51) O. Schmidt und H. Schmidt, Zeitschr. f. physik. Chem. (B) **44**, 185, 1939.
52) H. A. Stuart, Molekülstruktur, S. 79, 1934.
53) J. Thiele, Lieb. Ann. d. Chem. **306**, 87, 1899.
54) H. Eyring, A. Sherman und G. E. Kimball, Journ. Chem. Phys. **1**, 586, 1933.
55) H. Fröhlich, Elektronentheorie der Metalle, S. 257, 1936.
56) Fußnote 8, S. 133.
57) E. Wigner und H. B. Huntington, Journ. Chem. Phys. **3**, 764, 1935.
58) A. Sommerfeld und H. Welker, Ann. d. Phys. (5) **32**, 56, 1938.
59) H. Bethe, in: Handbuch der Physik, XXIV/2, S. 420, 1933.
60) W. Biltz, Naturwiss. **26**, 739, 1938.
61) O. Warburg, Ergebn. d. Enzymforschung **7**, 224, 1938.
62) W. Heitler, Handbuch der Radiologie, VI/2, 2. Aufl., S. 500.

Ziegelhausen bei Heidelberg, im Januar 1942.

(Eingegangen 15. Januar 1942)

Über ein Ionenquellensystem mit Massenmonochromator für Neutronengeneratoren

Von Manfred von Ardenne

Mit Tafel XIV

Inhalt

Die Aufgabe. Die Magnetfeldionenquelle, Prinzip, Ausführung, Messungen. Die Vakuumschleuse. Der Massenmonochromator.

Im Laboratorium des Verfassers wurde 1940/41 ein van de Graaff-Neutronengenerator der Spannung 1 Million Volt errichtet, um (in Ergänzung der übermikroskopischen Arbeiten) Untersuchungen nach der Methode der radioaktiven Indikatoren aufnehmen zu können. Für diese Anlage ist ein Ionenquellensystem entwickelt worden, dessen Bauweise und Eigenschaften von allgemeinerem Interesse sein dürften.

Die Aufgabe

Bei Auswahl und Gestaltung der Ionenquelle waren die folgenden Wünsche maßgebend:

Die Ionenquelle sollte einen möglichst kleinen Leistungsaufwand erfordern. Erwünscht war weiter ein möglichst niedriger Verbrauch an schwerem Wasserstoff für die Herstellung des benötigten Deuteronenstrahles von etwa 100 Mikroampere Stärke. Die vorstehende Forderung ist gleichbedeutend mit dem Verlangen, die Gasabgabe der Ionenquelle an den Hauptvakuumraum des Entladungsrohres klein zu halten, um in diesem ein möglichst gutes Vakuum mit einer einfachen Pumpanlage zu erreichen. Zur Verkürzung der Pumpzeiten sollte eine Vakuumschleuse für die Auswechselung des Strahlerzeugungssystemes bei Kathodenschäden vorgesehen sein. Die gleiche Ionenquelle sollte nach evtl. geringen Umbauten bei Impulsbetrieb in der Lage sein, kurzzeitig Deuteronenströme von einigen Milliampere zu liefern, um die Herstellung von Neutronenimpulsen zu ermöglichen. Diese Forderung zwingt dazu, den Deuteronenstrahl von einer relativ großen Fläche (0,3—1,0 cm²) ausgehen zu lassen, weil sonst bei den vorhandenen Möglichkeiten zur Bemessung der Beschleunigungsspannungen und Beschleunigungsstufen die starke Ionenraumladung zu große Strahldivergenzen ergeben würde. Auf die Betriebsweise mit periodischen Impulsen, für die der van de Graaff-Generator nächst dem Stoßgenerator besonders geeignet ist, wurde bei der Projektierung deswegen Wert gelegt, weil sie im Rahmen allgemeinerer Forschungen z. B. gute Dienste leisten kann für die Geschwindigkeitsanalyse von Neutronen mit thermischen und nahezu thermischen Geschwindigkeiten sowie für die Untersuchung kurzlebiger künstlich radioaktiver Substanzen und für Untersuchungen mit der Wilsonkammer. Um den van de Graaff-Generator und den Auffänger möglichst nur mit dem nutzbaren Deuteronenstrom zu belasten, sollte bereits im Ionenquellensystem eine massenspektrographische Abtrennung der Deuteronen aus dem Gemisch mit Molekülionen und Fremdgasionen erfolgen. Der Wunsch nach Vorschaltung eines Massenmonochromators vor das Hauptbeschleunigungsrohr beschränkte die Auswahl auf solche Ionenquellen, die eine besonders niedrige Geschwindigkeitsstreuung der Teilchen aufweisen.

Unter den zahlreichen bekannt gewordenen Ionenquellen[1]) kommen nur wenige Prinzipien in Frage, deren gemeinsames Kennzeichen darin besteht, daß ein Gasstrahl mit einer ionisierenden Elektronenströmung sehr hoher Stromdichte zusammentrifft. Die erforderliche hohe Stromdichte kann entweder durch Steigerung des Elektronenstromes erzwungen oder durch Herbeiführung möglichst zahlreicher Elektronenpendelungen im Ionisierungsraum erzeugt werden. Der zweitgenannte Weg hat den Vorteil, daß der Energieaufwand für die Speisung der Ionenquelle wesentlich kleiner ist.

Eine leistungsfähige Ionenquelle, die den meisten der oben genannten Forderungen entspricht, wurde vor einiger Zeit in einer amerika-

1) Vgl. z. B. die Zusammenstellungen bei H. Bomke, Erzeugung von Atom- und Ionenstrahlen, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig 1939, und H. Korsching, Neuere Ionenquellen, Physik. Zeitschr. **42** (H. 4/5), 74, 1941.

nischen Zeitschrift veröffentlicht[2]). Bei dieser Konstruktion wird ein magnetisches Hilfsfeld verwendet, dessen Kraftlinien in Richtung des entstehenden Ionenstrahles verlaufen. Bei einem anderen dem Verfasser bekannt gewordenen System[3]) ist das Magnetfeld und die Pendelbewegung der Elektronen senkrecht zur Absaugvorrichtung der Ionen orientiert. Neben diesen beiden Systemarten lassen sich aus der hochentwickelten Dezimeterwellen-Röhrentechnik noch einige weitere Elektrodenanordnungen herleiten, bei denen die Bahnlänge des Elektrons im Ionisierungsraum (durch Rollkreisbewegung und Pendelbewegung) bei Elektrodenabmessungen von wenigen Zentimetern Strecken bis zu 10 m und darüber erreicht. In dieser Richtung neuerdings unternommene Versuche des Verfassers ließen jedoch erkennen, daß nicht alle in bezug auf die resultierende Elektronenstromdichte günstigen Elektrodenanordnungen für die Ionenerzeugung vorteilhaft sind. Vielmehr sind bei der Auswahl diejenigen Anordnungen auszuscheiden, wo merkliche Ionenanteile auf der Kathode fokussiert werden und dort eine kritische Lebensdauerverkürzung bewirken.

Die Magnetfeldionenquelle

Die Versuche mit verschiedenen Pendelprinzipien und Elektrodenabmessungen führten zu einer Ionenquelle nach der von H. Heil vorgeschlagenen Bauart. Hinzugekommen ist gegenüber der Heilschen Anordnung eine elektrostatische Fokussierung der Elektronen im Beschleunigungsraum und eine Hilfselektrode zur Regelung der Strahldivergenz bei Betrieb mit dem Massenmonochromator.

a) Prinzip

Das Arbeits- und Schaltungsschema der Magnetfeldionenquelle, die in Verbindung mit der weiter unten besprochenen Vakuumschleuse und dem ebenfalls ausführlich beschriebenen Massenmonochromator die oben gestellten Forderungen gut erfüllt, ist in Fig. 1 wiedergegeben. Die Anode besteht aus einem flachen Kasten, bei dem zwei gegenüberliegende Seitenwände offen geblieben sind. Vor den beiden Öffnungen liegt je eine Drahtkathode, hinter der je ein zylindrisch gebogenes und gegenüber der Kathode negativ vorgespanntes Blech sich befindet. Durch die Formgebung dieser seitlichen, wie ein Wehneltzylinder wirkenden Elektroden werden die Fokussierungsbedingungen des von der Kathode in den Anodenkasten emittierten Elektronenbandes so verbessert, so daß schon ein Magnetfeld von 500 Gauß genügt, um einen für die meisten Zwecke ausreichend großen Pendelfaktor entstehen zu lassen. Die gleichzeitig vorgenommene Herabsetzung der Systemlänge erlaubt die Benutzung eines Luftspaltes von nur 30 mm. Der genannte Feldstärkenwert und die angegebene Luftspaltgröße haben die Anwendung eines Permanent-

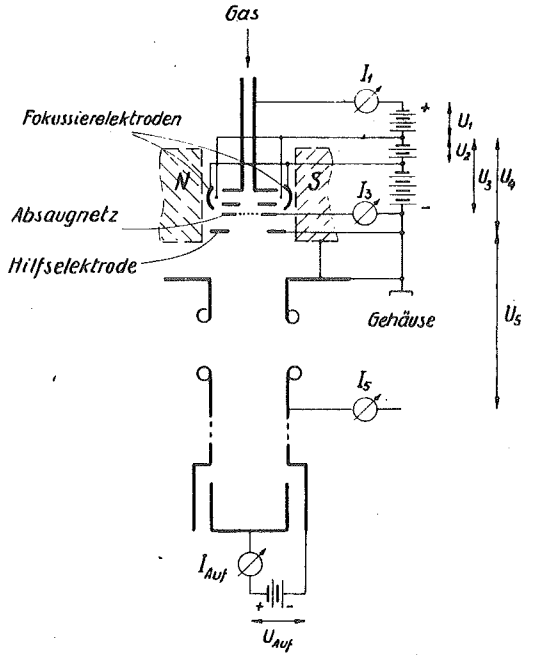

Fig. 1. Schaltschema der Magnetfeldionenquelle.

magneten zur Elektronenfokussierung ermöglicht. Die von der Kathode ausgehenden Elektronen erreichen bei den gewählten Durchgriffsverhältnissen schon bald nach Eintritt in den Anodenkasten ihre volle der Anodenspannung zugeordnete Geschwindigkeit. Erst kurz vor der gegenüberliegenden Kastenöffnung beginnt die Abbremsung, die vor der Raumladung der zweiten Kathode (falls diese geheizt wird) oder vor der zylindrischen Elektrode so stark wird, daß die Elektronen in den Kasten zurücklaufen. Magnetische und elektrostatische Fokussierung bewirken, daß die Elektronen erst nach einer großen Zahl von Pendelungen zur Anode gelangen. Zur Nachlieferung des schließlich auf die Anode fließenden Stromanteiles genügt die Ergiebigkeit einer einfachen Wolframdrahtkathode, die gegenüber Oxydkathoden den Vorzug sehr

[2]) A. T. Finkelstein, A high efficiency Jon Source. Phys. Rev. **11** (H. 5/6), 94, 1940.

[3]) H. Heil, Über eine neue Ionenquelle. Vortrag Phys. Ges. 22. 2. 42. Hamburg. Im Druck. — Der Verfasser dankt Herrn H. Heil für die liebenswürdige Überlassung des noch unveröffentlichten Manuskriptes, dessen Drucklegung dadurch verzögert wurde, daß H. Heil seit einem Jahre im Heeresdienst steht.

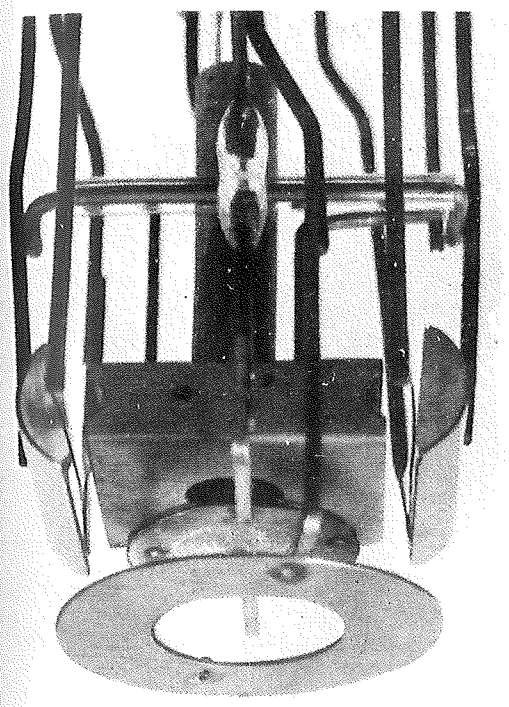

Fig. 3. Der Elektrodenaufbau der Ionenquelle mit kombinierter magnetischer und elektrostatischer Elektronenfokussierung.

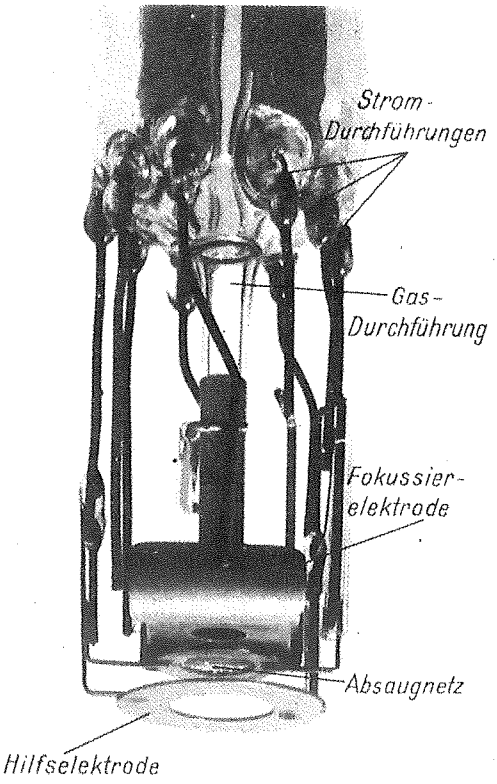

Fig. 4. Weitere Ansicht der Elektrodenanordnung.

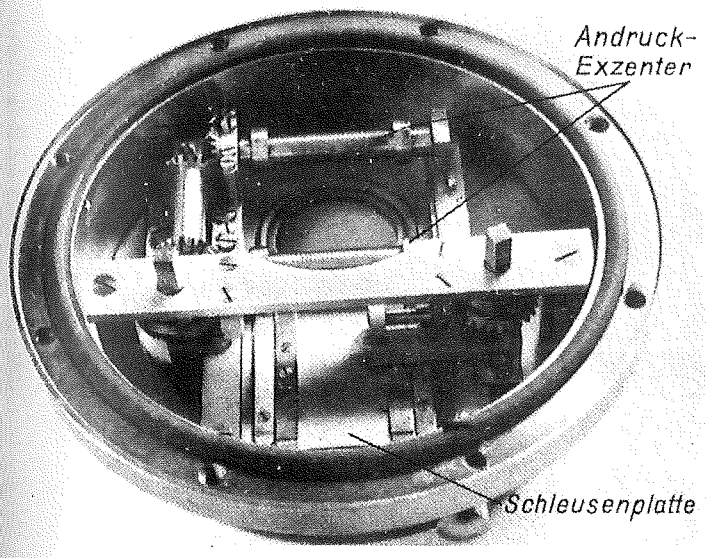

Fig. 8. Der innere Mechanismus der Schleuse.

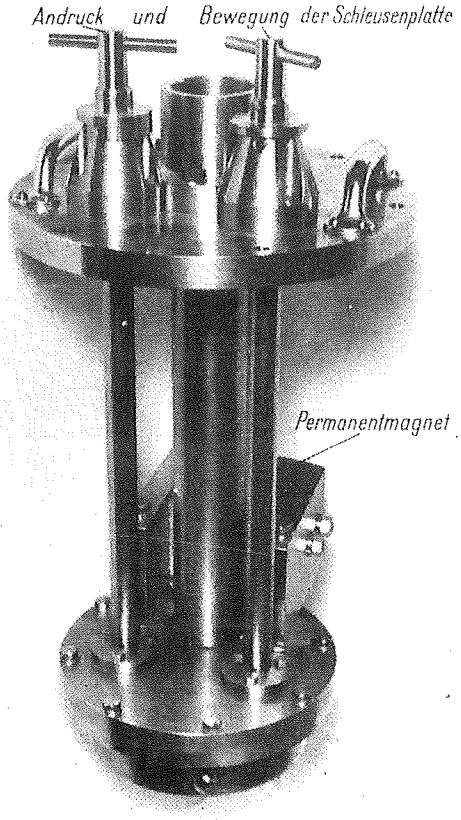

Fig. 9. Die äußere Mechanik der Magnetfeld-ionenquelle mit Vakuumschleuse.

bequemer Auswechselbarkeit hat. Für den normalen Betrieb reicht die von einer Kathode erzeugte Elektronendichte aus, so daß der zweite Faden als Reservekathode dienen kann. In der oberen Seite des Anodenkastens befindet sich ein Loch, über welches das zu ionisierende Gas eingeführt wird. Auch in der unteren Bodenfläche des Anodenkastens ist ein Loch vorgesehen, durch das die im Treffraum von Gasstrahl und Elektronenströmung gebildeten Ionen abgesaugt werden. Da die Ionen durch Elektronenstoß und in einem feldfreien Raum entstehen, besitzen sie eine außerordentlich geringe Eigengeschwindigkeit und Geschwindigkeitsstreuung (Größenordnung 0,1 Volt). Zur Absaugung dient, wie bei H. Heil (l. c.) beschrieben, ein wenige Millimeter unterhalb der Kastenöffnung angeordnetes dünndrähtiges Netz, das einige 100 Volt negativ gegenüber dem Anodenkasten vorgespannt ist. Solange die Ionenraumladung noch nicht stört, ist der Aperturwinkel α des Ionenstrahles bekanntlich gegeben durch die Wurzel aus dem Verhältnis zwischen Streuung der Anfangsgeschwindigkeiten in Volt und der Beschleunigungsspannung. Bei der erwähnten geringen Streuung der Anfangsgeschwindigkeiten genügen schon Spannungen von wenigen 100 Volt an der (feinmaschigen) Netzelektrode, um einen praktisch parallelen Ionenstrahl herauszuziehen. Da der unten beschriebene Massenmonochromator eine bestimmte Strahldivergenz verlangt, ist bei dem System der Ionenquelle noch eine weitere Hilfselektrode vorgesehen, die bei Anlegung einer variablen Spannung als Zerstreuungslinse regelbarer Brechkraft wirkt und die Strahldivergenz in weitesten Grenzen zu verändern gestattet.

b) Ausführung

Mit Rücksicht auf die Ionenoptik des Massenmonochromators und auf die Raumladungsverhältnisse bei Impulsbetrieb ist die Ionenaustrittsöffnung im Anodenkasten als rundes Loch von relativ großem Durchmesser ausgeführt. Die genauen Elektrodenabmessungen der vom Verfasser benutzten Ionenquelle sind in Fig. 2 angegeben. Bei der Bemessung des Anodenkastens wurde die Kastenhöhe mit 5 mm ausreichend groß gegenüber dem Rollkreisdurchmesser der Elektronenbahn von 1,4 mm für Elektronengeschwindigkeiten von 100 Volt und Magnetfelder von 500 Gauß gewählt. Eine größere Kastenhöhe, die den Pendelfaktor noch verbessert hätte, wurde nicht gewählt, weil bei dieser der Durchgriff der Kathodensysteme in den Ionisierungsraum kritisch anwachsen würde. Abgesehen von dem Anwachsen der Ionengeschwindigkeitsstreuung würde ein stärkerer Durchgriff der Kathodensysteme einen Teil der entstehenden Ionen dem Strahl entziehen und in Kathodennähe führen (Lebensdauerverkürzung). Die Wahl einer geringeren Kastenhöhe hat den weiteren Vorteil, daß der ganze Elektronenstrom unmittelbar vor der Austrittsöffnung des Molekularstrahles, d. h. dort wo er am dichtesten ist, vorbeifliegt.

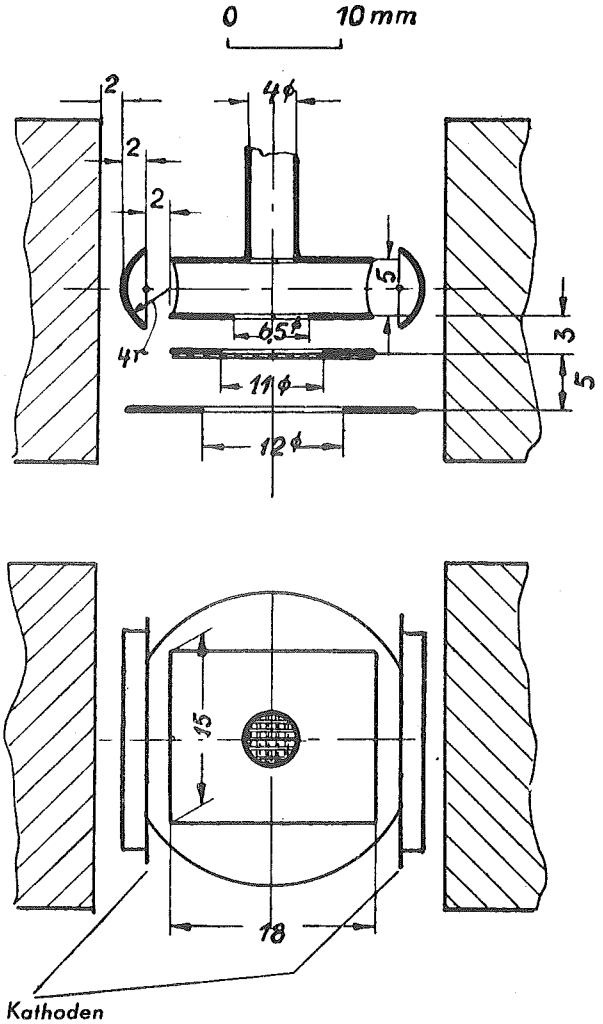

Fig. 2. Die Abmessungen der Elektrodenanordnung.

Die praktische Ausführung des gezeichneten Elektrodensystemes geht aus der Photographie Fig. 3 hervor. Weitere Einzelheiten der gleichen Elektrodenanordnung bringt die Photographie Fig. 4, die zugleich die Gasdurchführung erkennen läßt.

Den Einbau der beschriebenen Elektrodenanordnung in das Ionenquellsystem veranschaulicht die Bauzeichnung Fig. 5. Bei ihr ist der Massenmonochromator nicht mit dargestellt. Als Permanentmagnet dient ein Würfel mit

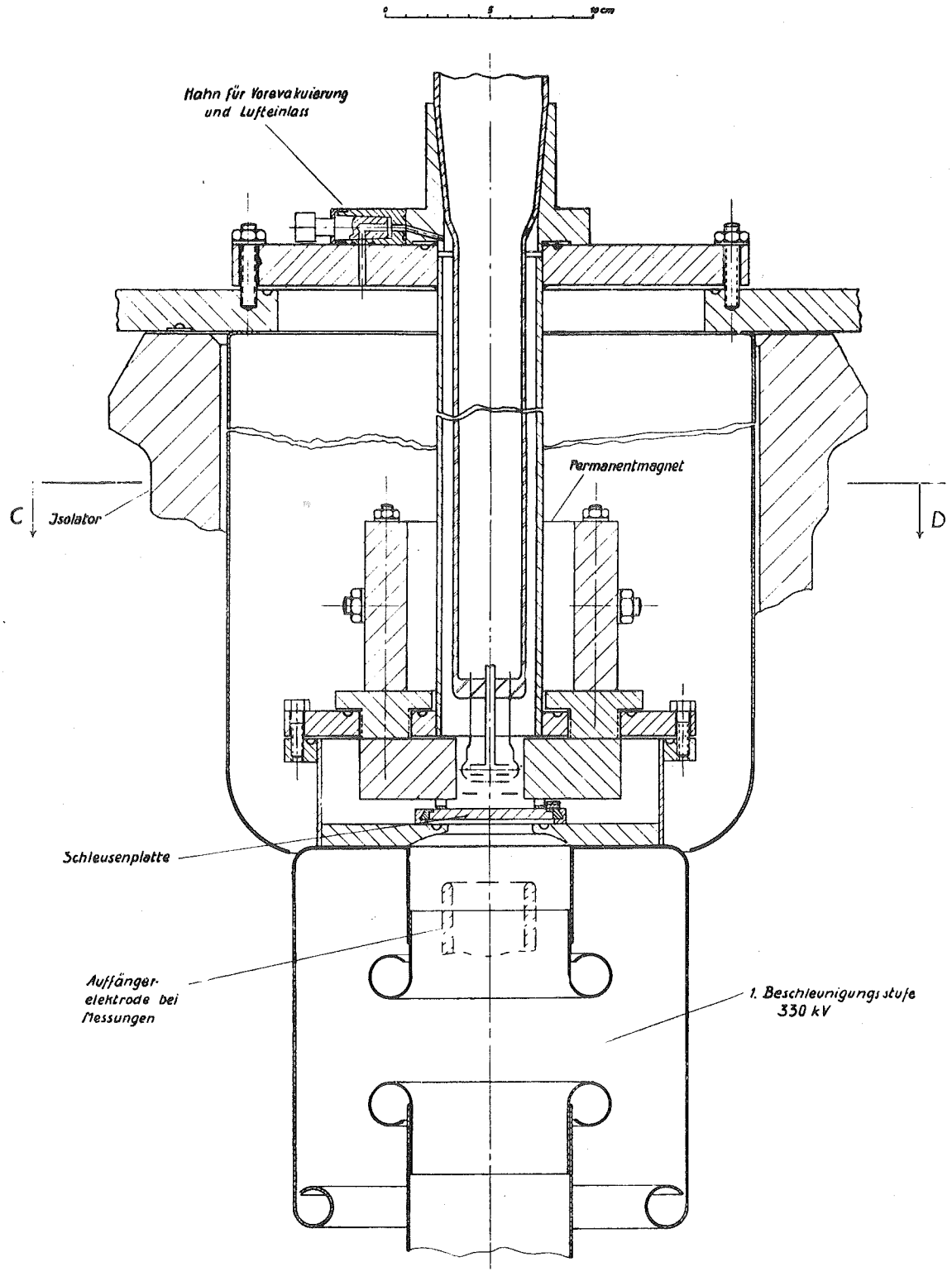

Fig. 5. Aufbau der Magnetfeldionenquelle des van de Graaff-Generators (Schnitt A/B).

8 cm Kantenlänge aus Oerstit (Deutsche Edelstahlwerke D 678/2).

Die Regelung des Druckes, unter dem das Gas in den Ionisationsraum strömt, erfolgt durch Heizstromeinstellung eines elektrisch geheizten Palladiumrohres. Die im folgenden Abschnitt mitgeteilten Messungen von Ionenströmen erfolgten mit Wasserstoffgas.

c) Messungen

Die Elektronenstromkennlinien des angegebenen Systemes zeigt Fig. 6. Bei diesen Messungen war nur eine der beiden Kathoden geheizt. Die Messungen über die Ionenstromausbeuten sind in Fig. 7 zusammengestellt.

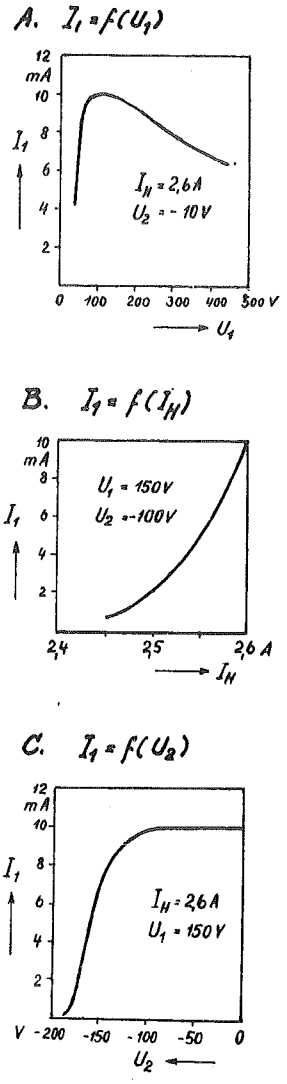

Fig. 6. Die Elektronenstromkennlinien der Magnetfeldionenquelle. $P < 10^{-4}$ Tor; $H = 500$ Gauß Wolfram-Einkristallkathode 0,15 mm ⌀.

Sie ergeben, daß trotz des verhältnismäßig schwachen Magnetfeldes, trotz der Verwendung nur eines Kathodenfadens und trotz Anwendung von Beschleunigungs- und Absaugspannungen von nur wenigen 100 Volt ein Ionenstrom von 0,5 mA erreicht wird. Die Ausnutzung des Gasstrahles ist infolge des Pendelprinzips so gut, daß der Wasserstoffverbrauch zur Herstellung eines Wasserstoffionenstrahles von beispielsweise 100 Mikroampere in der Größenordnung von 2 mg pro Stunde liegt. Der Verbrauch an schwerem Waserstoff ist infolge der mit der Massenzahl eintretenden Verbesserung der Ionen-

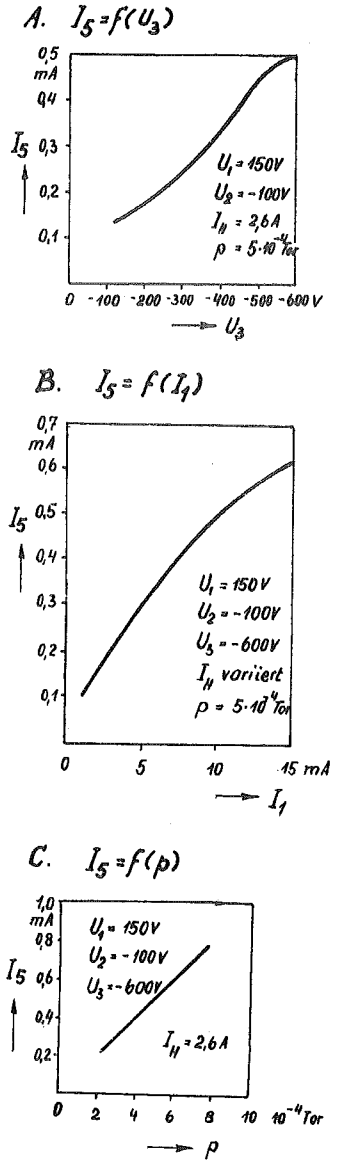

Fig. 7. Ionenstromausbeuten bei Betrieb mit Dauermagnet ($H = 500$ Gauß).

ausbeute sogar noch geringer[4]). Die zugeführten Gasströme sind so klein, daß schon Diffusionspumpen normaler Größe (z. B. Leybold Mod. E) genügen, um im Hauptvakuumraum des Entladungsrohres eine gute Evakuierung zu bewirken.

Aus den Strom- und Spannungswerten in Fig. 6 und 7 geht hervor, daß wenige kleine Trockenbatterien für die Speisung der Beschleunigungsstufen der Ionenquelle ausreichen. Der Gesamtleistungsverbrauch liegt hier in der Größenordnung von 1 Watt. Auch der Heizstromverbrauch beträgt nur wenige Watt, so daß eine kleine Akkumulatorenbatterie zur Speisung genügt. Die seitliche Ablenkung des Ionenstrahles durch das Magnetfeld von 500 Gauß liegt unter 1° und kann daher vernachlässigt werden. Für Betrieb mit stärkeren Magnetfeldern ist eine Verkantung und Parallelverschiebung der Ionenquelle möglich, um die auch dann nur geringe Vorablenkung auszugleichen.

Aus Untersuchungen an Dezimeterwellenröhren mit Elektronenpendelung läßt sich abschätzen, daß die durch die Pendelelektronen bedingte Stromdichte im Kasteninnern z. B. durch Steigerung des Magnetfeldes von 500 auf 5000 Gauß unter den hier benutzten Verhältnissen noch etwa vervierfacht werden kann. Messungen von H. Heil (l. c.) an seinem Elektrodensystem zeigen auch praktisch diese Zunahme der Ausbeute mit der Magnetfeldstärke. Durch Übergang vom Dauermagnet zum Elektromagnet läßt sich daher die Ionenstromausbeute der beschriebenen Ionenquelle leicht noch auf 2 mA steigern. Eine weitere Zunahme ist durch Heizung beider Kathoden und Verwendung mehrerer paralleler Kathodendrähte möglich. Wir sehen, daß die Ionenquelle dann etwa 2 Größenordnungen höhere Ströme liefert als einem normalen van de Graaff-Generator ohne Anwendung von Hochdruck und mehrerer Bänder entnommen werden können. Es liegt daher nahe, durch Einführung eines Betriebes mit periodischen Impulsen die Ionenquelle voll auszunutzen, ohne dabei die zeitliche Durchschnittsleistung des van de Graaff-Generators herabzusetzen. Bei dieser Betriebsweise ist die Frage der günstigsten Dauer der einzelnen Impulse zu prüfen.

Die untere Grenze der Zeitdauer eines Ionenimpulses ist durch die Ionenlaufzeit innerhalb des Systems der Ionenquelle gegeben. Diese ist bei den verwendeten Dimensionen und Absaugspannungen etwa von der Größenordnung einiger 10^{-5} sec. Für Arbeiten mit thermischen Neutronen hat es aber auch keinen Sinn, die Impulsdauer der Quelle kürzer zu wählen, da die Streuung der individuellen Verlangsamungsvorgänge für verschiedene Neutronen in Paraffin naturgemäß von der Größenordnung der Lebensdauer des thermischen Neutrons selbst wird. Der Verlangsamungsprozeß und die Neutronenlaufzeit ziehen nämlich selbst bei unendlich kurzer Dauer des Ionenimpulses den Neutronenimpuls auf eine Zeit der Größenordnung 10^{-4} sec auseinander. Es ist daher rationell, die Dauer des Impulses von dieser Größenordnung zu wählen. Der zweckmäßigste Zeitabstand zwischen den einzelnen periodisch wiederholten Impulsen richtet sich weitgehend nach der vorliegenden Forschungsaufgabe. Angaben über die Steuerung von Impulsdauer und Impulsabstand erübrigen sich, da diese unmittelbar aus der Technik der Kippschwingungsgeräte von Elektronenoszillographen im Zusammenhang mit den Kennlinien der Fig. 6 folgen.

Die Lebensdauer der Kathode hängt von der Evakuierung (Fremdgase!) und von der entnommenen Ionenstromstärke ab. Bei einem Gesamtstrom von 200 Mikroampere kann mit einer Betriebszeit von 50—100 Stunden gerechnet werden. Um nicht bei jedem Kathodenwechsel das ganze Entladungsrohr mit seiner großen Oberfläche unter Luft setzen zu müssen, ist die Ionenquelle mit einer Vakuumschleuse kombiniert.

Die Vakuumschleuse

Schon in der Zeichnung Fig. 5 ist die Schleusenplatte zur Abtrennung der Ionenquelle zum Hauptvakuumraum mitgezeichnet. Den inneren Mechanismus zur Bewegung und zum Ausdruck der Schleusenplatte zeigt die Photographie Fig. 8. Die beiden Antriebe werden von außen durch die in Fig. 9 sichtbaren Hähne gesteuert. Weitere Einzelheiten über die Konstruktion des Schleusenantriebes vermittelt die Zeichnung Fig. 10. Fig. 11 bringt ein weiteres Schema zum besseren Verständnis der Schleuse. Durch einen nicht in allen Zeichnungen enthaltenen Hahn kann der Vakuumraum der Ionenquelle zum Zwecke der Vorevakuierung mit dem Hauptvakuumraum verbunden werden. Der gleiche Hahn dient auch zum Lufteinlaß beim Kathodenwechsel. Durch die Vakuumschleuse wird bei jedem Kathodenwechsel eine Pumpzeit von einigen Stunden gespart, die notwendig ist, um eine ausreichende Entgasung des Hauptvakuumraumes zu bewirken.

4) Gegenüber Kanalstrahlionenquellen beträgt der Deuteriumverbrauch nur etwa 1 Proz. Vgl. z. B. die Angaben bei H. Reddemann, Untersuchungen mit schnellen Neutronen. Zeitschr. f. Phys. **110** (H. 5/6), 373, 1938.

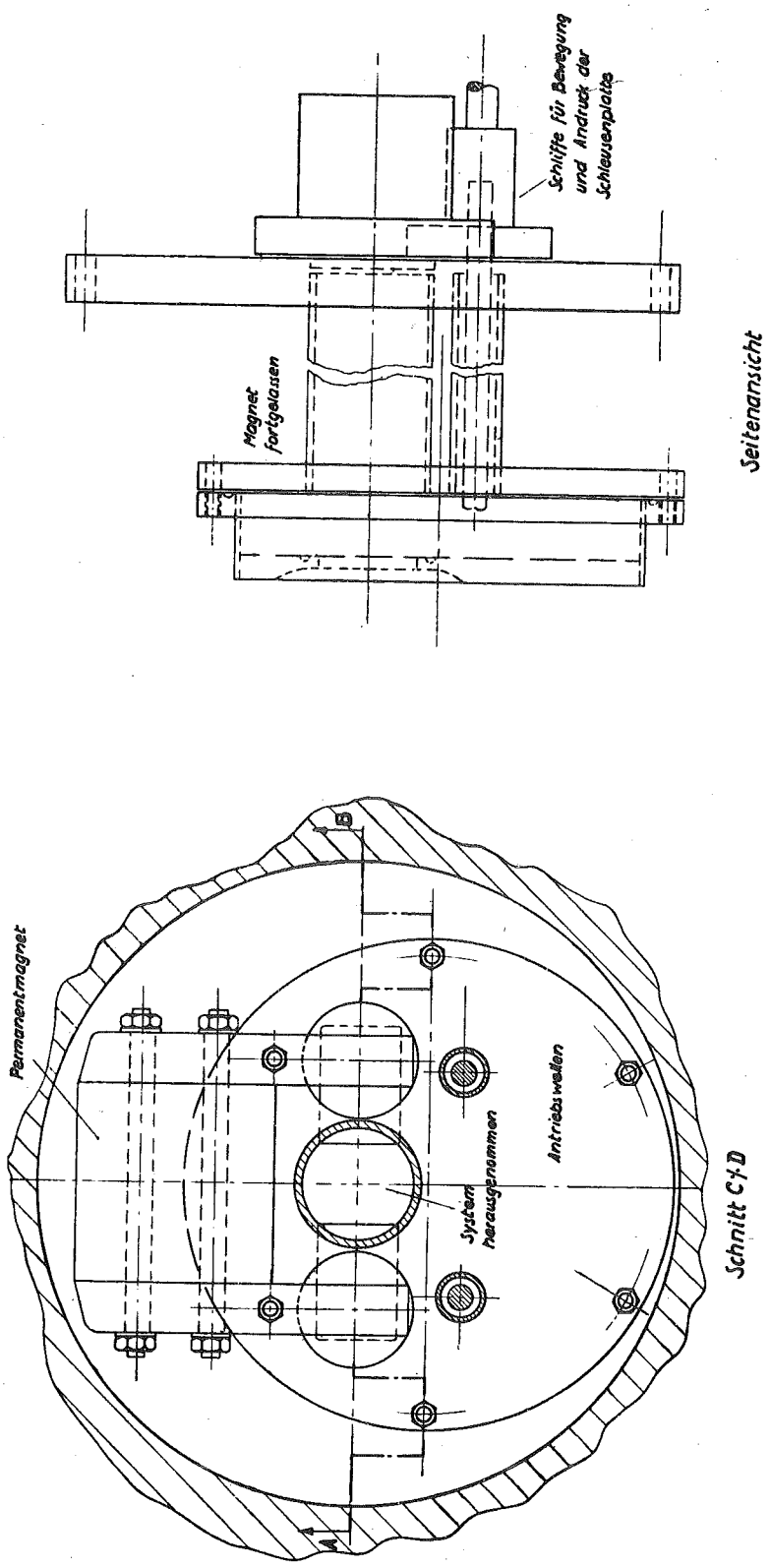

Fig. 10. Konstruktion des Schleusenantriebes.

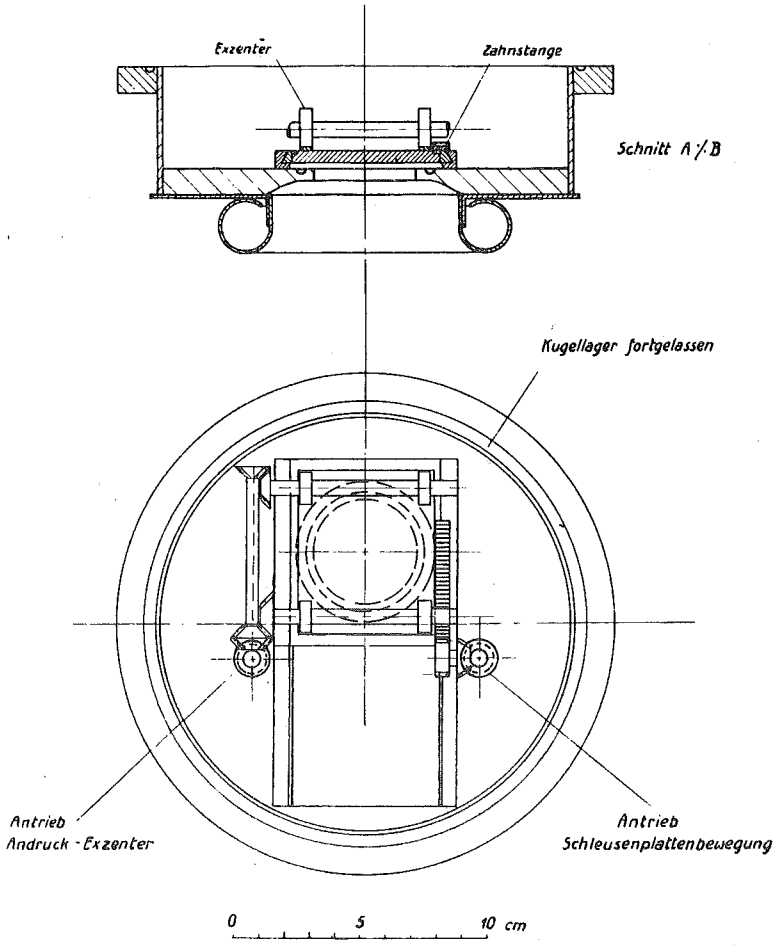

Fig. 11. Konstruktionsschema der Schleuse.

Der Massenmonochromator

Bei der benutzten Ionenerzeugungsart ist damit zu rechnen, daß nur etwa 50 Proz. des Ionenstromes aus Deuteronen besteht. Der Rest wird durch Molekülionen und durch Fremdgasionen gebildet. Damit würde stets die Hälfte der an sich bekanntlich geringen von einer van de Graaff-Anlage zur Verfügung gestellten Strommenge verloren gehen. Dieser Nachteil läßt sich vermeiden, wenn bereits vor Eintritt der Ionen in die von der van de Graaff-Anlage gespeisten Beschleunigungsstufen die unerwünschten schwereren Ionen ausgeschaltet werden. Für diese Abtrennung ist schon Anfang 1940 bei der Projektierung der Anlage innerhalb der Hochspannungselektrode mit einem kleinsten Durchmesser von 1,6 m ein ausreichender Raum vorgesehen worden. Zur Abtrennung des Deuteronenanteiles eignen sich bekanntlich vereinfachte massenspektrometrische Anordnungen, z. B. mit Knickung des Strahlenganges durch ein Magnetfeld[5]). Für die Anlage des Verfassers wurde die in Fig. 12 gezeichnete Gradsichtanordnung, die in ionenoptischer Hinsicht infolge ihrer Rotationssymmetrie große Vorteile besitzt, ausgewählt. Der dargestellte Massenmonochromator beruht darauf, daß die Ionenquelle mit Hilfe einer magnetischen Linse großer Öffnung über der Bohrung einer Zwischenblende abgebildet wird. Die Brechkraft der magnetischen Linse ist so eingestellt, daß für die benutzte Ionengeschwindigkeit (< 1000 Volt) für den Deuteronenanteil eine Abbildung im Maßstabe 1 : 1 erfolgt. Dann liegt die Bildweite für die Deuteronenmolekülionen gerade im Unendlichen. Die eintretende Anreicherung ergibt sich bei gleichmäßiger Beaufschlagung der Blenden einfach aus dem Flächenverhältnis der Zwischenbildblende zur Magnetlinsenblende. Der Deuteronenanteil

5) Vgl. N. Holl, J. Holtsmark und R. Tangen, Die γ-Strahlung der leichten Elemente bei Protonenbestrahlung. Zeitschr. f. Phys. **118**, (H. 1/2), 48, 1941.

von 50 Proz. steigt beispielsweise auf 90 Proz. des Gesamtstrahles an, wenn der Durchmesser der Zwischenbildblende (und des Anfangsquerschnittes der Ionenquelle) 6,5 mm und der Durchmesser der Magnetlinsenblende 20 mm gewählt wird. Damit der Öffnungsfehler der Magnetlinse ausreichend klein bleibt, muß der innere freie Durchmesser (Di in Fig. 12) etwa doppelt so groß wie der Durchmesser der Linsenblende (D l) gewählt werden. Für Deuteronen mit Geschwindigkeiten nicht über 1000 Volt gelingt es bei diesen Linsenabmessungen Brennweiten der erforderlichen Größe von etwa 10 cm mit Amperewindungszahlen von weniger als 5000 zu erreichen. Der hierfür bei mäßigem Wickelraum erforderliche Spulenstrom kann einer Autoakkumulatorenbatterie entnommen werden.

Der Gradsichtmonochromator nach Fig. 12 arbeitet dann am günstigsten, wenn der von der Ionenquelle ausgehende Ionenstrahl gerade so divergiert, daß er durch die Magnetlinsenblende begrenzt wird. Zur Regelung des Divergenzwinkels dient die schon oben erwähnte Hilfselektrode. Fig. 13 bringt eine Messung über die Abhängigkeit des Divergenzwinkels von der Hilfselektrodenspannung.

Ein Konstruktionsschema des Gradsichtmassenmonochromators ist in Fig. 14 wiedergegeben. Der Monochromator besteht aus einem Zwischenteil, das einfach auf den oberen Flansch in Fig. 5 aufgesetzt werden kann. Die genaue Zentrierung des Monochromators erfolgt durch die oben in Fig. 14 dargestellten Verstellungen zur Parallelverschiebung und Verkantung der Ionenquelle. Der bei Betrieb des Monochromators bestehende Divergenzwinkel bzw. Konvergenzwinkel des Ionenstrahles beträgt etwa 6°. Die erste Hauptbeschleunigungsstufe (mit einem Potentialanstieg von ungefähr 300 kV) befindet sich nur wenige Zentimeter unterhalb des Monochromators, d. h. an einer Stelle in dem Strahlengang, wo noch keine wesentliche Zunahme des Strahlquerschnittes gegenüber dem Querschnitt der Zwischenblendenöffnung eingetreten ist. Die Rotationssymmetrie des Massenmonochromators, die in ihm durch verschiedene Blenden erzeugte scharfe Begrenzung der

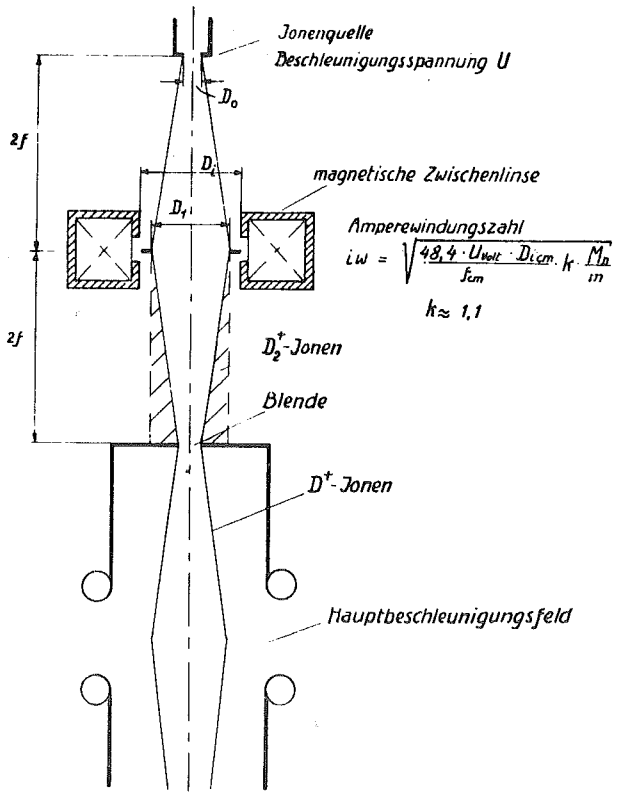

Fig. 12. Abtrennung eines Deuteronenstrahles aus einem Atom- und Molekülionenstrahl vor der Hauptbeschleunigung.

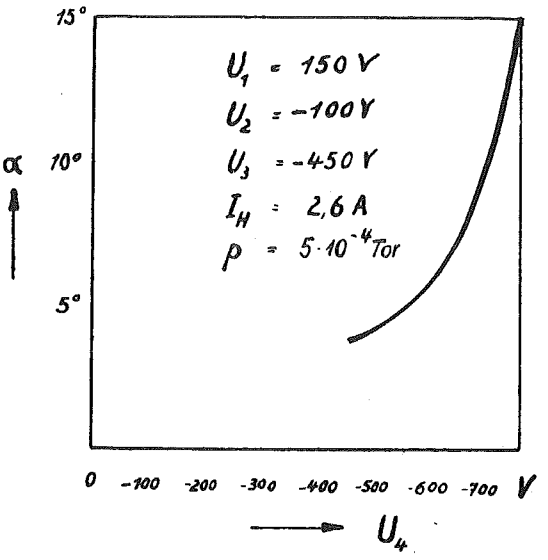

Fig. 13. Divergenzwinkel der Ionenstrahlung und Hilfselektrodenspannung.

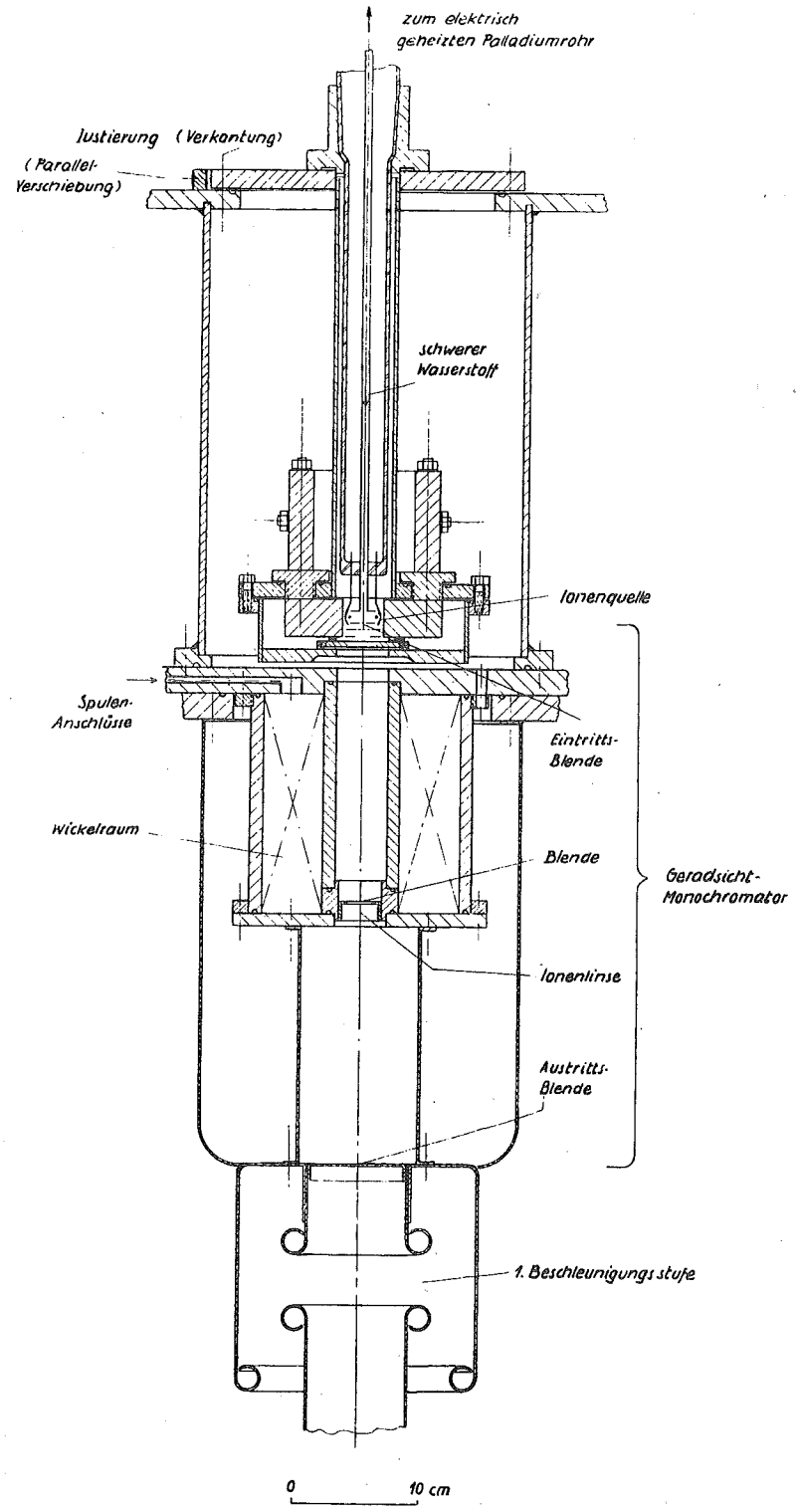

Fig. 14. Magnetfeldionenquelle mit Massenmonochromator.

Ionenstrahlung, sowie die beim Passieren der Hauptbeschleunigungsstufen eintretende Geschwindigkeitserhöhung und Fokussierung des Ionenstrahles bewirken, daß der Ionenstrom ungeschwächt, d. h. ohne die Hauptbeschleunigungselektroden der van de Graaff-Anlage zu streifen, zum Auffänger gelangt.

Berlin-Lichterfelde, im Januar 1942.

(Eingegangen 24. Januar 1942)

Absorptionsmessungen an biologischen Flüssigkeiten (Blut) im Bereich von 50—100 cm Wellenlänge[1])

Von Gerhard Gsell

Mitteilung aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Biophysik, Frankfurt a. M. (Direktor: Prof. Dr. B. Rajewsky)

1. Einleitung

Die Aufklärung des Mechanismus der Wirkung ultrakurzer Wellen auf das lebende Gewebe durch die biophysikalische Forschung hat in den letzten Jahren eine Reihe bemerkenswerter Ergebnisse gebracht. Durch systematische experimentelle Untersuchungen [vgl. Rajewsky (1)] gelang der Nachweis, daß in der Mikrostruktur des Gewebes die Strom- und damit auch Energieverteilung sehr wesentliche Unterschiede aufweist gegenüber den Verhältnissen bei Durchflutung mit normalen Hochfrequenzströmen (Diathermie). Diese Unterschiede sind in erster Linie bedingt durch den Umstand, daß die elektrisch schlecht leitenden Formbestandteile des Zellgewebes bei sehr hohen Frequenzen (sehr kurzen Wellen) in zunehmendem Maße eine kapazitive Stromleitung zeigen, als deren Folge eine Miterfassung innerer, durch die genannten schlecht leitenden Formbestandteile (Membranen, Hüllen) abgetrennter Zellbestandteile durch den Strom eintritt. Nach außen hin äußert sich diese Verschiebung der Strom- und Energieverteilung in einer bei manchen Zellgeweben sehr beträchtlichen Zunahme der Leitfähigkeit für Ultrakurzwellen. Diese Zunahme der Leitfähigkeit geht einher mit einer Abnahme der Dielektrizitätskonstanten. In dem Maße nämlich, wie die genannten schlecht leitenden Formelemente kapazitiv durchlässiger werden, verschwinden die an ihnen bei mittlerer Hochfrequenz und Niederfrequenz sich ausbildenden Grenzflächenladungen. Das aber bedeutet ein Absinken der DK. Durch systematische Untersuchung eines speziellen biologischen Systems, des Blutes, gelang es, die quantitative Auswertung der oben skizzierten Gesetzmäßigkeiten so weit zu treiben, daß eine vollständige Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment erzielt wurde (Fricke, Curtis, Schaefer, Dänzer, Graul, Rajewsky). Das Blut nämlich stellt in seinem Aufbau aus in der Blutflüssigkeit suspendierten Blutkörperchen ein verhältnismäßig einfaches und in seinen geometrischen Abmessungen durch mikroskopische Beobachtung direkt erfaßbares System dar. Da man außerdem durch Zentrifugieren die einzelnen Komponenten dieses Systems voneinander trennen und — durch Hämolyse (Zerstörung der Körperchenmembran) sogar das Körperchen-innere — in ihren elektrischen Konstanten einzeln der Messung zugänglich machen kann, war hier die genannte Möglichkeit gegeben, die direkte experimentelle Ermittlung der Wellenlängenabhängigkeit der Leitfähigkeit und der DK in vollem Umfange durch die Berechnung aus den Konstanten der Komponenten nachzuprüfen.

Die genannten Messungen hatten, wie gesagt, den vollen Dispersionsbereich der Leitfähigkeit des Blutes sichergestellt und waren darüber hinaus sogar um mehrere Frequenzoktaven in den Bereich der Konstanz des Ultrahochfrequenzwertes der Leitfähigkeit vorgedrungen. Der Messung entzogen blieb jedoch der Bereich der Dezimeterwellen, da hier die Anwendung der im Meterwellenbereich noch zuverlässig arbeitenden Meßmethoden (Schaefer) versagte. Indessen kommt diesem Wellenlängenbereich ein erhöhtes Interesse zu. Im Dezimetergebiet muß sich erwartungsgemäß der Einfluß der Dipolleitfähigkeit bei einer Reihe von biologischen Körpern auswirken, so daß dieser Bereich als Übergangsgebiet für die verschiedenen Leitungsmechanismen zu betrachten ist (Rajewsky). Messungen an biologischen Substanzen im Dezimeterwellenbereich liegen zwar schon vor (Kebbel, Wachter), doch sind diese mit gedämpften Schwingungen durchgeführt und arbeiten nach quasi-optischen Methoden. Dies bedingt jedoch einen grundsätzlichen Nachteil bezüglich der Meßgenauigkeit, da bei den Dezimeterwellen die Hauptvoraussetzung der Anwendbarkeit der optischen Gesetze, daß nämlich die Wellenlänge klein sein muß im Verhältnis zu den verwandten Linsen, Spiegeln und Strahlenbündelquerschnitten, nur sehr grob angenähert erfüllt ist. Es erschien darum wünschenswert, die bewährten, sehr genau arbeitenden elektrischen Meßmethoden mit Paralleldrahtsystemen

1) D 30 (gekürzt).