

## Die Ionenbündel-Fokussierung in einer 200 kV-Beschleunigungsanlage

Von D. Kamke und H. Seguin

Physikalisches Institut der Universität Marburg/Lahn  
(Z. Naturforschg. 10a, 1036–1038 [1955]; eingeg. am 28. November 1955)

In Publikationen über den Aufbau und die Fokussierungseigenschaften von Nachbeschleunigungsanlagen findet man im allgemeinen nur experimentelle Beobachtungen, die nicht mit rechnerisch gewonnenen Angaben verglichen werden<sup>1</sup>. Zudem handelt es sich meist um die Untersuchung der Eigenschaften nur der ersten (und wichtigsten) Linse des Beschleunigungsrohrs<sup>2</sup>. Wir haben Gelegenheit gehabt, an einer kleinen 200 kV-Anlage einen solchen erwünschten Vergleich zwischen rechnerisch und experimentell gewonnenen Daten des Bündels am Ort des Targets durchzuführen. Das heißt wir konnten die Fokussierungseigenschaften der Beschleunigungsstrecke als Ganzes prüfen. Da die Ergebnisse dieser Untersuchung auch für größere Anlagen von Interesse sein dürften, soll hier kurz darüber berichtet werden.

Im Marburger Institut war für andere Aufgaben eine einstufige 200 kV-Kaskadenanlage aufgestellt worden. Die hier ausschließlich interessierende Anordnung der Beschleunigungselektroden geht aus Abb. 1 hervor. Sämtliche Linsenrohre sind aus Stahl und an den Enden mit polierten und vernickelten Ringen versehen<sup>3</sup>. Bei 200 kV Gesamtspannung lagen die Linsen auf den in Abb. 1 angeschriebenen Spannungen; die Spannungsverhältnisse waren auch bei anderer Gesamtspannung dieselben (1000 MOhm-Potentiometer). Der Ioneneintrittskanal im obersten Rohr hatte 2 mm Durchmesser und 3 mm Länge. Über ihm befindet sich die Ionquelle (eine Kanalstrahlentladung<sup>4</sup>, welche später gegen einen anderen Typ ausgetauscht wird). Kurz unter dem Kanal ist ein Flachschieberventil eingebaut, dessen Teller einen kleinen Auffänger enthält, so daß bei nicht ganz verschlossenem Ventil die Ionquelle durch seitliches Verschieben auf maximale Stromabgabe in das Beschleunigungsrohr einjustiert werden kann. Das unterste Linsenrohr (0 kV) ragte etwa 17 cm in ein weites Stahlrohr von 25 cm Durchmesser hinein, die oberen Rohre waren in einer Säule aus drei Isolatoren von 180 mm Durchmesser montiert<sup>5</sup>. In dem

<sup>1</sup> Z. B. W. W. Buechner, E. S. Lamar u. R. J. van de Graaff, J. Appl. Phys. 12, 141 [1941]; J. D. Craggs, J. Appl. Phys. 13, 772 [1942]; E. Bleuler u. W. Zünti, Helv. Phys. Acta 19, 137 [1946]. — Auch in zusammenfassenden Darstellungen über Kaskaden- oder van de Graaff-Beschleuniger finden sich nur wenige Angaben über die Ionenbündelbildung: R. L. Fortescue, Progr. Nucl. Phys. 1, 21 [1950]; J. D. Craggs u. J. M. Meek, High Voltage Laboratory Technique, Butterworth Sci. Publ., London 1954; A. Bouwiers, Elektrische Höchstspannungen, Springer, Berlin 1939. — Nur M. M. Elkind (Rev. Sci. Instr. 24, 129 [1953]) untersuchte rechnerisch das Gesamtsystem, ohne daß der Durchmesser des Ionenbündels mit den Rechnungen verglichen wurde.

<sup>2</sup> Z. B. E. Thomas, Bull. Assoc. Ing. Art. Genie 31, 31 [1953], W. Dähnick, H. Neuert u. U. Timm,

unteren, weiten Stahlrohr, an welches seitlich die Pumpanlage angeschlossen war, konnte durch einen kurzen Ansatzstutzen ein von außen horizontal verschiebbarer Auffänger (einschließlich der notwendigen Sekundärelektronenblenden) eingesetzt werden. Dieses Auffängersystem hatte 20 cm Abstand vom unteren Ende des Rohres R<sub>4</sub> (Abb. 1).

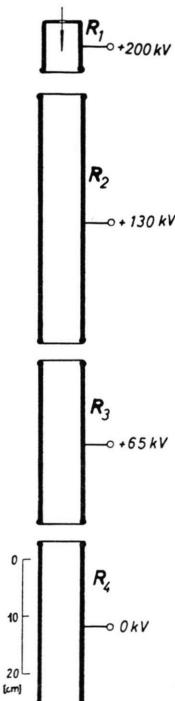


Abb. 1. Maßstabsgerechte, schematische Zeichnung der Beschleunigungsstrecke. Daten der Rohre (Durchmesser × Länge, alles in mm): R<sub>1</sub> 60×85, R<sub>2</sub> 70×420, R<sub>3</sub> 70×290, R<sub>4</sub> 70×290. Freier Abstand der Rohre voneinander je 30 mm.

Der Ionenbündelverlauf in einer solchen Drei-Linsen-Anordnung (die Linsen sind durch genügend lange, praktisch feldfreie Stücke getrennt, so daß sie wirklich als einzelne Immersionslinsen betrachtet werden können) ist grundsätzlich berechenbar<sup>6</sup>. Am besten geeignet, um schnell einen Überblick über den Bündelverlauf zu erhalten, erwies sich aber das kürzlich in dieser Zeitschrift von Timm<sup>7</sup> vorgeschlagene Verfahren, welches auf einer Erweiterung der Elkindschen

Z. Naturforsch. 10a, 603 [1955] (Beeinflussung der Gesamtfookusierung durch die der ersten Linse).

<sup>3</sup> Polierte Aluminium-Ringe bewährten sich nicht, da bei Durchschlägen in großen Mengen Aluminium verdampft und an den Elektroden Krater entstehen, welche zu weiteren Durchschlägen führen. Bei den Durchschlägen wird offenbar die Oxydhaut des Aluminiums aufgerissen und dadurch eine starke Zersetzung des Materials ermöglicht.

<sup>4</sup> Entladungsrohr wie bei K. Deutscher u. D. Kamke, Z. Phys. 135, 380 [1953].

<sup>5</sup> Die Isolatoren wurden uns von der Rosenthal Isolatoren G.m.b.H., Selb, freundlicherweise überlassen, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

<sup>6</sup> Z. B. W. Glaser, Grundlagen der Elektronenoptik, Springer Wien, 1952; O. Klemperer, Electron Optics, 2. Aufl., Univ. Press Cambridge, 1953.

<sup>7</sup> U. Timm, Z. Naturforsch. 10a, 593 [1955].



Überlegungen beruht<sup>1</sup>. Man teilt die Beschleunigungsstrecke ein in Gebiete „mit Feld“ und solche „ohne Feld“. In den Gebieten „mit Feld“, welche die eigentlichen Linsen darstellen, benützt man ein homogenes elektrisches Feld<sup>8</sup>; sowohl in diesen wie in den feldfreien Stücken sind Radiokoordinaten und Bahnneigung eines Ions ( $r$  und  $dr/dz$ ) am Eingang und Ausgang der Felder durch lineare Gleichungen miteinander verknüpft. Man berechnet so für das hier vorliegende System, daß in Höhe des Auffängers die Bündeldurchmesser die in Abb. 2 aufgezeichneten Werte haben. Sie hängen also bei dem von uns fest eingestellten Spannungsverhältnis in charakteristischer Weise von der Ionen-Einschießenergie und von der Gesamt-Beschleunigungsspannung ab. Bei den Rechnungen wurde angenommen, daß das Ionenbündel 30 mm jenseits des Kanals mit einem ganzen Öffnungswinkel von  $1^\circ$  startet<sup>9</sup>. Es sei bemerkt, daß besonders die Kenntnis dieses Öffnungswinkels ein wichtiges Datum für die Rechnungen ist.

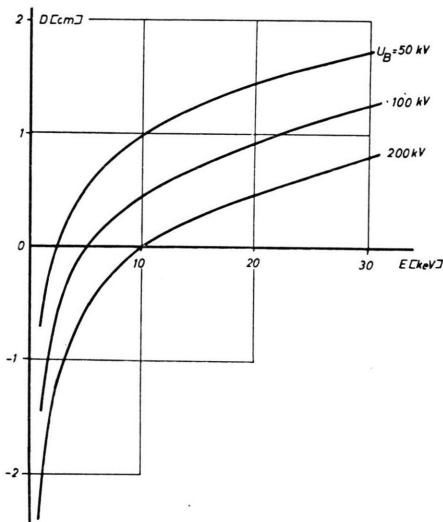


Abb. 2. Berechnete Bündeldurchmesser  $D$  am Ort des Auffängers in Abhängigkeit von der Ionen-Einschießenergie  $E$  bei verschiedenen Gesamt-Beschleunigungsspannungen  $U_B$ . Negative Werte von  $D$  bedeuten, daß rechnerisch vor dem Auffänger ein Überkreuzungspunkt des Bündels auftritt. Rechnung für homozentrisches Bündel, Öffnungswinkel  $1^\circ$ , Quellpunkt 30 mm über dem Ionen-Eintrittskanal.

Insbesondere ergeben sich also für eine Ionen-Einschießenergie von 5 keV und 13 keV in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung die gestrichelt ge-

<sup>8</sup> Wie Rechnung und Experiment zeigen, verläuft das ganze Ionenbündel in einer Umgebung von wenigen mm um die Achse. Daher kann die Krümmung der Äquipotentialflächen vernachlässigt werden. Auch sind die Ionen nach Passieren der ersten Linse genügend schnell, um auch die Raumladungskräfte vernachlässigen zu können. Sie würden zu einer Vergrößerung des berechneten Bündeldurchmessers führen.

zeichneten Kurven der Abb. 3, und diese sollten mit experimentellen Daten verglichen werden (der Bündeldurchmesser „Null“ kann natürlich experimentell nicht verifiziert werden). Zwar liefert die Kanalstrahlentladung nicht Ionen einer definierten scharfen Energie. Aber es sollte möglich sein, charakteristische Züge des Bündeldurchmesserverlaufs zu erkennen, wenn die Ionenquelle einmal mit 26 kV und einmal mit 10 kV betrieben wird. Die radialen Ionenstromverteilungskurven wurden daher mit dem verschiebbaren Auffänger für diese Betriebszustände gemessen. Aus ihnen wurden die Halbwertsdurchmesser der Verteilungskurven entnommen und ebenfalls in Abb. 3 eingetragen (ausgezogene Kurven). — Bei diesen Messungen konnte deutlich verfolgt werden, daß das Ionenstrommaximum bei ansteigender Beschleunigungsspannung sich um etwa 5 mm seitlich verschob, und daß die Verteilungskurven etwas unsymmetrisch werden, wenn die Justierung der Ionenquelle nicht sorgfältig genug ausgeführt ist. Die Seitenverschiebung kann durch Verbesserung der Gesamtjustierung der Beschleunigungsstrecke vermindert werden.

Aus Abb. 3 erkennt man, daß das Tamm'sche Verfahren zu einer befriedigenden Übereinstimmung mit dem Experiment führt, wenn man annimmt, daß der Schwerpunkt des Ionen-Energiespektrums etwa bei der halben Betriebsspannung der Ionenquelle liegt<sup>10</sup>. Insbesondere ergeben sich die Gesamtverläufe in befriedigender Übereinstimmung. Diese Übereinstimmung soll trotzdem nur als qualitativ befriedigend bezeichnet

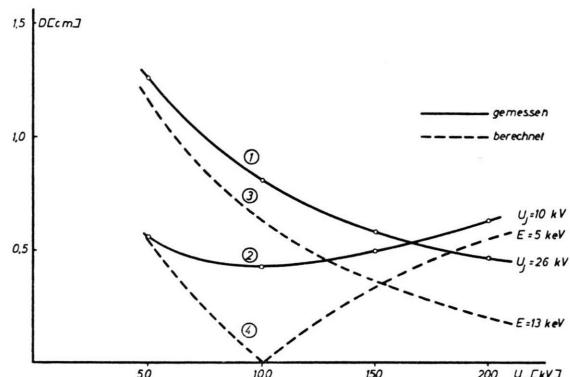


Abb. 3. Aus Abb. 2 entnommene, berechnete Bündeldurchmesser in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung bei einer Ionen-Einschießenergie  $E$  von 5 und 13 keV (gestrichelte Kurven); und experimentell bestimmte Halbwertsdurchmesser des Ionenbündels (ausgezogene Kurven) bei 10 und 26 kV Ionenquellen-Betriebsspannung  $U_I$ .

<sup>9</sup> Diese Zahlenwerte wurden der Diplomarbeit von S. Wagner (Marburg/Lahn, 1951, unveröffentlicht) entnommen, der die Ausbreitung des Kanalstrahl-Ionenbündels in einem feldfreien Raum untersucht hatte.

<sup>10</sup> K. Deutscher u. D. Kamke, Fußnote 4. In dieser Arbeit war gezeigt worden, daß an der Kathode selbst das Energiespektrum den Schwerpunkt bei etwa  $1/4$  der Betriebsspannung hat, daß dieser sich aber in größerem Abstand vom Ionen-Austrittskanal nach höheren Energien verschiebt.

werden, weil 1. keine scharfe Ionenenergie vorliegt, 2. der Ionenquellpunkt nicht genau definiert ist, 3. in die Rechnung Näherungen eingehen, und weil 4. in der Wahl gerade des *Halbwertdurchmessers* als charakteristische Größe für den Bündeldurchmesser natürlich eine gewisse Willkür enthalten ist. Bemerkt sei noch, daß die geringe Größe des Bündeldurchmessers auch visuell durch ein Einblickfenster festgestellt wurde. Das Ionenbündel ist so schmal, daß es auf keinerlei Linsen oder Blenden traf, welche in die Nähe des

Ionenweges eingebaut werden mußten. Dies ist ein wichtiger Punkt bei der Diskussion der Röntgen-Streustrahlung dieser Anlage, worauf in einer folgenden Arbeit eingegangen wird.

Herrn Prof. Dr. W. Walcher danken wir für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse, Herrn cand. phys. Henneberg für ausdauernde Hilfe bei den Messungen und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für apparative Unterstützung.

## BESPRECHUNG

**Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker.** Von R. Zurmühl. Springer-Verlag, Berlin, 1953. X, 481 S. mit 114 Abb.; Preis geb. DM 28,50.

Das Buch zielt darauf ab, diejenigen Teile der Mathematik zugänglich zu behandeln, welche zwar in der technisch-physikalischen Praxis vielfach gebraucht werden, aber dem Herkommen nach im Vorlesungsbetrieb der Hochschulen (von einigen Fällen abgesehen) nicht, oder nicht vordergründig behandelt werden: das liegt zum Teil natürlich daran, daß diese Dinge relativ viel Übungzeit erfordern, wenn man darauf mit Nutzen eingehen will und nicht bloß Rechenschablonen, sondern Verständnis und elastische Handhabung des Erlernten zu vermitteln sucht. Die Darstellung ordnet sich um die folgenden Schwerpunkte: Auflösen von Gleichungen (80 Seiten) mit einigen Anwendungen auf Stabilitätskriterien. Lineare Algebra, lin. Gleichungssysteme und Matrizen, mit Eingehen auf das Eigenwertproblem (75 Seiten); dabei werden die heute praktisch wichtigen Iterationsverfahren berücksichtigt. Interpolation und Integration (22 + 32 Seiten); beides ist wohl etwas zu knapp geblieben; wir vermissen wichtige Gesichtspunkte und Verfahren. Ausgleichen (43 Seiten). Darstellung willkürlicher Funktionen (55 Seiten), darin harmonische Analyse und Annäherungsprobleme mit kurzem Eingehen auf Orthogonalsysteme. Endlich zwei Kapitel über Anfangswertprobleme sowie über Rand- und Eigenwertprobleme bei Differentialgleichungen (55 + 100 Seiten). — Zuletzt muß vermerkt werden, daß das Werk die numerischen Verfahren betont, während die — oft zunächst zur Orientierung handlichen — zeichnerischen Verfahren mehr als uns gerechtfertigt scheint, daraus verbannt werden. Die Darstellung ist mit vielen durchgeföhrten Beispielen belebt, und enthält manchen Ratshag für die Rechenpraxis. Die Schreibweise kann als zugänglich anerkannt werden — sie setzt etwa die üblichen Kursvorlesungen an Technischen Hochschulen voraus.

Egon Ullrich, Gießen.

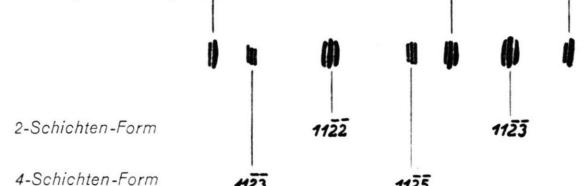
## BERICHTIGUNGEN

Zu J. Krumbiegel und K.-H. Jost, Leitfähigkeitsmessungen, spektrographische und röntgenographische Untersuchungen in Zinksulfidkristallen, Band **10a**, 526 [1955].

Die Beschriftung von Abb. 7 auf Seite 529 ist unvollständig. Sie muß lauten:

3-Schichten-Form:

1. Orientierg.  
2. Orientierg.



2-Schichten-Form

4-Schichten-Form

Abb. 7. Indizierung zu Abb. 6.

Zu J. van Calker, Untersuchungen über den zeitlichen Aufbau elektrischer Funken sowie die optische Absorption und das Nachleuchten abklingender Funkenentladungen, Band **10a**, S. 697 [1955].

Auf S. 698 a bei Abb. 2 sind die Markierungsstriche für die roten Stickstofflinien zu weit nach rechts verschoben. Die richtigen Abstände der Striche vom rechten Bildrand müssen sein: 13 mm, 10 mm und 8,5 mm.