

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Die Bildung der Erdalkaliperoxyde

Engler, Carl

Heidelberg, 1910

Beobachtungen über Lichtemission und Kanalstrahlen

[urn:nbn:de:bsz:31-289891](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-289891)

Sitzungsberichte
der Heidelberger Akademie der Wissenschaften
Stiftung Heinrich Lanz
Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse

=====
Jahrgang 1910. 4. Abhandlung.
=====

Beobachtungen über Lichtemission und Kanalstrahlen

von

[am]
Joh. Koenigsberger und Jos. Kutschewski
in Freiburg i. B.

—
Eingegangen am 2. März 1910

—
Vorgelegt von F. Himstedt

[T. 1]



Heidelberg 1910
Carl Winter's Universitätsbuchhandlung

Verlags-Nr. 420.

Abhandlung über
die physikalische Erklärung der Wasserkräfte
von
Johann Christian Poggendorff
Leipzig, 1842

Beobachtungen über Lichtemission und Kanalstrahlen

von
Johann Christian Poggendorff

Leipzig, 1842
Verlag von C. Neumann, Neudamm



Leipzig, 1842
Verlag von C. Neumann, Neudamm

Die folgenden Versuche gingen ursprünglich von optischen Beobachtungen aus, auf die wir a. a. O. eingehen werden. Die Mittel zu dieser Untersuchung verdanken wir teilweise dem gütigen Entgegenkommen der Heidelberger Akademie der Wissenschaften (Stiftung H. LANZ), teilweise dem ELISABETH THOMPSON Science fund in Boston, welche beiden wir an dieser Stelle unsern ergebensten Dank aussprechen möchten. Herrn Prof. F. HIMSTEDT sind wir ebenfalls für Überlassung vieler Hilfsmittel aus seinem Institut zu bestem Dank verpflichtet. Bezüglich der Literatur bis 1909 sei auf das vortreffliche Buch von E. GEHRCKE, *Die Strahlen der positiven Elektrizität* (Leipzig 1909) verwiesen.

1. Versuchsanordnung. Nach dem Vorgang von W. WIEN¹⁾ wurde der Entladungsraum vom Beobachtungsraum durch eine längere Kathode getrennt. Der Abstand zwischen Anode und Kathode im Entladungsraum betrug mindestens 30 cm, meist aber über 45 cm. Als Kathodenmaterial wurden Eisen und Messing, die keine wesentlichen Unterschiede zeigten, benutzt. Für völligen magnetischen Schutz des Entladungsraumes haben wir häufig gesorgt; doch ist er bei den benutzten engen Kapillaren unwesentlich (vgl. Abschnitt 5), da der Strahlenkegel vielfach schon durch die Apertur der Kapillare begrenzt ist.

Evakuiert wurde mit der Pumpe von W. GAEDE, die sich vorzüglich bewährt hat. Der Kitt für die Schliffe war ein besonders hergestelltes Ramsayfett, das durch langes hohes Erhitzen von Guttapercha und ausgekochten hochsiedenden Vaselinen hergestellt war. Es hat den Nachteil, nach der Abkühlung etwas hart zu werden, gibt aber keine Gase ab. Wichtig ist ferner manchmal die Vermeidung von Spuren von Phosphorwasserstoff; das wird leicht durch Vermengen oder Erwärmen des Phosphorperoxyd mit Kaliumpermanganat erzielt.

¹⁾ W. WIEN, *Sitzber. K. Bayr. Ak.*, 28, p. 55, 1908.

Das Vakuum muß für die Versuche in allen Grenzen variiert werden können. Nach dem Vorgang von W. WIEN wurde vielfach mit Durchströmung im Entladungsraum gearbeitet. Wichtig für viele Versuche ist insbesondere, daß im Entladungsraum, Kapillare und Beobachtungsraum nahezu gleiches Vakuum herrscht, da die Ergebnisse sonst viel schwerer zu deuten sind; denn die Kanalstrahlen entstehen, wie bekannt, je nach den Versuchsbedingungen ziemlich weit vor der Kathode und durchlaufen die Kapillare. Wenn man also auch im Beobachtungsraum ein noch so hohes Vakuum hat, so ist der Zustand der Kanalstrahlen doch im wesentlichen durch die Vorgänge bei dem höheren Druck in der Kapillaren und im Beobachtungsraum bedingt.

Man erhält daher für eine Länge des Beobachtungsraums bis zu 30 cm, sowie einmal das Vakuum im Beobachtungsraum unter $\frac{3}{10000}$ mm beträgt, keine anderen Versuchsergebnisse, auch wenn man den Druck noch weiter durch Abkühlen von Kokosnußkohle nach DEWAR oder flüssige Luft herabsetzt. Nur wenn im Entladungsraum der Druck höher ist, so bewirkt weiteres Herabsetzen des Druckes im Beobachtungsraum unter $\frac{3}{10000}$ mm kleine Unterschiede, weil dann der von den Kanalstrahlen in der Kapillare durchlaufene, unter höherem Druck stehende Raum sich dadurch entsprechend verkleinert. Wir haben daher meist (von einigen Versuchen zur Feststellung der Dissoziation abgesehen) vorgezogen mit möglichst kleinen Druckunterschieden im Entladungs- und Beobachtungsraum zu arbeiten.

Die Kathode und der ganze Beobachtungsraum waren stets geerdet und wenn nötig durch Drahtnetze gegen Ladungen etc. geschützt. Die Länge des Kanals in der Kathode variierte von 4—10 cm und mehr; der Durchmesser lag zwischen 5 mm und 0,2 mm. Wir konnten zu dem Zweck in einen ausgebohrten Eisenkonus Kapillaren von verschiedenem Durchmesser luftdicht einkitten. Nur wo besonders erwähnt, verwandten wir durchbohrte Kathodenbleche mit ganz kurzen Kanälen von 5 mm bis 1 mm Durchmesser.

Am schwierigsten ist die Druckmessung, weil sie am meisten unter systematischen Fehlern leidet. Wenn dauernd gepumpt wird, um die Gasreste, die bei der Entladung oder sonst an einzelnen Stellen der Röhre frei werden, fortzu-

schaffen, so ist der Druck durchaus nicht an allen Punkten derselbe wie derjenige, der mit dem MacLeod gemessen wird. Selbst bei Röhren von 1—2 cm lichter Weite, wo die Reibung keinen sehr erheblichen Einfluß hat, und wenn das MacLeod-Manometer möglichst nahe der Stelle ist, an der der Druck bestimmt werden soll, bewirken doch Wirbelströmungen u. a., daß die wahren Drucke, wenn dauernd gepumpt wird, an verschiedenen Stellen der Röhre erheblich bis um das Doppelte von den gemessenen verschieden sein können. Sowie aber Strahlbildung bei Ausfluß aus Kapillaren eintritt, kann der Druck an einzelnen Stellen sogar noch weit größer sein. Doch ist nach unsern Erfahrungen der Einfluß der aus dem Entladungsraum durch die Kapillare sich trichterförmig ausbreitenden Gasströmung in den Beobachtungsraum selbst bei 0,0001 mm Druck auf der einen und etwa 0,02 mm auf der andern nicht sehr weit, vielleicht 0,5—1 cm weit, reichend. Aber er wächst sehr erheblich mit zunehmender Druckdifferenz und breitet sich mit abnehmendem²⁾ Kapillardurchmesser bei seinem Austritt seitlich stärker aus, so daß man bei etwas größeren Druckdifferenzen auch mit den kräftigsten Magnetfeldern die Kanalstrahlen nur schwer aus seinem Bereich bringen kann.

Außerdem findet dann schon in der Kapillaren selbst eine Veränderung der Strahlen statt. Daher ist in vielen Fällen erforderlich, die definitive Beobachtung der Erscheinung und die gleichzeitige Ablesung des Druckes bei momentan verlangsamter oder fast verschwindender Pumpgeschwindigkeit vorzunehmen. Das gilt namentlich, wenn die Kapillaren eng und lang sind, aber auch sonst wegen der turbulenten Bewegungen, sowie die Luftwege Winkel bilden. Andernfalls ist der gemessene Druck nicht derjenige, welcher wirklich für die Erscheinung in Betracht kommt. Auch ist es vielfach notwendig, wenn die Versuchsbedingungen ganz klar und eindeutig sein sollen, möglichst kleine Druckdifferenzen zwischen Entladungs- und Beobachtungsraum zu nehmen, da sonst die Kanalstrahlen in der Kapillaren und auch im Entladungsraum d. i. auf der einen Hälfte ihres Weges sich unter andern Bedingungen befinden als auf der andern.

²⁾ Die Analogie mit Flüssigkeitsstrahlen trifft nicht zu, da die Druckkräfte den Gasstrahl verbreiten.

Die Messung der Drucke bis zu 0,00005 mm herab bietet sonst keine Schwierigkeit. Je geringer der Druck, um so mehr mißt man im MacLeod-Manometer, von dem Partialdruck des Quecksilbers abgesehen, wirklich den Gesamtdruck aller Gase und Dämpfe; für Wasserdampf z. B. trifft das für unser Manometer streng schon unter 0,01 mm zu. Man kann das auch sehr leicht prüfen, indem man Ablesungen mit variablen Druckdifferenzen beim Komprimieren nimmt. — Ob man Gleichstrom einer Influenzmaschine oder den intermittierenden Gleichstrom eines mit Wehneltunterbrecher unipolar abgestimmten Induktorium von KLINGELFUSS verwendet, ist, wie wir mehrfach festgestellt haben, ohne Einfluß auf die Erscheinungen. In vielen Fällen ist wegen der größeren Stromstärke und aus andern Gründen das Induktorium vorteilhafter. Nur wenn es darauf ankommt mit konstanten Potentialdifferenzen zu arbeiten, muß natürlich die Influenzmaschine verwandt werden.

2. Über die Lichtemission der Kanalstrahlen und ihre scheinbare Dissoziation. Die Lichtemission der Kanalstrahlen wurde zuerst von E. GOLDSTEIN³⁾ gefunden und untersucht. Dann hat J. STARK⁴⁾ den Dopplereffekt an den Kanalstrahlen entdeckt und festgestellt, daß ein Teil der Lichtemission von ruhenden, ein anderer von Teilen ausgeht, die sich mit einer Geschwindigkeit bewegen, die etwa der theoretisch berechneten von positiven Gasmolekülen entspricht. W. WIEN⁵⁾ hat zeigen können, daß die Lichtemission im wesentlichen von neutralen Teilen ausgehen muß. Wir haben über letzteres noch weitere Versuche angestellt. Durch ein recht starkes magnetisches Feld (1000 Gauss) kann man den positiven Anteil im Beobachtungsraum mit starker Krümmung ablenken und gegen die Glaswand werfen, wo er lebhaft gelbgraue Fluoreszenz erzeugt. Man sieht dann, daß auf diesem Kreisstück weder in Luft noch Wasserstoff bei Drucken zwischen 0,00005 und 0,03 mm das mindeste Leuchten stattfindet; nur tangential davon geht ein

³⁾ E. GOLDSTEIN, *Wied. Ann.* 64, p. 38, 1898.

⁴⁾ J. STARK, *Jahrb. f. Rad.*, 4, p. 231, 1907.

⁵⁾ W. WIEN, *Sitzber. K. Bayr. Ak.*, 28, p. 57, 1908.

ganz schwaches Leuchten⁶⁾ aus. Also leuchtet der leicht ablenkbare positiv geladene Wasserstoffanteil der Kanalstrahlen nicht. Bei Drucken über 0,02 mm leuchtet der ganze Entladungsraum; diese Erscheinung muß für sich behandelt werden. Der eigentlich primär-neutrale Strahl ist dann nicht mehr vorhanden (vgl. Abschnitt 10). Wir haben dann weiter untersucht, unter welchen Bedingungen der neutrale Anteil leuchtet.

Wenn der Druck im Entladungsraum nicht sehr niedrig ist, so ist ein erheblicher neutraler oder wenigstens nicht ablenkbarer Anteil vorhanden, der auf dem Willemitschirm Phosphoreszenz erregt. Dieser neutrale Strahl leuchtet aber im Beobachtungsraum nur dann, wenn dort der Druck nicht zu gering ist, wenn also genügend Gasmoleküle vorhanden sind, mit denen er zusammenstößt. Mit sinkendem Druck nimmt die Lichtintensität des neutralen Strahls stark ab, verglichen mit der Helligkeit der von ihm auf dem Schirm hervorgerufenen Phosphoreszenz.

Das stimmt mit der bereits von W. WIEN gefundenen Verringerung der Lichtemission bei sinkendem Druck verglichen mit der Gesamtwärmewirkung der Kanalstrahlen. Wir beabsichtigen diese Vergleichung der Lichtemission mit der Phosphoreszenzhelligkeit, die eine vielleicht etwas andere Beziehung ergeben dürfte wie die Vergleichung mit der Gesamtwärmewirkung, photometrisch eingehender durchzuführen.

Die Drucke, bei welchen die Lichtemission für unser fünf Minuten lang im Dunkeln ausgeruhtes Auge nicht mehr gut sichtbar ist, sind für Luft etwa 0,0006, für Wasserstoff 0,0002, für Quecksilber 0,005 mm. Natürlich sind das nur relative Daten. Die Helligkeit an einer bestimmten Stelle nimmt eben proportional der Zahl der Zusammenstöße und somit der Gasdichte ab, wenn die Intensität des neutralen Anteils im übrigen an der betreffenden Stelle dieselbe ist, bzw. wenn, was wegen der Absorption erforderlich, hierauf umgerechnet wird; sie wird also nie Null.

⁶⁾ Dies Leuchten in tangentialer Richtung ebenso wie das geringe Leuchten, das W. WIEN an wohl weniger stark abgelenktem positivem Strahl beobachtet hat, schreiben wir der Bildung von neutralen Teilen durch den positiven Strahl zu, die wie Abschnitt 7 gezeigt bei den höheren Drucken über 0,0005 mm, die zum Leuchten erforderlich sind, erfolgt.

In Quecksilberdampf ist unabhängig vom Druck im Entladungsraum, der durch Heizung nach dem Vorgang von W. WIEN und J. STARK von 0,0001 mm bis 0,1 mm variiert werden konnte, stets nur der neutrale, magnetisch und elektrostatisch nicht ablenkbare Strahl vorhanden, wenn der Partialdruck im Beobachtungsraum kleiner als 0,001 mm ist. Das würde also mit dem übereinstimmen, was W. WIEN auf anderm Weg gefunden hat, wonach der Quecksilberkanalstrahl keine Ladung mit sich führt.⁷⁾ Doch haben wir gefunden, daß dieser nicht ablenkbare Strahl absolut nicht leuchtet, im Gegensatz zu W. WIEN, wonach er intensiv Licht emittiert. Dieser Widerspruch ist leicht aufzuklären. Wir hatten, um uns dagegen zu sichern, daß Quecksilberdampf nicht in merklicher Menge aus dem Entladungsraum in den Beobachtungsraum übergeht, folgende Anordnung getroffen: In dem erwärmten Rohr befindet sich eine Kathode aus Eisenrohr mit Röhre von 5 mm Durchmesser und 35 mm Länge, die mit erwärmt wird. Auf diese folgt ein Eisenkonus von 10 cm Länge mit Kapillare von 1 mm Durchmesser, der gekühlt ist und auf den von der einen Seite luftdicht das erwärmte Glasrohr für den Entladungsraum und auf der andern Seite das abgekühlte mit dem Beobachtungsraum aufgesetzt wird. Kathode, Konus, Beobachtungsraum waren geerdet. Hierdurch ist erreicht, daß der Kanalstrahl von Hg in einem vollkommen von Hg freien Raum sich bewegt und deshalb wohl nicht leuchtet, obgleich er auf dem Willemitschirm noch stärkere Phosphoreszenz erregt als der neutrale Kanalstrahl von Luft unter gleichen Bedingungen. Auch wenn man in den Beobachtungsraum Luft einführt oder etwas Quecksilber verdampft ($p = 0,002$ mm), leuchtet der Kanalstrahl nicht, und erst über 0,05 mm Luftdruck tritt diffuse Lichtemission des ganzen Raumes ein. Das Leuchten des Hg-Kanalstrahls tritt also offenbar erst ein, wenn der Hg-Druck größer als 0,002 mm ist. Dasselbe Resultat erhält man auch, wenn man die oben erwähnte Hilfskathode wegläßt und nur den Eisenkonus mit der engen Kapillaren als Kathode verwendet.

Wir haben ferner festgestellt (vgl. Abschnitt 9), daß der leuchtende Anteil weder elektrisch noch magnetisch abgelenkt noch ein durch ein verzögerndes oder beschleunigendes Feld beeinflußt wird. Man kann durch das verzögernde Feld die

⁷⁾ W. WIEN, *Ber. K. Bayr. Ak.*, 1909, 12. Abh.

Phosphoreszenz des positiven Teils beliebig schwächen, ohne daß der leuchtende Strahl seine Intensität ändert. Man kann ferner beweisen, daß die leuchtenden Kanalstrahlen schon etwas vor der Kathode neutral sind. Je nach den Versuchsbedingungen entstehen die neutralen Teile, welche in der Richtung der Kanalstrahlen wandern und die bei Zusammenstoß mit ruhenden Gasmolekülen Licht emittieren und nach den Messungen von J. STARK und F. PASCHEN über den Dopplereffekt etwa $\frac{1}{6}$ der Geschwindigkeit des positiven Teils nach unsern Messungen besitzen, in bestimmtem Abstand vor der Kathode. Beide Angaben der Geschwindigkeit beziehen sich hierbei auf die Hauptintensitäten. Bei Messingkathoden in Luft von einem Druck von 0,003 mm, etwa 20000 Volt Potentialgefälle und 0,0001 Amp. (Influenzmaschine) zwischen 1 und 7 cm vor der Kathode, bei etwa 0,005 A. (Induktor) zwischen 0,5 und 6 cm. Je größer der Druck im Entladungsraum, um so näher der Kathode entstehen sie. Das wird auf folgende Art nachgewiesen. Bringt man den Magneten unmittelbar an das vordere Ende der Kathode, so wird der positive Anteil so abgelenkt, vermutlich gegen die Wand der Kapillaren geworfen, daß er nicht auf den Schirm gelangen kann. Gleichwohl ist der leuchtende Strahl im Beobachtungsraum in voller Intensität sichtbar. Manchmal kann diese Intensität etwas stärker oder schwächer sein wie bei nicht erregtem Magnet. Das hängt damit zusammen, daß durch den Einfluß des Magneten die Kathodenstrahlen stark abgebogen und der ganze Entladungsvorgang erheblich beeinflußt wird. Aber an der Tatsache, daß auf diese Art der leuchtende Anteil frei von dem ablenkbaren in den Beobachtungsraum gebracht werden kann, ändert das nichts. Der Magnet soll nicht stark streuen und muß an die geeignete Stelle vor der Kathode gebracht werden. Der leicht ablenkbare positive Anteil ist dann ganz verschwunden und wird auch von dem leuchtenden Kanalstrahl nicht mehr gebildet^{*)}, wie man durch Fehlen der elektrischen und magnetischen Ablenkung im Beobachtungsraum nachweisen kann.

^{*)} Mit Recht bemerkt J. STARK, *Phys. Zt.*, 11, p. 173, 1910, daß, falls Dissoziation des neutralen Teiles stattfindet, ein verzögerndes Feld eine Schwächung des Leuchtens hervorrufen müsse. Daß diese bei unseren Versuchen gleichwohl nicht zu bemerken ist, läßt sich einfach dadurch erklären, daß bei unseren Versuchen eine merkliche Dissoziation des neutralen Teils nicht vorhanden war.

Das haben wir für Luft, Wasserstoff, Kohlensäure, Quecksilber immer wieder gefunden. Ob vielleicht bei höheren Drucken ein sehr schwer ablenkbarer positiver Anteil doch gebildet wird, was nach den Versuchen von W. WIEN wahrscheinlich wäre, müssen wir dahingestellt sein lassen. Der leuchtende Kanalstrahl ist also in keiner Weise erheblich magnetisch beeinflussbar. Das scheint uns besonders mit Hinblick auf einen von dem Entdecker der Kanalstrahlen, E. GOLDSTEIN, seinerzeit gegen die Versuche von W. WIEN, der die magnetische Ablenkung der Kanalstrahlen fand, gemachten Einwand von Interesse. E. GOLDSTEIN arbeitete mit ziemlich hohem Druck, der in Beobachtungs- und Entladungsraum der gleiche war; hierbei mußte also der neutrale Anteil im Kanalstrahl überwiegen. Dieser ruft nur sehr schwache Glasfluoreszenz hervor und ist nach unsern Versuchen nicht mehr dissoziierbar und merklich magnetisch ablenkbar. Wie die von W. WIEN und J. J. THOMSON gefundenen Dissoziationserscheinungen des neutralen Anteils möglicherweise erklärt werden können, ist Abschnitt 7 besprochen.

Wenn man den Magneten dann weiter an die oben beschriebenen Stellen 6 bzw. 7 cm vor der Kathode schiebt, verschwindet auch der leuchtende Strahl. Das kann man auf zwei Arten erklären. Entweder muß man annehmen, daß bei größerem Abstand des Magneten von der Kathode der Entladungsvorgang so geändert wird, so daß überhaupt keine Kanalstrahlen mehr entstehen. Das scheint uns wenig wahrscheinlich. Oder die ursprünglich positiven Teile, die zur Kathode hingezogen werden und aus denen der neutrale Strahl entsteht, sind jetzt durch den Magneten so abgelenkt, daß sie nicht mehr durch die der Röhrenaxe parallele Kapillare hindurchgehen können. Dann entsteht also der neutrale leuchtende Anteil aus positiven Teilen des betr. Gases und muß demgemäß jedenfalls eine geringere Geschwindigkeit und daher auch kleinere Reichweite als der positive Wasserstoffanteil besitzen. Man könnte den Vorgang etwa folgendermaßen denken. Im Kathodendunkelraum entstehen positive Ionen, auf eine Weise die weiter unten besprochen werden soll. Diese werden durch die elektrostatischen Kräfte geradlinig zur Kathode getrieben. Auf diesem Wege stoßen sie auf Elektronen oder Gasmoleküle und neutralisieren sich, geben vielleicht auch neutralen Gasmolekülen durch geraden Stoß eine

erhebliche Geschwindigkeit in ihrer ursprünglichen Richtung. Je später sie sich neutralisieren, um so größer wird die erlangte Geschwindigkeit sein. Daher entsteht der intensivst wirkende neutrale Anteil nicht weit von der Kathode. Jedoch leuchten, wie aus den Seite 7 beschriebenen Beobachtungen folgt, diese neutralen Teile infolge ihrer Translationsgeschwindigkeit nicht. Das steht in Einklang mit den Folgerungen aus allen Elektronentheorien; denn eine gleichförmige Geschwindigkeit von Elektronen oder auch Jonensystemen kann keine elektromagnetische Strahlung bewirken, und die bei der Bildung des neutralen Teils aus dem positiven entstandene Schwingungsenergie klingt offenbar sehr rasch ab. Daher leuchten diese neutralen Teile im Entladungs- und Beobachtungsraum nur, wenn sie wieder auf Gasmoleküle stoßen. Die Linienemission muß dann nach den Beobachtungen von J. STARK an dem Dopplereffekt an Kanalstrahlen von bewegten wie von ruhenden Teilen ausgehen. Von der Art des Stoßes schräg oder gerade mag die Geschwindigkeitsverteilung abhängen. Ob die neutralen Teile die von PLÜCKER und HITTORF entdeckten, von VILLARD und namentlich RIGHI eingehender untersuchten Doublets oder Magnetstrahlen sind, läßt sich nicht angeben; denn bisher ist für die Magnetstrahlen eigentlich nur das Kriterium des neutralen Zustandes vorhanden.

Die positiven Ionen vor der Kathode, die dann im Beobachtungsraum teils positiv teils neutral sind, entstehen unserer Ansicht zum Teil dadurch, daß sie bei der Entladung von der Kathode als Gasmoleküle oder Gasionen mechanisch gegen das Feld herausgeschleudert werden. Die Geschwindigkeit dieser kann also demnach nur die mechanische ursprünglich vorhanden gewesene sein. Daher erhält man unter gewissen Bedingungen konstante vom Potentialfall unabhängige Geschwindigkeit des positiven Teils. Dagegen müssen die positiven Ionen, die zwischen Anode und Kathode entstehen, eine nur vom Potentialgefälle abhängige Geschwindigkeit haben, die maximal durch die zwischen Anode und Kathode gegeben ist. Von den Versuchsbedingungen wird es abhängen, was zutrifft. Wir haben wie J. J. THOMSON, namentlich in reinem Wasserstoff, den ersten Fall gehabt, eine konstante bei geringem Druck auch im Entladungsraum ziemlich einheitliche Geschwindigkeit des positiven Anteils.

Ziehen wir die Folgerungen aus obigen Versuchen, so sehen wir, daß in Übereinstimmung mit der Ansicht von P. LENARD⁹⁾ die Lichtemission der Hauptserie (und nach unsern Versuchen auch des Bandenspektrums) von neutralen Gasatomen oder -molekülen ausgeht. Diese Lichtemission kann aber nicht ein elektrischer Luminiszenzvorgang sein, sondern muß nach obigem durch die mechanischen Zusammenstöße des neutralen Kanalstrahls mit Gasmolekülen zustande kommen. Hierbei mag vielleicht eine Ionisation stattfinden und das Leuchten durch Molisierung, wie das J. STARK annimmt, bedingt sein. Jedoch ist ein gleichzeitiges Vorhandensein eines elektrischen Feldes oder elektrisch geladener Teile nicht erforderlich. Andererseits kann natürlich keinem Zweifel unterliegen, daß die Lichtemission durch Elektronenschwingungen erregt wird und elektrische Vorgänge zur Ursache hat; aber unsere elektrischen Felder sind wohl viel zu langsam variabel, um je direkt Elektronenschwingungen hervorrufen zu können.

3. Phosphoreszenzerregung durch neutrale Teile.

Von Interesse ist die mit diesen letzteren Beobachtungen eng zusammenhängende Frage, ob Phosphoreszenz auch durch neutrale Teile von großer Geschwindigkeit erregt werden kann. Die Phosphoreszenzfarbe des Willemit auf Wasserglas für den scheinbar neutralen Teil ist dieselbe wie für den positiven, nämlich für unser Auge¹⁰⁾ grün-gelbgrün, während Kathodenstrahlen blaugrüne Phosphoreszenz verursachen. Diese Tatsache ließ als möglich erscheinen, daß die Phosphoreszenz des neutralen Teils durch infolge Dissoziation in ihm entstehenden positiven Teile bedingt sei. Sowohl P. LENARD wie J. J. THOMSON haben sich früher dahin ausgesprochen, daß Phosphoreszenz nur durch Licht oder elektrisch geladene Teile hervorgerufen werde. Wir haben daher direkt vor dem Schirm ein sehr starkes transversales elektrisches Feld angebracht. Dies hätte die nachträglich durch Dissoziation aus dem neutralen Strahl entstandenen positiven Teile unmittelbar vor dem Schirm zumeist herausziehen und dadurch die Phosphoreszenz vernichten oder erheblich abschwächen müssen, wenn diese nur durch positive Teile be-

⁹⁾ P. LENARD, *Ann. d. Phys.*, *11*, p. 636, 1903, u. *17*, p. 222, 1905.

¹⁰⁾ Bei Studium der Literatur und mündlicher Diskussion fiel uns auf, wie verschieden gelb- bis blaugrüne Farbtöne von geringer Intensität von verschiedenen Beobachtern empfunden und bezeichnet werden.

wirkt ist. Das war aber für Luft wie für Quecksilber nicht der Fall. Daher muß man annehmen, daß entweder neutrale Kanalstrahlen in Luft oder Quecksilber Phosphoreszenz erregen können, oder daß der sogenannte neutrale Strahl in Wirklichkeit teilweise ein positiv geladener Strahl mit sehr großer Masse und gleichwohl auch sehr großer Geschwindigkeit ist, der demgemäß nur mit den stärksten magnetischen und elektrischen Feldern ablenkbar wäre.

4. Über die Reichweite des positiven und neutralen Kanalstrahls. Man kann nicht in demselben Sinn wie bei α -Strahlen von einer Reichweite der Kanalstrahlen sprechen; denn es ist weder die Jonisation an der Grenze der Reichweite am stärksten, noch hören plötzlich die Kanalstrahlen auf, nachdem sie eine bestimmte Strecke in Gas von gegebenem Druck durchlaufen haben. Doch ist für die neutralen wie positiven Strahlen der Intensitätsabfall zuerst langsamer und dann rascher, als er nach einem Absorptionsgesetz zu erwarten wäre. Man kann das für beide Anteile aus der Intensität der Phosphoreszenz und für den neutralen aus der Intensität der Lichtemission folgern. Wir werden das a. a. O. durch Zahlenangaben belegen. Die „Reichweite“ des positiven (Wasserstoff) Anteils mit einer Geschwindigkeit von etwa $2 \cdot 10^8$ ist in Luft bei $p = 0,3$ mm etwa 25 cm, des neutralen Anteils bei $p = 0,03$ gleich 25 cm; in Wasserstoff für den positiven Anteil etwa 0,4 mm für 25 cm, für den neutralen etwa 0,004 mm für 25 cm, bei Quecksilber-Kanalstrahlen für den neutralen (nicht leuchtenden) etwa 0,4 mm Luft für 25 cm. Eine Unsicherheit bezüglich des neutralen Teils besteht darin, daß unentschieden ist, ob nicht der sogenannte neutrale Anteil durchweg aus zwei Teilen besteht, nämlich 1. dem absolut neutralen Licht emittierenden Anteil, 2. dem schwer oder gar nicht magnetisch und elektrostatisch ablenkbaren phosphoreszierenden Anteil.

Daß die Reichweite des neutralen Teils erheblich geringer als die des positiven ist, erklärt sich zum Teil wohl aus seiner geringeren Geschwindigkeit.

5. Die Verbreiterung des Kanalstrahlenbündels. Je weiter der Schirm von der Mündung der Kapillare entfernt wird, um so breiter wird der Phosphoreszenzfleck sowohl des positiven wie des neutralen Teils. Man kann bei Anwendung des Induktionsapparates zwei verschiedene Stadien unterscheiden.

Über einem gewissen Grenzdruck ist der Fleck ganz verwaschen ohne scharfe Grenzen; unter diesem ist er zwar stets proportional der Entfernung von der Kapillaren größer, aber der Durchmesser ist dann praktisch unabhängig vom Vakuum. Dieser Grenzdruck ist für Luft etwa 0,003 mm¹¹⁾, für Wasserstoff 0,006 mm. Bei Quecksilber kann der Partialdruck des Quecksilberdampfes aus leicht ersichtlichen Gründen nicht gemessen werden, doch ist aus der Temperatur der Grenzdruck auf etwa 0,004 mm Quecksilberdampf zu schätzen und ebensohoch als Druck der Luft, wenn in den Beobachtungsraum der Hg-Kanalstrahlen Luft eingelassen wird.

Die verwaschene Ausbreitung des Fleckes bei stärkeren Drucken ist zum Teil wohl auf Ionisierung des benachbarten Gases und das Auftreffen der so gebildeten Ionen und gestoßenen Moleküle auf den Phosphoreszenzschirm zurückzuführen, kaum dagegen auf eine eigentliche Diffusion der Kanalstrahlen. Man könnte für das scharfe, aber doch gegenüber dem Durchmesser der Kapillaren verbreiterte Aussehen des Fleckes, welches zeigt, daß die Kanalstrahlen einen Kegel bilden, zwei Ursachen angeben. Erstens ist die elektrostatische Abstoßung des positiven Teils in Betracht zu ziehen. Da man ein derartiges Strahlenbündel als sehr ausgedehntes Rotationsellipsoid betrachten kann, erhält man, wie sich leicht zeigen läßt, folgende Formel für dessen äußeren Durchmesser $d = \frac{\pi e \rho \cdot r_0 l^2}{m \cdot v^2}$; hierin ρ die Dichte der elektrischen Ladung in ES, r_0 der Radius der Öffnung, aus der die Strahlen von der Geschwindigkeit v parallel austreten, l der Abstand des Schirmes von der Öffnung bedeutet, $\frac{e}{m}$ muß in ES gemessen sein. Nimmt man für Kanalstrahlen Wasserstoff $\frac{e}{m} = 10^4$ (E.M.) $v = 2,10^8$, wie das für den von uns untersuchten leicht ablenkbaren positiven Teil zutrifft, und berücksichtigt man, daß die durch die positive Ladung verursachte Stromstärke $= 10^{-6}$ Amp. im Maximum sein könnte, so erhält man im Abstand von 20 cm für Kapillare von 3 mm Öffnung:

$$d = \frac{3,14 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot 0,15 \cdot 400 \cdot 10^{-7} \cdot 1,5 \cdot 10^2}{10^{16}} = 8,5 \cdot 10^{-7} \text{ cm}$$

¹¹⁾ Diese Angaben beziehen sich auf nahezu gleiche Drucke in Beobachtungsraum, Kapillare und Entladungsraum.

Dagegen wäre für Kathodenstrahlen, die von einer Wehneltkathode mit Potentialgefälle von 300 Volt ausgehen und eine Stromstärke von 0,01 Amp. besitzen, die elektrostatische Verbreiterung unter sonst gleichen Bedingungen 1,2 cm.

Die Verbreiterung des positiven Teils kann also bei Kanalstrahlen nicht auf elektrostatische Abstoßung zurückgeführt werden. Schon die Tatsache, daß sie für den positiven und neutralen Teil gleich groß ist, spricht dagegen. Andererseits zeigt sich die ganz scharfe Begrenzung bei Verwendung des Induktionsapparates und enger Kapillare, daß unter dem Grenzdruck die Diffusion im Beobachtungsraum keine wesentliche Rolle spielen kann. Wir haben deshalb untersucht, ob vielleicht nur die Apertur der Kapillare die Begrenzung gibt. Der Durchmesser wäre dann durch die Formel gegeben: $d = \frac{d_0(l+a)}{a}$, wo d_0 der Durchmesser, $2a$ die Länge der Kapillare, l der Abstand des Endes der Kapillaren vom Schirm ist. Wir fanden in einem Fall $d = 1,30$ cm, $2a = 10,6$, $l = 17$; $d_0 = 0,3$, während nach obiger Formel $d = 1,26$ cm hätte sein sollen. Diese Übereinstimmung zeigt, daß innerhalb der Fehlergrenzen die Breite des Flecks (bei Induktionsentladung und Messing- oder Eisenkathode) nur durch die Apertur bedingt ist.

Dasselbe gilt, wenn man engere Kapillaren verwendet; dagegen zeigt sich bei breiterem Kanal keine scharfe Begrenzung mehr; der Durchmesser ist dann geringer als aus der Formel folgt. Daraus darf man wohl schließen, daß die Kanalstrahlen nicht alle senkrecht sondern teilweise auch schräg auf die Kathode treffen, aber daß praktisch bei einem bestimmten Winkel (bei uns etwa 75°) die Intensität der schräg einfallenden Strahlen praktisch verschwindet.

Bei dem kontinuierlichen Stromdurchgang mit Influenzmaschine ist die Erscheinung eine andere. Die Durchmesser sind weit kleiner als sich aus der Formel ergibt; man kann z. B. ohne Schwierigkeit mit einer Kapillaren von 0,3 mm Durchmesser und 9 cm Länge bei 25 cm Schirmabstand und einem Druck von 0,0001 mm in Kapillare und Beobachtungsraum und in Luft einen Phosphoreszenzfleck von 1,5 mm Durchmesser erhalten. Das besagt, daß bei Influenzmaschinenstrom die Kanalstrahlen fast senkrecht auf die Kathode treffen. Bei höheren Drucken wird der Fleck diffuser, vor allem nimmt bei

diesen Versuchsbedingungen die Intensität der Phosphoreszenz ab. Das hat folgende Gründe. Bei derartig engen Kapillaren muß man, um gute Wirkungen zu erhalten, mit stärkeren Strömen, also mit nicht zu großem Vakuum im Entladungsraum arbeiten. Das bedingt, daß der Kanalstrahl dann etwa zur Hälfte (nach der Intensität der Phosphoreszenz bei magnetischer Ablenkung beurteilt) aus neutralen Teilen besteht. Diese haben aber, wie Abschnitt 4 auseinandergesetzt, eine erheblich geringere Reichweite als die positiven, d. h. der Druck im Entladungsraum muß möglichst klein sein, damit der größte Teil des neutralen Strahls zum Phosphoreszenzschirm gelangt. Die Verbreiterung rührt davon her, daß die positiven Strahlen je nach dem Gasdruck in Kapillare und Beobachtungsraum noch mehr oder minder viel positive Teile bilden, deren Wegrichtung und Auftreffstelle auf den Schirm vermutlich nicht genau die des erzeugenden positiven Strahls ist.

6. Geschwindigkeit der Kanalstrahlen. Die durch das magnetische Feld hervorgebrachte Ablenkung auf dem Schirm ist in erster Annäherung, wie sich aus der von J. J. THOMSON abgeleiteten Formel ergibt, $\frac{e}{m} \cdot \frac{Hl^2}{v^2}$, wenn das magnetische Feld von der mittleren Stärke H auf der Strecke l sich bis zum Schirm erstreckt. Ist dann noch eine Strecke a feldfrei, so ist $d = \frac{eHl^2}{mv^2} + a \frac{eH \cdot l}{mv}$, wenn H variiert, so läßt sich die Formel von J. J. THOMSON anwenden und folgendermaßen abändern:

$$d = \frac{c}{mv} \int_0^l (1-x) H \cdot dx + \frac{a \cdot c}{mv} \int_0^l H dx.$$

Also muß bei konstantem $\frac{e}{m}$ mit abnehmender Geschwindigkeit d zunehmen. Wir haben nun für die Hauptintensität des positiven leicht ablenkbaren Teils der Kanalstrahlen in Luft wie Wasserstoff, der nach vorläufigen Messungen etwa $\frac{e}{m} = 10^4$ entspricht, stets dieselbe magnetische Ablenkung erhalten, gleichgültig, ob der Kathodendunkelraum 2 cm oder 40 cm und die an die Röhre angelegte Spannung, von der man annimmt, daß die positiven Ionen einen Teil durchlaufen, 10000 Volt oder 60000 Volt betrug. Die maximale Geschwindigkeit war bei unsern Versuchsbedingungen aus der elektrostatischen Ablenkung etwa

= $1,8 \cdot 10^8$ bis auf etwa 10 Prozent konstant. Die Geschwindigkeiten des positiven Teils in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure sind oberhalb eines Kathodenfalls, der je nach Material und Gestalt der Kathode zwischen 3000 und 30000 Volt liegt, konstant; bei kleinerem Kathodenfall variabel. Diese Angaben beziehen sich auf die Hauptintensität; außerdem ist ein Spektrum kontinuierlich abnehmender Geschwindigkeiten vorhanden. Eine Erklärung dafür ist auf Seite 11 versucht worden. Wenn das der Fall ist, so könnte man auch annehmen, daß die Geschwindigkeit aller positiven Teile im Kanalstrahl unabhängig von ihrer Masse dieselbe ist, daß die schweren Teile also eine viel größere kinetische Energie besitzen als die leichten. Dann wäre aber nach obiger Formel in Luft die Ablenkbarkeit 14—16, in Quecksilber 200mal kleiner als in Wasserstoff und demnach magnetisch in Luft erheblich schwerer, in Hg gar nicht mehr nachweisbar.

7. Veränderungen des positiven Kanalstrahls auf seinem Weg. Der positive Kanalstrahl erfährt im höchsten Vakuum in Wasserstoff (unter 0,0001 mm) keine Änderung auf seinem Weg, wie sich mit der von J. J. THOMSON¹²⁾ zuerst angewandten Anordnung der gekreuzten Magnetfelder nachweisen läßt. Wenn dagegen der Druck wächst (zwischen 0,0001 und 0,01 mm), so beobachtet man, daß ein immer zunehmender Teil des positiven Kanalstrahls neutralisiert wird und daß dann auch negative Ionen gebildet werden. Ferner ergibt dann die magnetische Ablenkung bei unserer Versuchsanordnung auf dem Wilemitschirm ein kontinuierliches, leuchtendes Band zwischen dem durch den ersten und zweiten Magneten abgelenkten Fleck, den also auf dem ganzen Weg positiv gebliebenen Strahlen, und dem nur durch den ersten, nicht durch den zweiten Magneten abgelenkten Fleck, also den Strahlen, die auf dem Weg zum zweiten Magnet neutral geworden sind. Dagegen haben wir im Unterschied zu den Beobachtungen von W. WIEN und J. J. THOMSON eine merkbare Aufspaltung des neutralen Strahls in negative und positive Teile nicht erhalten.

Wenn man nacheinander magnetische und elektrostatische Ablenkung studiert, so findet man, daß bei der magnetischen Ablenkung ein leuchtendes Band den neutralen Fleck mit der maximalen Intensität des positiven Flecks verbindet, während

¹²⁾ J. J. THOMSON, *Phil. Mag.*, 18, p. 821, 1909.

Sitzungsberichte der Heidelb. Akademie, math.-naturw. Kl. 1910. 4. Abb.

bei der elektrostatischen Ablenkung meist ein dunkler Zwischenraum neutralen und positiven Fleck trennt, während das Band vom positiven Maximum sich nach außen erstreckt. Analoge Erscheinungen erhält man, wenn man elektrostatische und magnetische Felder in geeigneter Weise hintereinander aufstellt. Das bedeutet, daß ein Teil der positiven Strahlen je nach den Drucken entweder im Entladungsraum oder Beobachtungsraum oder beiden sein mv vergrößert, dagegen mv^2 verkleinert hat.

Das kann, wie man leicht sieht, nur dadurch erklärt werden, daß eine Anlagerung von Masse stattfindet; denn dann muß mv^2 gleich oder kleiner werden, während ohne Widerspruch gegen das Prinzip von der Erhaltung der Energie mv größer werden könnte. Damit wäre die ursprüngliche Hypothese von J. STARK¹³⁾ und von G. MIE¹⁴⁾ bestätigt. Der Vorgang wäre ähnlich wie derjenige, welchen A. BECKER¹⁵⁾ und H. BAERWALD an langsamen negativen Elektrizitätsträgern beobachtet haben. Die Kanalstrahlen würden also in ihrem Verhalten diesen näher stehen als den α -Strahlen. Wie der Widerspruch zwischen diesen Beobachtungen und denen von W. WIEN und J. J. THOMSON zu erklären ist, können wir vorläufig nur hypothetisch andeuten. W. WIEN hat bei höheren Drucken, wobei die positiven Strahlen im Beobachtungsraum sehr erheblich in leuchtende neutrale umwandeln konnten, gemessen als wir und hat alle, auch die ganz langsam bewegten positiven Träger, elektrometrisch aufgefangen und vielleicht auch mit langsameren Kanalstrahlen gearbeitet. J. J. THOMSON hat die Drucke und die Längen der Röhren nicht angegeben; vielleicht werden bei seinen Versuchsbedingungen auch schwerere positive Teile gebildet und gelangen in den Beobachtungsraum, wo sie durch Zusammenstöße eine kleinere Geschwindigkeit erlangen und dadurch leichter ablenkbar werden. Auch das Kathodenmaterial mag von Einfluß sein. Der neutrale Teil der Kanalstrahlen von J. J. THOMSON hat vielleicht auch eine größere Geschwindigkeit besessen als der unsere.

8. Über das Verhalten des Quecksilberdampfes und die Einheit der positiven Elektrizität. J. J. THOMSON hat zuerst darauf hingewiesen, daß in den Kanalstrahlen unabhängig davon, in welchem Gas sie entstehen, stets Teile zu finden sind,

¹³⁾ J. STARK, *Phys. Zt.*, 4, p. 583, 1903.

¹⁴⁾ G. MIE, *Ann. Phys.*, 13, p. 669, 1904.

¹⁵⁾ A. BECKER u. H. BAERWALD, *Sitzber. Heid. Ak. Wiss.*, 1909, 4. Abh.

deren $\frac{e}{m}$ von der Größenordnung des Wasserstoffs oder Heliums ist. Nach den folgenden Versuchen scheint es uns aber, daß bei Quecksilberdampf das Vorhandensein der magnetisch und elektrostatisch ablenkbaren Strahlen, die dem Wasserstoff entsprechen, auf Verunreinigungen zurückzuführen ist. Wir haben wiederholt mit der auf Seite 8 beschriebenen Anordnung wahrgenommen, daß anfänglich oder nach Einlassen von etwas nicht getrockneter Zimmerluft ein positiver und negativer Kanalstrahl, ersterer (und auch ungefähr letzterer) mit $\frac{e}{m} = 10^4$, vor-

handen war. Nach längerem (ca. 8 Stunden) Evakuieren und Erhitzen des ganzen Rohres auf 70° war bei der Wiederabkühlung der Wasserstoffanteil völlig und dauernd verschwunden. Der Versuch wurde 4mal stets mit demselben Erfolg ausgeführt. Nur der neutrale bzw. äußerst schwer ablenkbare Phosphoreszenz-fleck (vgl. Seite 8) war mit gleicher Stärke sichtbar. Wir sind gegenwärtig damit beschäftigt zu untersuchen, ob auch bei Luftfüllung durch sorgfältigste Trocknung dasselbe erzielt werden kann.^{15a)} — Unter gewöhnlichen Versuchsbedingungen erscheint in Luft und Wasserstoff bei höchstem Vakuum in Entladungs- und Beobachtungsraum nur der Wasserstoff und nicht der neutrale Anteil. Doch gelingen diese Versuche nicht immer; sehr leicht wird die Röhre durchschlagen. Die Doublets wären also nicht das Primäre im Kanalstrahl. Das Auftreten von Wasserstoff wäre bei Luftfüllung vielleicht dadurch zu erklären, daß die Reste der Wasserhaut an der Glaswand (konzentrierte alkalische Lösung) dann allein als Dampf in den Entladungsraum gehen und so den Wasserstoffanteil bewirken.

In höchstem für Entladungen noch möglichen Vakuum von etwa 0,001 mm im Entladungsraum scheinen dann überhaupt keine Kanalstrahlen mehr vorhanden zu sein, obgleich die Entladung noch merklich durchgeht. Wie man da, wo der Wasserstoffanteil fehlt, und wo bei höherem Druck der neutrale Teil da ist, sich die Entstehung des letzteren erklären soll, können wir aus unsern Versuchen noch nicht folgern.

^{15a)} Wir haben auch bei Luft und Kohlensäure, nachdem durch die Anode lange Induktionsentladung geschickt worden war und die Kathode 8 Stunden auf Rotglut erhitzt wurde, den positiven Teil so schwächen können, daß er längere Zeit nicht mehr sichtbar war.

9. Der Einfluß longitudinaler Felder und die Konstitution des neutralen Kanalstrahlteils. Wir haben im vorigen Abschnitt schon erwähnt, daß wir bei geringen Drucken im Beobachtungsraum eine spontane Dissoziation des isolierten neutralen Anteils durch magnetische und elektrostatische Ablenkung nicht beobachten konnten. Einen leicht ablenkbaren Wasserstoffanteil, wie er sich nach den Versuchen von J. J. THOMSON aus dem neutralen Strahl bilden müßte, konnten wir nicht entdecken. Wir haben uns dann die Frage vorgelegt, ob der scheinbar neutrale Teil einheitlich ist, und ob er wirklich neutral ist.

Die Versuche mit Quecksilberdampf, wobei ein nicht leuchtender, nicht ablenkbarer, stark phosphoreszierender Strahl isoliert werden kann, und die mit Luft, wobei der neutrale phosphoreszierende Anteil eine größere Reichweite zu haben schien als der leuchtende, lassen es als möglich erscheinen, daß der neutrale Anteil vielleicht aus zwei Teilen besteht. Wir müssen diese Frage noch unentschieden lassen. Wir haben ein longitudinales, verzögerndes oder beschleunigendes Feld im Beobachtungsraum angebracht, wie es P. LENARD zuerst für Kathodenstrahlen durchgeführt hat, und wie es dann W. WIEN und J. J. THOMSON auf Kanalstrahlen angewandt haben. Hierbei muß vor allem darauf geachtet werden, daß der Druck im Beobachtungsraum so gering ist (kleiner als 0,001 mm), daß keine Entladung durch das Feld bewirkt wird. Selbst wenn das zunächst bei Abwesenheit von Kanalstrahlen erreicht ist, kann durch die jonisierende Wirkung der Kanalstrahlen auf das umgebende Gas die Entladung hervorgerufen werden. Bei unserer Anordnung war das infolge der Form der Feldplatten daran zu erkennen, daß in deren Nähe grüne Glasfluoreszenz durch die Kathodenstrahlen des Feldes verursacht auftrat. Der Druck wurde erniedrigt, bis das nicht mehr statt hatte. Es ist hierzu vorteilhaft, den Abstand des Feldes klein, etwa 1—2 cm zu nehmen. Die Öffnungen der Platten sollen auch möglichst klein sein (2 bis 5 mm), damit das elektrostatische Feld wirklich homogen ist. Man kann dann in der früher beschriebenen Weise durch Anbringen eines Magneten vor der Kathode den neutralen Teil bequem isolieren. Alsdann hat weder ein verzögerndes noch ein beschleunigendes Feld bis zu 8000 Volt einen Einfluß auf die Lichtintensität oder auf die Stärke der Phosphoreszenz. Das spricht nicht dafür, daß der neutrale Anteil etwa doch positiv ge-

laden und nur wegen großer Masse und hoher Geschwindigkeit unablenkbar wäre. Ebensovienig gab ein transversales Feld von 7000 Volt p. cm irgendeine Ablenkung. Wenn er nach der Hypothese von GEHRCKE¹⁶⁾ zum Teil aus zerstäubten Metallatomen bestehen würde, so müßte er bei niederen Drucken und hohen Potentialen stärker sein als bei höheren Drucken, was nicht zutrifft. Doch müßte man das Kathodenmaterial noch variieren, um endgültig darüber entscheiden zu können. Dagegen wird der positive Anteil, wie sich leicht nachweisen läßt, weil man dann mit sehr geringen Drucken im Entladungs- und Beobachtungsraum arbeiten darf, durch ein beschleunigendes Feld erheblich beschleunigt; die Phosphoreszenz wird bedeutend stärker; magnetische und elektrostatische Ablenkung werden kleiner. Durch ein verzögerndes Feld kann er andererseits völlig aufgehoben werden.

10. Kanalstrahlen unter höherem Druck. Wenn der Druck im Beobachtungsraum höher als 0,02—0,03 mm ist, so werden die Erscheinungen wesentlich anders als bei niedrigeren Drucken. Ein großer Teil der scheinbaren Widersprüche zwischen den Ergebnissen von E. GOLDSTEIN, W. WIEN, J. J. THOMSON, J. STARK dürfte darauf zurückzuführen sein, daß diese Forscher bei verschiedenen Drucken beobachteten. Wir haben vorerst nur vereinzelte Beobachtungen bei höheren Drucken angestellt. Die schon in der Kapillaren neutralen Strahlen kommen hierbei kaum in Betracht, da ihre Reichweite nur klein ist (vgl. Abschnitt 4). Die Lichtemission wird hauptsächlich durch die von den positiven Strahlen im Beobachtungsraum gebildeten neutralen Teile und Ionen bedingt, die eine erhebliche kinetische Energie erhalten und mit Gasmolekülen zusammenstoßen. Nach E. GOLDSTEIN bestehen diese Strahlen hinter der Kathode 1. aus den regelmäßigen Nebelstrahlen und 2. aus den diffusen Strahlen. Das von ihnen emittierte Licht ist das des Gases im Beobachtungsraum, nicht das des Wasserstoffs, aus dem der positive Anteil immer noch besteht, wie sich durch magnetische Ablenkung nachweisen läßt. Die Erscheinungen, die die positiven Kanalstrahlen bei solchen Drucken zeigen, sind also sehr ähnlich dem Verhalten der α -Strahlen von Radiumbromidkristallen in Luft bei Atmosphärendruck, wie es F. HIMSTEDT und G. MEYER¹⁷⁾ beobachtet haben.

¹⁶⁾ E. GEHRCKE, *Phys. Zt.*, 7, p. 181, 1906.

¹⁷⁾ F. HIMSTEDT u. G. MEYER, *Ber. Freib. Nat. Ges.*, 16, p. 13, 1907.

Ergebnisse.

1. Das Leuchten der Kanalstrahlen bei Drucken unter 0,03 mm geht in Übereinstimmung mit den neuesten Beobachtungen von W. WIEN von dem neutralen Teil aus. Das geringe scheinbare Leuchten der positiven Strahlen, was W. WIEN früher beobachtete, beruht auf der sekundären Bildung neutraler Teile, wie Abschnitt 7 nachgewiesen wurde. Der neutrale Teil des Kanalstrahls leuchtet indessen nur, wenn er auf Gasmoleküle stößt (Abschnitt 2). Wenn das Vakuum im Beobachtungsraum hoch ist, bleibt das Leuchten aus. Die kinetische Energie der gleichförmigen Translationsbewegung hat also keine Lichtemission zur Folge. Die Lichtemission ist bei den Kanalstrahlen kein Lumineszenzvorgang elektrischer Art, sondern die Schwingungen der gebundenen Elektronen werden durch mechanische Zusammenstöße, zum Teil vielleicht auch durch Molisierung der durch Stoß gebildeten Ionen, hervorgerufen.

Der neutrale Quecksilberkanalstrahl leuchtet in dem von Quecksilberdampf freien Beobachtungsraum nicht.

2. Der neutrale Lichtemission bewirkende Kanalstrahl entsteht vor der Kathode im Entladungsraum in einem Abstand, der mit wachsendem Gasdruck abnimmt, wahrscheinlich aus positiven Gasionen.

3. Der isolierte neutrale Kanalstrahl zeigt keine wirkliche spontane Dissoziation in hohem Vakuum.

4. Die Absorption des neutralen leuchtenden Strahls ist stets *cet. par.* viel stärker als die des positiv geladenen Teils.

5. Bei hohem Vakuum in Entladungs- und Beobachtungsraum besteht der Kanalstrahl nur aus positiven Teilen; das läßt sich am leichtesten in Wasserstoff nachweisen.

6. Die Verbreiterung des Kanalstrahlenbündels mit dem Druck ist nur scheinbar durch die Wanderung und Wirkung sekundärer Ionen hervorgerufen.

Das Bündel ist ein Kegel, dessen Winkel sich wie gezeigt aus Länge und Durchmesser der Kapillaren in Übereinstimmung mit den Beobachtungen berechnen läßt. Das gilt für Induktoriumentladung, die bewirkt, daß die Kanalstrahlen nicht genau senkrecht, sondern bis zu 75° geneigt auf die Kathode auftreffen. Daher ist in diesem Fall bei enger Kapillare der Fleck auf dem Phosphoreszenzschirm scharf begrenzt. Mit Influenzmaschine ist

das Feld dagegen derartig, daß die Kanalstrahlen nahezu senkrecht auftreffen, daher ist dann unter gleichen Bedingungen der Fleck kleiner, aber nicht scharf begrenzt. Für die Verbreiterung durch elektrostatische Abstoßung eines Strahlenzylinders läßt sich eine Formel aufstellen, die zeigt, daß diese nur bei Kathodenstrahlen unter günstigen Bedingungen wahrgenommen werden könnte.

7. Die Geschwindigkeit der Kanalstrahlen war bei unserer Versuchsanordnung fast unabhängig von der Potentialdifferenz im Entladungsraum.

8. In längere Zeit gut getrockneten mit Quecksilberdampf gefüllten Röhren verschwindet nach längerem Evakuieren der positive Wasserstoffanteil. Das wäre also eine Ausnahme von den von J. J. THOMSON beobachteten Gasen, die stets den Wasserstoffanteil zeigten.

9. Der positive (Wasserstoff-) Anteil des Kanalstrahls zeigt ein Verhalten, das der Hypothese von J. STARK entspricht. Wir glauben aus unsern Versuchen schließen zu können, daß eine teilweise Neutralisation und auch teilweise eine Anlagerung von neutralen Gasmolekülen an die positiven Teile stattfindet.

10. Durch ein longitudinales Feld läßt sich der positive Teil der Kanalstrahlen verzögern oder beschleunigen und auch dadurch nachweisen, daß er der Größenordnung nach etwa eine Geschwindigkeit 10^8 besitzt. Der leuchtende neutrale Teil dagegen wird, so weit er unter den gegebenen Bedingungen überhaupt noch wahrnehmbar ist, nicht beeinflußt.

11. Das Verhalten der Kanalstrahlen und der von ihnen erzeugten Sekundärstrahlung wird ein wesentlich von dem hier beobachteten verschiedenes, wenn die Drucke im Beobachtungsraum höher als 0,02 mm sind.

Wir beabsichtigen zunächst Versuche darüber anzustellen, wie und woraus der neutrale Sfrahl von der Kathode, der den eigentlichen Kanalstrahl bildet, entsteht.

Math.-physik. Institut der Universität Freiburg i. B.



C. F. Wintersche Buchdruckerei.