**2. Über den Geschwindigkeitsverlust,
welchen die Kathodenstrahlen beim Durchgang
durch dünne Metallschichten erleiden, und über
die Ausmessung magnetischer Spektren¹⁾;
von G. E. Leithäuser.**

§ 1.

Der Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten ist zuerst von H. Hertz²⁾ beobachtet und beschrieben worden; er wies auch nach, daß die Strahlen beim Durchgang diffus zerstreut werden. Nach H. Hertz hat sich besonders Ph. Lenard³⁾ mit diesem Gegenstande beschäftigt. Ihm gelang es zuerst, durch ein dünnes Metallblättchen Strahlen aus dem Entladungsrohr in die Luft austreten zu lassen; seine zahlreichen Messungen beziehen sich hauptsächlich auf die Absorption der Strahlen in verschiedenen Körpern. Bei der Untersuchung der magnetischen Ablenkbarkeit der durch ein Metallblättchen gegangenen Strahlen fand er keine Änderung infolge dieses Durchganges, d. h. keine Geschwindigkeitsänderung. In neuerer Zeit hat sich Hr. Seitz⁴⁾ mit diesem Gegenstand beschäftigt und ist zu demselben Ergebnis gelangt.

Nun hat aber Hr. Gehrcke⁵⁾ gezeigt, daß homogene Kathodenstrahlen, die unter konstantem Entladungspotentiale erzeugt sind und in einem zur Strahlenrichtung senkrechten Magnetfeld keine Dispersion erleiden, nach der Reflexion an Metallen sich als inhomogen erweisen und bei magnetischer Ablenkung zu einem „Spektrum“ auseinandergelegt werden können. Es sind dabei unter den reflektierten Strahlen solche vorhanden, die die ursprüngliche Ablenkbarkeit beibehalten

1) Berliner Dissertation vom 31. Juli 1903 für die Annalen bearbeitet, mit Zusätzen.

2) H. Hertz, Wied. Ann. 45. p. 28. 1892.

3) Ph. Lenard, Wied. Ann. 52. p. 27. 1894.

4) W. Seitz, Ann. d. Phys. 6. p. 29. 1901.

5) E. Gehrcke, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin, 18. April 1901.

haben, und an diese reihen sich mit abnehmender Intensität Strahlen an, die eine größere Ablenkung erfahren. Hr. Gehrcke hat Strahlen beobachten können, welche die doppelte Ablenkung derjenigen besaßen, die sie vor der Reflexion hatten.

Diese Vermehrung der Ablenkung kann nun auf zweierlei Weise zustande kommen; indem sich nämlich bei der Reflexion für einen Teil der Strahlen entweder das Verhältnis von Ladung zur Masse oder die Geschwindigkeit, oder beides zusammen ändert. Ersteres ist, wie Hr. Starke¹⁾ gezeigt hat, nicht der Fall; man muß also die Vermehrung der Ablenkung auf eine Änderung der Geschwindigkeit schieben, und es folgt so aus der Beobachtung, daß das homogene Strahlenbündel in eins verwandelt wird, das alle Geschwindigkeiten von der ursprünglichen bis zu der Hälfte derselben enthält.

Man kann die beobachtete Erscheinung erklären, indem man einerseits annimmt, daß die Reflexion der Kathodenstrahlen keine Oberflächenreflexion ist, sondern daß die Elektronen zum Teil ins Metall eindringen und erst aus größerer Tiefe reflektiert werden, andererseits, daß dieselben auf ihrem Wege durchs Metall durch Zusammenstöße mit den Molekülen oder auch durch elektromagnetische Ausstrahlung an Geschwindigkeit verlieren. Sind diese beiden Annahmen richtig, so muß ein Kathodenstrahlbündel auch beim Durchgang durch ein Metallblättchen inhomogen werden, indem Geschwindigkeitsverluste auftreten, welche für verschiedene Strahlenpartien verschiedene Werte aufweisen.

Die Arbeiten der Herren Lenard und Seitz stehen, wie man sieht, mit diesen Folgerungen nicht im Einklang. Nun waren bei diesen Versuchen die Kathodenstrahlen mit Hilfe von Induktorien erzeugt. Da aber das Entladungspotential an den Polen eines Funkeninduktors niemals ein konstantes ist, so waren die benutzten Kathodenstrahlen von vornherein inhomogen, ein Umstand, der das Auffinden eines Geschwindigkeitsverlustes nach dem Durchgang durch ein Metallblättchen sehr erschweren mußte (vgl. indessen auch § 13). So erschien es geboten, diese Versuche noch einmal mit homogenen Kathodenstrahlen, wie sie mittels einer Influenzmaschine erhält-

1) H. Starke, Verh. d. Phys. Ges. 5. Jahrg. Nr. 1.

lich sind, zu wiederholen. Auf Anregung von Hrn. Geheimrat Warburg habe ich diese Arbeit übernommen und das bestätigt gefunden, was die Gehrckeschen Versuche voraussehen ließen.

§ 2.

Die angewandte Versuchsanordnung war folgende. Horizontale, homogene, an einer Hohlspiegelkathode mittels einer 20 plattigen Influenzmaschine erzeugte Kathodenstrahlen trafen nach dem Durchgang durch eine kreisförmige Blende auf einen horizontalen Spalt, der mit zwei Lagen dünner Aluminiumfolie belegt war. Hinter dem Spalt befanden sich in geringer Ent-

Fig. 1.

fernung zwei ähnliche Diaphragmen, um aus dem nach Austritt aus dem Blättchen diffus verlaufenden Strahlenbündel einen Teil auszublenden. Dieser Teil fiel am Ende der Röhre auf einen Fluoreszenzschirm, einen langen, an den Rändern

etwas verwaschenen leuchtenden Streifen auf ihm erzeugend. In die Aluminiumfolie war ein kleines Loch gestochen, so daß ein kleiner Teil der von der Kathode kommenden Strahlen, ohne durch das Blättchen gegangen zu sein, auf den Schirm gelangte und auf diesem einen helleren runden Fleck erzeugte, der innerhalb des von den durchgegangenen Strahlen erhellten Streifens lag. Alle Diaphragmen waren durch einen Messingzylinder metallisch verbunden, der als Anode diente und zur Erde abgeleitet war.

Das Entladungsrohr mit den Diaphragmen wurde in einen Kasten aus Messingrotguß *M* (Fig. 1) von 19 cm Höhe, 12,5 cm Breite und 9,3 cm Tiefe eingekittet, den auch Hr. Gehrcke benutzt hatte. Die Vorderfläche war mit einer dicken Spiegelglasplatte verschlossen, die mit Chatterton-Asphaltkitt sorgfältig luftdicht aufgesetzt war. Sie trug auf der Innenseite den Fluoreszenzschirm, auf Seidenpapier aufgetragenes Calciumsulfid. Später trug ich das CaS direkt auf die mit einer dünnen Fettschicht präparierte Platte auf, da das Seidenpapier noch einen erheblichen Teil des Fluoreszenzlichtes absorbierte. Im Kasten waren Schalen mit P_2O_5 aufgestellt, um das Vakuum trocken zu halten.

Ist in einem der beiden Strahlenbündel ein Geschwindigkeitsverlust vorhanden, so muß die gleichzeitige magnetische Ablenkung der beiden Bündel ihn direkt erkennen lassen. Das Magnetfeld konnte mittels zweier auf Zinkzylinder aufgewickelter Drahtspulen, die von Hrn. Simon¹⁾ konstruiert und ausführlich beschrieben sind, hervorgebracht werden. Bei seiner Erregung wurden die Fluoreszenzflecke gleichzeitig nach oben oder nach unten, je nach der Richtung des Stromes abgelenkt. Die Richtung der Kraftlinien war horizontal und zur Fortpflanzungsrichtung der Kathodenstrahlen senkrecht.

§ 3.

War unter fortwährendem Hindurchsenden von Entladungen das Vakuum im Apparat so weit fortgeschritten, daß die 20 plattige Influenzmaschine, deren einer Pol geerdet war, Kathodenstrahlen solcher Geschwindigkeit erzeugte, daß

1) S. Simon, Wied. Ann. 69. p. 595. 1899.

neben dem punktförmigen direkten Strahlenbild der von den durchgegangenen Strahlen herrührende Lichtstreif erschien, so zeigt die Fig. 2 das Verhalten der Fluoreszenzflecke bei Erregung des Magnetfeldes. In der Mitte erkennt man die Flecke in der unabgelenkten Lage, den punktförmigen direkten F_1 und den an den Rändern nicht ganz scharf begrenzten F_2 . Der direkte Fleck mußte sehr klein sein, weil sonst seine Hellig-

F_1 direkter Fleck. S Spektrum. F_2 von durchgegangenen Strahlen herrührend.

Fig. 2a. ($E = 12\,000$ Volt.)

Fig. 2b. ($E = 17\,000$ Volt.)

keit bei der Beobachtung des Flecks F_2 störte. Wird das Magnetfeld erregt, so werden beide Flecke, wie aus der Fig. 2a und b ersichtlich, je nach der Stromrichtung nach oben oder unten abgelenkt. Fig. 2a entspricht einem Entladungspotential von 12000 Volt, Fig. 2b einem von 17000 Volt. Betrachtet man Fig. 2a, die Ablenkung nach oben, so findet man zunächst, daß die direkten Strahlen ohne jede Verbreiterung abgelenkt werden; sie sind also vollkommen homogen. Bei 12000 Volt

ist der den durch die Folie gegangenen Strahlen entsprechende Streifen F_2 zu einem breit ausgedehnten „magnetischen Spektrum“ verbreitert. Die Unterkante des Spektrums ist gegen den direkten Fleck verschoben (im Gegensatz zur Reflexion); während dieser in der unabgelenkten Lage mitten im Streifen F' liegt, ist er nach der Ablenkung ganz aus dem Spektrum herausgetreten, so daß sich bei einer Ablenkung des direkten Flecks von 32 mm ein dunkler Zwischenraum zwischen ihm und der Unterkante des Spektrums von 3 mm befand. Hieraus geht hervor, daß in diesem Falle alle durch das Blättchen gegangenen Strahlen einen Geschwindigkeitsverlust erfahren haben; die Erscheinung des Spektrums beweist, daß der Verlust für alle durchgegangenen Strahlen durchaus nicht gleich groß ist.

Während die Ablenkung der Unterkante 35 mm betrug, war die Oberkante um 68 mm abgelenkt, es waren also im Spektrum noch Strahlen enthalten, die nur noch ungefähr die Hälfte ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit besaßen. Die Helligkeit in diesem Spektrum nahm nach kleineren Geschwindigkeiten allmählich, ohne schärferen Sprung ab.

Wenn man nun durch fortwährendes Evakuieren den Druck im Entladungsrohr weiter erniedrigte, so daß das Entladungspotential anstieg und damit die Geschwindigkeit der erzeugten Kathodenstrahlen wuchs, so änderte sich die beschriebene Erscheinung und nahm ein Aussehen an, wie es die Fig. 2 b darstellt. Das Entladungspotential ist hier 17000 Volt. Der dunkle Zwischenraum zwischen dem direkten Fleck und der Unterkante des Spektrums ist zusammengeschrumpft, er berührt jetzt die Unterkante und ragt nur wenig aus ihr hervor. Mithin sind jetzt im Spektrum unter den durchgegangenen Strahlen solche vorhanden, deren Geschwindigkeit nur um einen sehr kleinen Wert von der ursprünglichen abweicht, oder ihr gleich ist. Die Ausdehnung des Spektrums ist nicht mehr so groß wie vorher. Bedeutend geändert hat sich aber gegenüber dem Fall von 12000 Volt die Helligkeitsverteilung im Spektrum. Während in jenem Falle der Übergang von helleren zu weniger hellen Stellen allmählich vor sich ging, findet er hier viel plötzlicher statt, d. h. das Spektrum hat an der Unterkante maximale Helligkeit, die sich nach oben

hin etwas abnehmend über ein bestimmtes Gebiet erstreckt, dann erfolgt ein Sprung zu einem wenig hellen Gebiet, das den Rest des Spektrums ausfüllt.

Um etwas Objektives zu besitzen, habe ich versucht die Erscheinung zu photographieren. Da die Expositionszeit durch das Konstantbleiben des Vakuums bedingt und die Helligkeit der Fluoreszenzflecke nicht bedeutend war, machte dies Schwierigkeiten. Trotzdem gelang es schließlich, auch den Fall bei 12000 Volt, bei dem der direkte Fleck ganz aus dem Spektrum herausgetreten ist, zu fixieren. Die Photographie, auf deren Wiedergabe ich an dieser Stelle verzichte, zeigt deutlich den Zwischenraum zwischen direktem Fleck und der Unterkante des Spektrums; letzteres aber nicht in seiner ganzen Ausdehnung, da die dunkleren Teile desselben doch zu schwach waren, um in der Expositionszeit merklich auf die Platte einzuwirken. Daher geben die Fig. 2a und b das wahre Aussehen der Erscheinung besser wieder.

§ 4.

Noch auf eine andere Weise habe ich diesen Geschwindigkeitsverlust der Kathodenstrahlen zu zeigen versucht. Die magnetische Ablenkung eines Kathodenstrahlbündels ist umgekehrt proportional der Kathodenstrahlgeschwindigkeit, die elektrostatische Ablenkung dem Quadrat derselben. Lenkt man nun zwei Strahlenbündel verschiedener Geschwindigkeit zusammen elektrostatisch ab und kompensiert die Ablenkung für die Strahlen größerer Geschwindigkeit durch ein im entgegengesetzten Sinne wirkendes Magnetfeld, so muß für jede kleinere Geschwindigkeit eine Ablenkung im Sinne der elektrostatischen übrig bleiben.

Den benutzten Apparat zeigt Fig. 3. Der Entladungsraum von 10 cm Länge, der die hohlspiegelförmige Kathode aus Aluminium und das schon früher benutzte Messingrohr mit Diaphragmen und Blättchen enthält, erweitert sich in einen 15 cm langen Tubus, der am unteren Ende durch eine Schliffkappe *S* verschlossen ist. Sie trägt auf der Innenseite den mit CaS bestrichenen Fluoreszenzschirm. Nach dem Austritt aus dem letzten Diaphragma passieren die Kathodenstrahlen einen bei *C* eingeschmolzenen Kondensator (in der Figur um

90° gedreht gezeichnet), dessen Platten eine Oberfläche von $4 \times 5 \text{ cm}^2$ besaßen; der Abstand der Platten voneinander be-

Fig. 3.

trag 1 cm; vier Elfenbeinstäbchen zwischen den Kondensatorplatten sorgten für Isolation. Das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten erzeugte eine Hochspannungsbatterie von 2000 Volt Spannung. Bei der elektrostatischen Ablenkung muß die Luft im Entladungsrohr in hohem Grade verdünnt sein, da die Strahlen auf ihrem Wege die Luft leitend machen. Hinter dem Kondensator wurde mit den beschriebenen Spulen das Magnetfeld erzeugt.

Der Versuch zeigte das erwartete Resultat. Wurde durch passende Stromstärke in den Spulen die elektrostatische Ablenkung kompensiert für die direkten Strahlen, so blieb für die durchgegangenen ein Spektrum, elektrostatisch abgelenkt, übrig. Auch hier zeigte das Spektrum je nach der Größe

des Entladungspotentiales die früher beschriebene Helligkeitsverteilung. Die Unterkante war durch einen großen dunklen Zwischenraum vom direkten Fleck getrennt, wenn das Entladungspotential verhältnismäßig gering war; stieg es zu höheren Werten an, so verkleinerte dieser Zwischenraum sich schnell, die Länge des Spektrums schrumpfte zusammen, und es zeigte jenen mehr plötzlicheren Übergang von hellen zu schwächeren Stellen.

§ 5.

Durch die beschriebenen Versuche ist gezeigt worden, daß beim Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metall-

schichten ein Geschwindigkeitsverlust derselben stattfindet und daß dieser bei sonst ungeänderten Versuchsbedingungen vom Entladungspotential, d. h. von der ursprünglichen Geschwindigkeit abhängt.

Für eine Theorie der Erscheinung ist es nun von Wichtigkeit, die Verteilung der Elektrizitätsmenge im Spektrum zu kennen. Aus der Fluoreszenzhelligkeit eines Spektralbezirkes kann man ohne weiteres einen Schluß auf die dorthin gelangende Elektrizitätsmenge nicht ziehen, da sie jedenfalls auch eine Funktion der Kathodenstrahlgeschwindigkeit ist. Der einfachste Weg, über eine Verteilung der Elektrizitätsmenge im Spektrum Kenntnis zu erhalten, schien der zu sein, einen durch einen geerdeten Metallmantel geschützten Hohlzylinder durch das zu untersuchende Spektrum hindurchzubewegen und die ihm an den einzelnen Stellen von den einfallenden Strahlen erteilte Ladung durch den in einem Galvanometer hervorgebrachten Ausschlag zu messen. Diese Methode war leider undurchführbar, weil der entstehende Strom selbst bei sehr empfindlichen Instrumenten zu geringe Ausschläge erzeugte. Ein anderer Weg bestand darin, die Ladung an den einzelnen Stellen elektrometrisch zu bestimmen, die ein Auffänger dort in einer gewissen Zeit erlangte. Es wurde hierbei ein Hankelsches Elektrometer von großer Empfindlichkeit und sehr kleiner Kapazität benutzt. Die Ausschläge waren gut meßbar, doch ergaben sich in den einzelnen Spektralgebieten nur sehr kleine Unterschiede, was wohl auf das Leitendwerden der Luft unter dem Einfluß der Kathodenstrahlen zu schieben war. Man hätte also, um mit der Methode einwandfreie Resultate erzielen zu können, den Entladungsraum vom Raum der magnetischen Ablenkung vollkommen luftdicht trennen und letzteren auf das höchst erreichbare Vakuum bringen müssen, was eine sehr schwierige Aufgabe gewesen wäre. Es blieb nun noch ein dritter Weg: aus der photometrisch gemessenen Helligkeit die Elektrizitätsmenge zu berechnen.

§ 6.

Dieser Weg setzte eine Kenntnis der Abhängigkeit der Helligkeit vom Potential und der Stromdichte der Kathodenstrahlen voraus, wobei unter dem Potential der Strahlen die

Potentialdifferenz zwischen Kathode und dem Punkt verstanden ist, in welchem die Strahlen beobachtet werden.¹⁾ Zu dieser Bestimmung benutzte ich ein Entladungsrohr, wie es Fig. 4 darstellt. Der 7 cm lange Entladungsraum enthielt eine kleine

- K Kathode.
 D, D Diaphragmen.
 S Schliff.
 M geerdeter Mantel des
 Auffängers.
 C innen Zylinder des
 selben.
 F Fluoreszenzschirm.
 B Stützen zur Hellig-
 keitsbeobachtung.
 A Auffänger.

Fig. 4.

Hohlspiegelkathode und war durch ein Doppeldiaphragma mit 4 mm Öffnungsdurchmesser abgeschlossen. Er erweiterte sich in einen 8 cm langen Raum, der am unteren Ende senkrecht zur Zeichnungsebene der Figur in einen weiten Schliff *S* auslief, mit dem ein Auffänger *A* eingeführt werden konnte, durch einen kleinen Schliff im Konus des ersten drehbar angeordnet. Der Auffänger war ein zur Erde abgeleiteter hohler Messingwürfel, an der Seite, an welcher die Kathodenstrahlen einfielen, durch ein Drahtnetz verschlossen. Im Inneren befand sich, durch Ebonit von den Wänden isoliert, ein metallischer Hohlzylinder, der durch ein Galvanometer zur Erde abgeleitet werden konnte. Die eine Seite des Auffängers trug den Fluoreszenzschirm, der durch eine Drehung des Schliffs der Bestrahlung ausgesetzt wurde; dann fielen also die Kathodenstrahlen nicht in den Zylinder. Durch den seitlichen Ansatz *B* wurde die Stärke des Fluoreszenzlichtes beobachtet; die Öffnung von *B*

war mittels einer aufgekitteten Glasplatte luftdicht verschlossen.

Zur Erzeugung der Strahlen diente eine 2plattige Influenzmaschine, die nach guter Reinigung bei konstanter Tourenzahl so regelmäßig arbeitete, daß der vom Auffänger auf-

1) Über diese Frage sind kurz nach dem Erscheinen meiner Dissertation in diesen Annalen (Ann. d. Phys. 12. p. 462. 1903) Messungen von Hrn. Lenard veröffentlicht worden. Doch beziehen sich diese Messungen auf kleinere Potentiale als die von mir benutzten, hören nämlich auf bei Potentialen, bei welchen meine beginnen. Auch ist die von Hrn. Lenard benutzte Messungsmethode eine andere als die meinige. Die Mitteilung meiner Ergebnisse dürfte daher auch an dieser Stelle nicht überflüssig sein.

genommene Kathodenstrahlenstrom einem galvanischen Element zu entstammen schien. Das Photometer war ein von Hrn. Martens¹⁾ konstruiertes Polarisationsphotometer; das Vergleichslicht eine kleine Glühlampe, die mit bedeutender Unterspannung brannte, welche durch Kompensation gegen ein Normalelement auf $\frac{1}{1000}$ Volt konstant gehalten werden konnte. Ihr Licht wurde durch farbige Gelatine und Gläser gefärbt und der Farbe des Fluoreszenzmittels gleich gemacht; dadurch ließ sich eine gute Photometereinstellung erreichen.

Die Messungen selbst wurden so ausgeführt, daß zunächst, während der Auffänger die offene Seite den einfallenden Strahlen

M Maschine. *K* Kathode. *D, D* Diaphragmen. *A* Auffänger. *G* Galvanometer.
P Photometer. *E* Elektrometer. *F* Fluoreszenzschirm.

Fig. 5.

zukehrte, die elektrischen Größen bestimmt wurden; sodann wurde er um einen durch einen Anschlag markierten Winkel gedreht, so daß die Strahlen auf den Fluoreszenzschirm auffielen, und die entstehende Helligkeit aus vier Photometereinstellungen bestimmt, endlich in der Anfangsstellung eine Kontrolle der elektrischen Größen vorgenommen. Bei der photometrischen Messung fielen nur im Augenblick der eigentlichen Einstellung die Strahlen auf das Fluoreszenzmittel auf,

1) F. F. Martens, Phys. Zeitschr. 1. p. 299—303. 1900.

in der übrigen Zeit wurden sie durch Erregung eines Elektromagneten abgelenkt. Durch diese Maßregel erlangte man zu verschiedenen Zeiten bei denselben Verhältnissen von Entladungspotential und Strom immer die gleichen Einstellungen und die Ermüdung des fluoreszierenden Stoffes machte sich nicht störend bemerkbar. Die gesamte Versuchsanordnung zeigt Fig. 5.

§ 7.

Da die orientierenden Messungen zeigten, daß die Helligkeit nicht immer der auffallenden Energiemenge proportional war, so zerfiel die Untersuchung von selbst in zwei Teile; einmal galt es zu bestimmen, wie sich bei konstant gehaltenem Entladungspotential und veränderlichem Strom die Helligkeit änderte, andererseits war ihre Änderung bei konstantem Strom und veränderlichem Entladungspotential zu messen. Zunächst wurde das erstere ausgeführt. Um bei konstantem Potential verschiedene Stromstärken im Entladungsrohr zu erhalten, genügt es nicht, die Tourenzahl der Influenzmaschine zu verändern, da bei einer Vermehrung derselben im allgemeinen wohl der Strom zunimmt, aber auch das Entladungspotential ansteigt. Um letzteres wieder auf den alten Wert zu bekommen, muß man den Druck im Apparat variieren können. Dies geschah einerseits durch Heben oder Senken des Quecksilberniveaus in der Luftpumpe, andererseits durch eine am Rohre angeschmolzene Glaskapillare, die gewöhnlich durch einen fest angedrückten Gummipfropfen verschlossen, momentan durch Entfernen desselben geöffnet werden konnte und ein außerordentlich kleines Luftquantum in den Apparat eintreten ließ. Die Tourenzahl der Maschine war in sehr engen Grenzen variabel gemacht dadurch, daß zum Anker des sie antreibenden Elektromotors, der einen sehr kleinen Widerstand hatte, ein fein regulierbarer Nebenschluß von hohem Widerstand gelegt wurde.

Das Resultat der Messungen für Calciumsulfid als fluoreszierende Substanz zeigt die Tab. I (Kurve A). Man erkennt, daß die Abhängigkeit der Helligkeit vom Strom bei konstantem Potential linear ist; dieselbe Beziehung ist von Hrn. Lenard für kleinere Geschwindigkeiten gefunden worden.¹⁾ Erst bei sehr großen Helligkeiten, wie sie bei den Messungen nicht benutzt werden, nimmt die Helligkeit langsamer als der Strom

1) P. Lenard, l. c.

zu. Das Resultat der linearen Beziehung wird verständlich, wenn man bedenkt, daß bei konstantem Entladungspotential die Qualität der erzeugten Kathodenstrahlen mit einer Änderung des Stromes sich nicht ändert, sondern daß dabei nur die Quantität der erzeugten Strahlen eine andere wird.

Tabelle I.

Entladungspotential konstant. Helligkeit als Funktion des Stromes.

Strom	Helligkeit	Strom	Helligkeit
2,5	20,0	11,25	82,6
4,0	31,3	12,6	93,0
5,25	39,5	14,11	102,2
6,0	46,1	14,57	108,0
6,86	51,4	15,86	111,7
7,47	54,9	16,30	118,9
8,10	62,0	17,97	128,1
9,30	67,9	18,33	135,0
9,91	73,4	19,67	140,0
10,46	77,0	21,0	148,2

Kurve A. Entladungspotential konstant.

§ 8.

Es folgte nun die Bestimmung der Abhängigkeit der Helligkeit vom Entladungspotential, während der Strom im Apparat konstant blieb. Die Einregulierung der Stromstärke bei verschiedenen Potentialen auf immer den gleichen Wert war mühsam und konnte durch Änderung der Maschinengeschwindigkeit, des Druckes und durch Anwendung eines Spitzennebenschlusses, der zur Röhre parallel geschaltet war, bewirkt werden. Da sie bei hohen Potentialen nicht immer gut zu erreichen war, wurde in solchen Fällen die Stromstärke der erforderlichen möglichst nahe gebracht und der richtige Helligkeitswert aus dem beobachteten durch Interpolation bestimmt. Die Messung des Entladungspotentiales geschah bis zu 12000 Volt mit einem geeichten Braunschen Elektrometer.

Bei höheren Potentialen lud das zu messende die eine Platte eines Kohlrauschschen Plattenkondensators, an dessen anderer Platte ein Elektrometer anlag. Der Plattenabstand betrug ca. 7 cm, die Eichung der Kombination erfolgte empirisch. Durch diese Anordnung ließen sich Potentiale bis zu 25000 Volt gut messen; Bedingung für eine exakte Messung ist aber vollkommene Isolation des Systems, die in diesem Falle durch Anwendung von Bernstein als Isoliermittel des Elektrometers gut erfüllt war.

Tabelle II.

Strom konstant. Helligkeit als Funktion des Entladungspotentiales.

Entladungspotential	Helligkeit	Entladungspotential	Helligkeit
3000	28,2	11600	138,5
4220	34,4	12300	148,4
5100	41,1	13200	160,0
6350	54,0	13800	166,1
6900	60,7	14400	172,0
7400	66,6	15000	176,0
8050	76,7	15900	181,2
9200	99,9	17100	184,0
9700	107,5	18000	186,3
10400	120,0	19100	188,1
11000	129,0	20000	192,0

Die erhaltenen Resultate sind aus der Tab. II und der Kurve B ersichtlich, für einen Fluoreszenzschirm aus CaS. Das Verhältnis $\frac{\text{Helligkeit}}{\text{Entladungspotential}}$ wächst zuerst mit steigendem Entladungspotential, wird in einem darauf folgenden Ge-

biet konstant und nimmt alsdann wieder ab. Die Resultate entstammen zahlreichen Messungen, die untereinander eine gute Übereinstimmung zeigen. Hr. Lenard hat für die von ihm benutzten Potentiale ein anderes Ergebnis gefunden.

§ 9.

Nachdem durch diese Messung ein Kenntnis der Abhängigkeit der Helligkeit von den elektrischen Größen gewonnen war, erschien es möglich, durch die Beobachtung der Helligkeitsverteilung im magnetischen Kathodenstrahlspektrum einen Schluß auf die Verteilung der Stromdichte in diesem ziehen zu können. Die Beobachtungen wurden mit der in § 2 beschriebenen Versuchsanordnung angestellt. Der Messingkasten war durch einen anderen von kleinerer Querdimension ersetzt worden, wodurch man eine viel bessere Konstanz des Vakuums erreichte. Die Erzeugung der Strahlen geschah mit einer 20plattigen Maschine neuer Konstruktion, deren Strom so stark war, daß die magnetischen Spektren eine zur Messung

gut ausreichende Helligkeit erlangten. Als Photometer diente das bei den früheren Versuchen benutzte; das zu messende Spektralgebiet wurde mittels einer Linse in natürlicher Größe auf der Photometeröffnung abgebildet. Um die Lage des abgebildeten Gebietes genau bestimmen zu können, trug die Abschlußplatte des Kastens eine Glasskale, auf der die Marken und Striche durch seitlich einreflektiertes Licht einer Glühlampe hell auf dunklem Grunde sichtbar gemacht werden konnten. Durch die Linse wurde diese Skale gleichfalls auf der Photometeröffnung abgebildet, und gestattete damit eine genaue Bestimmung der Lage des gemessenen Bezirkes. Innerhalb einer Messung wurde genau auf Konstantbleiben des Vakuums und der Tourenzahl der Maschine geachtet; das Photometer wurde durch das Spektrum hindurchgeführt, die einzelnen Gebiete von den helleren zu den dunkleren hin erschienen nacheinander auf der Photometeröffnung. Zum Schluß wurde noch einmal auf das zuerst gemessene Gebiet eingestellt und damit die etwaige Veränderung des Vakuums festgestellt.

§ 10.

Die Resultate der Messungen sind durch die Tab. III und die Kurven C dargestellt. Letztere zeigen die Stromdichte als Funktion der Kathodenstrahlengeschwindigkeit. Die Geschwindigkeiten nehmen von links nach rechts hin ab, so daß der am meisten links liegende Teil der Kurven der am wenigsten abgelenkten Kante des Spektrums entspricht.

Die Resultate sind auf folgende Weise gefunden. Für die einzelnen Spektralbezirke sind durch Bestimmung der Größe der magnetischen Ablenkung die Geschwindigkeiten, und damit die Entladungspotentiale der dorthin treffenden Strahlen bestimmt. Setzt man nun die der größten im Spektrum vorkommenden Helligkeit entsprechende Stromdichte gleich 100, so liefert die Kurve B durch graphische Interpolation für jedes andere Entladungspotential, also jede andere Geschwindigkeit und mithin für jeden anderen Spektralbezirk, die, der Stromdichte 100 entsprechende Helligkeit H_{100} . Da aber nach Kurve A bei konstanter Geschwindigkeit die Helligkeiten sich wie die Stromdichten verhalten, findet man aus der für einen

bestimmten Spektralbezirk gemessenen Helligkeit H_g die zugehörige Stromdichte x aus:

$$H_g : H_{100} = x : 100.$$

Tabelle III.
Magnetische Spektren.

Entladungspotential	Spektralgebiet (Ablenkung)	Geschwindigkeit	Helligkeit	Elektrizitätsmenge
11000	dir. Fl. (43 mm)	$6,40 \cdot 10^9$	—	—
9220	I. Geb. 47—51 mm	5,85	10,6	22,7
7820	II. „ 51—55 „	5,39	33,4	100
6730	III. „ 55—59 „	5,00	18,1	63
5860	IV. „ 59—63 „	4,66	4,5	19,7
5140	V. „ 63—67 „	4,36	1,2	6,0
12000	dir. Fl. (37,3 mm)	$6,69 \cdot 10^9$	—	—
10440	I. Geb. 40 mm	6,24	4,93	4,44
8630	II. „ 44 „	5,66	81,09	100
7260	III. „ 48 „	5,20	45,55	82,4
6190	IV. „ 52 „	4,70	17,18	38,0
5320	V. „ 56 „	4,45	10,6	27,6
4640	VI. „ 60 „	4,16	6,46	19,5
13000	dir. Fl. (36 mm)	$6,96 \cdot 10^9$	—	—
11600	I. Geb. 38 mm	6,60	13,3	9,47
9560	II. „ 42 „	5,97	107,2	100
7990	III. „ 46 „	5,42	68,1	91
6750	IV. „ 50 „	5,02	34,75	61,8
5790	V. „ 54 „	4,64	13,3	29,22
5020	VI. „ 58 „	4,32	10,6	27,26
4390	VII. „ 62 „	4,04	7,19	20,09
3870	VIII. „ 66 „	3,80	3	12
14000	dir. Fl. (45 mm)	$7,24 \cdot 10^9$	—	—
12800	I. Geb. 47 mm	6,92	204	100
10900	II. „ 51 „	6,39	152,2	89,7
9370	III. „ 55 „	5,92	39,15	28,96
8150	IV. „ 59 „	5,52	25,6	25,0
7150	V. „ 63 „	5,16	16,38	20,5
6500	VI. „ 66 „	4,94	5,69	8,3

Tabelle III (Fortsetzung).

Entladungspotential	Spektralgebiet (Ablenkung)	Geschwindigkeit	Helligkeit	Elektrizitätsmenge
16500	dir. Fl. (34,5 mm)	$7,84 \cdot 10^9$	—	—
16000	I. Geb. 35 mm	7,73	160,2	100
12900	II. „ 39 „	6,94	152,8	11,66
10600	III. „ 43 „	6,28	49,05	4,49
9290	IV. „ 47 „	5,88	42,25	4,49
8150	V. „ 51 „	5,52	30,8	4,48
7000	VI. „ 55 „	5,10	13,3	3,00
(doppelte Blättchendicke)				
17000	dir. Fl. (42,2 mm)	$7,96 \cdot 10^9$	—	—
16400	I. Geb. 43 mm	7,83	11,9	46,5
13700	II. „ 47 „	7,16	32,1	100
11800	III. „ 51 „	6,60	18,98	68,7
10000	IV. „ 55 „	6,12	13,00	55,1
8710	V. „ 59 „	5,71	7,59	43,4
7650	VI. „ 63 „	5,34	4,54	34,1
6770	VII. „ 67 „	5,02	3,11	28,8

Kurve C, Entladungspotential 11000 Volt.

Kurve C, Entladungspotential 12000 Volt.

Betrachtet man die Kurven *C*, so findet man, daß bei Potentialen der auffallenden Kathodenstrahlen, für welche die Durchlässigkeit der Blättchen gering ist, das Maximum der Stromdichte nicht bei den größten Geschwindigkeiten liegt, sondern nach kleineren zu verschoben ist. Alle hindurchgegangenen Strahlen haben an Geschwindigkeit verloren, entsprechend dem dunklen Zwischenraum zwischen direktem Fleck und Unterkante; die Stromdichte für die größten im Spektrum

Kurve C. Entladungspotential 14000 Volt.

Kurve C. Entladungspotential 16500 Volt.

vorhandenen Geschwindigkeiten ist sehr klein; erreicht ihren größten Wert bei etwas kleineren Geschwindigkeiten und fällt dann ziemlich schnell mit abnehmender Geschwindigkeit. Bei steigendem Potential der auffallenden Strahlen verändert sich der Charakter der Kurven. Bei 14000 Volt z. B. liegt das Maximum der Stromdichte den größten im Spektrum vertretenen Geschwindigkeiten viel näher; nur wenige Strahlen besitzen noch eine größere Geschwindigkeit als die Haupt-

menge. Hinter dem Maximum fällt die Stromdichte nicht mehr gleichmäßig mit der Geschwindigkeit ab, sondern zunächst viel rascher, um von einem gewissen Werte an gleichmäßig abzunehmen. Steigt das Potential der auffallenden Strahlen noch weiter (16500 Volt), so liegt das Maximum an der Unterseite des Spektrums, die meisten Strahlen haben ihre ursprüngliche Geschwindigkeit beibehalten.

Kurve Ca. Dopp.Blättchendicke Entladungspotential 17000 Volt

Die Kurve fällt sehr steil ab zu einem kleinen Werte und verläuft dann wieder gleichmäßig; d. h. es sind Strahlen kleinerer Geschwindigkeit vorhanden, aber in nur kleiner Zahl und diese nimmt mit abnehmender Geschwindigkeit nur sehr langsam ab. Bei diesen Versuchen ist die Dicke des Blättchens unverändert geblieben, ändert man sie, so beobachtet man dieselbe Abhängigkeit der Elektrizitätsmenge von der Geschwindigkeit, wie sie die Kurven darstellen, aber bei anderem Potential der auffallenden Strahlen. So bezieht sich die Kurve Ca

auf ein Potential von 17000 Volt und eine Blättchendicke von 0,0036 mm, gleich der doppelten der früher benutzten. Wie man sieht, ist der Verlauf der Kurve demjenigen bei 11000 Volt und einfacher Dicke ähnlich.

§ 11.

Nimmt man an, daß die von Kathodenstrahlen beim Durchgang durch Metalle getroffenen Körperteilchen mit Masse behaftete Kraftzentren sind, die auf die Elektronen mit einer Kraft wirken, welche mit abnehmender Entfernung stark wächst¹⁾, so läßt die Theorie voraussehen, daß die aus einem Blättchen austretenden Kathodenstrahlen nicht ganz diffus verlaufen können, sondern daß im austretenden Bündel die Richtung der einfallenden Strahlen bevorzugt sein muß, um so mehr, je größer die Geschwindigkeit der letzteren und je kleiner die Dicke des Blättchens ist. Dies wurde in der Tat bereits von Hrn. des Coudres²⁾ beobachtet. Durch die folgenden Versuche über dieses Verhalten sollte das Potential der einfallenden Strahlen ermittelt werden, bei welchem im austretenden Bündel die Bevorzugung der Richtung der einfallenden Strahlen beginnt. Ich benutzte dabei eine Röhre von der Gestalt der Fig. 6. Im Zentrum der Kugel *A* befand sich ein dünnes Metallblättchen, ein Diaphragma im geerdeten, das Rohr *B* verlängernden Messingzylinder *M* bedeckend. In den letzteren fielen Kathodenstrahlen von konstanter Geschwindigkeit an der Hohlspiegelskathode *K* mit der 20 plattigen Maschine erzeugt ein, konnten daher in die Halbkugel nur nach dem Durchgang durch das Blättchen gelangen. Die Glaswand der Kugel war durch einen gleichmäßigen Überzug von Calciumsulfid

Fig. 6.

1) E. Warburg, Verh. d. Phys. Gesellsch. 1904. Heft 1.

2) Th. des Coudres, Physik. Zeitschr. 4. p. 140. 1902.

zum Fluoreszieren geeigneter gemacht. Bei einem Entladungspotential von 12000 Volt bemerkte man zuerst ein an allen Stellen der Kugel gleich starkes Fluoreszieren; die austretenden Strahlen verliefen also vollkommen diffus. Beim Steigern des Entladungspotentials nahm die Helligkeit der Fluoreszenz an allen Stellen der Kugel zu, bis zu einem Potential von 20000 Volt, wo man zwar nicht mit bloßem Auge, aber mit dem Photometer eine hellere Fluoreszenz der zentraleren, in der Verlängerung der Einfallrichtung liegenden Glaswandpartien bemerken konnte. Bei noch höherer Geschwindigkeit der Strahlen, bei 22000 Volt, trat der Helligkeitsunterschied der verschiedenen Stellen der Halbkugel so deutlich hervor, daß man ihn ohne Photometer sehen konnte. Der Übergang von helleren zu dunkleren Stellen war durchaus gleichmäßig und ohne irgend einen Sprung in der Intensität. Der Versuch zeigt, daß bei dem Entladungspotential 16500 Volt, bei dem das letzte Spektrum gemessen wurde, eine bevorzugte Strahlenrichtung im Blättchen nicht vorhanden ist, sondern daß die Strahlen vollkommen diffus in ihm verlaufen.

§ 12.

Um die Theorie des Hrn. Warburg auf die beschriebenen Versuche anwenden zu können, war es nötig, die Durchlässigkeit der benutzten Blättchen zu kennen, d. h.

$$\frac{\text{Ladung der durchgegangenen Strahlen}}{\text{Ladung der auffallenden Strahlen}},$$

eine Größe, die mit der Geschwindigkeit der einfallenden Strahlen schnell wächst und auf folgende Weise gemessen wurde. Homogene Kathodenstrahlen fielen in schmalem durch ein Diaphragma begrenzten Bündel (Fig. 7) in einen mit kleiner Öffnung versehenen Faradayschen Zylinder, der durch eine erdabgeleitete Hülle gegen störende Ladungen geschützt und durch ein empfindliches Drehspulgalvanometer zur Erde abgeleitet war. Der Galvanometerausschlag maß also direkt die auffallende Menge. Vor der Öffnung des Faradayschen Zylinders war magnetisch von außen verschiebbar ein kleiner Metallschieber angebracht, der entweder die Öffnung frei ließ, oder

aber sie mit einem dünnen Metallblättchen bedeckte, so daß im letzteren Falle nur Strahlen in den Zylinder gelangten, die das Blättchen durchsetzt hatten. Der Galvanometeraussschlag mißt also jetzt die durchgegangene Menge. Für die Messungen ist ein sehr konstantes Vakuum erforderlich, da während der Dauer einer Messung das Entladungspotential sich nicht ändern darf; zur Kontrolle wurde die Messung der einfallenden Menge zweimal, nämlich vor und nach der Bestimmung der hindurchgegangenen gemacht. Die folgende Tabelle gibt die Resultate der Messungen für die Dicken 0,0018 und 0,0036 mm.

V (Volt)	Durchlässigkeit	
	$d = 0,0018$	$d = 0,0036$
11600	0,036	—
13000	0,095	0,018
14000	0,16	0,038
15000	0,24	0,108
16500	0,33	0,150

Auf diese Versuche hat Hr. Warburg seine Berechnungen gegründet.¹⁾

Fig. 7.

§ 13.

Daß den Herren Lenard und Seitz der Geschwindigkeitsverlust der Kathodenstrahlen beim Durchgang durch dünne Blättchen entgangen ist, glaube ich dem Umstande zuschreiben zu sollen, daß die Herren mit einem Induktorium und daher

1) E. Warburg, l. c.

wahrscheinlich mit sehr hohen Entladungspotentialen gearbeitet haben. Dann muß die Auffindung des Verlustes Schwierigkeiten machen, da, wie die Kurven C zeigen, in solchen Fällen der Hauptteil der hindurchgegangenen Strahlen die alte Geschwindigkeit besitzt und nur ein kleiner Teil mit kleinerer Geschwindigkeit vorhanden ist.

Auch an dieser Stelle sei es mir gestattet, Hrn. Geheimrat Warburg für das stete Interesse an der vorliegenden Arbeit und für fördernden Rat meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Berlin, Physik. Institut d. Univ., 1. August 1904.

(Eingegangen 5. August 1904.)