine Voraussetzung, die wahrscheinlich keineswegs erfüllt ist; der hierdurch bedingte Fehler beeinträchtigt das Ergebnis aber sicher zu Gunsten HAILERS. Möglicherweise ist der richtige Wert $1,5$ bis 2 mal so gross als der berechnete. (Jedenfalls ergaben die durchgeprüften Ionenquellen Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Wasserstoffstrom dann, wenn die absolute Temperatur in der Entladung gleich 3 mal der absoluten Zimmertemperatur gesetzt wurde). Die Berechnungen des Wasserstoffstroms ergaben den Wert $95 \mu\text{l}/\text{sec}$.

Der Ionenstrom wird maximal zu $1,5 \text{ mA}$ angegeben.

Das Protonenverhältnis = 30 v. H.

Der ökonomischste Betrieb mit elektrischer Energie wurde bei 620 μA Ionenausbeute erreicht, was einem Entladungsstrom von 8,6 mA entspricht.

Effekt bei diesem Strom = $8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 30000 = 260$ Watt.

Auf der Grundlage dieser Zahlen wird berechnet welche Ionenquelle die besten Protonenausbeuten im Verhältnis zum Wasserstoffstrom und der Energie liefert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4.

	Ionen- quelle I	Ionen- quelle II	Ionen- quelle III	Hailer
$\mu\text{A}/\mu\text{l}$ pro sec	4	9	5	5
$\mu\text{A}/\text{Watt} \cdot \mu\text{l}$ pro sec	0,02	0,09	0,11	0,008
Nutzwirkung von Protonen	0,1 v. H.	0,2 v. H.	0,1 v. H.	0,1 v. H.

Erste Reihe: Maximaler Ionenstrom mal Protoneninhalt dividiert durch Wasserstoffverbrauch.

Zweite Reihe: Ionenstrom bei bester Ökonomie mal Protoneninhalt dividiert durch Wasserstoffverbrauch mal Effekt.

Dritte Reihe: Anzahl der Protonen im maximalen Ionenstrom dividiert durch die Anzahl der Wasserstoffmoleküle im Wasserstoffstrom.

Aus der Tabelle geht deutlich hervor, dass die Hochspannungs-Ionenquelle inbezug auf die Ausnutzung der Wasserstoffmenge etwas schlechter ist als die beste Niederspannungs-Ionenquelle, aber etwas besser als die schlechtesten Typen dieser Quellen. Die Unterschiede in beiden Richtungen sind jedoch nur geringfügig und, wie aus der dritten Reihe der Tabelle hervorgeht, sind wir noch weit davon entfernt, die Gesamtzahl der Moleküle in Protonen zu spalten. Wertet man dagegen die Ausbeuten im Verhältnis zum Energieverbrauch, so sind die Niederspannungs-Ionenquellen zu bevorzugen. Es muss hier betont werden,

dass sich die berechneten Zahlen auf Protonen beziehen; werden die zusammengesetzten Ionen mitgerechnet, verschieben sich die Verhältnisse noch stärker zu Gunsten der Niederspannungs-Ionenquellen, und bei vielen Anwendungen kann der ganze Ionenstrahl benutzt werden.

Schliesslich darf hier noch erwähnt werden, dass gewisse Umstände darauf hindeuten, dass HAILER seine Ergebnisse unterschätzt hat. Fig. 3 seiner Arbeit erinnert sehr an meine Fig. 4, aber er zieht aus dieser Figur den Schluss, dass die Ionenausbeute dem Minimumwert entspricht, weil der Apparat derart gebaut ist, dass von der Blenden-Elektrode herrührende sekundäre Elektronen sehr unwahrscheinlich sind. Meiner Erfahrung nach ist es aber sehr schwierig, eine solche Anlage aufzubauen, sodass die wirkliche Ausbeute wahrscheinlich zwischen den beiden Extremwerten liegt und HAILERS Werte möglicherweise verdoppelt werden müssen, um die wirklichen Ausbeuten wiederzugeben. Bezüglich der Protonenausbeute verschwindet dann der Unterschied zwischen den beiden Ionenquellentypen, es bleibt aber ein bedeutender Überschuss an zusammengesetzten Wasserstoffionen.

6. Zusammenfassung.

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist das folgende: Im Hinblick auf die Bildung von Protonenstrahlen ist es ziemlich gleichgültig, ob man die Niederspannungs- oder die Hochspannungs-Ionenquelle benutzt. Dies erklärt vielleicht auch die Tatsache, dass die Niederspannungs-Ionenquellen, für die in Amerika zuerst eine brauchbare Konstruktion erreicht wurde, auch dort am meisten verwendet werden, während die Hochspannungs-Ionenquellen fast aus-

schliesslich in Europa Verwendung gefunden haben. Vielleicht spielt hierbei auch die Verbindung dieser beiden Ionenquellen mit dem Van der Graaff- bzw. der Transformator-Hochspannungsanlage eine Rolle.

Für die ausgezeichneten Arbeitsbedingungen und für seine ständigen Ermunterungen sowie das dauernde Interesse an meiner Arbeit möchte ich Herrn Professor Dr. SVEN WERNER herzlichst danken. Auch Herrn J. C. MADSEN bin ich für viele wertvolle Diskussionen sehr dankbar.

Literatur.

Hochspannungs-Ionenquellen:

- (1) COCKCROFT and WALTON, Proc. Roy. Soc. **129**, 477 (1930).
- (2) OLIPHANT and RUTHERFORD, Proc. Roy. Soc. **141**, 259 (1933).
- (3) BOTHE und GENTNER, ZS. f. Phys. **104**, 685 (1937); **112**, 45 (1939).
- (4) C. HAILER, Wiss. Veröff. aus den Siemens Werken, **17**, 321 (1938).

Niederspannungs-Ionenquellen:

- (5) LAMAR and LUHR, Phys. Rev. **46**, 87 (1934).
- (6) LANGMUIR and JONES, Phys. Rev. **31**, 357 (1928).
- (7) TUVE, HAFSTAD and DAHL, Phys. Rev. **48**, 315 (1935).
- (8) CRANE, LAURITZEN and SOLTAN, Phys. Rev. **45**, 507 (1934).
- (9) CRANE, Phys. Rev. **52**, 11 (1937).
- (10) OLIPHANT, Proc. Roy. Soc. **127**, 373 (1930).
- (11) SMITH and SCOTT, Phys. Rev. **55**, 946 (1939).
- (12) SCOTT, Phys. Rev. **55**, 954 (1939).
- (13) TH. FINKELSTEIN, Rev. Scient. Instr. **11**, 94 (1940).
- (14) CRANE and OLESON, Phys. Rev. **55**, 1100 (1939).
- (15) TUVE, HAFSTAD and DAHL, Phys. Rev. **48**, 249 (1935).
- (16) SLACK and EHRKE, Rev. Scient. Instr. **8**, 193 (1937).
- (17) BILLING, Ann. d. Phys. **32**, 577 (1938).
- (18) ZINN, Phys. Rev. **52**, 655 (1937).
- (19) FOWLER and GIBSON, Phys. Rev. **46**, 1075 (1934).
- (20) HAWORTH, KING, ZAHN and HEYDENBURG, Rev. Scient. Instr. **8**, 486 (1937).
- (21) LAMAR, SAMSON and COMPTON, Phys. Rev. **48**, 886 (1935).
- (22) KOTECKI, ZS. f. Phys. **111**, 640 (1939).
- (23) TIMOSCHENKO, Rev. Scient. Instr. **9**, 186 (1938).
- (24) LAMAR, BUECHNER and COMPTON, Phys. Rev. **51**, 936 (1937).
- (25) LIVINGSTON, HOLLOWAY and BAKER, Rev. Scient. Instr. **10**, 63 (1939).
- (26) Mc MILLAN and SALISBURY, Phys. Rev. **56**, 836 (1939).

