

[Vorläufige Mitteilung<sup>1)</sup> aus dem Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Berlin<sup>2)</sup>.]

## Das kurze Raumladungsfeld einer Hilfsentladung als Sammellinse für Kathodenstrahlen.

Von Bodo von Borries und Ernst Ruska in Berlin.

Mit 3 Abbildungen. (Eingegangen am 22. April 1932.)

Ausgehend von der bekannten Konzentrierung eines Kathodenstrahls durch die von ihm selbst erzeugte positive Raumladung zeigt die Arbeit, wie durch die Beschränkung der Raumladung auf einen Teil der Strahlänge eine in erster Annäherung optisch wirkende Sammellinse für Kathodenstrahlen entsteht. Die hierfür erforderliche „kurze Raumladungssäule“ wird durch eine Hilfsentladung verwirklicht.

Wenn ein Kathodenstrahlbündel beim Durchgang durch verdünntes Gas ionisiert, kann man mit Johnson<sup>3)</sup> annehmen, daß in der Strahlbahn die positiven Ionen wegen ihrer sehr viel geringeren Wanderungsgeschwindigkeit wesentlich länger verbleiben als die abgespaltenen Elektronen. Es muß sich daher eine positive zylindrische Raumladungswolke bilden, zwischen deren Achse und Rand sich eine bestimmte Potentialdifferenz  $E_r$  (Volt) einstellt. Die radialen Feldstärken  $\mathcal{E}_r$  (Volt/cm) sind bei Annahme einer über den Strahlquerschnitt konstanten Raumladungsdichte der Größe  $\rho$  (Coulomb/cm<sup>3</sup>) dem Achsenabstand proportional. Wenn  $y$  (cm) den Achsenabstand,  $r$  (cm) den Strahlradius,  $\epsilon$  die Elektrizitätszahl und  $\epsilon_0$  die absolute Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$ ) bedeutet, so gilt

$$\mathcal{E}_y = \frac{\rho}{2 \epsilon \epsilon_0} y \quad (1)$$

und

$$E_r = \int_0^r \mathcal{E}_y dy = \frac{\rho}{4 \epsilon \epsilon_0} r^2. \quad (2)$$

Auch *außerhalb* des Ionisierungsbereichs (Strahlvolumens) hat die radiale Feldstärke noch die gleiche Richtung, wird aber vom Strahlrand an nach außen allmählich kleiner. Daher wird auch für Punkte außerhalb des Strahls

<sup>1)</sup> Erweiterte Wiedergabe aus einem von E. Ruska am 27. Januar 1932 im Seminar für Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Berlin gehaltenen Referat.

<sup>2)</sup> Vorstand Prof. A. Matthias.

<sup>3)</sup> B. Johnson, Journ. Opt. Soc. Amer. 6, 701, 1922.

die Potentialdifferenz gegen die Achse mit dem Abstand weiter langsam größer. Solange nun die ursprünglichen radialen Voltgeschwindigkeiten der Strahlelektronen (Querkomponenten der Austrittsgeschwindigkeiten und der Beschleunigungsspannung) klein sind, können die Strahlelektronen gegen das konzentrierende Raumladungsfeld in radialer Richtung nur kleine Wege zurücklegen und bleiben daher dauernd in der Nähe der Achse. Es ergeben sich die bekannten Fadenstrahlen, die erstmalig von A. Wehnelt<sup>1)</sup> und W. Westphal<sup>2)</sup> beobachtet und photographiert, dann von Johnson<sup>3)</sup> erklärt und später von E. Brüche<sup>4)</sup> in besonders reiner Form dargestellt und angewendet worden sind. Die bei solchen Strahlen beobachtete gleichmäßige Leuchtdichte und relativ scharfe Begrenzung zeigen, daß die Strahlelektronen mit annähernd konstanter Stromdichte über den Kreisquerschnitt vom Radius  $r$  verteilt und praktisch alle darin enthalten sind. Damit ist die eingangs angenommene konstante Raumladungsdichte als erste Annäherung gerechtfertigt und die Gleichungen (1) und (2) genügen als Ansatz für die Betrachtung der geometrisch-optischen Gesetzmäßigkeiten, da alle Strahlelektronen sich nur in ihrem Geltungsbereich bewegen. Besitzen die Fadenstrahlen (bei Wahl passender Anfangsbedingungen) längs des ganzen Weges gleichen Durchmesser, so kann man die Raumladungsdichte auch über die Strahlänge als konstant ansehen. In diesem Falle entsteht wegen der vorausgesetzten Linearität der Rückstellkräfte für die radialen Wege der Elektronen eine harmonische Schwingung, woraus sich bei der praktisch konstanten Längsgeschwindigkeit sinusförmige Elektronenbahnen ergeben. Die volle Wellenlänge  $2X$  der Schwingung folgt mit  $E$  als Strahlspannung zu

$$2X = 4\pi \sqrt{\frac{E \epsilon \epsilon_0}{e}}, \quad (3)$$

der Durchmesser  $d$  des Strahles zu

$$d = 4 \sqrt{\frac{E_r \cdot \epsilon \epsilon_0}{e}}. \quad (4)$$

Die Wellenlänge muß natürlich von der Größe der radialen Voltgeschwindigkeit unabhängig sein, sofern diese, wie bei der Rechnung angenommen, klein gegen die Strahlspannung bleibt. Daher muß sich ein Achsenpunkt

<sup>1)</sup> A. Wehnelt, Ann. d. Phys. 14, 463, 1904.

<sup>2)</sup> W. Westphal, ebenda 27, 586, 1908; vgl. auch J. W. Buchta, Journ. Opt. Soc. Amer. 10, 581, 1925.

<sup>3)</sup> B. Johnson, Journ. Opt. Soc. Amer. 6, 701, 1922.

<sup>4)</sup> E. Brüche, Forschung und Technik 1930, S. 23. Berlin, Julius Springer. ZS. f. Phys. 64, 186, 1930.

nach ganzzahligen Vielfachen von  $X$  immer wieder abbilden. Jeder beliebige Strahlquerschnitt, z. B. die (ausgedehnte) Emissionsfläche, bildet sich nach ganzen Vielfachen von  $2X$  aufrecht in natürlicher Größe ab. Hierfür liegen experimentelle Befunde vor (Strukturbilder der Kathode).

Die Geometrie dieser Abbildung entspricht sehr weit derjenigen, die bei der Strahlsammlung im homogenen Felde einer langen Spule<sup>1)</sup> auftritt. Beschränkt man, wie das bei den praktisch verwendeten Sammelspulen bekanntlich fast stets geschieht, die Einwirkung der Spule auf einen kleinen Teil der Gesamtstrahlänge, so ergibt sich eine in sehr hohem Maße optisch fehlerfreie *Linse*, für die die bekannten Linsengesetze gelten<sup>2)</sup>.

Da, wie oben dargelegt, die optische Grundbedingung, nämlich die achsenproportionale Richtungsänderung der Kathodenstrahlen, auch bei der homogenen Raumladung erfüllt ist, muß es möglich sein, mit ihrer Hilfe eine Elektronenlinse zu schaffen, wenn die Länge der wirksamen Raumladung auf einen Teil des Strahles beschränkt wird. Es wird jedoch, wie bei der Sammelspule, nur möglich sein, eine *Sammellinse* zu erhalten. Eine Zerstreuungslinse würde nur bei negativer Raumladung entstehen.

Diese Beschränkung der Länge könnte *erstens* dadurch gelingen, daß man über die „Linsendicke“ einen höheren Druck aufrechterhält, als im Gegenstands- und Bildraum. Dies geschieht zweckmäßigerweise mit Hilfe des Wienschen Strömungsverfahrens<sup>3)</sup>, indem nach Fig. 1 die durch das Ventil in die Linsen-kammer einströmende Luft nach beiden Seiten durch eine genügend leistungsfähige Pumpe über die als Drossel dienenden beiden Strahlblenden abgesaugt wird. Man erhielte so eine elektrodenlose Linse, deren Brennweite durch Regelung der Luftzufuhr (Ventil) oder der Strömungsdrossel (Blenden) verändert werden könnte.

*Zweitens* läßt sich die Beschränkung der Länge dadurch erreichen, daß man die Erzeugung der Raumladung nicht mehr dem zu konzentrierenden Strahle überläßt, sondern durch eine Hilfsentladung besorgt.

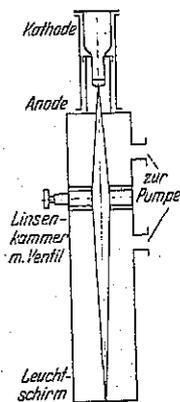


Fig. 1.  
Elektrodenlose  
Raumladungslinse  
(schematisch).

<sup>1)</sup> E. Riecke, Wied. Ann. 13, 191, 1881.

<sup>2)</sup> H. Busch, Ann. d. Phys. 81, 974, 1926; Arch. f. Elektrotechn. 18, 583, 1927; E. Ruska u. M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. 12, 389, 1931; M. Knoll u. E. Ruska, Ann. d. Phys. 12, 607, 1932.

<sup>3)</sup> W. Wien, Ann. d. Phys. 76, 117, 1925.

Eine dazu geeignete Anordnung zeigt Fig. 2. Das abbildende Element besteht aus drei coaxialen Lochelektroden, von denen die mittlere die negative Hilfsspannung erhält. Es bildet sich nun unter passendem Vakuum bei geeigneter Spannung eine Entladung aus, bei der von der mittleren Elektrode nach beiden Seiten ein leuchtender, in der Achse verlaufender Strahl durch die geerdeten Blenden in die Apparatur dringt, wo er sich allmählich in diffuses Leuchten verliert. In der Mittelebene der inneren Elektrode setzt der Strahl sehr scharfkantig an, was an der durch Kathodenzerstäubung gebildeten, schmalen, ringförmigen Spur erkennbar und durch seitliches Anbohren der Mittelelektrode auch visuell nachweisbar ist. Schon beim Austritt aus der 1 cm hohen Mittelscheibe ist der Strahl axial gerichtet.

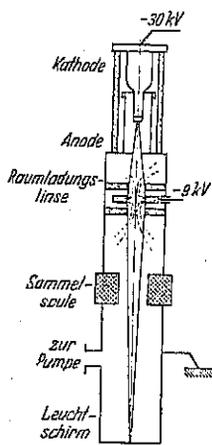


Fig. 2.  
Abbildung durch eine kurze Raumladungsskizze (Fremdionisation).

Bildet man mit einer Sammelschule, die zwischen dieser Anordnung und dem Leuchtschirm liegt (Fig. 2), verschiedene Querschnitte der Hilfsentladung mittels des von ihr erzeugten Elektronenbündels ab, so zeigen sich alle Einzelheiten einer gewöhnlichen Ionenentladung, nämlich Ansatz der Entladung an der Kathode (hier ringförmig) und ein kleinster Querschnitt mit hoher Intensität in unmittelbarer Nähe der Mittelebene des Systems, mit einem ringförmigen Hof<sup>1)</sup>.

Schickt man nun durch das beschriebene Elektrodensystem einen Strahl schnellerer Elektronen, so kann man mit ihm durch die optische Wirkung der Hilfsentladung sowohl die Kathode als auch beliebige zwischen Kathode und abbildendem System liegende Strahlquerschnitte abbilden. Die Veränderung der Brennweite erfolgt durch Variation der Stromstärke der Hilfsentladung, so daß in einfacher Weise auf verschiedene Objekte eingestellt werden kann.

Bei der experimentellen Ausführung wurden zunächst Kathodenstrahlen von etwa 30 kV der Beeinflussung unterworfen. Um eine Kathodenabbildung zu erhalten, mußten bei einem Druck von  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  mm Hg ungefähr

<sup>1)</sup> Es ist möglich, daß sich nach diesem Prinzip der ringförmigen Kathode günstige Elektronenquellen (Entladungsröhren) mit geringen Alterungswerten bauen lassen. Zu ihrer Untersuchung wird man ähnlich wie bei Untersuchungen von irgendwelchen Steuerungsvorgängen an Kathodenstrahlen mit Vorteil Sammelschulen als optisch einwandfreie Linsen in Mikroskopanordnung verwenden.

9 kV an die Raumladungslinse angelegt werden. Es zeigt sich, daß die entstehenden Bilder gewisse Fehler besitzen. So weist das in Fig. 3 schematisch wiedergegebene Bild eines quadratischen Netzes eine kissenförmige Verzeichnung auf; weiter ist im optischen Mittelpunkt eine kreisförmige Störung zu sehen. Gerade diese „Bildfehler“ können Aufschlüsse über gewisse Eigenschaften des abbildenden Raumladungsfeldes geben; bei dessen Untersuchung benutzt man also den Hauptstrahl als „Sonde“, die die Hilfsentladung selbst nicht stört.

Der Nachweis, daß es sich bei dieser Abbildung nicht etwa um die Wirkung des elektrostatischen Feldes zwischen den Elektroden<sup>1)</sup> handelt, ist dadurch gegeben, daß bei Steigerung der Hilfsspannung von Null bis zu einem Schwellenwert eine Beeinflussung des Hauptstrahles nicht beobachtet werden kann. Bei Überschreitung dieser Schwellenspannung setzt plötzlich eine konzentrierende Wirkung ein. Im gleichen Moment läßt sich in der Elektrodenanordnung das Eintreten einer Entladung an bläulichen Leuchten beobachten. Legt man an die innere Elektrode positive Spannung, so läßt sich zuerst ebenfalls eine Beeinflussung nicht beobachten; oberhalb der Schwellenspannung ließ sich bei dieser Anordnung eine stabile Entladung nicht aufrechterhalten. Eine elektrostatische Linse müßte natürlich bei umgekehrter Polarität eine Zerstreuungswirkung zeigen.

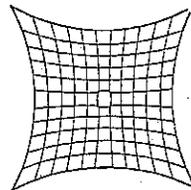


Fig. 3.  
Abbildung eines quadratischen Netzes (schematisch).

Für eine spätere günstigere Verwirklichung der angegebenen Abbildungsmethode ist folgendes zu sagen: Es ist zu hoffen, daß es, etwa durch Anwendung von Netzen oder von Strahlhindernissen, gelingt, die Hilfsentladung nur nach einer Seite, beispielsweise gegen die Kathode des Hauptstrahles zu, brennen zu lassen. Dadurch würde der Verwertungsraum des Hauptstrahles frei von den langsamen Elektronen der Hilfsentladung. Falls sich dieses Ziel so nicht erreichen läßt, lassen sich jedenfalls die langsameren Elektronen durch Ablenkfelder oder Lenardfolien ausfiltern. Die notwendige Raumladung läßt sich um so leichter erzeugen, je niedriger die Spannung der Hilfsentladung sein kann, weil das Ionisierungsvermögen

<sup>1)</sup> Solche Abbildungen wurden von C. J. Davisson u. C. J. Calbick, Phys. Rev. 38, 585, 1931 und von E. Brüche, Naturwissenschaften 20, 49, 1932 erhalten und lassen sich natürlich auch mit einer der beschriebenen Elektrodenanordnung ähnlichen erreichen. Vgl. auch M. Knoll u. E. Rüska, Ann. d. Phys. 12, 625, 1932.

der Elektronen bei 800 Volt ein Maximum hat. Daher muß der Gasdruck im Abbildungssystem relativ hoch sein. Da man zur Erzeugung der schnellen Elektronen des Hauptstrahles bei Ionenvröhren (die bei den Versuchen in Form von Metallentladungsröhren benutzt wurden) eines relativ niedrigen Druckes bedarf, wird sich eine ähnliche Vakuumordnung wie bei Fig. 1 empfehlen.

Ein Urteil über die Anwendungsmöglichkeiten der Raumladungslinse kann erst gefällt werden, wenn genauere Untersuchungen über deren Gesetzmäßigkeiten vorliegen.

Herrn Prof. Matthias danken wir für die Ermöglichung der Arbeit, der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft für die finanzielle Unterstützung.

---