4. Über Goldsteins „unsichtbare“ Kathodenstrahlen; von A. Wehnelt.

Nach den Beobachtungen von E. Goldstein¹⁾ gehen von einer den Querschnitt eines zylindrischen Entladungsrohres ausfüllenden Kathode, bei tiefen Drucken, zweierlei Arten von Kathodenstrahlen aus. Die eine entspringt aus den mittleren Teilen der Kathode und ist, schwach divergierend, meist durch das ganze Rohr zu verfolgen. Die zweite geht von allen Stellen der Kathode aus und zeigt dabei stärkere Divergenz, so daß sogar die Glaswände bis nahe an die Kathode heran zur Fluoreszenz erregt werden, ist aber auf ihrem Wege nicht sichtbar.²⁾

Wie ich in einer früheren Arbeit gezeigt habe, sind die Niveauflächen in der Nähe der Kathode stark gekrümmt. Außerdem hat die Feldstärke dort den weitaus größten Wert, so daß die Kathodenstrahlen dort hauptsächlich ihre Geschwindigkeit und Richtung erlangen. Die Strahlen, welche von einem nahe am Rande gelegenen Punkte ausgehen, müssen deshalb eine Krümmung erfahren, die sie zur Glaswand hin ablenkt. Die Richtigkeit dieser Ansicht zeigte ich früher³⁾ bereits durch folgenden Versuch (Fig. 1). Eine Kathode K_1 , die als Endverschlußplatte eines Entladungsrohres R_1 diente, war mit einer feinen Öffnung O durchbohrt, welche sich nahe am Rande befand. Hinten war auf die Kathode ein zweites, wesentlich engeres Entladungsrohr R_2 aufgesetzt, welches K_1 als Anode benutzte und eine Kathode K_2 besaß. Wurden nun

1) E. Goldstein, Wied. Ann. 60. p. 491. 1897; Verh. d. Deutsch. Physik. Ges. 3. p. 192. 1901.

2) A. Wehnelt, Physik. Zeitschr. 2. p. 518—527. 1901.

3) A. Wehnelt, Habilitationsschrift, Erlangen 1901. p. 41; Ann. d. Phys. 10. p. 578. 1903.

die beiden Röhren soweit evakuiert, daß das hintere Rohr R_2 gute Kathodenstrahlen gab, die, auf Glas auftreffend, dasselbe zur lebhaften Fluoreszenz erregten, so war die Entladung in dem Rohr R_1 noch nicht so weit vorgeschritten, daß die Strahlen dort Fluoreszenz hervorbrachten, andererseits war jedoch der Querschnitt des Kanalstrahlenbündels bereits so weit verengt, daß die Krümmung der Niveauflächen an der Kathode schon sehr ausgeprägt sein mußte. Schickte man nur durch das Rohr R_2 eine Entladung, so gingen die dabei erzeugten Kathodenstrahlen durch das Loch O der Verschlußplatte und gelangten in das vordere Rohr R_1 , wo sie, natürlich völlig geradlinig verlaufend, einen Fluoreszenzfleck F_1 erzeugten.

Fig. 1.

Rief man nun aber in R_1 auch eine Entladung hervor, so wurden die Kathodenstrahlen dort sofort abgelenkt, was man aus dem Wandern des Fluoreszenzfleckes von F_1 nach F_2 ersieht. Daraus folgt, daß, wenn Strahlen nahe am Rande der Kathode entstehen, sie zur Wand hin abgelenkt werden und diese bald treffen müssen.

Wodurch diese Strahlen entstehen, war bisher noch nicht mit Sicherheit festgestellt. Ich¹⁾ hatte seinerzeit die Vermutung ausgesprochen, daß das ultraviolette Licht, welches von dem Glimmlicht ausgeht, auf der ganzen Fläche der Aluminiumkathode einen Photoeffekt hervorruft, und daß die so erzeugten Elektronen Veranlassung zu den von der ganzen Fläche ausgehenden Kathodenstrahlen geben mußten.

Entstehungsursachen der unsichtbaren Kathodenstrahlen.

Gelegentlich einer früheren Arbeit über die Stromverteilung an ebenen Kathoden zylindrischer Entladungsröhren hatte ich²⁾

1) A. Wehnelt, Verh. d. Deutsch. Physik. Ges. 14. p. 832. 1912.

2) A. Wehnelt, Physik. Zeitschr. 2. p. 334—339. 1901.

gefunden, daß bei tiefen Drucken der gesamte Strom an der Kathode durch das sichtbare Bündel (Kanalstrahlenbündel) abfließt. Ich hatte dies dadurch nachzuweisen geglaubt, daß ich die Kathodenfläche aus zwei voneinander isolierten Teilen anfertigte, nämlich aus einem kreisförmigen Mittelteil und einem denselben umgebenden Ring. Beide Teile der Kathode waren gut voneinander isoliert und durch Galvanometer zur Erde abgeleitet. Das damals zu diesen Versuchen benutzte Instrument hatte nur eine Empfindlichkeit von $2 \cdot 10^{-6}$ Amp. pro Skalenteil. Bei einer so geringen Empfindlichkeit mußte ein Photoeffekt, selbst wenn er vorhanden gewesen wäre, sich der Wahrnehmung entziehen. Ich habe deshalb die Versuche noch einmal wiederholt mit einem empfindlicheren Galvanometer (1 Skt. = $1,8 \cdot 10^{-10}$ Amp.) und bin dabei zu einer ganz anderen Auffassung der Entstehungsursache der unsichtbaren Kathodenstrahlen gekommen.

Benutzt wurde zu diesen Versuchen eine Kathode, welche aus drei voneinander gut isolierten Teilen bestand. Dieselbe füllte den Querschnitt eines zylindrischen Entladungsrohres vollkommen aus und bestand (Fig. 2) 1. aus einem kreisförmigen Mittelteil von 1 cm Durchmesser K_1 , 2. aus zwei denselben umgebenden Ringen von je 1 cm Breite K_2 und K_3 . Die einzelnen Teile der Kathode wurden durch eine starke Glimmerplatte zusammengehalten, auf welche sie aufgeschraubt waren. Der Strom, der durch den Mittelteil abfloß, wurde durch ein Milliampereometer gemessen und der von den Ringen durch das oben erwähnte Galvanometer, dessen Empfindlichkeit durch Nebenschlüsse in geeigneter Weise verändert werden konnte.

Fig. 2.

Den Strom lieferte eine Influenzmaschine. Der Versuch ergab, wie folgende Tabelle zeigt, daß auch bei den tiefsten Drucken, bei denen die Dicke des sichtbaren Kathodenstrahlenbündels nur noch einige Millimeter betrug, doch noch relativ beträchtliche Ströme durch die beiden Ringe abflossen.

Stromstärke, welche abfließt durch den	Mittelteil	$i = 0,313 \cdot 10^{-3}$ Amp.	$i = 0,313 \cdot 10^{-3}$ Amp.
	den 1. Ring	$0,021 \cdot 10^{-3}$ "	$0,016 \cdot 10^{-3}$ "
	den 2. Ring	$0,003 \cdot 10^{-3}$ "	$0,0022 \cdot 10^{-3}$ "

Um eine Bestimmung der durch die Oberflächeneinheit an den verschiedenen Stellen der Kathode abfließenden Stromstärken zu erhalten, diente folgende Anordnung (Fig. 3). In dem Entladungsrohr R von 3 cm Durchmesser mit der Anode A befand sich eine Kathode K , die auf das glattgeschliffene Ende des Rohres mit sanftem Druck (hervorgerufen durch die Feder F) aufgepreßt war. Die Kathode K hatte in der Mitte eine kreis-

Fig. 3.

förmige Öffnung von 1 mm Durchmesser. Mit Hilfe von Zahnstange und Trieb konnte die Kathode K an dem Rohr R entlang bewegt werden, so daß die Öffnung an alle Stellen der Kathode kam. Hinter der Öffnung war eine Auffangelektrode E . Die Kathode K und die von ihr gut isolierte Auffangelektrode E waren, damit die erstere verschoben werden konnte, mit ihren Zuleitungen in Messingröhren mit sanfter Reibung verschiebbar. Zwischen A und K wurde nun bei verschiedenen Drucken die

Entladung mit Hilfe einer Hochspannungsmaschine erzeugt und dabei die Öffnung in der Kathode K vom Rande zur Mitte bewegt. Die Stromstärke, welche durch E abfloß, wurde mit dem oben erwähnten empfindlichen Galvanometer, der Gesamtstrom, welcher durch R ging (also durch K abfloß) durch ein Milliampèremeter gemessen. Bei diesen Versuchen waren die Quecksilberdämpfe durch ein mit flüssiger Luft gekühltes Rohr abgehalten. Der Druck blieb während einer Messung konstant, da ein großes kugelförmiges Rohr von 30 cm Durchmesser an das Versuchsrohr angeschlossen war.

Folgende Tabelle gibt die Resultate einiger Versuchsreihen.

Tabelle 1.

Abstand der Mitte der Kathodenöffnung vom Rande in Millimetern	Ausschlag des Galvanometers auf gleiche Emp- findlichkeit reduziert (1 Skt. = $1,8 \cdot 10^{-10}$ Amp.) bei einem Entladungspotential von		
	1600 Volt	2000 Volt	5040 Volt
0	0	0	0
1	0,5	—	—
2	1	1	5,5
3	1,5	—	—
4	3,5	2	8,5
5	7,5	—	—
6	17	6	17,5
7	50	—	—
8	171	39	48
9	430	135	—
10	620	350	187
11	715	642	900
12	785	850	2900
13	725	900	5500
14	725	905	7400
15	715	905	7800
Dicke des sichtbaren Kathodenstrahlenbündels	13 mm	8 mm	5 mm
Stromstärke im Entladungsrohr R	$1 \cdot 10^{-3}$ Amp.	$1 \cdot 10^{-3}$ Amp.	$1,2 \cdot 10^{-3}$ Amp.

Die Fig. 4 zeigt die nach der Tabelle gezeichneten Kurven. Man ersieht daraus, daß der Strom im sichtbaren Bündel nur in der Mitte konstant ist und dann nach den Rändern zu schnell abfällt, daß jedoch bis zum Rande der Kathode hin noch Ströme vorhanden sind.

Aus der Größe der beobachteten Stromstärken am Rande der Kathode ergibt sich schon, daß das ultraviolette Licht keineswegs allein für den Effekt verantwortlich gemacht werden kann.

Um zu untersuchen, ob durch die Öffnung positive geladene Ionen hindurchtreten, obgleich man sich am Rande meist außerhalb des sichtbaren Kanalstrahlenbündels befand,

wurde die Kathode auf -120 Volt aufgeladen, so daß also die positiven Strahlen ein entgegengerichtetes Feld zu durchlaufen hatten. Der Versuch ergab, daß der durch E abfließende Strom dadurch bei niedrigen Potentialen (1600 Volt)

Fig. 4.

um 70 Proz., bei höheren (5040 Volt) um 40 Proz. geschwächt wurde.

Aus diesem Versuche folgt, daß der Hauptsache nach positive Ionen nach rückwärts aus der Kathode austreten auch außerhalb des sichtbaren Kanalstrahlenbündels, denn nur diese und nicht das ultraviolette Licht können durch ein entgegen geschaltetes Feld beeinflußt werden.

Daß das ultraviolette Licht nur einen sehr geringen Einfluß auf die Entladung hat, wurde durch folgenden Versuch gezeigt. Eine Kathode K (Fig. 5), die auf das eine Ende eines 3 cm weiten Entladungsrohres R_1 gekittet war, hatte in der Mitte eine Öffnung von 1 mm Durchmesser. Auf die Rückseite der Kathode K war eine dünne Quarzplatte Q (Deckglasplatte) gekittet und ein Rohr R_2 , welches eine blank geschmirgelte Aluminiumplatte A enthielt. Diese, durch Bern-

Fig. 5.

stein isoliert, war mit einem Quadrantenelektrometer verbunden. Der Ganze, die Platte umgebende Raum war durch ein Messingdrahtnetz N geschützt, das auf $+6$ Volt aufgeladen wurde um sicher zu sein, daß alle Photoelektronen die Aluminiumplatte verließen und gleichzeitig um diese und das mit ihr verbundene Elektrometer vor elektrostatischen Strömen zu schützen.

Erzeugte man in R_1 eine Entladung der gleichen Stromstärke (ca. $1 \cdot 10^{-3}$ Amp.) wie in der Tabelle p. 743 mit a als Anode, so gingen die ultravioletten Strahlen des Glimmlichtes durch die Öffnung in der Kathode K und trafen die Aluminiumplatte A . Der dabei auftretende Photostrom betrug im Maximum ca. 10^{-12} Amp. bei hohem Druck und wurde mit abnehmendem Druck sehr schnell unmerklich schwach.

Wurde die Kathode K auf dem Rohr R_1 so verschoben, daß die zentrale Öffnung von 1 mm Weite ca. 10 mm vom Rande entfernt war, so zeigte das Elektrometer keinerlei Wirkung mehr an, trotzdem bei dem gleichen Versuche Tab. I der Strom im Galvanometer ohne Quarzplatte noch $6,2 \cdot 10^{-8}$ Ampère betrug.

Aus dem Versuche folgt, daß, wenn auch das dünne Quarzfenster etwas von dem ultravioletten Licht absorbiert, dennoch die Wirkung desselben außerordentlich schwach ist gegenüber der Wirkung der positiven Teilchen (vgl. Tab. 1).

Demnach entstehen die unsichtbaren Kathodenstrahlen an der ganzen Fläche der Kathode durch genau die gleichen Ursachen, wie das zentrale Bündel, also durch auftreffende positive Teilchen, die auch Zerstreuung an ruhenden Gasmolekülen an die entfernter gelegenen Teile der Kathode gelangen mögen. Die Unsichtbarkeit dieser Strahlen wird veranlaßt durch die gegen das zentrale Bündel schwächere Stromdichte.

Messungen der Geschwindigkeit der unsichtbaren Kathodenstrahlen.

Die Strahlen, die nahe am Rande der Kathode ausgehen und eine schnell zur Rohrachse gekrümmte Bahn haben, müssen, da sie nicht den ganzen Kathodenfall durchlaufen, eine geringere Geschwindigkeit besitzen, als die zentralen Strahlen. Ich habe deshalb die Geschwindigkeit dieser Strahlen durch ihre magnetische Ablenkung untersucht und in der Tat gefunden, daß ihre Geschwindigkeit immer geringer wird, je näher sie dem Rande der Kathode entspringen.

Die hierzu benutzte Versuchsanordnung ist im folgenden beschrieben.

Ein 4 cm langes zylindrisches Entladungsrohr (Fig. 6) enthielt an einem Ende die feste Anode *A*, am anderen Ende die, durch Zahnstange und Trieb verschiebbare Kathode *K*. In die Seitenwand der Glasröhre war eine Öffnung *O* eingeschliffen von 3 mm Breite und 10 mm Länge. Innen war das Rohr mit einer enganliegenden dünnen Glimmerplatte ausgekleidet, die bei *O* einen $\frac{1}{2}$ mm breiten Spalt hatte, der senkrecht zu der Längsrichtung der Öffnung *O* verlief. Aus dieser feinen Öffnung traten seitwärts die zu untersuchenden Strahlen aus. Das Rohr war umgeben von einer Kugel von 15 cm Durchmesser, in welcher sich ein blau lumineszierender Leuchtschirm *L* einer Braunschen Röhre befand. Derselbe war so befestigt, daß die aus dem kleinen Schlitz in der Glimmerplatte bei *O* austretenden Kathodenstrahlen ihn streifend trafen.

Die Gasfüllung im Rohre war Wasserstoff, der durch ein Palladiumröhrchen eingeführt wurde. Quecksilber und Fettdämpfe wurden bei diesen Versuchen nicht vermieden. Als Stromquelle diente teilweise eine Starkstrominfluenzmaschine von Wehrsen, teils eine Hochspannungsdynamomaschine von 10000 Volt. Zur Evakuuation wurde eine Quecksilberpumpe mit Kapselvorpumpe nach Gaede benutzt.

Fig. 6.

Vor jedem Versuch wurde das Rohr völlig evakuiert bis auf weniger als 10^{-3} mm Hg, dann wurde durch Glühen des Palladiumröhrchens mit einem Bunsenbrenner so viel Gas eingelassen, daß die Entladung einsetzte und das gewünschte Potential erreichte.

Dabei traten aus der Öffnung O sehr schöne, scharf begrenzte Strahlenbündel. Dieselben waren, wenn die Kathode einen sehr geringen Abstand von der Öffnung hatte, etwas

Fig. 7.

breiter, als wenn sie etwas weiter entfernt war, da die Projektion der Öffnung auf den Strahlenkegel im ersteren Falle größer ist als im letzteren (Fig. 7).

Aus diesen Versuchen folgt, daß von der Kathode Strahlen bis nahe am Rande ausgehen, und daß sie, wie Fig. 7 zeigt,

nach allen Richtungen divergent ausgehen.¹⁾ Es war nun noch das Potential festzustellen, welches diesen Strahlen ihre Geschwindigkeit erteilte. Zu diesem Zwecke wurde der kugelförmige Teil des Entladungsrohres in das nahezu homogene Feld zweier großer Magnetspulen gebracht. Das Feld wurde nur so schwach eingestellt, daß der Krümmungsradius der Strahlen gerade noch gut ausmeßbar war. Aus dem Werte von $e/m = 1,76 \cdot 10^7$ konnte dann das Potential berechnet werden nach der Formel:

$$V = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \rho^2 H^2.$$

Da H sehr genau gemessen werden konnte, liegt die einzige Ungenauigkeit in der Bestimmung des Krümmungsradius.

Um diesen möglichst genau zn bestimmen, wurden die Kurven in natürlicher Größe photographiert, wozu 20—30 Sek.

Fig. 8a.

Fig. 8b.

Expositionszeit genügten. Das Gesamtpotential wurde an einem geeichten Righischen Elektrometer abgelesen und blieb während der Messung konstant. Fig. 8 zeigt zwei Aufnahmen derartiger Versuche. Dabei sieht man wieder deutlich den Unterschied in der Breite der Strahlenbündel, hervorgerufen durch die verschiedene Breite der Projektion der Öffnung auf dem Strahlenkegel, wenn dieselben nahe der Kathode (Fig. 8a)

1) Natürlich sind die Strahlen in der Nähe der Kathode gekrümmt, was in der Zeichnung nicht zum Ausdruck gebracht ist.

und wenn sie etwas entfernter ist (Fig. 8b). Die Ausmessung des Krümmungsradius der Kurven geschah folgendermaßen:

Auf einer nicht entwickelten, aber fixierten photographischen Platte wurden auf der Gelatineschicht mehrere Kreise gezogen, deren Radius stets um 2 mm kleiner wurde. Legte man dann die Schichtseite dieser Platte auf die gleiche Seite der photographischen Platten, so konnte ziemlich genau, mit Hilfe einer Lupe, der Krümmungsradius der Kurven bestimmt werden. Die äußerste Abweichung ist dabei + 2 mm. Folgende Tabelle enthält die Resultate einer derartigen Messung:

Platten- nummer	Feldstärke <i>H</i> Gauß	Gesamt- spannung Volt	Abstand 0 von Kathode mm	Krüm- mungs- radius ϱ cm	Berech- nete Werte des Potentials	Mit Sonde gemessene Werte des Potentials
13	30	7460	1,3	5,4	2320	2400
14	30	7460	2,9	6,4	3270	3150
15	30	7460	6,2	7,4	4380	4220
16	30	7460	9,0	7,8	4820	4700
17	30	7460	12,2	8,2	5320	5020

Die in der letzten Zahlenreihe der Tabelle verzeichneten Werte wurden erhalten, indem nach Entfernung der äußeren Glaskugel auf die Öffnung bei *O* ein Rohr gekittet wurde, welches eine Sonde enthielt, die nur etwa 1 mm tief durch den Glimmerschirm in das Rohr hineinreichte. Nach Herstellung der gleichen Druck- und Spannungsverhältnisse wurden bei gleich starkem magnetischen Felde die Potentiale dann mit einem geeichten Braunschen Elektrometer gemessen.

Die Übereinstimmung der aus der magnetischen Ablenkung berechneten Potentiale mit denen durch das Elektrometer gemessenen ist eine für diesen Zweck genügende. Hieraus kann man den Schluß ziehen, daß diese Strahlen mit immer geringeren Geschwindigkeiten von der Kathode ausgehen, je näher ihre Ausgangsstelle dem Rande derselben zuliegt.

Zusammenfassung.

An Kathoden, die den Querschnitt eines zylindrischen Entladungsrohres ausfüllen, gehen bei tieferen Drucken zweierlei Arten von Kathodenstrahlen aus.

1. Ein zentrales, schwach divergierendes Bündel, welches von einigen wenigen Quadratmillimetern des mittleren Teiles der Kathodenfläche ausgeht und meist durch das ganze Rohr schwach erkennbar ist.

2. Von der ganzen Fläche der Kathode gehen unsichtbare Kathodenstrahlen aus. Dieselben divergieren um so mehr, je näher sie vom Rande ausgehen, da sie durch die Form der Niveauflächen der Glaswand zu gebogen werden und daher eine dem durchlaufenen Fall entsprechende Geschwindigkeit haben. Diese Strahlen entstehen hauptsächlich durch positive Teilchen, die auf die Kathode auftreffen und dort Elektronen auslösen, genau so wie man sich das zentrale Bündel auch entstanden denkt.

Berlin, Physik. Institut der Universität, 30. April 1913

(Eingegangen 6. Mai 1913.)