9. *Der dunkle Kathodenraum;* *von G. C. Schmidt.*

§ 1. *Einleitung.* In den letzten Jahren haben sich unsere Anschauungen über den Elektrizitätsdurchgang durch Gase, dadurch, daß man diesen Vorgang in Analogie zur Elektrolyse gebracht hat, in bemerkenswerter Weise geklärt. Nach der wohl allgemein herrschenden Auffassung wird die Elektrizität in Gasen durch positive und negative Ionen bez. Elektronen in ähnlicher Weise transportiert, wie dies bei den flüssigen Leitern der Fall ist.

In der nachfolgenden Arbeit habe ich versucht, den Parallelismus noch etwas weiter zu verfolgen und dadurch namentlich die Verhältnisse im dunklen Kathodenraum aufzuklären.

Über die Natur desselben und den an der Kathode vorhandenen großen Kathodenfall sind mancherlei Hypothesen aufgestellt worden. Auf Grund der Tatsache, daß eine Entladung erlischt, wenn der dunkle Raum die Anode berührt, hat Hr. E. Wiedemann¹⁾ die Vermutung ausgesprochen, daß der dunkle Raum dem Durchgang der Elektrizität einen großen Widerstand entgegensetzt, einer Ansicht, welcher sich auch andere Forscher angeschlossen haben.²⁾ Stellt man sich auf den Boden der Elektronentheorie, so ist nicht recht einzusehen, weswegen die Ionen, die sich doch in luftgefüllten Räumen leicht bewegen, nach Entfernung der Luftmoleküle gerade im dunklen Raum einem besonderen Hindernis begegnen. Der dunkle Raum zeigt, wie aus den ausgedehnten Versuchen von E. Wiedemann und H. Ebert³⁾ hervorgeht, auch in anderer Hinsicht keine Besonderheiten, aus denen man auf einen Widerstand schließen könnte.

1) E. Wiedemann, Wied. Ann. 20. p. 771. 1883.

2) W. Hittorf, Wied. Ann. 20. p. 705. 1883; 21. p. 90. 1883; J. J. Thomson, Roy. Instit. 1894. Sep.; Beibl. 20. p. 303. 1894.

3) E. Wiedemann u. H. Ebert, Wied. Ann. 36. p. 643. 1889.

A. Schuster¹⁾ nimmt an, daß die Kathode sich polarisiert in ähnlicher Weise, wie dies bei flüssigen Elektrolyten der Fall ist, einer Ansicht, der sich unter anderem Mebius²⁾ anschließt. Hiergegen spricht, daß bisher ein Polarisationsstrom in einwandfreier Weise nicht nachgewiesen worden ist.³⁾

Nach O. Lehmann⁴⁾ sollen sich die negativen Ionen an der Anode leicht entladen können, während die positiven ihre Ladung nur schwierig an die Kathode abgeben, so daß sich um diese eine mehr oder minder ausgedehnte Hülle positiv elektrischen Gases lagert. Hiergegen läßt sich einwenden, daß ein negativ geladener Körper in den Kanal- und Kathodenstrahlen seine Ladung sehr schnell verliert, und zwar, soweit aus den allerdings mehr qualitativen Beobachtungen hervorgeht, annähernd ebenso schnell, als wenn derselbe positiv geladen ist.⁵⁾

Von Hrn. W. Kaufmann⁶⁾ ist die Theorie aufgestellt worden, daß in der Nähe der Kathode die Konzentration beider Ionenarten wegen des stark wachsenden Potentialgefälles außerordentlich klein wird. Hiergegen sind von Hrn. E. Goldstein⁷⁾ Einwände erhoben worden, der den dunklen Kathodenraum als eine Deflexionserscheinung auffaßt. Auf die Theorie von Kaufmann komme ich später zurück.

1) A. Schuster, Proc. Roy. Soc. 47. p. 526. 1890.

2) C. A. Mebius, Wied. Ann. 59. p. 695. 1896.

3) A. Schuster hat (Lum. électrique 46. p. 371. 1892; Beibl. 27. p. 157. 1893) bei H, N, O, Wasserdampf und verschiedenen anderen zusammengesetzten Gasen keine Polarisation beobachten können, wohl aber bei einigen Kohlenwasserstoffen. Aus der Tatsache, daß nur die letzteren Gase diese Erscheinung zeigen, geht mit Sicherheit hervor, daß wir es hier mit Ausnahmefällen zu tun haben, die wohl in Zusammenhang stehen mit der leichten Zersetzbarkeit der betreffenden Gase und dem Niederschlagen der Zersetzungsprodukte auf die Elektroden. Von anderen Forschern ist niemals eine Polarisation beobachtet worden. J. J. Thomson u. E. Rutherford, Phil. Mag. 42. p. 392. 1897.

4) O. Lehmann, Verhandl. d. Naturw. Vereins Karlsruhe 15. p. 35. 1902. Sep.

5) W. Arnold, Wied. Ann. 61. p. 327. 1897; H. Dufour, Compt. rend. 122. p. 460. 1896, u. a. Die geringen beobachteten Unterschiede erklären sich durch die verschiedenen Geschwindigkeiten der + und - Ionen.

6) W. Kaufmann, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2. p. 141. 1900.

7) E. Goldstein, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2. p. 143. 1900.

Im folgenden möchte ich zunächst eine andere Vorstellung entwickeln, die der Nernstschen¹⁾ Theorie der Elektrolyse gewisser wässrigen Lösungen nachgebildet ist.

§ 2. *Theorie.* Wie in der Elektrochemie unterscheide ich zwischen *löslichen* und *unlöslichen* Elektroden. Eine lösliche Elektrode ist eine solche, welche Elektronen oder Ionen in das Gas sendet, eine unlösliche, welche keine zu bilden vermag. Weißglühende Elektroden, Elektroden, von denen Kathodenstrahlen ausgehen, sind also als lösliche aufzufassen, ebenso ein lichtelektrisches Metall, das bei Bestrahlung Elektronen abgibt etc.

Ionisieren wir ein Gas, sei es durch Röntgen- oder Becquerelstrahlung oder auf andere Weise, so gilt, wie aus den Versuchen von J. J. Thomson²⁾ hervorgeht, das Ohmsche Gesetz — die Stromstärke ist proportional der Anzahl der Ionen, also der Leitfähigkeit und dem Potentialgradienten —; allerdings wird dasselbe in mannigfacher Weise modifiziert, dadurch, daß die Ionen sich sehr schnell miteinander verbinden und zum Teil durch den Strom weggeschafft werden etc. Polarisation tritt hierbei nicht auf. Da die Elektroden, falls sie nicht direkt von den Röntgenstrahlen getroffen werden, keine Ionen liefern, so sind sie als unlöslich zu bezeichnen, und ist der Vorgang also ganz analog der Elektrolyse wässriger Lösungen zwischen unangreifbaren Elektroden z. B. von Kohle, nur werden im letzteren Fall die Verhältnisse noch durch die Polarisation verwickelter.

Betrachten wir jetzt die Vorgänge in einem Elektrolyten bei größerer Stromdichte. Elektrolysiert man z. B. eine Kupfersulfatlösung zwischen Kupferelektroden durch einen kräftigen Strom, so ändert sich die Konzentration in der Lösung dicht um die Elektrode. An der Kathode tritt eine *Verarmung* an Kupferionen ein, da die Wanderung und Diffusion nicht so viel Ionen zuführt, als aus der Lösung gedrängt werden. Bei geringer Stromentnahme hilft die Zuwanderung und Diffusion in der Flüssigkeit über diese Divergenz hinweg. Deren Wir-

1) W. Nernst, Ber. d. deutsch. chem. Ges. p. 1547. 1897.

2) J. J. Thomson u. E. Rutherford, Phil. Mag. **42**. p. 892. 1896; vgl. J. Stark, Ann. d. Phys. **5**. p. 89 u. p. 793. 1901; **7**. p. 932. 1902.

kung reicht aber bei hohen Stromdichten nicht aus und es tritt infolge der Konzentrationsänderungen an den Elektroden eine Gegenkraft auf, welche sich der Strombewegung widersetzt. Diese Art der Polarisation zeigen unangreifbare Elektroden, an denen Wasserstoff-, Chlor- oder Hydroxylionen entladen werden, gleichfalls; denn die Konzentration dieser Ionen an der Elektrode wird nicht minder verändert, wenn bei rascher Entladung Zuwanderung und Diffusion nicht mehr ausreichen, um den Verlust durch Entladung zu decken. Wie weit die Veränderung der Schichten dicht um die Elektroden geht, hängt ausschließlich von der Stromdichte, der Wanderungs- und Diffusionsgeschwindigkeit ab.

Etwas verwickelter werden die Verhältnisse, wenn die an den Elektroden sich entladenden Ionen nicht ursprünglich in ausreichender Weise vorhanden sind, sondern sich allmählich Neubilden. Da diese Vorgänge in vieler Hinsicht ähnlich sind denen in Entladungsröhren, so mögen auch die hierbei auftretenden Erscheinungen kurz geschildert werden.

Haben wir z. B. eine wässrige Lösung von KOH, so werden nach den Untersuchungen von Nernst¹⁾ bei 1,08 Volt Kathodenpotential (dem ersten Knick) die H-Ionen, die in der wässrigen Lösung stets vorhanden sind, entladen. Da dieselben sich aber nicht schnell genug nachbilden, so bewirkt jede Entladung eine *Verarmung* der Elektrodenumgebung an Ionen. Soll die Stromstärke trotz dieser Verarmung zunehmen, so muß man eine weitere Steigerung der elektromotorischen

Fig. 1.

Kraft vornehmen; da die verfügbare Zahl der Wasserstoffionen lediglich durch die Geschwindigkeit der Neubildung bedingt ist, so ist der Neigungswinkel der Kurve direkt ein Maß für ihre Bildungsgeschwindigkeit. Erst bei 1,4 Volt, dem zweiten

1) W. Nernst, l. c.

Knick, werden die K-Ionen entladen und jetzt nimmt, da die Zahl der vorhandenen Ionen sehr groß ist, bei Steigerung der elektromotorischen Kraft die Stromstärke rasch zu.

Diese Theorie läßt sich auf Gasentladungen übertragen.

Steigert man nämlich in einem Gase, nachdem dasselbe ionisiert ist, die Stromdichte, so wird an den Elektroden bald eine *Verarmung* an Ionen eintreten, da die Ionen sich nicht unendlich rasch Neubilden und zu den Elektroden diffundieren. Wie weit die Veränderung der Schichten an den Elektroden vor sich geht, hängt ausschließlich von der Stromdichte und der Diffusions- und Wanderungsgeschwindigkeit ab. Trotzdem über die Natur und Wanderungsgeschwindigkeit der Elektronen und Ionen in Entladungsröhren noch keine Messungen vorliegen, so sprechen doch viele Tatsachen dafür, daß das positive Ion langsamer wandert als das negative. Nimmt man diese sehr wahrscheinliche Hypothese an, so erklärt sich leicht, weswegen an der Kathode, wohin die positiven Ionen gelangen, eine viel stärkere Verarmung eintritt, als an der Anode.

Nach dieser Vorstellung ist also *der dunkle Raum der Verarmungsbereich*.

Im folgenden habe ich diese Hypothese geprüft. Zu dem Zweck wird zunächst festgestellt, daß tatsächlich im dunklen Raum im Vergleich zu den übrigen Teilen der Entladung sehr wenig Ionen vorhanden sind. Damit wird die Grundlage der Theorie bestätigt. Darauf habe ich eine Reihe von Folgerungen aus der Theorie gezogen, nämlich, daß der dunkle Raum kleiner werden, ja sogar verschwinden muß, wenn man nur genügend Ionen in denselben hineinbringt. Dies gelingt tatsächlich, wenn man das Gas im dunklen Raum durch Kathoden- oder Kanalstrahlen ionisiert oder als Kathode ein lichtelektrisch empfindliches Metall anwendet, welches ebenfalls unter dem Einfluß des in der Entladung vorhandenen positiven und Glimm-Lichtes Ionen in den dunklen Raum aussendet. Auch alle anderen Erscheinungen an der Kathode finden, soweit ich das übersehen kann, ihre ungezwungene Erklärung durch die Theorie.

§ 3. *Nachweis der Verarmung an Ionen an der Kathode.*

Um den Nachweis zu führen, daß an der Kathode im Vergleich zu den übrigen Teilen der Entladung verhältnismäßig

wenig Ionen sind, wurde eine bewegliche Sonde, die mit einer Kapazität verbunden war, in die verschiedenen Teile der Entladung gebracht und nun die zur Ladung erforderliche Zeit beobachtet.

Als Entladungsrohr benutzte ich ein von Hrn. A. Wehnelt¹⁾ bei seinen Potentialmessungen im dunklen Raum angewandtes; dasselbe war 6 cm weit und 100 cm lang. Die senkrecht zur Rohrachse befindliche scheibenförmige und den ganzen Querschnitt des Entladungsrohres ausfüllende Kathode K und eine seitlich sitzende Sonde S_1 waren in der aus der Fig. 2 ersichtlichen Weise (e sind kurze Enden eines 10 mm dicken

Fig. 2.

Eisendrahtes) mit Hilfe eines Magneten von außen verschiebbar. So konnte man an jeder Stelle des Raumes sowohl senkrecht als auch parallel zur Kathodenfläche die Potentialdifferenzen zwischen Sonde und Kathode messen. Der ersten Sonde S_1 befand sich eine zweite S_2 diametral gegenüber, welche bis in die Mitte der Entladungsrohre reichte. Die Sonden waren beide bis auf eine 1 mm lange Spitze durch ein dünnes Glasrohr isoliert. Die Sonden wurden so kurz gewählt, um möglichst das Potential an der betreffenden Stelle zu erhalten. Zu den Potentialmessungen dienten Braunsche Elektrometer. Das Elektrometer E_1 maß die Potentialdifferenz zwischen der beweglichen Sonde S_1 und der zur Erde abgeleiteten Kathode, und Elektrometer E_2 das gesamte Entladungspotential des

1) A. Wehnelt, Ann. d. Phys. 10. p. 553. 1903.

Rohres. N stellt ein kleines Näpfchen mit Phosphorsäureanhydrid dar, das zur völligen Austrocknung diene. Als Stromquelle wurde eine 20plattige Influenzmaschine benutzt. Das Entladungspotential wurde durch Regulieren des Druckes möglichst konstant gehalten. Da jede einzelne Messung der Ladungszeit vielfach 10—15 Min. dauerte, so gelang dies nicht vollständig; Schwankungen von 500 Volt bei 4000—5000 Volt waren keine Seltenheit.

Bei den Messungen wurde die Kathode der Reihe nach in die verschiedenen Abstände von den Sonden gebracht. Bei jedem Abstände x der Sonden von der Kathode wurde die bewegliche Sonde von der Achse des Entladungsrohres nach dem Rande zu bewegt und für bestimmte Abstände r der Sonde S von der Mitte ($r = 0$) zunächst die Potentialdifferenz der Sonde und der zur Erde abgeleiteten Kathode gemessen. Darauf wurde die Sonde mit einer Kapazität, einer Leydener Flasche, verbunden und nun die Zeit der Ladung bestimmt. Da sich hierbei ergab, daß, bevor die Flasche das Endpotential erreichte, vielfach eine Entladung in Form eines Funkens nach der Kathode zu vor sich ging, so war zwischen Sonde und dem mit der Kapazität verbundenen Elektrometer ein großer Widerstand, ein feuchter Bindfaden, eingeschaltet. In manchen Teilen des dunklen Raumes hätte es, wie die Messungen ergaben, Stunden gedauert, bis das Elektrometer und die Leydener Flasche ihre Endpotentiale erreicht hätten. In diesen Fällen wurde das Steigen des Elektrometers während mehreren Intervallen von je 5 Min. beobachtet und aus den so gewonnenen Zahlen die Zeit extrapoliert, die nötig gewesen wäre, um die Kapazität und das Elektrometer vollständig zu laden.

Die Methode besitzt gegenüber der ihr sehr ähnlichen Methode der Querströme den Vorteil, daß an Stelle zweier Sonden nur eine benutzt wird und daher die Leitfähigkeit nicht in dem Raum zwischen den beiden Sonden, sondern nur in dem unmittelbar die eine Sonde umgrenzenden Raum gemessen wird. Alle Einwände gegen die Methode der Querströme gelten aber auch für die hier benutzte. Durch Hereinbringen der Sonde mit der Kapazität in die Röhre wird der Kraftlinienverlauf gestört und zwar an den verschiedenen Stellen der Entladung in verschiedener Weise, so daß Schlüsse aus den Messungen nur

mit Vorbehalt gezogen werden können. Für das Nachfolgende kommen die Bedenken gegen die hier benutzte Methode nicht in Frage, da es sich nur um qualitative Ergebnisse handelt.

In den nachfolgenden Tabellen bedeutet r die Entfernung der Sonde von der Mitte der Kathode ($r = 0$), x der Abstand der Kathode von der Sonde, GP das Gesamtpotential, P das Potential der Sonde, Z die Zeit, die erforderlich war, damit sich das Elektrometer und die Leydener Flasche auf das Potential P luden. Das Gesamtpotential wurde am Anfang der Messungsreihe bestimmt, im Verlauf der letzteren änderte es sich vielfach um mehrere 100 Volt, da es nicht möglich war, das Entladungspotential während 15–30 Min. konstant zu halten. Der Kathodenstrahl bestand aus einem dünnen Strahl, der von der Mitte der Kathode ausging.

Tabelle I.

$$p = 0,09 \text{ mm}, \quad i = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Amp.}$$

r	x	GP	P	Z
2,5 cm	1 mm	1800	420	240 Min.
2,0	1	1850	450	190
1,5	1	1850	490	80
0,5	1	1800	710	2
2,5	10	1750	1260	12
2,0	10	1850	1300	9
1,5	10	1850	1300	7
0,5	10	1800	1250	$1\frac{1}{2}$
2,5	20	2100	2000	5
2,0	20	1900	1850	4
1,5	20	1980	1870	3
0,5	20	1930	1900	2
2,5	40	1900	1850	2
2,0	40	2000	1900	$1\frac{1}{2}$
2,5	40	1950	1900	$1\frac{1}{2}$
0,5	40	1950	1870	$1\frac{1}{2}$
Glimmlicht				
2,5	60	2000	1950	$1\frac{1}{2}$
2,0	60	2100	2000	$1\frac{1}{2}$
1,5	60	2000	1950	$1\frac{1}{2}$
0,5	60	2200	1990	$1\frac{1}{2}$

Tabelle II.

$$p = 0,05 \text{ mm. } i = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Amp.}$$

r	x	GP	P	Z
2,5 cm	1 mm	4500	810	∞
2,0	1	5000	900	∞
1,5	1	5000	920	300 Min.
0,5	1	6000	970	25
2,5	20	5000	1100	20
2,0	20	4500	1150	14
1,5	20	4800	1150	8
0,5	20	5500	1120	$1\frac{1}{2}$
2,5	40	5000	4100	5
2,0	40	5500	4200	4
1,5	40	5000	4000	3
0,5	40	5800	4000	$1\frac{1}{2}$
Glimmlicht				
2,5	80	4500	4500	2
2,0	80	4500	4500	2
1,5	80	5000	5000	$1\frac{1}{2}$
0,5	80	5000	5000	$1\frac{1}{2}$

Aus den Tabellen ist deutlich zu ersehen, daß je näher man sich dem Glimm- oder Kathodenlicht befindet, desto schneller das Elektrometer seine Ladung annimmt.

Es wurde jetzt die Mitte der Kathode durch ein 2 mm breites Loch durchbohrt, durch welches ein Kanalstrahlenbündel in den Raum hinter der Kathode trat.

Tabelle III.

$$p = 0,04 \text{ mm. } i = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ Amp.}$$

r	x	GP	P	Z
2,5 cm	3 mm	5500	2000	55 Min.
2,0	3	5000	1650	22
1,5	3	4500	1500	20
0,5	3	4800	1540	4
2,5	10	5500	2800	12
2,0	10	4500	2600	10
1,5	10	4800	2650	7
0,5	10	5000	2700	3

Tabelle III (Fortsetzung).

r	x	GP	P	Z
2,5 cm	20 mm	4700	3000	5 Min.
2,0	20	4700	3000	4
1,5	20	4800	2950	3
0,5	20	4900	2900	2
2,5	40	4500	3300	3
2,0	40	4400	3500	2
1,5	40	4400	3500	$1\frac{1}{2}$
0,5	40	4500	3300	$1\frac{1}{2}$
Glimmlicht				
2,5	80	3800	3600	$1\frac{1}{2}$
2,0	80	3800	3600	$1\frac{1}{2}$
1,5	80	3800	3600	$1\frac{1}{2}$
0,5	80	3800	3600	$1\frac{1}{2}$

Aus den Tabellen ergibt sich:

1. Im dunklen Kathodenraum dauert es außerordentlich lange, bis ein mit einer Kapazität verbundenes Elektrometer sich lädt. Hieraus schließe ich, daß der dunkle Raum nur wenig Ionen enthält, er ist der Verarmungsbereich. Hiermit ist die Grundlage der oben gegebenen Theorie bestätigt.

2. Je mehr man sich dem Glimmlicht- und Kathodenstrahlenbündel nähert, desto schneller lädt sich ein mit einer Kapazität verbundenes Elektrometer. Hieraus ergibt sich, daß je mehr man sich den Glimmlicht- und Kathodenstrahlen nähert, desto größer die Ionisation ist.

Die Kathodenstrahlen ionisieren also das Gas auf ihrer Bahn im dunklen Raum. Daraus, daß die Ionen nur in beschränktem Maße in den dunklen Raum diffundieren, muß man schließen, daß die positiven Ionen sofort nach der Kathode gerissen, die negativen nach der Anode geschleudert werden. Hiermit steht in Einklang, daß nach A. Wehnelt¹⁾, je mehr das sichtbare Strahlenbündel an der Kathode sich nach der Mitte zusammenzieht, der „Ringstrom“, d. h. der Strom, der durch die äußeren Teile der plattenförmigen Kathode fließt, schwächer wird, bis schließlich bei sehr tiefen Drucken, wo

1) A. Wehnelt, Ann. d. Phys. 7. p. 242. 1902.

die Kanal- und Kathodenstrahlenbündel nur noch ganz dünn sind, der innere Teil der Kathode allein die Stromführung übernimmt, d. h. es fließt nur durch diejenigen Stellen der Kathode Strom ab, die von der sichtbaren Ansatzstelle der Strahlenbündel bedeckt sind.

§ 4. *Einfluß der Kathoden- und Kanalstrahlen auf die Erscheinungen im dunklen Raum.* Aus den obigen Anschauungen folgt unmittelbar, daß der dunkle Raum verschwinden muß und ebenso der große Potentialsprung, wenn wir in demselben positive Ionen in genügender Menge schaffen. Wir haben hierzu eine Reihe von Mitteln, nämlich dadurch, daß wir Kathoden-, Kanalstrahlen oder Röntgenstrahlen in den dunklen Raum fallen lassen. Daß tatsächlich die Kathoden- und Kanalstrahlen den Potentialsprung an der Kathode erniedrigen, dafür sprechen eine Reihe von Versuchen von E. Wiedemann und mir¹⁾, aus denen hervorgeht, daß diese beiden Arten von Strahlen das Entladungspotential in hohem Maße herabdrücken, wenn sie auf die Kathode fallen, während ihre Einwirkung auf die Anode sehr gering ist.

Ich habe diese Beobachtungen etwas weiter verfolgt.

Zur Anwendung kamen drei Entladungsröhren. Rohr I (Fig. 3): *A* und *B* sind zwei Glasröhren von passender Weite (ungefähr 4 cm und 15 cm lang). Zwischen *A* und *B* wird ein Drahtnetz *K* gekittet. Die Elektroden bestanden aus Zink. Macht man dann a_1 zur Kathode, so treten bei passendem Druck Kathodenstrahlen in *B* ein; ist a_1 Anode, so dringen Kanalstrahlen nach *B*. Je nachdem man a_2 zur Anode oder Kathode macht, fallen dann Kanal- bez. Kathodenstrahlen in den dunklen Raum, der sich um das Drahtnetz in *B* ausbildet, oder auf die positive Lichtsäule. Röhre II (Fig. 4) ist ein ähnliches Rohr mit Eiselektroden, Rohr III (Fig. 5) mit Aluminiuelektroden. *S* ist eine in Glas bis auf die Spitze gehüllte Sonde, *K* ist wieder das zur Erde abgeleitete Drahtnetz. Die Versuche wurden in Stickstoff, der durch Erhitzen einer wässrigen Lösung von Kaliumnitrit und Salmiak dargestellt wurde und der durch Überleiten über glühendes Kupfer und Kupferoxyd von allen Spuren von Wasserstoff und Sauerstoff befreit war, ferner in

1) E. Wiedemann u. G. C. Schmidt, Wied. Ann. 62. p. 471. 1897.

Wasserstoff und Sauerstoff, die elektrolytisch gewonnen wurden, angestellt. Ich bemerke noch, daß wegen der stark erwärmenden Wirkung der Kanal- und Kathodenstrahlen der Siegelack sich etwas zersetzte und infolgedessen die Gase bald verunreinigt wurden. Ich habe dies mit in den Kauf genommen, da eine Umwandlung der Rohre unter Vermeidung von Siegelack mit beträchtlichen Kosten verbunden gewesen wäre und kaum zu weiteren Resultaten geführt hätte. Denn ein mathematischer Ausbau der Theorie sowie ihre Prüfung durch quanti-

Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 5.

tative Messungen erscheint aussichtslos, bevor es gelingt, die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen sowie ihre Zahl in den verschiedenen Teilen einer Entladungsröhre zu bestimmen.

Ich beschreibe jetzt die Erscheinung bei Rohr I.

Ist *A* mit der Batterie verbunden derart, daß *a*₁ die Kathode ist, und *B* mit der Influenzmaschine, derart, daß *a*₂ Anode ist, während die anderen Pole zur Erde abgeleitet sind, so bildet sich in *B* um *K* ein dunkler Raum aus. Bei kleinen Stromstärken in *A* und hohen Drucken werden die von der Kathode *a*₁ kommenden Kathodenstrahlen das Gas im dunklen Raum in *B* nur wenig ionisieren; die Ver-

armung an Ionen wird also zum Teil erhalten bleiben. Steigert man die Stromstärke in A , so nimmt die Intensität der Kathodenstrahlen immer mehr zu, und damit die Ionisation; der dunkle Raum wird immer verwaschener, bis er schließlich verschwindet und nur positives Licht oder positive Schichten in B vorhanden sind. Die ganze Entladung geht dann von a_1 nach a_2 und es fließt eventuell nichts durch das Drahtnetz zur Erde. Ganz ähnlich sind die Verhältnisse bei Kehrung des Stromes in A ; jetzt ionisieren die Kanalstrahlen. Gleichzeitig mit dem Verschwinden des dunklen Raumes nimmt das Potential an der Kathode ab. Bei einem Versuch wurden folgende Zahlen erhalten. Die Stromstärke der Influenzmaschine in B betrug $i = 0,25$ M.-A. und das Gesamtpotential in B 610 Volt, Kathodenpotential 490 Volt. Das Gesamtpotential fiel auf 220 Volt, als ein Batteriestrom von 0,22 M.-A. durch A geschickt wurde, auf 175 Volt bei 0,4 M.-A., auf 140 Volt bei 1,3 M.-A. Als Kanalstrahlen in das Rohr geschickt wurden, fiel das Potential von 610 Volt auf 600 bei 0,2 M.-A., auf 530 Volt bei 0,41 M.-A., 300 Volt bei 1,2 und 180 Volt bei 1,5 M.-A.

Ähnliche Erscheinungen treten auch in Rohr II und III (Figg. 4 und 5) auf. Sind b_3 oder c_3 Kathode, so bleibt die Entladungsform in B dieselbe, gleichgültig, ob in A ein Strom hindurchgeht oder nicht. Ist b_1 oder c_1 Anode, so fließt, wenn kein Strom in B vorhanden ist, der ganze Strom durch b_2 bez. c_2 zur Erde ab; sobald aber Kanalstrahlen oder Kathodenstrahlen durch das Drahtnetz nach A geworfen werden, wird der dunkle Raum von b_2 bez. c_2 zunächst verwaschener, und schließlich, wenn die Intensität der Kathoden- bez. Kanalstrahlen sehr groß ist, wählt die Entladung den längeren Weg und fließt nicht von b_1 bez. c_1 durch b_2 bez. c_2 zur Erde, sondern durch das Drahtnetz K .

Von den vielen Messungen, die ich angestellt habe, teile ich zwei ausführlich mit. Bei Rohr II und III wurde durch B stets der Batteriestrom, durch A der Influenzmaschinenstrom geschickt. In der nachfolgenden Tabelle bedeutet i der Strom der Influenzmaschine, I der der Batterie, G das Gesamtpotential in A , G_1 das in B ; dieselben wurden mit Braunschen Elektrometern gemessen, die eine Schätzung auf 10 Volt erlaubten. Ich

teile die Zahlen unter I , G_1 nur mit, damit man eine ungefähre Vorstellung von der Stärke der Kathoden- bez. Kanalstrahlen hat. Für das folgende kommen hauptsächlich die Zahlen unter G in Betracht.

Mit den zur Erde verbundenen Elektroden waren stets Galvanometer verbunden, um die Stromstärken zu messen. Ich teile diese Zahlen nicht mit, weil sich aus ihnen nichts entnehmen läßt. Fällt durch K ein intensives Kathoden- oder Kanalstrahlenbündel, so geht die ganze Entladung von b_1 nach K und nicht nach b_2 , selbst wenn die Entfernung zwischen $b_1 b_2$ bedeutend kleiner ist, als zwischen $b_1 K$. Ist dies der Fall, so fließt auch nichts durch b_2 zur Erde. Wie viel also durch b_2 abfließt, hängt von der betreffenden Röhre, von der Entfernung $b_1 K$ von den Stromstärken etc. ab, so daß die Mitteilung dieser Zahlen keinen Wert hat, da sie je nach den Versuchsbedingungen, Dimensionen des Rohres etc. ganz verschieden ausfielen.

Tabelle IV.

Röhre II. b_2 Kathode. b_3 Kathode, es werden also Kathodenstrahlen in den dunklen Raum geworfen. Stickstoff.

I	G_1	i	G
—	—	0,253 M.-A.	450 Volt
0,06 M.-V.	370 Volt	0,253	420
0,11	420	0,252	370
0,2	480	0,251	290
0,32	540	0,250	200
0,41	580	0,254	160
0,60	590	0,254	110
0,80	600	0,253	70
1,00	610	0,250	60
1,33	620	0,253	55

b_2 Kathode. b_3 Anode. Kanalstrahlen.

—	—	0,257 M.-A.	460 Volt
0,04 M.-A.	440 Volt	0,256	450
0,18	580	0,257	420
0,38	800	0,258	400
0,60	900	0,259	360
0,85	1000	0,259	340
1,20	1300	0,257	300
2,00	1800	0,261	190

Tabelle IV (Fortsetzung).

 b_2 Anode. Kathodenstrahlen.

I	G_1	i	G
—	—	0,254 M.-A.	540 Volt
0,14 M.-A.	750 Volt	0,253	520
0,25	850	0,253	500
0,32	900	0,253	480
0,60	1000	0,256	470
1,40	1200	0,254	460

 b_2 Anode. Kanalstrahlen.

—	—	0,256 M.-A.	540 Volt
0,11 M.-A.	300 Volt	0,258	520
0,28	400	0,259	500
0,40	520	0,260	490
1,40	1300	0,259	470

Röhre II. Stickstoff. b_2 Kathode. Kathodenstrahlen.

—	—	0,265 M.-A.	900 Volt
0,15 M.-A.	1500 Volt	0,264	500
0,2	2000	0,264	310
0,34	2200	0,264	200
1,00	2300	0,264	70

 b_2 Kathode. Kanalstrahlen.

—	—	0,259 M.-A.	720 Volt
0,2 M.-A.	1250 Volt	0,257	490
0,4	1800	0,256	400
0,65	2100	0,256	290
1,00	2400	0,250	210

Als b_2 zur Anode gemacht wurde, und Kathoden- bez. Kanalstrahlen darauf fielen, nahm das Potential im Höchstfall um 70 Volt ab.

Tabelle V.

Wasserstoff. Rohr III. c_2 Kathode. Kathodenstrahlen.

I	G_1	i	G
—	—	0,243 M.-A.	480 Volt
0,14 M.-A.	620 Volt	0,244	160
0,35	830	0,244	100
0,70	980	0,243	70
0,80	1000	0,244	60
1,00	1150	0,245	50

Tabellle V (Fortsetzung).

 c_2 Kathode. Kanalstrahlen.

I	G_1	i	G
—	—	0,244 M.-A.	530 Volt
0,1 M.-A.	900 Volt	0,240	470
0,2	1100	0,241	360
0,6	1650	0,241	300
0,9	2000	0,240	220

 c_2 Anode. Kathodenstrahlen.

—	—	0,249 M.-A.	490 Volt
0,82 M.-A.	800 Volt	0,243	450
0,60	900	0,245	440
0,95	1100	0,246	430
1,30	1200	0,245	420

 c_2 Anode. Kanalstrahlen.

—	—	0,246 M.-A.	480 Volt
0,12 M.-A.	400 Volt	0,240	470
0,42	460	0,245	460
0,85	890	0,245	450
1,20	1250	0,245	420

Aus den Beobachtungen und Tabellen ergibt sich:

1. Kathoden- und Kanalstrahlen vernichten den dunklen Raum und setzen gleichzeitig das Kathodenpotential herab.
2. Ihre Einwirkung auf die Anode ist sehr gering.
3. Die Abnahme des Kathodenpotentials ist um so größer, je intensiver die Kathoden- bez. Kanalstrahlen sind.
4. Ist die Kathode zur Erde abgeleitet und fallen die Kathoden- bez. Kanalstrahlen durch ein zur Erde abgeleitetes Drahtnetz in den dunklen Raum, so geht die Entladung längs der Bahn der Kathoden- bez. Kanalstrahlen durch das Drahtnetz zur Erde, selbst wenn diese Bahn die längere ist (vgl. p. 634).

§ 5. Einfluß des Elektrodenmaterials auf den dunklen Raum. Während dieser Teil der Untersuchung in Gang war, erschien die ausführliche Arbeit von K. Mey¹⁾: über das Kathodengefälle der Alkalimetalle. Ich habe hieraufhin meine Versuche abgebrochen. Aus der Abhandlung von Mey geht hervor,

1) K. Mey, Ann. d. Phys. 11. p. 144. 1903.

daß „im allgemeinen die Reihenfolge der Metalle nach abnehmendem Kathodengefälle in jedem Gase dieselbe ist. Platin hat stets das höchste, Aluminium ein niedrigeres, Magnesium ein noch geringeres Gefälle, dann folgt Natrium und mit dem kleinsten Gefälle Kalium. Dieselbe Reihe tritt auch auf, wenn man die Metalle nach ihrem spezifischen Gewicht ordnet oder nach der Verwandtschaft zum Sauerstoff oder nach der Voltaschen Spannungsreihe“. Die Reihenfolge ist dieselbe wie die der lichtelektrischen Empfindlichkeit¹⁾ und erklärt sich nach dem Vorhergehenden folgendermaßen: Das Licht in der Entladungsröhre fällt auf die Kathode und zerstreut dort negative Elektrizität. Die Kathode ist aus diesem Grunde als eine sehr schwach lösliche zu bezeichnen. Die von der Kathode austretenden negativen Elektronen ionisieren das Gas in der Nähe der Kathode²⁾; die Verarmung wird hierdurch geringer und das Kathodenpotential sinkt und zwar um so mehr, je mehr Elektronen aus der Kathode austreten, d. h. je lichtelektrisch empfindlicher das Metall der Kathode ist.

§ 6. *Vergleich der Wirksamkeit der Kanalstrahlen mit der der Kathodenstrahlen.* Im Vorhergehenden ist die Wirkung der Kanal- und Kathodenstrahlen nur auf die ionisierende Kraft dieser beiden zurückgeführt. Es fragt sich, ob nicht noch eine spezifische Wirkung vorhanden ist, ob Kathodenstrahlen intensiver wirken als Kanalstrahlen bei gleicher Ionisation oder umgekehrt.

Enthielten die Kanalstrahlen nur positive Ionen und die Kathodenstrahlen nur negative, so wäre die Frage leicht zu beantworten; es würden dann nur Kanalstrahlen wirksam sein, genau so wie bei der Elektrolyse von CuSO_4 zwischen Cu-Elektroden nur Cu-Ionen die Verarmung an der Kathode aufheben. Bedeutend verwickelter liegen die Verhältnisse bei Entladungen, da beide Strahlenarten das Gas ionisieren und man daher stets ein Gemenge von positiven und negativen Ionen mit einem Überschuß der einen Ionenart hat.

Um die Verhältnisse zu überblicken, knüpfen wir an einen Versuch an. *A* und *B* seien zwei Röhre mit Endelektroden,

1) H. Kreusler, Ann. d. Phys. 6. p. 409. 1901.

2) A. Wehnelt, Ann. d. Phys. 10. p. 576. 1903.

zwischen denen sich ein zur Erde abgeleitetes Drahtnetz befindet. Fließt der Strom in *B*, so müssen die positiven Ionen von der Anode *a* zur Kathode, dem zur Erde abgeleiteten Drahtnetz, und die negativen in umgekehrter Richtung wandern. Laden wir jetzt *b* negativ, werfen wir also Kathodenstrahlen in die Röhre *B*

Fig. 6.

— und zwar wollen wir annehmen, daß dieselben bis zur Mitte der Röhre gelangen —, so brauchen die positiven Ionen nur von *a* bis zur Mitte der Rohre zu wandern, hier vereinigen sie sich mit den negativen, falls die letzteren in genügender Menge vorhanden sind. Paßt man die Entladung gerade ab, so wird die Elektrizität direkt von *a* nach *b* fließen, ohne daß etwas durch das Drahtnetz zur Erde abströmt. Werfen wir dagegen Kanalstrahlen, also einen Überschuß von positiven Ionen herein (jetzt ist *b* positiv), so vernichten diese zwar auch den dunklen Raum, aber es müssen jetzt sowohl diese positiven Ionen der Kanalstrahlen zum Rückfließen gebracht werden, damit sie an das Drahtnetz ihre Elektrizität abgeben, als auch müssen die positiven Ionen von der Anode *a* den Weg bis zur Kathode zurücklegen. Im zweiten Falle sind also, wenn wir nur die Verhältnisse in der Röhre *B* berücksichtigen, die Wege, welche die Ionen zurücklegen müssen, größer und es bedarf hierzu bei gleicher Stromstärke einer größeren elektromotorischen Kraft als im vorhergehenden Fall, d. h. Kathodenstrahlen setzen das Entladungspotential mehr herab als Kanalstrahlen.

Da bei den vorhergehenden Versuchen die Kathoden- bez. Kanalstrahlen direkt auf die Kathode fielen und es nicht ausgeschlossen schien, daß hierdurch die Einwirkung auf den dunklen Raum nicht rein zur Geltung käme, so wurde der Versuch folgendermaßen angeordnet. *A* ist ein Rohr von

Fig. 7.

10 cm Durchmesser. Die Elektrode ist aus Zink, die Elektrode *b* aus Messingdrahtnetz. *B* ist ein weites Rohr von der in der Fig. 7 dargestellten Form. *C* ist ein zur Erde

abgeleitetes Kupferblech, das in der Mitte ein Loch von ungefähr $1\frac{1}{2}$ mm Durchmesser enthält. D eine Elektrode aus Aluminium. Es werden jetzt die Kanal- bez. Kathodenstrahlen durch das Drahtnetz in B geworfen, derart, daß sie an der *hinteren* Seite der in Betracht kommenden Kathode C in einiger Entfernung vorbeigehen. Macht man nun D zur Kathode, so gehen von demselben bei passendem Druck Kathodenstrahlen aus, die das Loch in C durchsetzen. Werden jetzt in B Kathoden- oder Kanalstrahlen erregt, so ist nichts besonderes wahrzunehmen. Macht man dagegen C zur Kathode, während in A kein Strom fließt, so breitet sich um C ein dunkler Raum aus, der je nach dem Druck große Dimensionen annehmen kann. Durch das Loch in C gehen Kanalstrahlen, wie die Figur andeutet. Wirft man nun in B Kathodenstrahlen hinein, so schlägt bei passendem Druck die Entladung um und geht an dem dunklen Raum vorbei; fast die ganze Elektrizität entlädt sich in Form von positivem Licht durch das Loch und entweicht durch b zur Erde, oder die positiven Ionen der oberen Röhre vereinigen sich mit den negativen der Kathodenstrahlen. Gleichzeitig sinkt das Potential sehr stark. Wirft man dagegen Kanalstrahlen nach B , so sinkt der dunkle Raum bei C etwas zusammen und es sinkt eventuell das Potential um einige 100 Volt, da jetzt ein Teil und zwar nur ein kleiner Teil des Stromes durch b zur Erde abfließt. Bei meinen Versuchen habe ich das Potential in C nie so weit steigern können, daß bei Anwesenheit von Kanalstrahlen in B fast die ganze Entladung durch b zur Erde floß. Dieser Versuch beweist also, daß *Kathodenstrahlen das Entladungspotential stärker herabsetzen als Kanalstrahlen*. Die Erklärung ist schon vorhin gegeben. Um die Kathode C ist eine starke Verarmung an positiven und negativen Ionen eingetreten, doch sind positive immer noch in Überschuß vorhanden. Machen wir das Gas in B negativ, so ziehen die negativen Ionen die positiven Ionen in C an, so daß die Entladung den Weg durch b wählt. Laden wir das Gas in B dagegen positiv, so stoßen die positiven Ionen in B die positiven in C ab und es wird daher die Entladung erst bei viel höheren Potentialen in C durch b zur Erde entweichen.

Aus der folgenden Tabelle, welche ich meinen Beob-

achtungen entnehme, wird man leicht den starken Potentialabfall beim Vorhandensein von Kathodenstrahlen erkennen. P bedeutet das Potential von D gegen Erde, i die Stromstärke in DC , I die Stromstärke in A in Milliampère, II das Potential in A . Ich teile die letzteren beiden Zahlen mit, damit man einen ungefähren Anhalt über die Stärke der Kathoden- und Kanalstrahlen hat. Für das folgende kommen nur i und hauptsächlich P in Betracht.

Tabelle VI.

 D Kathode. Luft.

II	I	P	i	
—	—	1650 Volt	0,29 M.-A.	—
900 Volt	0,4	1650	0,30	Kathodenstrahlen
1180	1,0	1650	0,30	„
1300	1,5	1650	0,29	„
1700	3,2	1650	0,29	„
970	0,32	1650	0,29	Kanalstrahlen
1400	1,4	1650	0,29	„
1570	2,2	1650	0,30	„
1750	3,4	1650	0,31	„

Ist D also Kathode, so haben Kathoden- oder Kanalstrahlen, die hinter der durchlöcherten Anode vorbei geschickt werden, keinen Einfluß.

Tabelle VII.

 C Kathode. Luft. $i = 0,29$ M.-A.

II	I	P	
—	—	3200 Volt	{ Ohne Kathoden- und Kanalstrahlen
1600 Volt	0,3	2500	Kanalstrahlen
900	0,3	250	Kathodenstrahlen
1680	0,4	2500	Kanalstrahlen
950	0,4	260	Kathodenstrahlen
1800	1,0	2300	Kanalstrahlen
1180	1,0	280	Kathodenstrahlen
1950	1,5	2200	Kanalstrahlen
1300	1,5	270	Kathodenstrahlen
2200	3,2	2100	Kanalstrahlen
1700	3,2	260	Kathodenstrahlen

Tabelle VIII.

Ein anderes, sehr ähnliches Rohr. C Kathode.

II	I	P	
—	—	2800 Volt	{ Ohne Kathoden- und Kanalstrahlen
900 Volt	0,35	320	Kathodenstrahlen
1300	0,35	2450	Kanalstrahlen
1200	1,0	320	Kathodenstrahlen
2000	1,0	2400	Kanalstrahlen
1400	1,5	330	Kathodenstrahlen
2200	1,5	2400	Kanalstrahlen
1600	13,5	330	Kathodenstrahlen

Aus den Tabellen ergibt sich unzweifelhaft, daß *Kathodenstrahlen* das *Entladungspotential* stärker herabsetzen als *Kanalstrahlen*.

Gegen die Deutung dieser Versuche läßt sich der Einwand erheben, daß die Kathodenstrahlen stärker ionisieren als die Kanalstrahlen und daß hierauf die Wirkung zurückgeführt werden müsse. Daß dies nicht der Fall ist, geht aus folgenden Versuchen hervor.

§ 7. *Messung der Leitfähigkeit in mit Kathoden- bez. Kanalstrahlen durchsetzten Räumen.* Zur Messung der Leitfähigkeit wurde die Methode der Querströme genommen. In dem Rohr, in welchem die Leitfähigkeit untersucht werden sollte, standen einander gegenüber zwei bis auf die Spitzen in Glas gehüllte Sonden oder plattenförmige Elektroden, die bei Anlegung einer äußeren elektromotorischen Kraft im Galvanometer einen Strom gaben. Da die Methode sich nur anwenden läßt, wenn von vornherein in dem betreffenden Rohr keine Potentialdifferenz vorhanden ist, da sonst ein Teil des Hauptstromes bei Anlegung einer elektromotorischen Kraft durch die Querelektroden hindurchgeht¹⁾ und wegen der hierbei auftretenden verwickelten Verhältnisse eine Berechnung der Leitfähigkeit kaum möglich ist²⁾, so habe ich zunächst untersucht, ob in dem Raum hinter dem Drahtnetz, der für die Entscheidung der eben erwähnten Frage allein in Betracht kommt, überall dasselbe Potential herrscht.

1) G. Wiedemann, *Lehre von der Elektrizität* 4. p. 504 ff. Braunschweig 1885; C. A. Mebius, *Wied. Ann.* 59. p. 695. 1896.

2) C. A. Mebius, l. c.

Eine Röhre *A* von 80 cm Länge und 40 cm Breite und eine zweite Röhre *B* von 140 cm Länge und 40 cm Weite wurden aneinander derart gekittet, daß sich zwischen ihnen ein Drahtnetz befand. In dem Rohr *B* befanden sich sechs Sonden aus Platin, die bis auf die Spitze in Glas gehüllt waren. Sie führten zu dem Elektrometer. Die Elektrode *a* bestand aus Zink. Der Druck wurde mit einem McLeod abgelesen. In der folgenden Tabelle bedeutet Nr. die Nummer der Sonde, *P* das Potential der Sonde, *II* das Potential bei *a*, welches eine ungefähre Vorstellung von der Wucht, mit der die Kanal- bez. Kathodenstrahlen in den Raum *B* geworfen wurden, gibt, und schließlich *p* der Druck und *i* die Stromstärke in *A*.

Fig. 8.

Tabelle IX.

Stickstoff. Kanalstrahlen. $i = 0,3$ M.-A.

$p = 0,035$ mm $II = 1160$ Volt		$p = 0,27$ mm $II = 550$ Volt		$p = 0,35$ mm $II = 460$ Volt	
Nr.	<i>P</i>	Nr.	<i>P</i>	Nr.	<i>P</i>
1	+ 19,1 Volt	1	+ 17,8 Volt	1	+ 7,4 Volt
2	19,2	2	17,8	2	7,4
3	19,1	3	17,7	3	7,4
4	19,2	4	17,8	4	7,3
5	19,0	5	17,7	5	7,4
6	19,0	6	17,7	6	7,3

Stickstoff. Kathodenstrahlen. $i = 0,3$ M.-A.

$p = 0,035$ mm $II = 1050$ Volt		$p = 0,27$ mm $II = 530$ Volt		$p = 0,35$ mm $II = 420$ Volt	
Nr.	<i>p</i>	Nr.	<i>p</i>	Nr.	<i>p</i>
1	- 3,5 Volt	1	- 20,0 Volt	1	- 20,0 Volt
2	3,4	2	19,9	2	20,0
3	3,5	3	19,9	3	22,2
4	3,5	4	20,0	4	22,3
5	3,5	5	19,9	5	21,8
6	3,5	6	19,9	6	21,7

Aus der Tabelle, die ich noch vermehren könnte, ergibt sich, daß innerhalb der Beobachtungsfehler *überall im Raum hinter dem Drahtnetz ungefähr dasselbe Potential vorhanden ist. Fallen Kanalstrahlen hinein, so ist der Raum positiv, fallen Kathodenstrahlen hinein, so ist er negativ geladen.* Nur bei größeren Drucken, die aber im späteren gar nicht in Betracht kommen, sind nicht genau dieselben Potentiale überall vorhanden. Selbstverständlich gilt der obige Satz nur so lange, als der Raum, in den die Kathoden- bez. Kanalstrahlen fallen, nicht allzugroß ist.

Daß im allgemeinen auch bei Veränderung der Stromstärke in *A* das Potential in Rohr *B* überall gleich ist, geht aus der folgenden Tabelle hervor.

Tabelle X.

Wasserstoff. $p = 0,59$ mm.

Kathodenstrahlen				Kanalstrahlen			
Nr.	<i>i</i>	<i>P</i>	<i>II</i>	Nr.	<i>i</i>	<i>P</i>	<i>II</i>
1	0,5 M.-A.	-5,6 Volt	360 Volt	1	0,41 M.-A.	9,1 Volt	450 Volt
4	0,5	5,4	360	4	0,41	9,2	450
1	0,69	5,4	380	1	0,62	9,4	480
4	0,69	5,5	380	4	0,62	9,5	480
1	1,0	5,3	400	1	1,1	9,8	540
4	1,0	5,6	400	4	1,1	9,6	540
1	2,3	5,9	500	1	2,3	9,7	640
4	2,3	5,9	500	4	2,3	9,7	640

 $p = 0,33$ mm.

Kathodenstrahlen				Kanalstrahlen			
Nr.	<i>i</i>	<i>p</i>	<i>II</i>	Nr.	<i>i</i>	<i>P</i>	<i>II</i>
1	0,49 M.-A.	-0,7 Volt	500 Volt	1	0,4 M.-A.	10,5 Volt	690 Volt
4	0,49	0,7	500	4	0,4	10,3	690
1	0,8	0,7	550	1	0,59	10,6	770
4	0,8	0,7	550	4	0,59	10,6	770
1	1,0	0,75	640	1	1,0	10,7	880
4	1,0	0,75	640	4	1,0	10,8	880
1	2,5	2,8	1100	1	2,4	11,1	1050
4	2,5	2,5	1100	4	2,4	11,1	1050

Es wurde nun ein neues Rohr angefertigt, welches an mehreren Stellen einander genau gegenüberstehende Sonden enthielt. Die letzteren wurden durch ein Galvanometer mit einer Batterie verbunden. Da sich bei höheren elektromotorischen Kräften leicht ein Flammenbogen ausbildete, so befand sich vor dem Galvanometer ein größerer Jodcadmiumwiderstand, der bewirkte, daß die Elektrizität höchstens in Form einer Entladung, d. h. mit Glimmlicht dunklem Raum und positiven Licht übergang. In den nachfolgenden Tabellen bedeuten p der Druck, II das Potential in A , I die Stromstärke in A , P die elektromotorische Kraft zwischen den Sonden, die, solange kein Glimmlicht, positives Licht etc. zwischen den Sonden sich ausgebildet hatte, identisch war mit der äußeren angelegten elektromotorischen Kraft und i die Stromstärke zwischen den Sonden. Die Galvanometeraussschläge sind in willkürlichen Einheiten angegeben (1 Teilstrich gleich $3,8 \cdot 10^{-6}$ M.-A.).

Tabelle XI.

Wasserstoff.

Kathodenstrahlen. $p = 0,19$ mm, $I = 0,2$ M.-A., $II = 790$ Volt.		Kathodenstrahlen. $p = 0,085$ mm, $I = 0,2$ M.A., $II = 840$ Volt.	
p	i	p	i
10 Volt	37	10 Volt	250
20	63	20	440
30	82	30	610
40	83	40	720
50	93	50	840
60	104	60	980
70	118	70	1100
80	140	80	1260
90	163	90	1400
100	175	100	1480
110	179	110	1560
120	194	120	1650
130	221	130	1760
140	226	140	1880
150	245	150	1960
160	260	160	2060

Tabelle XI (Fortsetzung).

Kanalstrahlen. $p = 0,63 \text{ mm}$, $I = 0,2 \text{ M.-A.}$, $II = 400 \text{ Volt}$.		Kanalstrahlen. $p = 0,13 \text{ mm}$, $I = 0,2 \text{ M.-A.}$, $II = 1480 \text{ Volt}$.	
p	i	p	i
10 Volt	80	10 Volt	510
20	160	20	880
30	200	30	1150
40	220	40	1300
50	240	50	1400
60	270	60	1600
70	310	70	1900
80	360	80	2300
90	410	90	2500
100	450	100	2700
110	510	110	2900
120	560	120	3100
130	610	130	3300
140	660	140	3500
150	710	150	3700
160	760	160	3900

Tabelle XII.

Sauerstoff.

Kanalstrahlen. $p = 0,045 \text{ mm}$, $I = 0,2 \text{ M.-A.}$, $II = 1910 \text{ Volt}$.		Kathodenstrahlen. $p = 0,01 \text{ mm}$, $I = 0,2 \text{ M.-A.}$, $II = 2100 \text{ Volt}$.	
p	i	II	i
10 Volt	220	10 Volt	120
20	410	20	250
40	620	40	450
60	820	60	620
80	1100	80	770
100	1300	100	900
120	1450	120	1000
140	1600	140	1140
160	1700	160	1300

Bei 160 Volt war stets im Querstrom Glimmlicht etc. zu sehen; bei großen Stromstärken im Hauptstrom sogar schon bei 120 Volt. Die beistehende Fig. 9 gibt die erste Beobachtungsreihe wieder, die anderen sind analog. Wächst die Elektrodenspannung ausgehend von kleinen Werten, so wächst mit ihr die Stromstärke erst schnell, dann langsamer und nimmt darauf einen nahezu konstanten Wert an. Steigt die Elektrodenspannung noch weiter, so nimmt auch die Stromstärke zu. Die Kurve hat also zwei Wendepunkte. Die Beobachtungen stimmen mit denen früherer Beobachter überein und finden ihre Erklärung dadurch, daß, bevor die Sättigung eingetreten ist, die sich bewegenden Ionen weiter ionisieren.¹⁾ Mit steigender Stromstärke im Hauptstrom nimmt die Leitfähigkeit im Querstrom stark zu, ebenso bei weiterer Verdünnung. Aus den Beobachtungen ergibt sich, daß eine Leitfähigkeit sich nur messen läßt, wenn man keine höheren Spannungen als 40 Volt anwendet. Das ist im folgenden auch geschehen.

Fig. 9.

§ 8. *Weitere Messungen über die Wirkung der Kanal- und Kathodenstrahlen.* Es wurde ein der Fig. 7 ähnliches Rohr verwandt, nur waren unmittelbar unter dem durchbohrten Kupferblech *C* zwei Sonden *S* angebracht, die dazu dienen sollten, die Leitfähigkeit zu messen. War *D* Kathode, so war, wie bei Tab. VI, kein Einfluß der Kathoden- oder Kanalstrahlen zu beobachten. Es wurde jetzt, nachdem die Kathoden- bez. Kanalstrahlen in *B* hineingeschickt waren, die Leitfähigkeit bei 40 Volt zwischen *SS* gemessen, darauf wurde die Influenz-

Fig. 10.

1) Vgl. J. Stark, Elektrizität in Gasen p. 184. Leipzig 1902.

maschine zwischen CD eingeschaltet, derart, daß C Kathode war. Solange kein großer dunkler Raum sich ausgebildet hatte, war kaum ein Einfluß der Kathoden- oder Kanalstrahlen zu beobachten. Mit den Messungen begann ich bei 0,015 mm, nachher, beim weiteren Auspumpen, ließ sich der Druck nicht mehr messen. In der nachfolgenden Tabelle bedeuten I die Stromstärke im Hauptkreis, P das Potential zwischen D und Erde, L die Leitfähigkeit zwischen SS .

Tabelle XIII.

Luft.					
Kathodenstrahlen.			Kanalstrahlen.		
I	P	L	I	P	L
—	1150 Volt	—	—	1150 Volt	—
0,1 M.-A.	220	30	0,1 M.-A.	950	40
0,3	220	120	0,15	750	60
0,6	220	270	0,3	650	140
1,0	220	460	0,5	600	300
			1	520	500

Wasserstoff.					
Kathodenstrahlen.			Kanalstrahlen.		
—	1900 Volt	—	—	1900 Volt	—
0,1 M.-A.	720	50	0,1 M.-A.	1150	55
0,2	220	130	0,2	900	150
0,3	220	200	0,3	760	230
1,0	220	700	0,5	600	370
			1	400	780

Mit Stickstoff und Sauerstoff wurden ähnliche Resultate erhalten.

Aus der Tabelle ergibt sich, daß *Kathodenstrahlen, selbst wenn sie in viel geringerem Maße ionisieren als Kanalstrahlen, trotzdem wirksamer sind als letztere.* Die negativen Ionen der Kathodenstrahlen in B ziehen die positiven aus dem dunklen Raume in C heraus, so daß die Entladung eine ganz andere Bahn einschlägt, während die positiven Ionen der Kanalstrahlen diese anziehende Wirkung nicht ausüben können.

§ 9. *Einwirkung der Kathodenstrahlen auf den von ihnen durchdrungenen dunklen Raum.* Aus der Tatsache, daß Kathodenstrahlen ionisieren und dadurch die Verarmung an Ionen an

der Kathode beseitigen, folgt, daß der dunkle Raum und das Kathodenpotential ohne Kathodenstrahlen größer sein würden, als sie tatsächlich sind. Hieraus ergibt sich, daß, wenn man die von einer Kathode ausgehenden Kathodenstrahlen auf die Kathode zurückwirft, der dunkle Raum kleiner werden und der Kathodenfall sinken muß. Daß tatsächlich der dunkle Raum durch Zurückwerfen der Kathodenstrahlen in denselben kleiner wird, ist von den Herren E. Wiedemann u. H. Ebert¹⁾ beobachtet worden. Ich habe diese Beobachtungen durch Potentialmessungen ergänzt. Zur Verwendung kam das von E. Wiedemann und H. Ebert benutzte Rohr. Ein 5,6 cm weites, 22 cm langes Glasrohr trägt an einem Ende einen

Fig. 11.

weiten Schliff s_3 mit einer Aluminiumplatte a , welche zur Kathode gemacht wird. Am anderen Ende befindet sich ein weiterer Schliff s_1 , durch den ein Glasstab eingeführt wird, der oben eine flachgedrückte Glashülse trägt. In diese kann von oben her durch den weiten Schliff mittels einer Zange der Stiel einer Platte p gesetzt werden, welche also um die Rohrachse drehbar ist. In der Höhe der Plattenmitten ist seitlich ein über 2 cm weites Rohr angesetzt, in welches eine als Kathode benutzte Aluminiumplatte durch den Schliff s_2 eingeführt wird. Wird so weit ausgepumpt, daß sich das positive Licht nach oben zurückzieht und um die

1) E. Wiedemann u. H. Ebert, Sitzungsber. d. phys.-med. Soc. Erlangen 1891.

Kathode ein dunkler Raum ausbildet, so kann man durch Drehen von p leicht bewirken, daß die Kathodenstrahlen mehr oder minder in den dunklen Raum reflektiert werden. Der letztere wird dann kleiner und gleichzeitig dringt das positive Licht vor. In der ersten Reihe der nachfolgenden Tabelle stehen die Entladungspotentiale, während die Kathodenstrahlen seitwärts an m vorbeigingen, und in der zweiten die Entladungspotentiale, wenn sie in den dunklen Raum geworfen wurden.

Tabelle XIV.

Ohne Reflexion	Mit Reflexion
5300 Volt	3700 Volt
3700	3400
3300	3000
4000	3500
4500	3600
5500	3700

Als Kathode wurde jetzt ein Aluminiumdraht, der bis auf die Spitze in Glas gehüllt war, benutzt.

Tabelle XV.

Ohne Reflexion	Mit Reflexion
2500 Volt	1950 Volt
2000	1700
1700	1600
1500	1400
1380	1300
1300	1240

Auch durch den Magneten kann man die Kathodenstrahlen in ihren dunklen Raum zurückwerfen. Benutzt wurde hierzu ein Rohr von 10 cm Länge und 5 cm Durchmesser. Anode und Kathode bestanden aus Aluminiumdraht. Der Strom in dem unter der Kathode befindlichen Elektromagneten war so stark, daß das Kathodenstrahlenbündel völlig aufgewickelt wurde. Bei Beginn des Versuches war das Rohr mit Kathodenstrahlen erfüllt; als der Magnet angelegt wurde, drang das positive Licht vor.

Tabelle XVI.

Ohne Magnet	Mit Magnet
5000 Volt	2200 Volt
3500	1750
3000	1550
2500	1380
2100	1260
1800	1150
1600	1110
1500	1070

Mit einem halb so starken Magneten wurden folgende Resultate erhalten.

Tabelle XVII.

Ohne Magnet	Mit Magnet
4000 Volt	3500 Volt
3500	3300
3000	2800
2500	2350
2000	1900
1750	1650
1500	1450

Aus den Tabellen ergibt sich:

1. *Kathodenstrahlen und zwar sowohl direkte als auch reflektierte und durch den Magneten in den dunklen Raum geworfene ionisieren das Gas im dunklen Raum und bewirken dadurch, daß derselbe und zugleich das Kathodenpotential kleiner wird.*

2. *Die Wirkung ist um so größer, je größer der dunkle Raum ist, d. h. je weiter die Verarmung an Ionen um die Kathode fortgeschritten ist.*

Die Erklärung hierfür ist oben gegeben worden.

§ 10. *Schluß.* Aus der hier entwickelten Theorie über die Natur des dunklen Raumes lassen sich noch einige Folgerungen ziehen.

Da der dunkle Raum verhältnismäßig wenig Ionen enthält, so muß er sich in jeder Hinsicht wie ein Dielektrikum verhalten. Hieraus erklären sich die Beobachtungen von E. Wiedemann und mir¹⁾, daß derselbe nicht gegen elektrische Wellen schirmt, während die übrigen Teile einer Ent-

1) E. Wiedemann u. G. C. Schmidt, Wied. Ann. 62. p. 460. 1897.

ladung dies tun, sowie die Beobachtungen von A. Wehnelt¹⁾, daß die Entladung durch den dunklen Raum oszillatorisch ist.

Da die negativen Ionen eine größere Geschwindigkeit besitzen als die positiven, so folgt hieraus, wie schon p. 626 angedeutet, daß nur an der Kathode, wohin die positiven Ionen gelangen, eine Verarmung eintreten kann, während an der Anode stets Ionen in reichlicherer Menge vorhanden sein müssen. Hieraus erklärt sich, weswegen nur an der Kathode der dunkle Raum auftritt.

Über die Größe des dunklen Raumes und die Beziehung desselben zur Stromdichte, Gasdruck etc. werden sich erst genaue Gesetze nach Ermittlung der Wanderungsgeschwindigkeit, Anzahl der Ionen, sowie der Ionisation durch Kathodenstrahlen etc. aufstellen lassen.

Es war meine Absicht, diese Arbeit durch Bestimmung der Wanderungsgeschwindigkeiten aus der Leitfähigkeit zu vervollständigen. Die Methode bestand im wesentlichen darin, das Gas im Entladungsrohr zu ionisieren und darauf in dem isoliert aufgehängten Rohr nach Unterbrechung des Hauptstromes die Leitfähigkeit in den verschiedenen Teilen der Entladung zu messen. Nach Überwindung vieler Schwierigkeiten ergab sich, daß die Ionen so schnell verschwanden, daß eine Messung auf diesem Wege nicht möglich war. Nur die an den Glaswänden haftenden und sich allmählich freimachenden Ionen erteilten der Luft eine geringe Leitfähigkeit.

Erlangen, Physikalisches Institut, 4. Juli.

1) A. Wehnelt, Wied. Ann. 65. p. 511. 1898.

(Eingegangen 10. Juli 1903.)