

8. *Sekundäres und primäres negatives Glimmlicht; von J. Stark.*

Inhalt: I. Kathodendunkelraum und negative Glimmschicht. § 1. Über die elektrische Konzentrationsänderung an der Kathode. § 2. Tatsachen und Erklärungshypothesen über die Leuchtintensität des Glimmlichtes. § 3. Methode zur Herstellung sekundären Glimmlichtes. § 4. Sekundärer Kathodenfall. § 5. Länge des sekundären Dunkelraumes. § 6. Folgerungen, Erklärung der Dunkelraumgrenze. — II. Erste Kathodenschicht, Länge des primären Dunkelraumes. § 7. Problemstellung, Erklärungshypothesen. § 8. Die erste Kathodenschicht im sekundären Glimmlicht. § 9. Langsame Kanalstrahlen. § 10. Primärer Dunkelraum, Herkunft der negativen Ionen an der Glimmstromkathode. § 11. Strömungen mit negativen Elektronionen aus der Kathode.

I. Kathodendunkelraum und negative Glimmschicht.

§ 1. *Über die elektrische Konzentrationsänderung an der Kathode.* — Indem die elektrische Strömung von der Kathode negative, von der Anode positive Ionen wegführt, ändert sie wie in einem Elektrolyten so auch in einem ionisierten Gase die Konzentration der Ionen in der Nähe der Elektroden. Hierauf hat für die Strömung in Gasen wohl als erster J. J. Thomson¹⁾ hingewiesen; ihm folgte der Verfasser mit einer ausführlicheren Behandlung²⁾ der Erscheinung. „Durch die elektrische Strömung wird demnach in den Ladungsschichten (Gasschichten an den Elektroden) die Ionisation erniedrigt.“ — „Die spez. Ionengeschwindigkeiten sind im allgemeinen nicht gleich, vielmehr ist v_n immer größer als v_p . Aus diesem Grunde wird an der Kathode die Ionenkonzentration und damit das Leitvermögen durch die elektrische Strömung stärker vermindert als an der Anode. Die kathodische Ladungsschicht besitzt darum in Gasen einen größeren Widerstand als die anodische“. (El. i. G. p. 283.) „Durch die

1) J. J. Thomson, *Phil. Mag.* **47.** p. 253. 1899.

2) J. Stark, *Wied. Ann.* **68.** p. 945. 1899; *Ann. d. Phys.* **2.** p. 62. 1900; **3.** p. 500. 1900; *Die Elektrizität in Gasen.* p. 281. Leipzig 1902.

Konzentrationserniedrigung in den Ladungsschichten wird darum in diesen der Widerstand und damit das Spannungsgefälle um so mehr erhöht, je kleiner die anfängliche Ionisation an der Elektrode und je größer die Stromstärke ist¹. (El. i G. p. 284.) Beim Glimmstrom sind die Verhältnisse an der Kathode verwickelt, da hier ionisierende Strahlungen auftreten. Indes bedingt auch hier die elektrische Konzentrationsänderung ein Steigen des Kathodenfalles mit wachsender Stromdichte. (El. i G. p. 286.) G. C. Schmidt¹⁾ hat neuerdings ebenfalls die Ansicht geäußert, daß an der Kathode des Glimmstromes eine Erniedrigung der Ionenkonzentration, „Verarmung“ an Ionen, eintrete.

Daß die Leitfähigkeit bez. Zahl der Ionen im Gase in der Nähe der Kathodenoberfläche, im Dunkelraum in der Tat größer ist als in der negativen Glimmschicht, wurde von H. A. Wilson und dem Verfasser mittels der Methode der Querströme²⁾ experimentell nachgewiesen. G. C. Schmidt (l. c.) ist mittels einer ähnlichen Methode zu dem gleichen Resultate gekommen; auch fand er, daß der abnormale Kathodenfall des Glimmstromes kleiner wird, wenn man das Gas in dem Kathodendunkelraum mittels Kathoden- oder Kanalstrahlen von einer zweiten Kathode her ionisiert.

Nach dem Vorstehenden wird in einer elektrischen Strömung in Gasen, speziell auch im Glimmstrom an der Kathode durch die elektrische Konzentrationsänderung ein beträchtlicher Spannungsabfall bedingt. Damit allein ist aber die Grenze zwischen Kathodendunkelraum und negativer Glimmschicht nicht erklärt; die Feststellung, daß im Dunkelraum die spez. Ionenzahl geringer ist als in der Glimmschicht, erklärt für sich allein noch nicht die merkwürdige Intensitätsverteilung des Leuchtens an der Kathode des Glimmstromes.

§ 2. *Tatsachen und Erklärungshypothesen über die Leuchtintensität des Glimmlichtes.* — In optischer Hinsicht besteht das negative Glimmlicht aus drei Teilen, nicht nur was die Intensität, sondern auch die Farbe des ausgestrahlten Lichtes

1) G. C. Schmidt, Ann. d. Phys. **12**. p. 622. 1903.

2) H. A. Wilson, Phil. Mag. **49**. p. 514. 1900; J. Stark, Ann. d. Phys. **3**. p. 492. 1900.

betrifft. Auf der Kathode sitzt die *erste Kathodenschicht*, ihre Lichtintensität nimmt von der Kathode weg ab; ihre Farbe ist in vielen Gasen gelblich. Auf sie folgt ein nur wenig leuchtender Raum, der sogenannte *dunkle Kathodenraum*; seine Farbe ist rein blau. Auf ihn folgt mit rasch ansteigender und nach der Anode zu langsam abklingender Lichtintensität die hell leuchtende *negative Glimmschicht*; ihre Farbe ist ein Gemisch von intensivem weißlichem oder rötlichem Blau und einem schwachen reinen Blau, demselben Blau, welches der Kathodendunkelraum zeigt. Im dunklen Kathodenraum besitzt also die Lichtintensität ein Minimum, daneben am Ende der ersten Kathodenschicht und an der Grenze von Dunkelraum und Glimmschicht je einen Wendepunkt. Dem Auge fällt besonders diese letztere scharfe Grenze auf. Als *Länge des Kathodendunkelraumes* wird in der Regel der Abstand der Grenze Glimmschicht-Dunkelraum von der Kathodenoberfläche bezeichnet.

Die elektrische Spannung fällt innerhalb der Länge des Dunkelraumes rasch ab, innerhalb der negativen Glimmschicht ist der Spannungsabfall von Null nur wenig verschieden. Die Spannungsdifferenz zwischen negativer Glimmschicht und Kathode, der Kathodenfall, kann unter einen bestimmten Minimalwert, den normalen Kathodenfall, nicht sinken, wenn der Glimmstrom nicht aufhören soll, selbständig zu existieren. Von der negativen Glimmschicht weg laufen nach der Kathode zu positive Ionen, erlangen beim Durchlaufen des Kathodenfalles eine große Spannungsdifferenz und besitzen darum an der Kathodenoberfläche strahlenartigen Charakter (positive Strahlen, Kanalstrahlen). Aus der ersten Kathodenschicht laufen von der Kathode weg nach der negativen Glimmschicht negative Ionen, erlangen beim Durchlaufen des Kathodenfalles ebenfalls eine große Geschwindigkeit und nehmen so strahlartigen Charakter an (negative Strahlen, Kathodenstrahlen).

Indem die *primären* von der Kathode kommenden negativen Strahlen auf Gasmoleküle treffen, werden sie einerseits diffus zerstreut, andererseits erregen sie im Gase neue, *sekundäre* Kathodenstrahlen. Die Geschwindigkeit der zerstreuten und sekundären Strahlen ist kleiner als diejenige der primären; dies ist aus der stärkeren magnetischen Ablenkbarkeit

zu schließen; gemessen in Volt (genauer in der Quadratwurzel aus Volt) ist die Geschwindigkeit der primären Strahlen immer größer als mehrere Hunderte Volt, nämlich gleich dem Kathodenfall; ob die Mehrzahl der sekundären Strahlen eine angenähert gleich große oder eine viel kleinere Geschwindigkeit besitzt, weiß man nicht. Von der Kathode weg nimmt die Zerstreung der primären Strahlen zu und erreicht in der negativen Glimmschicht ein Maximum.

Zur Erklärung der räumlichen Variation der Intensität des negativen Glimmlichtes hat man von der elektrischen Strahlung in ihr auszugehen. Als Energiequelle des Leuchtens der ersten Kathodenschicht nimmt man heute ziemlich allgemein die kinetische Energie der positiven Strahlen (Kanalstrahlen) an. Das schwache rein blaue Licht des Kathodendunkelraumes wird erzeugt von einem kleinen Bruchteil primärer Strahlen, die bereits hier Gasmoleküle treffen; auch diese Annahme wird kaum Widerspruch finden. Das Leuchten der negativen Glimmschicht wird nach E. Goldstein,¹⁾ soweit es rein blau wie im Dunkelraum ist, von den primären, soweit es weißlich oder rötlich ist, von den sekundären Kathodenstrahlen erzeugt. Bezüglich der scharfen Grenze zwischen Glimmschicht und Dunkelraum hat sich der Verfasser in seinem Buche (Die Elektrizität in Gasen, Leipzig 1902) der Ansicht Goldsteins angeschlossen. „In der negativen Glimmschicht entstehen — sekundäre langsamere Strahlen, die gemäß ihrer größeren Absorbierbarkeit auch intensiveres Leuchten erregen; diese breiten sich nach allen Richtungen aus, auch rückwärts nach dem Kathodendunkelraum und würden in ihm Leuchten erregen, wenn sie in ihn tief eindringen könnten; dies ist ihnen aber nicht möglich, da sie als negative Teilchen aus dem Dunkelraum zurückgetrieben werden“. (El. i. G. p. 454.) Diese Erklärungshypothese wird im nachstehenden experimentell begründet.

§ 3. *Methode zur Herstellung sekundären Glimmlichtes.* — Der Glimmstrom ist eine selbständige Strömung, er schafft sich an seiner Kathode die notwendigen positiven und negativen

1) E. Goldstein, Verhandl. d. Deutschen Physik. Gesellsch. 2. p. 142. 1900.

Ionen selbst (El. i. G. p. 67, 118); sein negatives Glimmlicht soll aus diesem Grunde primär oder selbständig heißen. Sekundäres Glimmlicht kann man auf folgende Weise herstellen. Man bringt an zwei Stellen einer Niveaufäche eines primären Glimmstromes je eine Querelektrode an und legt an diese eine gut isolierte elektromotorische Kraft. Man erhält auf diese Weise zwischen den Querelektroden im Gas eine unselbständige oder sekundäre Strömung, welcher die notwendigen Ionen von dem primären Glimmstrom geliefert werden. Der unselbständige Querstrom erlischt, wenn der selbständige Glimmstrom unterbrochen wird.

Bringt man die Elektroden des Querstromes in die primäre negative Glimmschicht, so sind an seiner Kathode die Bedingungen für die Ausbildung eines Kathodendunkelraumes

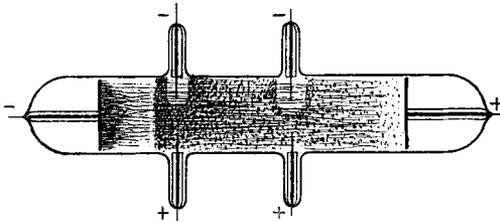


Fig. 1.

gegeben, nämlich erstens ein beträchtlicher Spannungsabfall an der sekundären Kathode infolge von elektrischer Konzentrationsänderung, zweitens sekundäre lichterregende Kathodenstrahlen der Glimmschicht des selbständigen Längsstromes. In der Tat beobachtet man in diesem Falle an der Querkathode sekundäres Glimmlicht. Solange an die Querelektroden keine elektromotorische Kraft gelegt ist, sind sie gleichmäßig in das bläuliche Licht der primären Glimmschicht gehüllt. Wird Spannung an sie gelegt, so entsteht um die Querkathode ein dunkler Raum, an dessen Grenze wird das bläuliche Leuchten verstärkt (sekundäre Glimmschicht), unter günstigen Bedingungen ist an der Oberfläche der Querkathode auch das gelbliche Leuchten einer sekundären ersten Kathodenschicht wahrzunehmen. An der Queranode wird die Verteilung der Leuchtintensität durch Anlegen einer Spannungsdifferenz nicht geändert. Fig. 1 gibt von dem Vorstehenden eine Anschauung.

Der primäre Glimmstrom muß stetig sein. Die Spannungsdifferenz der Querelektroden kann kleiner als der normale Kathodenfall des primären Glimmstromes sein; bei nachstehenden Versuchen lag sie zwischen 10 und 160 Volt; sie wurde kleinen wohlisolierten Akkumulatoren entnommen. Als Querelektroden



Fig. 2.

verwendet man zweckmäßig 0,5—1,5 mm dicke Drähte, die vorne auf einer Länge von 7—10 mm breitgeklopft sind und in Glasröhrchen stecken (Fig. 2); sie werden mit ihrer Ebene senkrecht zu den Linien des primären Glimmstromes gestellt.

Über die Farbe des sekundären Glimmlichtes ist folgendes zu sagen. Wird der Raum um die Querkathode bei Abwesenheit der Querspannung von dem Lichtgemisch reinen und rötlichen Blaus erfüllt, das die primäre Glimmschicht zeigt, so bleibt bei Anlegen der Querspannung im entstehenden sekundären Dunkelraum das schwache rein blaue Leuchten zurück, wie es auch der primäre Dunkelraum zeigt; das rötliche Blau verschwindet aus dem sekundären Dunkelraum und konzentriert sich an seiner Grenze, die sekundäre negative Glimmschicht bildend. Ist an der Querkathode eine sekundäre erste Kathodenschicht wahrnehmbar, so zeigt sie dieselbe Farbe wie im primären Glimmlicht.

§ 4. *Sekundärer Kathodenfall.* — Reicht im primären Glimmstrom die negative Glimmschicht bis zur Anode, so ist der Kathodenfall, die Spannungsdifferenz zwischen Kathode und Anfang der negativen Glimmschicht, nahezu gleich der ganzen Elektrodenspannung. Da die Queranode auch von der stark ionisierten negativen Glimmschicht berührt wird, so ist für den *sekundären Kathodenfall*, der auf dem sekundären Dunkelraum liegenden Spannungsdifferenz, das gleiche zu erwarten.

Um dies zu prüfen, wurde einerseits die ganze Spannung zwischen den Querelektroden, andererseits der sekundäre Kathodenfall mit Hilfe einer Sonde bestimmt. Wie die nachstehende Tabelle zeigt, *ist an der Querkathode im sekundären Dunkelraum ein großer Spannungsabfall vorhanden; der sekundäre Kathodenfall ist nur wenig kleiner als die ganze Spannungsdifferenz zwischen den Querelektroden.*

Tabelle I.

Querstrom- stärke in Mikroamp.	Sekundäre Elektroden- spannung	Sekundärer Kathodenfall	Bemerkungen
140	87,5	84,5	} Querstrom im Anfang der primären Glimm- schicht
160	103,2	99,4	
175	118,5	115,5	
195	136,5	135	
50	90	87,5	} Querstrom im Ende der primären Glimm- schicht
55	106	103,2	
60	122	117,5	
65	139	134,0	

Wie beim primären Glimmstrom und den übrigen Strömen durch ein ionisiertes Gas ist bei gleicher Stromstärke der Kathodenfall um so größer oder bei gleichem Kathodenfall die Stromstärke um so kleiner, je kleiner die Kathodenoberfläche ist. Dies ist auch bei dem Querstrom der Fall. Bei 40 Volt Kathodenfall war für eine bis auf 3 mm nicht mit Glas bedeckte Kathode die Stromstärke $240 \cdot 10^{-7}$ Amp., für eine nur bis auf 0,5 mm freie Kathode $18 \cdot 10^{-7}$ Amp.

Der große Spannungsabfall im sekundären Dunkelraum wird durch zwei Ursachen bedingt. Erstens wird durch die elektrische Konzentrationsänderung die Zahl der positiven und negativen Ionen in ihm verkleinert. Zweitens wird durch den hierdurch bedingten Spannungsabfall ein Teil der sekundären stark ionisierenden Kathodenstrahlen am Eindringen in den sekundären Dunkelraum und damit an der Ionisierung hierin gehindert (§ 6); hierdurch wird der Spannungsabfall noch weiter gesteigert.

§ 5. *Länge des sekundären Dunkelraumes.* — Wie beim primären Kathodendunkelraum so sei auch als Länge des sekundären Dunkelraumes der Abstand des Anfanges der negativen Glimmschicht von der Kathode gerechnet. Die nachfolgenden Messungen des sekundären Kathodendunkelraumes wurden mit Hilfe eines Kathetometers an einer Querkathode, wie sie Fig. 2 zeigt, ausgeführt. Sie sind nur bis auf 10 Proz. genau; wegen der geringen Lichtintensität ist eine größere Genauigkeit nicht möglich. Wie aus Fig. 1 zu ersehen ist,

besitzt der sekundäre Dunkelraum auf der nach der primären Kathode sehenden Seite eine kleinere Länge (d_k) als auf der abgewandten Seite (d_a).

Wie die Tab. II und III ersehen lassen, *nimmt die Länge des sekundären Dunkelraumes ab mit zunehmender primärer Stromstärke; sie ist um so kleiner, je größer die Ionisation in der Nähe der Querkathode ist.*

Tabelle II.

$p = 0,42$ mm. Sekundärer Kathodenfall 156 Volt.

Primäre Stromstärke	Primärer Kathodenfall	Primärer Dunkelraum	Sekundäre Stromstärke	Sekundärer Dunkelraum	
				d_k	d_a
$2,7 \cdot 10^{-3}$	500	5,3 mm	$375 \cdot 10^{-6}$	2,2 mm	3,5 mm
3,6	540	5	475	1,9	2,8
5,1	610	4,5	685	1,8	2,1

Tabelle III.

$p = 0,24$ mm. Sekundärer Kathodenfall 156 Volt.

Primäre Stromstärke	Primärer Kathodenfall	Primärer Dunkelraum	Sekundäre Stromstärke	Sekundärer Dunkelraum	
				d_k	d_a
$0,9 \cdot 10^{-3}$	520	6,5 mm	$190 \cdot 10^{-6}$	1,6 mm	3,4 mm
2,3	630	6	505	1,3	3,1
3,1	680	5,8	635	1,2	2,7
4,3	770	5,7	915	1,1	2,4

Die Abhängigkeit der Länge des sekundären Dunkelraumes von der Ionisation bei gleichem Gasdruck und gleicher primärer Stromstärke zeigt sich auch in folgenden Erscheinungen. Auf der nach der primären Kathode schauenden Seite der Querkathode ist der sekundäre Dunkelraum länger als auf der entgegengesetzten Seite, weil hier die Ionisation kleiner ist als dort. Ferner ist auf beiden Seiten der Querkathode der sekundäre Dunkelraum um so länger, je weiter die Querelektroden von dem Anfang der negativen Glimmschicht entfernt sind. So war bei 156 Volt sekundärem Kathodenfall,

4,3 · 10⁻³ Amp. primärer Stromstärke bei 0,24 mm Druck im Anfang der primären Glimmschicht $i = 915 \cdot 10^{-6}$ Amp., $d_k + d_a = 3,5$ mm; im Ende der Glimmschicht $i = 265 \cdot 10^{-6}$ Amp., $d_k + d_a = 6,6$ mm.

Die Länge des sekundären Dunkelraumes ist weiter unter sonst gleichen Umständen um so größer, je größer der sekundäre Kathodenfall und damit auch die sekundäre Stromstärke ist. Dies zeigt die nachstehende Tabelle.

Tabelle IV.

$p = 0,24$ mm. Primäre Stromstärke $4,3 \cdot 10^{-3}$ Amp.

Sekundärer Kathodenfall	Sekundäre Stromstärke	Sekundärer Dunkelraum	
		d_k	d_a
20	$85 \cdot 10^{-6}$	0,5 mm	1,5 mm
40	117	0,9	2,3
80	175	1,6	2,8
120	225	2,7	3,3
157	265	3,2	3,4

§ 6. *Folgerungen, Erklärung der Dunkelraumgrenze.* —

Aus der oben festgestellten Tatsache, daß die Spannungsdifferenz zwischen Querelektroden in einem Gas, das durch Kathodenstrahlen ionisiert wird, fast ausschließlich als Kathodenfall im sekundären Dunkelraum auftritt, lassen sich wichtige Folgerungen ziehen.

1. Läßt man Kathodenstrahlen zwischen zwei Querelektroden, die auf einer gewissen Spannungsdifferenz gehalten sind, verlaufen, so darf man nur dann eine Ablenkung erwarten, wenn der sekundäre Dunkelraum durch das Kathodenstrahlenbündel hindurch bis zur Queranode reicht. In der Tat erfuhren in den obigen Versuchen nur diejenigen primären Kathodenstrahlen eine Ablenkung, welche den sekundären Dunkelraum durchliefen.

2. Das Auftreten des sekundären Dunkelraumes bei schon kleinem Kathodenfall läßt sich ungezwungen erklären, wenn man annimmt, daß das weißlich blaue Leuchten der negativen Glimmschicht von langsamen sekundären Strahlen erzeugt wird. Diese werden durch den sekundären Kathodenfall aus der unmittelbaren Umgebung der Kathode weggelenkt und in der

sekundären Glimmschicht zusammengedrängt. Darum tritt hier eine Verstärkung, dort eine Verminderung der Leuchtintensität ein. Da nach Goldsteins Beobachtungen die sekundären Kathodenstrahlen in der Tat das weißlich blaue Leuchten verursachen, *so ist das Auftreten des sekundären Dunkelraumes umgekehrt ein Beweis dafür, daß von den sekundären Kathodenstrahlen der negativen Glimmschicht des Glimmstromes eine beträchtliche Anzahl eine kleine Geschwindigkeit von 10—100 Volt besitzt.*

3. Nachdem dies festgestellt ist, hat die Erklärung der primären Dunkelraumgrenze auch keine Schwierigkeit mehr. Das weißlich blaue Leuchten der primären negativen Glimmschicht wird erzeugt durch die langsamen sekundären Strahlen. Diese können in das die Kathode umgebende Gebiet nicht eindringen, da hier der Spannungsabfall groß ist, und zwar genügt wegen der Kleinheit der Geschwindigkeit schon ein kleiner



Fig. 3.



Fig. 4.

Teil des großen primären Kathodenfalles, um sie wegzulenken. *Da die sekundären Strahlen in das Gebiet großen Spannungsabfalles nicht eindringen können, so zeigt dieses nicht das von ihnen hervorgebrachte weißlich blaue Leuchten, sondern nur das sehr schwache rein blaue Leuchten, herrührend von den primären Strahlen.* Daß die Dunkelraumgrenze nicht direkt mit den primären Kathodenstrahlen zusammenhängt, lehrt auch folgende Beobachtung. Bei niedrigen Drucken geht an einer eng von der Glaswand umschlossenen Kathode nur von der Mitte der Kathode ein dünnes etwas divergentes primäres Kathodenstrahlbündel aus (Fig. 3). Gleichwohl erfüllt der Kathodendunkelraum und die negative Glimmschicht den ganzen Querschnitt der Röhre dank dem Kathodenfall und den diffusen sekundären Strahlen.

Liegt der sekundäre Dunkelraum gerade im Anfang der primären negativen Glimmschicht, so wird da, wo primärer und sekundärer Dunkelraum sich berühren, ein kleines Gebiet von geringem Spannungsabfall geschaffen; in dieses können darum die sekundären Strahlen der negativen Glimmschicht eindringen (Fig. 4).

II. Erste Kathodenschicht, Länge des primären Dunkelraumes.

§ 7. *Problemstellung, Erklärungshypothesen.* — Im vorstehenden Abschnitt wurde gezeigt, daß großer Spannungsabfall und kleine Geschwindigkeit der sekundären Strahlen in ihrem Zusammenwirken überhaupt einen Dunkelraum um die Kathode bedingen. Es bleiben nun noch zwei Fragen bezüglich des negativen Glimmlichtes zu beantworten.

1. Wodurch wird die Länge des primären Dunkelraumes bestimmt? Diese Frage soll wenigstens für den einfachen Fall des normalen Kathodenfalles der Beantwortung näher gerückt werden.

2. Welche Rolle spielt im elektrischen Mechanismus des primären Glimmlichtes die erste Kathodenschicht? Die Beantwortung dieser Frage schließt die Antwort auf eine andere Frage in sich. Woher kommen die negativen Ionen an der Kathode des Glimmstromes, aus dem Gas oder aus der Kathode?

Wie schon bemerkt wurde, herrscht nahezu allgemeine Übereinstimmung darüber, daß die Energiequelle für das gelbliche Leuchten der ersten Kathodenschicht die kinetische Energie der auf die Kathode zulaufenden positiven Strahlen ist. Befindet sich in der Kathode ein Kanal, so setzt sich das gelbliche Leuchten durch diesen hindurch hinter die Kathode fort, und hier zeigen seine Erreger nach W. Wiens Versuchen das Verhalten von positiv geladenen Teilchen. Man weiß ferner, daß die positiven Strahlen das Gas hinter der Kathode durch ihren Stoß zu ionisieren vermögen. Da sie im Kanal und hinter der Kathode keinen Geschwindigkeitszuwachs mehr erfahren, so ist es als sichere Tatsache zu betrachten, daß *die positiven Strahlen auch unmittelbar an der Kathodenoberfläche die von ihnen getroffenen Gasteilchen zu ionisieren vermögen.*

Daß die Länge des primären Dunkelraumes nichts mit der freien Weglänge der neutralen Gasmoleküle zu tun hat, ist theoretisch zu erwarten und ist auch experimentell festgestellt worden. Man begegnet vielfach der Meinung, daß die Dunkelraumlänge die freie Weglänge der von der Kathode ausgehenden negativen Elektronionen darstelle. Auch diese Meinung ist irrig. Zwar ist die primäre Dunkelraumlänge eine

untere Grenze der mittleren freien Weglänge der primären Kathodenstrahlen; der größte Teil von diesen durchläuft den Dunkelraum frei. In Wirklichkeit ist aber die mittlere freie Weglänge der primären Kathodenstrahlen größer als die Länge des Dunkelraumes; bei niedrigen Drucken liegt nämlich das Maximum des rein blauen Leuchtens, das von den primären Strahlen erregt wird, nicht im Anfang der negativen Glimmschicht, sondern hat eine viel größere Entfernung von der Kathode. Von dem Verfasser ist an verschiedenen Stellen¹⁾ die Ansicht vertreten worden, daß die Länge des primären Dunkelraumes, wenigstens bei normalem Kathodenfall, die mittlere freie Weglänge der positiven Ionen darstelle, welche vom Anfang der negativen Glimmschicht bis zur Kathodenoberfläche den Kathodenfall frei durchlaufen haben. Diese Ansicht soll im Nachstehenden einer Prüfung unterzogen werden.

Bezüglich der Herkunft der negativen Ionen an der Kathode des Glimmstromes stehen sich zwei Meinungen gegenüber. Allgemein verbreitet ist die Meinung, daß die negativen Elektronionen, welche als Kathodenstrahlen von der Kathode weg in die negative Glimmschicht laufen, direkt aus der Kathode herauskommen. Die zweite Meinung, die vom Verfasser mehrfach ausgesprochen worden ist, gibt zunächst zu, daß positive Gasionen dicht an die Kathodenoberfläche herantreten, aus ihr negative Elektronen an sich nehmen und so neutral werden; diejenigen negativen Elektronionen dagegen, welche von der elektrischen Kraft getrieben von der Kathode wegströmen, läßt die zweite Meinung nicht direkt aus der Kathode selbst, sondern aus der unmittelbar an dieser liegenden Gasschicht kommen, hier läßt sie sie erst aus neutralen Molekülen durch den ionisierenden Stoß der positiven Ionen entstehen. Für beide Ansichten ist das Auftreten der negativen Elektronionen im Gas unmittelbar an der Kathodenoberfläche an die Bedingung einer Arbeitsleistung geknüpft. Im ersten Falle muß eine Elektrisierungsarbeit (El. i. G. p. 99, 375) entgegen der Kontaktkraft in der Grenzfläche Kathode-Gas ge-

1) J. Stark, *Ann. d. Phys.* 7. p. 432. 1902; 3. p. 403. 1902; *El. i. G.* p. 67.

leistet werden; nach Richardson¹⁾ ist diese Kontaktenergie für Kohle 6,1, für Platin 4,1 Volt. Im zweiten Falle muß eine Ionisierungsarbeit (El. i. G. p. 37) bei der Zerlegung eines neutralen Moleküls in ein Ionenpaar geleistet werden. Die Tatsache, daß der Kathodenfall des Glimmstromes nicht unter einen bestimmten Minimalwert sinken darf, wenn der Glimmstrom selbständig existieren soll, erklären beide Ansichten zunächst gleich gut. Beide können *jenen Minimalwert, den normalen Kathodenfall, als das Minimum von Spannungsdifferenz ansprechen, welches die positiven Ionen von der negativen Glimmschicht ab frei durchlaufen müssen, um im Gas unmittelbar an der Kathode das Auftreten negativer Elektronionen zu bewirken, im ersten Fall durch Elektrisierung, im zweiten durch Ionisierung.* Für die Elektrisierungshypothese ist die erste Kathodenschicht lediglich eine sekundäre Begleiterscheinung; für die Ionisierungshypothese ist dagegen die erste Kathodenschicht ein unentbehrliches Glied für den Mechanismus der elektrischen Strömung im primären Glimmlicht. Für die erste Hypothese kann die mittlere freie Weglänge der positiven Ionen größer sein als die Länge des primären Dunkelraumes; nach der zweiten Hypothese dagegen muß bei normalem Kathodenfall das Ende der mittleren freien Weglänge der von der Glimmschicht ausgehenden Ionen in der ersten Kathodenschicht im Gas unmittelbar an der Kathodenoberfläche liegen.

§ 8. *Die erste Kathodenschicht im sekundären Glimmlicht.* — Die erste gelblich leuchtende Kathodenschicht ist im sekundären Glimmlicht nur *bei höherem Druck* sichtbar; es ist dann schon bei etwa 100 Volt sekundärem Kathodenfall eine Andeutung von ihr wahrnehmbar; ihre Intensität wächst mit zunehmendem sekundärem Kathodenfall. Ist dieser gleich dem normalen Kathodenfall geworden, so kann der Querstrom zwischen nahen Querelektroden als selbständiger Glimmstrom weiter existieren, auch wenn der primäre Glimmstrom unterbrochen wird; das sekundäre Glimmlicht ist primär geworden; dies ist indessen solange nicht möglich, als der sekundäre Kathodenfall kleiner als der normale ist.

Läßt man nun den selbständigen Querglimmstrom für

1) O. W. Richardson, Phil. Trans. 201. p. 497. 1903.

sich ohne Längsstrom existieren, läßt man ihn dann in der negativen Glimmschicht des Längsstromes sich ausbilden, so beobachtet man folgendes. *Die Länge des primär gewordenen Dunkelraumes des Querstromes ist innerhalb der negativen Glimmschicht des Längsstromes beträchtlich kürzer als bei Abwesenheit des Längsstromes; die Leuchtintensität der ersten Kathodenschicht ist im zweiten Falle größer als im ersten, trotzdem in diesem die Stromstärke größer ist.* Diese Erscheinung erklärt sich daraus, daß eine Verkürzung des Dunkelraumes bei konstantem Kathodenfall und konstantem Gasdruck, also bei konstanter mittlerer freier Weglänge der positiven Ionen diese zum größten Teile die Kathodenoberfläche erreichen, ohne zuvor auf Gasmoleküle gestoßen zu sein.

Unter diesem Gesichtspunkt ist weiter folgende Beobachtung zu verstehen. *Ist der Gasdruck so klein, daß der Dunkelraum an der Querkathode, wenn er sich bei Abwesenheit des Längsstromes ausbilden könnte, die Röhrenwände erreichen würde, so kann der Querstrom trotz Anwendung einer den normalen Kathodenfall übertreffenden Elektrodenspannung nicht mehr selbständig existieren; er stellt sich indessen als unselbständig in beträchtlicher Stärke bei Erregung der Glimmschicht des Längsstromes her und besitzt dann ein sekundäres Glimmlicht, aber nunmehr ohne erste Kathodenschicht.* Die mittlere freie Weglänge der positiven Ionen im sekundären Dunkelraum ist nunmehr so vielmal größer als dessen Länge, daß an der Oberfläche der Querkathode so gut wie keine Gasmoleküle mehr von den positiven Strahlen getroffen werden. Obwohl dann die Bedingung erfüllt ist, daß der Kathodenfall größer als normal sei, erlischt der Querstrom bei Unterbrechung des Längsstromes; es wird wohl die Kathodenoberfläche, aber es werden nicht mehr die Moleküle der anliegenden Gasschicht von den positiven Strahlen getroffen, es fehlt die erste Kathodenschicht.

Zum Belege der vorstehenden Beobachtungen diene die nachstehende Tabelle, die an Aluminiumelektroden in Stickstoff erhalten wurde. In ihr bezeichnet d_0 die Länge des Dunkelraumes an der Querkathode bei Abwesenheit des Längsstromes, d_k und d_a diejenige bei Anwesenheit auf der kathodischen bez. anodischen Seite. Die Spannungsdifferenz zwischen den Querelektroden betrug 320 Volt. Die Länge des Dunkel-

raumes des primären Längsstromes ist als Maß für den Gasdruck beigesetzt, dieser ist ihr nämlich angenähert umgekehrt proportional.

Tabelle V.
Sekundärer Kathodenfall 320 Volt.

Primärer Dunkelraum mm	Sekund. Stromstärke	Sekundärer Dunkelraum			Erste Kathodenschicht	Lage des Querstromes in der Glimmschicht
		d_o	d_k	d_a		
—	$12 \cdot 10^{-4}$	2,5	—	—	Sichtbar	Anfang
2,5	16	—	2,3	2,3	„	„
—	0,5	8	—	—	Sichtbar	Anfang
5	25	—	2	3	Nicht sichtbar	„
5	12	—	3	6,5	Auf d_a sichtbar	Ende
7	26	—	2	4	Nicht sichtbar	Anfang
13	4	—	6	10	Auf d_a angedeutet	Mitte

§ 9. *Langsame Kanalstrahlen.* — Bis jetzt kannte man nur Kanalstrahlen, deren Geschwindigkeit größer als der normale Kathodenfall war; dies kam daher, daß man sie immer mit Hilfe des selbständigen Glimmstromes herstellte, dessen Kathodenfall nicht unter den Normalwert sinken kann. Nach dem vorstehenden Paragraphen sind bei höherem Gasdruck auch im sekundären Dunkelraum Kanalstrahlen vorhanden, wie das Auftreten der ersten Kathodenschicht beweist. Wenn sie bei niedrigem Druck an der Querkathode das gelbliche Leuchten des Gases nicht hervorrufen, so liegt dies bloß daran, daß sie infolge der Verkürzung des Dunkelraumes nicht im Gas, sondern an der Kathodenoberfläche zur Absorption kommen. Ist diese Überlegung richtig, so müssen sie ihre Existenz durch das gelbliche Leuchten des Gases verraten, sowie man sie durch Kanäle in der Querkathode hinter dieser im Gase verlaufen läßt.

Zur Prüfung dieser Folgerung wurden zwei Arten von durchlöcherten Querelektroden verwendet. Wie Fig. 5 zeigt, wurde ein dünnes Glasrohr vorne mit einer ein- oder mehrfach durchlöcherten Messingscheibe verschlossen, an die ein Zuleitungsdraht angelötet war. Das Glasröhrchen wurde in einer

seitlichen Ansatzröhre der zylindrischen Glimmstromröhre befestigt. Als zweite Elektrodenart wurden aus dünnem Aluminiumblech Röhren hergestellt, deren Seitenwände wie in Fig. 6 geschlitzt, deren Böden mit kleinen zahlreichen Löchern versehen waren; ihr Inneres war auf diese Weise vor elektrischen Kraftlinien geschützt; sie wurden in seitlichen Ansatzröhrchen eng anliegend befestigt. Mit beiden Elektrodenarten, besonders aber mit der zweiten lassen sich ohne Schwierigkeit folgende Resultate erhalten.

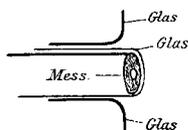


Fig. 5.

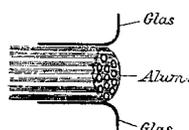


Fig. 6.

In dem Gasraum hinter durchlöcherten Querkathoden tritt das gelbliche Leuchten der Kanalstrahlen deutlich sichtbar bei Erzeugung des sekundären Dunkelraumes auf, und zwar auch wenn es an der Vorderseite der Querkathode nur schwach oder gar nicht wahrnehmbar ist. Diese so hinter die Oberfläche der Querkathode verlegte erste Kathodenschicht ist immer mehrfach länger als der sekundäre Dunkelraum, sie leuchtet um so intensiver, je größer der sekundäre Kathodenfall und die Querstromstärke ist.

Tabelle VI.

Sekundärer Kathodenfall 310 Volt.

Sekund. Stromstärke	Gasdruck mm	Prim. Dunkelraum mm	Sekund. Dunkelraum mm	Erste Kathodenschicht		Bemerkungen
				vor Kath.	hinter Kath.	
55 · 10 ⁻⁶	0,55	—	6	1,5	5	Längsstrom unterbr.
360	0,55	2,5	3	0,8	20	„ geschl.
—	0,19	—	—	—	—	„ unterbr.
360	0,19	7,5	4	0,1	25	Längsstrom geschl., Glimmschichtanfang
100	0,19	7,5	5	2	23	
75	0,07	20	4	0,1	30	Längsstrom geschl.
—	0,07	—	—	—	—	„ unterbr.

Mittels der vorstehenden Methode lassen sich schon Kanalstrahlen von kleiner Geschwindigkeit (über 50 Volt) aus dem Kraftfeld der erzeugenden Strömung heraus in einen kräftefreien Gasraum leiten. Wie die nachstehende Tabelle zeigt, nimmt bei angenähert konstanter Stromstärke die Intensität des gelblichen Leuchtens rasch mit der Geschwindigkeit der erzeugenden Kanalstrahlen ab.

Tabelle VII.

$$p = 0,19 \text{ mm.}$$

Sekundärer Kathodenfall	Sekundäre Stromstärke	Intensität des gelblichen Leuchtens hinter Querkathode
194 Volt	$250 \cdot 10^{-6}$	Intensives Leuchten
116	230	Noch ziemlich intensiv
80	200	Schwach

Daß übrigens Kanalstrahlen bereits bei einer Geschwindigkeit, welche kleiner ist als der normale Kathodenfall, das gelbliche Leuchten erregen können, ist daraus zu folgern, daß im selbständigen Glimmstrom bei niedrigem Druck und normalem Kathodenfall das gelbliche Licht der ersten Kathodenschicht bereits in einem Abstand von der Kathode auftritt, bis zu welchem (gerechnet von der negativen Glimmschicht) die positiven Ionen erst einen Teil des Kathodenfalles durchlaufen haben können.

§ 10. *Primärer Dunkelraum, Herkunft der negativen Ionen an der Glimmstromkathode.* — Die nachfolgenden Ausführungen über die Länge des primären Dunkelraumes beziehen sich lediglich auf den einfachen Fall des normalen Kathodenfalles.

Der einen Kanal der Glimmstromkathode passierende Teil der positiven Strahlen (Kanalstrahlen) würde bei Abwesenheit des Kanals die Oberfläche der Kathode treffen. Andererseits tritt schon in einigem Abstand von der Kathode im Gase gelbliches Leuchten auf, hat also Zusammenstoß positiver Strahlen mit neutralen Gasteilchen statt. Hieraus geht hervor, daß im primären negativen Glimmlicht die von der Glimmschicht ausgehenden Strahlen zum Teil an den Gasteilchen der ersten Kathodenschicht, zum Teil an der Kathodenoberfläche ein Ende ihrer freien Weglänge finden.

Nun wissen wir weiter, daß der Glimmstrom ohne die erste Kathodenschicht nicht existieren kann; nur der unselbständige Querstrom hat sie nicht notwendig. Wir müssen es daher für wahrscheinlich halten, daß *im Anfang der ersten Kathodenschicht des Glimmstromes Ionisierung des Gases durch die positiven Strahlen erfolgt und daß somit die Länge des primären Dunkelraumes die mittlere freie Weglänge der positiven Ionen unter den gegebenen Umständen (Spannungsabfall, Gassichte, Stromdichte)* darstellt. Nach dieser Vorstellung wächst an der Kathode der Spannungsabfall solange, bis er gleich dem normalen Kathodenfall geworden ist; gleichzeitig wächst auch das Gebiet großen Spannungsabfalles, die Länge des Dunkelraumes solange, bis diese gleich der mittleren freien Weglänge der positiven Ionen geworden ist. Sowie diese Bedingungen erfüllt sind, erfolgt Ionisierung des Gases an der Kathodenoberfläche, der selbständige Glimmstrom ist entstanden.

Dieser Vorstellung scheint die Beobachtung Schwierigkeiten zu machen, daß das gelbliche Leuchten der ersten Kathodenschicht sich nicht auf eine sehr dünne Gasschicht an der Kathodenoberfläche beschränkt, sondern schon in einigem Abstand von der Kathode auftritt. Indes ist zu beachten, daß das gelbliche Leuchten nicht notwendig von Ionisierung begleitet zu sein braucht. Es ist wahrscheinlich, daß nicht in allen Teilen der ersten Kathodenschicht Ionisierung durch die positiven Strahlen statt hat, sondern nur in der unmittelbar an der Kathodenoberfläche liegenden Teilschicht.

§ 11. *Strömungen mit negativen Elektronionen aus der Kathode.* — Der selbständige Glimmstrom ist als solcher dadurch charakterisiert, daß sein negatives Glimmlicht aus den drei bekannten Schichten besteht und daß sein Kathodenfall nicht unter den Normalwert sinken kann; dieser ist von Gasdruck und Stromstärke und bis zur Hellrotglut auch von der Temperatur unabhängig. Nur für diesen selbständigen Glimmstrom gelten die vorstehenden Ausführungen über Dunkelraumlänge und Herkunft der negativen Elektronionen an der Kathode.

Es sei ausdrücklich betont, daß die Länge des sekundären Dunkelraumes nichts mit der freien Weglänge der positiven Ionen zu tun hat. Und um Mißverständnisse zu vermeiden, sei zum Schlusse auf Fälle hingewiesen, in denen die

Strömung in einem Gas an der Kathode ihre negativen Elektronen in der Tat aus dieser und nicht aus dem Gas erhält.

Der Lichtbogen ist ebenfalls eine selbständige Strömung wie der Glimmstrom; bei ihm kommen indes die negativen Ionen an der Kathode ausschließlich aus dieser; seine Existenzbedingung ist, daß die Strombasis an der Kathode eine so hohe Temperatur unter dem Stoß auftreffender positiver Ionen annimmt, daß intensive Ausstrahlung negativer Elektronen erfolgt.¹⁾

Im lichtelektrischen Strom werden durch die sekundäre Elektrisierungsarbeit des auffallenden Lichtes die negativen Elektronen aus der Kathode gewonnen; er ist unselbständig und würde bei größerer Stromdichte und genügend großem Kathodenfall, wenn das Leuchten des Gases wahrnehmbar würde, ein sekundäres Glimmlicht mit erster Kathodenschicht, Dunkelraum und Glimmschicht zeigen. Aber die Dunkelraumlänge würde in diesem Fall nichts mit den positiven Ionen zu tun haben.

Im Lichtbogen als selbständiger Strömung wird die hohe Temperatur der Kathode primär durch die Strömung selbst geschaffen. Man kann auch durch sekundäre Erwärmung einer Kathode sie zur Ausstrahlung negativer Elektronen bringen und so eine unselbständige Strömung gewinnen. Bei genügend großem Kathodenfall werden die von der Kathode ausgehenden negativen Elektronen das Gas ionisieren und zum Leuchten bringen²⁾ und sekundäre Strahlen erzeugen. Es sind dann auch in diesem Falle die Bedingungen für die Bildung sekundären Glimmlichtes vorhanden. Aber nichtsdestoweniger wird diese Strömung nicht identisch sein mit dem oben charakterisierten selbständigen Glimmstrom, sie wird erlöschen, wenn die Kathode sekundär nicht mehr erwärmt wird; ihr Kathodenfall wird keinen Normalwert besitzen und außerdem von der Temperatur abhängen.

Göttingen, Oktober 1903.

1) J. Stark, Ann. d. Phys. 12. p. 673. 1903.

2) A. Wehnelt, Ber. d. Deutschen Physik. Ges. 5. p. 255. 1903.

(Eingegangen 25. Oktober 1903.)