

8. Die magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen und ihre Abhängigkeit vom Entladungspotential; von W. Kaufmann.

1. Bringt man eine Kathodenstrahlenröhre derart in ein homogenes Magnetfeld, dass die Kraftlinien des letzteren die ursprünglich geradlinige Bahn der Kathodenstrahlen senkrecht durchschneiden, so werden die Strahlen derart abgelenkt, dass ihre Bahn innerhalb des Magnetfeldes die Form eines Kreisbogens annimmt, dessen Ebene zur Richtung der Kraftlinien senkrecht ist. Die Grösse der Ablenkung hängt ausser von der Stärke des Magnetfeldes, der sie direct proportional ist, noch in sehr mannichfaltiger Weise von den Versuchsbedingungen ab; hierzu gehören vor allem der Verdünnungsgrad des in der Röhre befindlichen Gases, die chemische Natur des letzteren, die Dimensionen der Röhre, das etwaige Vorhandensein von Funkenstrecken in der Zuleitung u. a.

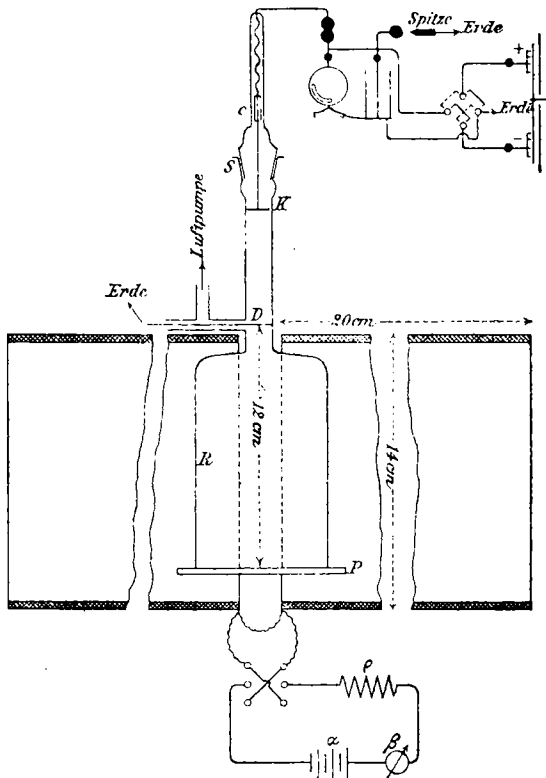
2. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass alle diese verschiedenartigen Veränderungen mit der Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen nur indirect zusammenhängen und auf dieselbe nur insofern von Einfluss sind, als sie die Potentialdifferenz zwischen den Electroden der Röhre verändern. Mit anderen Worten: *Zu einer bestimmten Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode gehört stets eine bestimmte Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen*, ganz unabhängig von dem Gasdruck in der Röhre, von der Natur der Gasfüllung, von dem Electrodenmaterial oder von irgend welchen anderen Umständen.¹⁾

3. Ausser dem genannten ergab sich aber noch das weitere Resultat, dass die Ablenkbarkeiten bei verschiedenem

1) Ein derartiges Verhalten wurde schon von Hrn. Kr. Birckland (Compt. rend. 123. p. 492. 1896) für höhere Potentiale durch Messung mit einer parallel geschalteten Funkenstrecke für den Fall nachgewiesen, dass die Stärke der erregenden Inductorentladung variirt bez eine Funkenstrecke vor die Kathode geschaltet wurde. Ferner gelangt Hr. J. J. Thomson (Nature 55. p. 453. 1897) wenigstens in Bezug auf den Einfluss der chemischen Natur der Gasfüllung zu demselben Resultat. Letztere Veröffentlichung gelangte jedoch erst kurz vor Abschluss meiner Versuche zu meiner Kenntniss.

Entladungspotential durch eine einfache mathematische Relation zusammenhängen; *es ist nämlich die Ablenkbarkeit umgekehrt proportional der Quadratwurzel der Potentialdifferenz der Electroden.*

4. Der benutzte Apparat ist in der Figur im Durchschnitt dargestellt. Eine 11 cm lange und 6,5 cm weite Glasröhre (R) war an ihrem einen Ende mit einer angekitteten starken



Spiegelglasplatte (P) verschlossen; am anderen Ende war ein 1,4 cm weites Ansatzrohr angeblasen, in welchem sich die Kathode (K) befand. Letztere trug an ihrem Stiele einen dünnen Eisencylinder (c), sodass sie durch einen Electromagneten von aussen verschoben werden konnte. Die Zuleitung geschah durch einen am Ende mit Siegelack eingekitteten, spiralförmig gewundenen Kupferdraht, dessen vorstehendes Ende in einen Quecksilbernafp eintauchte. Um die Kathode bequem

auswechseln bez. reinigen zu können, bestand das Electrodenrohr aus zwei durch den Schliff (*S*) verbundenen Theilen. Als Anode diente ein etwa 0,5 mm dicker Platindraht (*D*), dessen Schatten auf der mit einer Theilung versehenen Platte (*P*) die Beobachtung der Ablenkung ermöglichte. Behufs leichterer Beobachtung der Strahlen war die Platte auf der Innenseite mit einer dünnen Schicht Kreide bedeckt, die unter dem Einfluss der Strahlen röthlich fluorescirt.

Zur Erzeugung des Magnetfeldes dienten zwei Röhren aus Zinkblech mit je 2×130 Windungen isolirten Kupferdrahts; ihre Dimensionen sowie ihre Anordnung sind aus der Figur leicht zu ersehen. Der Strom für die Spulen wurde durch eine Accumulatorenatterie (α) geliefert und mittels eines Rheostaten (ρ) und eines Präcisionsampèremeters von Siemens und Halske regulirt bez. abgelesen. Als Electricitätsquelle für die Röhre diente eine Influenzelectrisirmaschine¹⁾ (Radius der rotirenden Scheibe 23 cm), die durch einen Electromotor angetrieben wurde. Der + Pol war zur Erde abgeleitet, vom – Pol führte eine Leitung zu einer Leydner Flasche, von dort zu der einen Kugel eines Funkenmikrometers, von der anderen Kugel zur Kathode; eine Abzweigung verband die innere Belegung der Flasche mit einem Braun'schen Electrometer.²⁾ Die Anode, das Gehäuse des Electrometers, sowie die äussere Belegung der Leydner Flasche waren ebenfalls zur Erde abgeleitet. Endlich war noch eine Vorrichtung angebracht, um durch Annäherung einer abgeleiteten Spitze an einen Theil der Zuleitung die Electricitätszufuhr verringern zu können. Schematisch ist diese Schaltung ebenfalls in der Figur dargestellt.

Zur Messung des Gasdruckes diente ein McLeod'sches Manometer; da jedoch die Angaben desselben nicht sehr constant waren und ausserdem, wie sich bald zeigte, nur wenig

1) Benutzt man als Electricitätsquelle ein Inductorium, so verschwindet der Schatten bei der Ablenkung, da wegen des während jeder Entladung variirenden Potentials die einzelnen verschieden stark abgelenkten Bilder sich übereinander lagern; benutzt man als Anode ein Blech mit einem feinen Spalt, so erhält man mehrere abgelenkte Spaltbilder zugleich (vgl. Kr. Birkeland, l. c.); bei Benutzung der Electrisirmaschine dagegen erhält man auch hier nur *ein* abgelenktes Spaltbild.

2) Um das Potential in Volts zu erhalten, müssen die Angaben des Electrometers mit 1,21 multiplicirt werden.

Interesse boten, so habe ich dieselben in den folgenden Tabellen nicht angegeben. Zur Orientirung sei nur bemerkt, dass der Druck bei den Versuchen zwischen etwa 0,07 bis 0,03 mm variierte. War die Röhre mit Wasserstoff gefüllt, so betrug für dasselbe Entladungspotential *cet. par.* der Druck etwa das Doppelte als bei Luft-, Leuchtgas- und CO₂-Füllung.

5. Waren die Electroden gut gereinigt, so war sowohl die Lichterscheinung in der Röhre, als auch die Stellung der Electrometernadel völlig ruhig, zumal kleine Schwankungen im Gange der Maschine durch die als Reservoir dienende Leydner Flasche ausgeglichen wurden. Nach längerem Gebrauch hingegen traten häufig disruptive Entladungen auf, bei denen die Leydner Flasche sich jedesmal völlig entlud und die Röhre sich mit hellglänzendem Lichte erfüllte; durch Abschmirlen der Electroden konnte der alte Zustand leicht wieder hergestellt werden.

6. Die direct abgelesenen Ablenkungen sind nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar, da das eigentliche Maass für die Ablenkbarkeit die Krümmung (der reciproke Krümmungsradius) der Bahn des Strahles ist, und nur für Ablenkungen, die sehr klein im Verhältniss zum durchlaufenen Weg sind, Proportionalität zwischen Ablenkung und Krümmung besteht. Es müssen deshalb die abgelesenen Werthe auf unendlich kleine Ablenkungen reducirt werden und zwar nach der Gleichung: $A' = x_0^2 A / (x_0^2 + A^2/4)$, wobei A' die reducirte, A die abgelesene doppelte (durch Commutiren des Spulenstromes erhaltene) Ablenkung, x_0 den im Magnetfelde durchlaufenen Weg bedeutet. Bei dem benutzten Apparate war $x_0 = 11$ cm.

In den folgenden Tabellen enthält die erste Zeile das Entladungspotential (V_0) in Volt, die zweite die abgelesene Ablenkung (A), die dritte die corrigirte (A'), die vierte Zeile den Spulenstrom (J) in Ampère; in der fünften Zeile steht die nach 3. constante Grösse $A' \sqrt{V_0} / J$, in der sechsten die procentualen Abweichungen der Constanten vom Mittelwerth.

7. Es war verschiedene Male nöthig, behufs Reinigung des Apparates bez. behufs Erneuerung der durch den Luftdruck zersprengten Verschlussplatte den Apparat auseinander zu nehmen. Da nun hierbei sehr leicht eine Verschiebung der Röhre in ihrer Längsaxe um 1—2 mm eintrat, so änderte

sich dadurch auch die Länge des von den Strahlen im Magnetfelde durchlaufenen Weges. Nun ist aber die Ablenkung proportional dem Quadrate des Weges, sodass bei einer Weglänge von etwa 11 cm der obengenannten Verschiebung eine Aenderung der Ablenkung um etwa 2—4 Proc. entspricht. Dementsprechend unterscheiden sich auch die extremsten Mittelwerthe von $A' \sqrt{V_0}/J$ in den folgenden Tabellen um 3,2 Proc., obgleich die Einzelbeobachtungen in jeder Reihe viel geringere Abweichungen zeigen. Ich glaube daher wohl zu dem Schlusse berechtigt zu sein, dass bei einem Apparate, der es gestattet die Röhre stets wieder genau an dieselbe Stelle zu bringen, die Mittelwerthe durchaus übereinstimmen würden.

8. *Beobachtungsergebnisse.* (Soweit nichts Besonderes bemerkt, ist die Funkenstrecke kurz geschlossen, die Spitzenentladung ausgeschaltet.)

Tabelle I.

(Aluminiumkathode, Luftfüllung, Electrodenabstand 6 cm, Variirung von V_0 durch Aenderung des Gasdruckes.)

V_0	A	A'	J	$A' \sqrt{V_0}/J$	δ
5 920	3,80	3,65	0,705	399	+ 0,8%
6 160	3,73	3,59	0,710	397	+ 0,3
8 220	3,15	3,06	0,705	393	— 0,8
8 950	3,04	2,96	0,705	397	+ 0,3
9 550	2,95	2,87	0,705	398	+ 0,5
10 750	2,74	2,67	0,705	393	— 0,8
11 600	2,63	2,57	0,705	393	— 0,8

Mittel 396

Tabelle II.

(Kupferkathode, sonst wie Tab. I.)

V_0	A	A'	J	$A' \sqrt{V_0}/J$	δ
4 350	4,45	4,23	0,71	393	± 0 %
5 920	3,75	3,61	0,71	391	— 0,5
7 740	3,31	3,20	0,71	397	+ 1,0
9 550	2,95	2,87	0,71	395	+ 0,5
10 630	2,75	2,68	0,71	389	— 1,0

Mittel 393

Aus Tabelle I und II folgt, dass das Kathodenmaterial keinen Einfluss auf die Ablenkung hat; in den folgenden Tabellen ist die Kathode stets aus *Kupfer*.

Tabelle III.

(Wie Tab. II, Electrodenabstand 5,75 cm.)

V_0	A	A'	J	$A'\sqrt{V_0}/J$	δ
3 260	2,87	2,78	0,397	400	+ 0,5°
3 620	2,67	2,61	0,397	396	— 0,5
4 110	3,22	3,12	0,507	395	— 0,8
4 770	4,25	4,06	0,700	400	+ 0,5
5 670	3,87	3,72	0,701	399	+ 3,0
6 880	3,49	3,37	0,701	399	+ 0,3
8 450	3,12	3,03	0,701	398	± 0

Mittel 398

Tabelle IV.

Durch Verschieben der Kathode lässt sich V_0 innerhalb enger Grenzen variiren. Je geringer der Druck, desto grösser ist der Einfluss der Verschiebung auf V_0 ; in der Tabelle ist der Electrodenabstand unter l angegeben. Die bei demselben Gasdruck erhaltenen Werthe von V_0 sind durch eine Klammer verbunden. Die Röhre ist mit Luft gefüllt.)

V_0	A	A'	J	l	$A'\sqrt{V_0}/J$	δ
{ 4 170	4,0	3,84	0,607	4,6	408	+ 0,5°
{ 4 170	3,55	3,43	0,542	6,0	408	+ 0,5
{ 4 600	3,72	3,58	0,603	6,0	403	— 0,7
{ 5 050	3,65	3,52	0,605	4,1	413	+ 1,7
{ 5 800	3,75	3,61	0,682	6,0	403	— 0,7
{ 6 880	3,70	3,56	0,733	3,95	403	— 0,7

Mittel 406

Die Entfernung der Electroden beeinflusst also die Ablenkbarkeit nicht.

Tabelle V.

(Röhre mit Leuchtgas gefüllt, Electrodenabstand 5,8 cm.)

V_0	A	A'	J	$A'\sqrt{V_0}/J$	δ
6 410	3,85	3,70	0,735	403	+ 0,4°
8 350	3,35	3,24	0,735	403	+ 0,4
9 310	3,20	3,10	0,735	407	+ 1,5
9 550	3,07	2,98	0,735	396	— 1,4
11 120	2,87	2,80	0,735	401	— 0,1
11 850	2,78	2,71	0,735	401	— 0,1

Mittel 401,5

Tabelle VI.

(Röhre mit CO_2 gefüllt, Electrodenabstand 6 cm.)

V_0	A	A'	J	$A\sqrt{V_0}/J$	δ
3 870	3,75	3,61	0,564	398	$\pm 0 \%$
4 830	3,38	3,27	0,566	402	$+ 1,0$
5 440	4,02	3,86	0,724	393	$- 1,3$
6 530	3,73	3,59	0,724	401	$+ 0,8$
7 740	3,40	3,29	0,725	400	$+ 0,5$
11 100	2,80	2,73	0,7275	396	$- 0,5$

Mittel 398

Tabelle VII.

(Wasserstofffüllung, Electrodenabstand 5,7 cm.)

V_0	A	A'	J	$A\sqrt{V_0}/J$	δ
4 230	4,2	4,02	0,642	407	$+ 0,7\%$
6 900	3,8	3,65	0,74	409	$+ 1,2$
9 430	3,15	3,06	0,74	402	$- 0,5$
14 400 ¹⁾	2,50	2,45	0,74	398	$- 1,5$

Mittel 404

Aus den Tabellen V bis VII geht hervor, dass auch die Natur des in der Röhre vorhandenen Gases keinen directen Einfluss auf die Ablenkung hat.

Es ist endlich noch möglich das Entladungspotential durch Aenderung in der Art der Electricitätszufuhr zu variiren, und zwar bewirkt die Einschaltung einer kleinen Luftfunkenstrecke vor die Kathode eine Steigerung, die Annäherung einer zur Erde abgeleiteten Spitze an einen Theil der negativen Zuleitung eine Verminderung von V_0 .

Das auch für das auf diese Weise variierte Potential die oben aufgeführten Gesetze noch gelten, zeigt die folgende Tabelle VIII.

1) Da das Electrometer nur bis 12 100 Volt zeigte, so wurde dieser Werth der Tabelle aus der Schlagweite einer zur Röhre parallel geschalteten Funkenstrecke mit Hülfe der von Hrn. Paschen (Wied. Ann. 37. p. 79. 1889) angegebenen Tabellen berechnet.

Tabelle VIII.

(Ohne Funkenstrecke und Spitzenentladung beträgt $V_0 = 7740$ — in der Tabelle unterstrichen — unterhalb 6220 findet bei dem vorhandenen Gasdruck überhaupt keine Entladung mehr statt, oberhalb 10 150 verliert die Entladung wegen zu langsamen Aufeinanderfolgens der Funken ihren stetigen Charakter.)

V_0	A	A'	J	$A\sqrt{V_0}/J$	δ
6 220	3,80	3,65	0,725	397	— 0,25%
7 020	3,57	3,45	0,725	398	± 0
7 260	3,50	3,38	0,725	397	— 0,25
<u>7 740</u>	<u>3,40</u>	<u>3,29</u>	<u>0,725</u>	<u>399</u>	+ 0,25
<u>9 200</u>	<u>3,10</u>	<u>3,01</u>	<u>0,725</u>	<u>398</u>	± 0
10 150	2,95	2,87	0,725	399	+ 0,25

Mittel 398

9. Die magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen ist vielfach als Beweis für die Hypothese hingestellt worden, dass die Kathodenstrahlen von der Kathode fortgeschleuderte und negativ geladene materielle Theilchen seien. Wenn dies wirklich der Fall ist, so ist offenbar die Geschwindigkeit der Theilchen bedingt durch die auf sie verwandte electriche Arbeit. Da nun die bei der Beobachtung in Betracht kommenden Theilchen sich unmittelbar an der Anode vorbei bewegen, so kommt für diese die gesammte Potentialdifferenz der Electroden in Anrechnung, und es ist die kinetische Energie eines bei der Anode vorbeigehenden Theilchens:

$$(I) \quad \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = \varepsilon V_0.$$

Hierbei ist m die Masse des Theilchens in g, ε seine Ladung und V_0 das Entladungspotential in absoluten electromagnetischen Einheiten; die Richtung der Kathodenstrahlen sei die X -Axe eines rechtwinkligen Coordinatensystems, die Richtung der Magnetkraftlinien die Y -Axe und die Ablenkungsrichtung die Z -Axe. Dann ist die in der Z -Richtung auf das Theilchen ausgeübte Beschleunigung:

$$(II) \quad m \frac{d^2 z}{dt^2} = H \varepsilon \frac{dx}{dt};$$

wenn mit H die absolute Feldintensität bezeichnet wird.

Bezeichnet man nun mit x_0 den gesammten innerhalb des Magnetfeldes zurückgelegten Weg, so ergibt sich die Ablenkung¹⁾:

$$(III) \quad z = H \frac{x_0^2}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{2 m V_0}}.$$

Soll also dies theoretische Resultat mit dem Beobachtungsergebnisse übereinstimmen, dass nämlich die Ablenkbarkeit der Strahlen $\sqrt{V_0}$ umgekehrt proportional ist, so muss ϵ/m eine constante Zahl sein. Eine derartige Annahme würde jedoch physikalisch schwer zu deuten sein; macht man nämlich die naheliegendste Annahme, dass die bewegten Theilchen Ionen seien, so müsste ϵ/m für jeden Stoff einen anderen Werth haben, die Ablenkung müsste also vom Electrodenmaterial, oder, wenn die Theilchen aus der Gasfüllung stammen, von der Natur des letzteren abhängig sein. Beides ist thatsächlich nicht der Fall. Ausserdem zeigt eine einfache Rechnung, dass man zur Erklärung der beobachteten Ablenkungen der Grösse ϵ/m einen Werth von rund 10^7 C. G. S.-E. beilegen müsste, während er doch selbst für ein Wasserstoffion nur 10^4 C. G. S.-E. beträgt.

Wollte man andererseits annehmen, dass die Theilchen sich durch blossen Contact an der Kathode laden, und dass der grosse Werth von ϵ/m durch die ausserordentliche Kleinheit der Theilchen bedingt sei, da ja die Capacität einer Kugel pro Masseneinheit dem Quadrat ihres Durchmessers umgekehrt proportional ist, so wäre wiederum die Constanz von ϵ/m bei variirendem Potential unerklärlich, da ja jetzt ϵ dem Potential proportional sein müsste. Ebensowenig liesse sich die Constanz bei verschiedenem Electroden- oder Gasmaterial ohne Zuhülfenahme neuer künstlicher Hypothesen erklären.

9. Ich glaube deshalb zu dem Schlusse berechtigt zu sein, dass die Hypothese, welche annimmt, die Kathodenstrahlen seien abgeschleuderte Theilchen, zu einer befriedigenden Erklärung der von mir beobachteten Gesetzmässigkeiten allein nicht ausreichend ist.

Berlin, Physik. Inst. d. Univ., April 1897.

(Eingegangen 21. Mai 1897.)