12. Ueber Ionisirung von Gasen durch Ionenstoss; von J. Stark.

I. Das bewegte Ion als Ionisator.

1. *Einleitung.* — Die IONENTHEORIE der Elektrizität gründet sich auf die *HYPOTHESE* des freien Elektrizitätsteilchens. Dessen bleiben sich ihre Vertreter ebenso gut bewusst wie ihre Gegner. Für ihre Vertreter besitzt die Ionenhypothese nicht einen Wert an sich, sondern lediglich einen heuristischen und systematischen. Sowie eine andere Hypothese sich findet, die das gleiche und noch mehr leistet, sei sie als ein leistungsfähigeres Instrument zur Erforschung der Erscheinungen willkommen und sei die Ionenhypothese zur Seite oder in Reserve gestellt.

Bezüglich des Mechanismus der elektrischen Strömung hat sich in den letzten Jahren eine bedeutungsvolle Wandlung der Anschauungen in den Köpfen vollzogen, welche neuen Erkenntnissen zugänglich sind. Man hat erkannt, dass die Art der elektrischen Strömung in den elektrolytischen und metallischen Leitern, die durch das Ohm'sche Gesetz geregelt ist, nicht die einzig mögliche Art ist, dass vielmehr in den Gasen die Elektrizität in einer anderen Weise strömen kann, welche wesentlich von der bisher bekannten verschieden ist. Ihren Gipfelpunkt findet diese Erkenntnis in der modernen Auffassung der Kathodenstrahlen als eines elektrischen Convectionsstromes, der losgelöst von der erzeugenden Kraft eines elektrischen Feldes auftreten kann.

Ist mit der elektrischen Convection oder den Ionenstrahlen für die Forschung ein neues grosses wichtiges Gebiet bereits gewonnen und schon fleissig bearbeitet, so stehen wir gegenwärtig in der Erschliessung eines nicht minder grossen und wichtigen Gebietes; dies ist die Ionisirung, die Schaffung freier Ionen aus neutralen Teilchen. Wir stehen hier erst in den Anfängen; das experimentelle Material auf diesem Gebiete ist noch gering. Aufgabe der vorliegenden Abhandlung ist es, theoretische Gesichtspunkte für die experimentelle Forschung

zu liefern, in Fortsetzung eines früheren Beitrages¹⁾ über diesen Gegenstand.

2. *Definitionen.* — *Elektron* ist der Name für das Elementarquantum, das an Masse ungefähr tausendmal kleiner ist als das chemische Atom; das Elektron kann frei wie in den Kathodenstrahlen sein, oder gebunden innerhalb des chemischen Atoms, wie im Zeemanphänomen. *Ion* ist der Name für das freie Elektrizitätsteilchen, ohne Rücksicht auf die Masse; die Ionentheorie ist also die Theorie der freien Elektrizitätsteilchen.

Ionisierung heisst der Vorgang, in dem aus einem neutralen Teilchen freie positive und negative Ionen gewonnen werden. *Ionisator* heisst ein Agens, welches Ionisierung zu bewirken vermag; Röntgen-, Becquerelstrahlen sind beispielsweise Ionisatoren; ein Ionisator ist auch der Stoss eines bewegten Ions oder kurz ein bewegtes Ion. *Ionisation* ist die Zahl der Ionen in der Volumeneinheit.

Ionenenergie e_i heisst die Energie, welche zwei Ionen nach vollendeter Ionisierung in Bezug aufeinander besitzen. *Ionisierungsarbeit* a_i möge (in Abänderung der in dem früheren Beitrag gegebenen Definition) diejenige Arbeit heissen, welche bei der Ionisierung aufgewendet wird. Sie wird im allgemeinen nicht ganz in die potentielle Ionenenergie verwandelt; a_i ist darum in der Regel grösser als e_i .

Ein Ionisator stellt zusammen mit einem zu ionisierenden Teilchen einen Energietransformator oder *Energiewandler* dar. Es wird bei der Ionisierung Energie des Ionisators in potentielle Ionenenergie verwandelt; so wird bei der Ionisierung durch Ionenstoss kinetische Energie des stossenden Ions in potentielle der neugeschaffenen Ionen verwandelt. Das Verhältnis e_i/a_i heisst der *Wirkungsgrad eines Ionisators*. Bestimmt man für verschiedene Ionisatoren die Energiemenge, welche notwendig ist zur Schaffung zweier freier Ionen, so erhält man verschiedene Werte. Man bestimmt eben die entsprechenden Ionisierungsarbeiten a_i , diese und damit die *Wirkungsgrade der einzelnen Ionisatoren sind voneinander verschieden*.

1) J. Stark, Ann. d. Phys. 4. p. 402. 1901.

Wiederholt sei der wichtige Satz: *ein Ionisator kann nur dann Ionisirung herbeiführen, wenn seine Energie oberhalb eines bestimmten Minimums oder Grenzwertes liegt, oberhalb der kleinsten zulässigen Ionisierungsarbeit; unterhalb der Ionenenergie kann sie nie liegen.*

3. *Abhängigkeit der Ionenenergie.* — Die Ionenenergie nimmt ab, wenn die *absolute Temperatur* der neutralen Teilchen wächst. Sie hängt ferner ab von *der Art des Ionenpaares*, ist also für verschiedene Gase verschieden unter sonst gleichen Verhältnissen. Sie hängt drittens ab von *der Art des Mediums*, von dem das zu ionisierende neutrale Teilchen umgeben ist. Ueber die Abhängigkeit der Ionenenergie von der Art des Mediums sei hier mit specieller Beziehung auf die Ionisirung durch ein bewegtes Ion folgendes ausgeführt.

Ist ein neutrales Gasmolecül rings nur umgeben von anderen gleichartigen Molecülen und wird es mit ultravioletttem Licht ionisirt, so hat für seine Ionen die Ionenenergie einen bestimmten Wert. Dieser Wert ist kleiner, wenn in der Nähe des zu ionisierenden Teilchens bereits ein freies Ion vorhanden ist, mögen im übrigen ringsum auch nur gleichartige Molecüle sich befinden. Das freie Ion setzt also durch seine Gegenwart die Ionenenergie herab, es wirkt *katalytisch*, wie man sich ausdrücken kann. Dieser Fall liegt nun offenbar immer vor bei Ionisirung durch ein bewegtes Ion; dieses wirkt also in zweierlei Weise, einmal durch sein Wirkungsfeld erniedrigend auf die Ionenenergie, zweitens ionisierend durch seine kinetische Energie. Die Ionisirung kann sich, wie in den zwei vorstehenden Fällen angenommen ist, im Innern eines Gases vollziehen, sie kann aber zweitens auch in der Grenzschicht eines Gases gegen einen anderen Körper, beispielsweise an der Oberfläche eines Metalles, erfolgen. In diesem Fall kommt neben dem Gas noch das Metall als umgebendes Medium in Betracht bezüglich der Ionenenergie. Das Metall beeinflusst die Ionisirung eines Gases an seiner Oberfläche und zwar begünstigt es sie; es setzt nämlich wie ein freies Ion durch seine Gegenwart als *Katalysator* die Ionenenergie herab. *An der Oberfläche eines Metalles ist also die Ionenenergie kleiner als im Innern des Gases.* Demgemäss ist die kleinste zulässige Ionisierungsarbeit für ein stossendes Ion im Innern eines

Gases grösser als an der Oberfläche eines Metalles. Für das positive Ion in Luft beträgt sie im Innern der Luft ungefähr $7,5 \cdot 10^{-10}$ Erg, an Platin $4,9 \cdot 10^{-10}$ Erg.

Die Herabsetzung der Ionenenergie durch die katalytische Wirkung eines freien Ions oder eines Metalles lässt sich energetisch ungezwungen erklären. Doch ist hier nicht der Platz hierzu.

4. *Ionisierungsspannung, freie Weglänge.* — Damit ein bewegtes Ion durch seinen Stoss unter Abgabe von kinetischer Energie ein neutrales Teilchen ionisieren kann, muss seine kinetische Energie oberhalb eines gewissen Minimums liegen, dem kleinsten zulässigen Wert der Ionisierungsarbeit. Diese Forderung lässt sich noch anders formulieren, indem man sie auf den Ursprung der kinetischen Energie aus einem Felde elektrischer Spannung umschreibt.

Wie ein neutrales Gasteilchen, so stösst auch ein Ion auf seinem Wege durch das Gewimmel der Moleküle mit anderen Teilchen zusammen und ändert dabei den Betrag seiner kinetischen Energie. Die zwischen zwei unmittelbar aufeinander folgenden Zusammenstössen durchlaufene Wegstrecke heisst die freie Weglänge des Ions. Indem ein Ion, angetrieben von der Kraft des Feldes, dem elektrischen Spannungsgefälle, eine Spannungsdifferenz durchläuft, wird elektrische Energie des Feldes an dem Ion in kinetische Energie verwandelt. Die kinetische Energie des im Spannungsfelde fallenden Ions kann indes nicht unbegrenzt anwachsen, da das Ion bei jedem Zusammenstoss wieder Energie abgibt; das Ion kann immer nur auf seiner Weglänge zwischen zwei aufeinander folgenden Zusammenstössen Energie in kinetischer Form an sich ansammeln. Das Maximum seiner kinetischen Energie besitzt es immer unmittelbar vor dem Zusammenstoss. Und dieses Maximum ist gleich der bis dahin freidurchlaufenen Spannungsdifferenz. Oder seien wir genauer. Das Ion durchlaufe frei die Spannungsdifferenz ΔV_f , gemessen in Volt, ferner sei seine Ladung $\epsilon = 4,2 \cdot 10^{-10}$ in elektrostatischen Einheiten; seine kinetische Energie in Erg beträgt dann

$$e_k = \epsilon \cdot \frac{\Delta V_f}{300} = \frac{4,2 \cdot 10^{-10}}{300} \cdot \Delta V_f.$$

Damit die kinetische Energie eines Ions das zur Ionisirung notwendige Minimum überschritten hat, muss also das Ion ein Minimum von Spannungsdifferenz frei ohne Zusammenstoss durchlaufen haben. Dieses Minimum von Spannungsdifferenz ΔV_m heisse *Ionisirungsspannung*. Diese ist offenbar verschieden für verschiedene Gase, für das positive und das negative Ion; sie hat im Innern eines Gases einen anderen Wert als an der Oberfläche eines Metalles, eben je nach dem verschiedenen Wert der Ionenenergie.

Bemerkt sei noch folgendes. Im Vorstehenden und auch im Folgenden ist die kinetische Energie eines Ions

$$e_k = \frac{1}{2} \mu v^2 = \epsilon \cdot \Delta V_f$$

gesetzt. Dies ist natürlich nicht genau richtig. Ein Teil der elektrischen Arbeit wird in magnetische Energie des Ionenfeldes verwandelt, dazu mag bei sehr grossen Geschwindigkeiten auch Ausstrahlung von Energie eintreten. Aber immerhin dürfen wir für die hier in Betracht kommenden Fälle $e_k = \epsilon \cdot \Delta V_f$ mit Annäherung setzen.

5. *Kraft und Ionisirung.* — Bis in die neueste Zeit herein hat sich die Vorstellung erhalten, die Moleküle eines Gases werden, speciell im elektrischen Funken, von der elektrischen Kraft in Ionen zerrissen, wenn diese über eine gewisse Grenze steigt; und im Anschluss daran hat man von dielektrischer Festigkeit und ähnlichen Dingen gesprochen.

Man muss nun in der That theoretisch die Möglichkeit zugeben, dass die elektrische Kraft so gross sein kann, dass sie die neutralen Teilchen in Ionen zerreisst. Indes ist diese Möglichkeit bis jetzt noch nicht verwirklicht worden. Ehe nämlich das elektrische Spannungsgefälle jene Höhe erreicht hat, wird bereits ein Gas durch die von jenem angetriebenen Ionen ionisirt. Es sind ja in einem Gase immer einige wenige Ionen vorhanden; diese setzt das Spannungsgefälle in Bewegung, erteilt ihnen, entsprechend ihrer freien Weglänge, kinetische Energie und durch deren Vermittelung ionisirt sie dann das Gas. Am besten werden diese Verhältnisse vielleicht durch das nachstehende Diagramm (Fig. 1) klar gemacht.

x ist die Richtung im Raume, senkrecht dazu ist die elektrische Spannung bezogen auf die Ladung ϵ aufgetragen,

und zwar ist eine lineare Beziehung zwischen x und V angenommen. M ist ein neutrales Molecül, N bez. P ist das negative bez. positive Ion, das aus M gewonnen wird; a ist der kleinste Abstand zwischen beiden, bei welchem sie frei sind. Durch $E_1 E_2$ sei der Abfall der potentiellen Ionenenergie dargestellt, durch $(E_1 - E_2)$ diese selbst. Wie man sieht, reicht

Fig. 1.

die auf der Strecke a liegende Spannungsdifferenz $(V_1 - V_2)$ nicht aus, um die Ionenenergie $(E_1 - E_2)$ zu schaffen. Um gleichwohl die Ionisierungsarbeit leisten zu können, wendet die elektrische Kraft mit Hülfe des Ions J das Hebelgesetz an. Indem sie an dem Ion längs des Weges $K_2 M = \lambda$ arbeitet, sammelt sie an diesem Energie in kinetischer Form an im Betrage $(K_1 - K_2)$, und mit dieser wird dann die Ionisierungsarbeit an M durch den Stoss des Ions geleistet. Der directe Beitrag der Kraft zur Ionisierungsarbeit ist gleich $(V_1 - V_2)$.

Indem durch die elektrische Kraft das Ion in Bewegung gesetzt wird, integriert es über die Kraft längs seines freien Weges; das Ion summiert also hierbei an sich Energie, es dient als Energieaccumulator. Mit der grossen Energiemenge, die auf diese Weise an einem Ion angesammelt werden kann, können dann auch grosse Arbeitsleistungen vollbracht werden. Die kinetische Energie, die an einem Ion angesammelt werden kann, ist um so grösser, je grösser die von ihm frei durchlaufene Spannungsdifferenz ist.

Das Minimum von Spannungsdifferenz, das zum Ende der Ionisierung von einem Ion frei durchlaufen sein muss, oder kurz die Ionisierungsspannung ΔV_m ist eine Grösse, die zwar mit der Ionisation ein wenig veränderlich, aber in der Hauptsache für ein Gas bei gegebener Temperatur eine charakteristische

Contante ist. Unter der Annahme, dass das Spannungsgefälle auf der Strecke λ constant ist, kann man setzen

$$\Delta V_m = \lambda \frac{dV}{dx}.$$

Diese Beziehung enthält folgende Sätze. *Bei gegebener mittlerer freier Weglänge des Ions kann bei Gegenwart einiger Ionen das Spannungsgefälle in einem Gase nicht über einen bestimmten maximalen Wert gesteigert werden, ohne dass Ionisierung und damit eine elektrische Strömung eintritt. Sind sehr wenig Ionen zufällig vorhanden, so kann es für einige Zeit, aber nicht dauernd, über jenen Wert gesteigert werden, es hat dann der sogenannte Entladeverzug statt. Das maximale Spannungsgefälle in einem Gase ist um so grösser, je kleiner die mittlere freie Weglänge der Ionen in ihm ist. Wie die Ionisierungsspannung, so ist bei gegebenem Druck und gegebener Temperatur auch das maximale Spannungsgefälle eine charakteristische Grösse für ein Gas.*

Bemerkt sei noch folgendes. Es ist nicht möglich, die Ionisierung, wie es J. J. Thomson thut, räumlich mit der elektrischen Kraft zu verknüpfen, die Ionisierung als Function der örtlichen Kraft darzustellen. Wie leicht zu sehen ist und wie ich schon mehrmals betont habe (Ann. d. Phys. 4. p. 11. 1901; Physik. Zeitschr. 2. p. 666. 1901), besteht zwischen der Kraft und der Ionisierung durch Ionenstoss ein *räumlicher Gangunterschied*. Die Ionisierung ist eben ein energetischer Vorgang. Kraft und Ionisierung zu einander in Beziehung zu bringen, hat nur für räumliche Constanz des Spannungsgefälles Sinn, so in der ungeschichteten positiven Lichtsäule.

6. *Das positive und das negative Ion als Ionisator.* — Sowohl das positive wie das negative Ion vermögen durch ihren Stoss unter Abgabe von kinetischer Energie ein neutrales Gas-
teilchen zu ionisiren. Doch ist ihr Ionisierungsvermögen verschieden gross. Einmal unterscheiden sie sich ja hinsichtlich ihrer freien Weglänge, sie integriren dadurch auf verschiedenen langen Strecken über das Spannungsgefälle, durchlaufen verschieden grosse Spannungs-differenzen frei, sammeln also verschieden grosse Mengen kinetischer Energie in sich an. Aber auch wenn sie eine gleich grosse Spannungs-differenz frei durchlaufen haben, ist ihr Ionisierungsvermögen verschieden gross (Physik. Zeitschr. 2. p. 17. 1900; Ann. d. Phys. 4. p. 410. 1900).

Nach den vorliegenden Erfahrungen *ist die Ionisierungsspannung für ein negatives Ion beträchtlich kleiner als für ein positives*. In Luft ist beispielsweise die Ionisierungsspannung für ein negatives Ion ungefähr 50 Volt, für ein positives ungefähr 530 Volt. Der Wirkungsgrad des negativen ionisierenden Ions ist also viel grösser als derjenige des positiven.

Sind an einer Stelle in einem Gase sowohl positive wie negative Ionen vorhanden und findet dort Ionisierung durch Ionenstoss unter dem Antrieb des elektrischen Feldes statt, so kommen dort als Ionisator lediglich die negativen Ionen in Betracht. Denn das Spannungsgefälle kann nur wenig über denjenigen Wert steigen, bei welchem Ionisierung durch die negativen Ionen eintritt, und kann wohl kaum bis zu dem viel höheren Wert steigen, welcher für die positiven Ionen notwendig ist. *Diese können nur in solchen Partien als Ionisatoren auftreten, wo die negativen Ionen noch eine geringe kinetische Energie besitzen, weil sie von ihnen erst ausgehen, während die positiven in diese Partien mit grosser kinetischer Energie eintreten.*

Dafür, dass die negativen Ionen bessere Ionisatoren sind als die positiven, ist der Grund in der speciellen Beschaffenheit der Ionenart zu suchen. In den Fällen von Ionisierung, die hier zur Sprache kommen, ist das negative Ion fast ausnahmslos ein freies Elektron und als solches mag es gemäss seiner geringen Masse vielleicht wie eine Bombe in das Gefüge eines neutralen Molecüls hineinschiessen und an einzelnen Teilen desselben angreifen, während dies dem positiven Ion wegen seiner grösseren Masse nicht möglich ist.

7. *Temperatur der bewegten Ionen.* — Wärme eines Gases bedeutet uns kinetische Energie seiner Teilchen. Die mittlere kinetische Energie eines Gasteilchens setzen wir proportional der absoluten Temperatur. Statt von der kinetischen Energie eines Gasteilchens können wir demnach von der absoluten Temperatur des Teilchens sprechen. Die mittlere kinetische Energie eines Gasteilchens bei der absoluten Temperatur 1 beträgt $2,3 \cdot 10^{-16}$ Erg (Drude, Planck).

Es ist interessant, die kinetische Energie oder, anders gesagt, die Temperatur von Ionen in einem elektrischen Felde zu berechnen. Im Folgenden ist wieder die Annäherung ein-

geführt, dass die gesamte elektrische Arbeit in kinetische Energie verwandelt werde, wenn es die Spannungsdifferenz ΔV , frei durchläuft.

ΔV , Volt	Erg	Absol. Temp.	Bemerkungen
	$2,3 \cdot 10^{-16}$	1	
	$6,7 \cdot 10^{-14}$	$2,9 \cdot 10^3$	Zimmertemperatur
	$9,7 \cdot 10^{-13}$	$4,2 \cdot 10^3$	Lichtbogen
1	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^3$	
232	$3,2 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^5$	Ionisierungsspannung des positiven Ions in Stickstoff an Platin
30 000	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^5$	Negatives Ion in Röntgenröhren

Man sieht, dass man an den Ionen in Gasen, indem man sie eine Spannungsdifferenz frei durchlaufen lässt, ganz riesige Temperaturen herstellen kann. Doch ist wohl zu beachten, dass sich diese Temperaturen nur an den Ionen, nicht gleichzeitig auch an den Gasmoleculen finden; die mittlere Temperatur des durchströmten Gases kann, entsprechend der geringen Zahl der Ionen im Vergleich mit der Gesamtzahl der Moleculé, eine niedrige sein. Diese Ansicht, welche schon früher vermutungsweise von mehreren Forschern geäussert und speciell von A. Wüllner¹⁾ mit Bezug auf das elektrische Leuchten der Gase vertreten wurde, habe ich in neuer Form bereits an einem anderen Orte²⁾ mit Nachdruck wieder aufgenommen.

Bei der hohen Temperatur, welche die bewegten Ionen annehmen können, ist es verständlich, dass sie Atome und Moleculé zu intensivem Leuchten durch ihren Anschlag erregen. Treffen die negativen Ionen mit ihrer riesigen Geschwindigkeit in Röntgenröhren auf einen festen Körper, so dürfen wir ganz neue Erscheinungen erwarten. Und wie das Leben der Moleculé in der Temperatur des Lichtbogens aufhört, so werden bei der hohen Temperatur der bewegten Ionen chemische Atome in elementare Bestandteile zerlegt, sie werden ionisirt.

1) A. Wüllner, Wied. Ann. **34**. p. 651. 1888.

2) J. Stark, Physik. Zeitschr. **2**. p. 233. 1900.

II. Ionisirung im Innern eines durchströmten Gases.

1. *Allgemeines.* — Ein schlagendes Beispiel dafür, dass Ionen durch ihren Stoss neutrale Gasteilchen ionisiren können, bieten die Ionenstrahlen, speciell die Kathodenstrahlen. Diese ionisiren ein von ihnen durchsetztes Gas in hohem Maasse. Indes können die Ionenstrahlen als elektrische Convectionsströme auch losgelöst von dem Felde einer elektrischen Strömung auftreten. Und hier möge nur die Ionisirung durch Ionenstoss innerhalb einer elektrischen Strömung betrachtet werden.

In einem durchströmten Gase sind zwei Hauptfälle von Ionisirung möglich. Diese kann statthaben im Innern eines Gases oder an seiner Grenzfläche gegen ein Metall. Wir betrachten zuerst jenen Fall.

Findet im Innern eines durchströmten Gases Ionisirung durch Ionenstoss statt, so sind dort ja sowohl positive wie negative Ionen vorhanden. Der Abfall der Spannung ist ein derartiger, dass die negativen Ionen eine so grosse kinetische Energie annehmen, dass sie durch ihren Stoss zu ionisiren vermögen. Damit auch die positiven Ionen durch ihren Stoss ionisiren könnten, müsste der Abfall der Spannung ein viel grösserer sein. *Im Innern eines durchströmten Gases wirken darum nur die negativen, nicht die positiven Ionen ionisirend, gleichmässiger Querschnitt vorausgesetzt.*

Die Ionisirung durch die negativen Ionen kann hierbei in zweierlei Weise erfolgen. Entweder kann sie gleichmässig in allen aufeinander folgenden Querschnitten sich abspielen oder sich auf specielle Partien beschränken. Im ersten Fall *ist sie ungeschichtet und liefert die ungeschichtete positive Lichtsäule*, im zweiten *ist sie geschichtet und ergiebt die geschichtete positive Lichtsäule*. Der Fall, dass ein durchströmtes Gas an einzelnen Stellen Querschnittsverringerungen hat, sei hier bezüglich der Ionisierungsverhältnisse nicht näher besprochen. Doch bietet seine Behandlung auf Grund der hier angestellten Ueberlegungen keine Schwierigkeit.

2. *Ungeschichtete Ionisirung.* — Bei der ungeschichteten Ionisirung sind auf eine längere Strecke die Verhältnisse räumlich constant; es ist kein Querschnitt vor dem anderen ausgezeichnet. Demgemäss ist auch das Spannungsgefälle räum-

lich constant. Ist λ die mittlere freie Weglänge der negativen Ionen, dV/dx das Spannungsgefälle, so muss

$$\lambda \cdot \frac{dV}{dx} > \Delta V_m$$

sein. In dieser Gleichung bedeutet ΔV_m das Minimum von Spannungsdifferenz, welches von einem negativen Ion frei durchlaufen sein muss, damit es ein neutrales Gasteilchen ionisiren kann. ΔV_m hängt natürlich ab von der Natur des betreffenden Gases; es ist auch für ein und dasselbe Gas bei constanter Temperatur etwas veränderlich mit der Ionisation und zwar nimmt es ab, wenn diese zunimmt.

$\lambda \cdot (dV/dx)$ kann in der ungeschichteten positiven Lichtsäule nie kleiner sein als ΔV_m , sich diesem Werte aber beliebig nähern. Wegen des an anderer Stelle zu erörternden Einflusses der Begrenzung auf die Ionisation in der positiven Lichtsäule, muss $\lambda \cdot (dV/dx)$ oder lediglich dV/dx , das Spannungsgefälle, um so grösser sein, je kleiner der Querschnitt ist. Für grosse Querschnitte ist $\lambda (dV/dx)$ nahezu gleich ΔV_m und darum nahezu unabhängig von der Stromstärke, da ΔV_m sich nur wenig mit der Ionisation ändert. Für nicht zu grosse Ionisation kann man zudem $\lambda = k/p$, umgekehrt proportional dem Gasdruck setzen. Für grosse Querschnitte und kleine Aenderungen der Stromstärke der ungeschichteten positiven Lichtsäule gilt darum mit Annäherung

$$\frac{k}{p} \cdot \frac{dV}{dx} = \Delta V_m = \text{const.},$$

oder es ist das Spannungsgefälle proportional dem Drucke.¹⁾ Für grössere Aenderungen der Stromstärke und für kleine Querschnitte gilt diese einfache Beziehung nicht mehr.

3. *Geschichtete Ionisirung.*²⁾ — In der ungeschichteten Ionisirung treffen in allen Querschnitten negative Ionen mit einer

1) Vgl. J. J. Thomson, Phil. Mag. (6) 1. p. 368. 1901; J. Stark, Physik. Zeitschr. 2. p. 664. 1901.

2) An früherer Stelle (Ann. d. Phys. 5. p. 110. 1901) habe ich bereits die Schichtung behandelt. Wo meine vorstehenden Ausführungen abweichen von den früheren, haben jene zu gelten. Insonderheit nehme ich die Erklärung zurück, dass die negativen Ionen speciell nur von den dunkeln Räumen ausgehen, weil hier die Kraft gross sei. Ueber die Verteilung des Spannungsgefälles im Zusammenhalt mit derjenigen der Ionisation sei in einer besonderen Mitteilung die Rede.

zur Ionisirung ausreichenden kinetischen Energie ein, gleichzeitig gehen auch von einem jeden Querschnitt negative Ionen mit einer kleinen Geschwindigkeit aus, um nach der freien Durchlaufung einer genügenden Spannungsdifferenz in einem anderen Querschnitt ebenfalls ionisierend zu wirken. Nun ist folgendes möglich. Ausgehend von angenähert demselben Querschnitt können negative Ionen angenähert die gleiche Weglänge frei durchlaufen und dann vermöge ihrer kinetischen Energie angenähert in demselben Querschnitt das Gas ionisiren. Diese Ionisirungspartie ist dann wieder mit Annäherung ein Querschnitt, von dem Ionen ausgehen und eine Spannungsdifferenz frei durchlaufen, um darauf in einer neuen Ionisirungspartie ihre kinetische Energie durch Zusammenstoss abzugeben. Auf diese Weise entstehen in dem durchströmten Gas ausgezeichnete Partien; es bilden sich einzelne Ionisirungspartien aus, diese gehen in der Richtung von der Kathode zur Anode allmählich in Teile mit sehr geringer Ionisirung über und auf diese folgt dann wieder in schroffem Uebergang der Anfang der nächsten Ionisirungspartie.

Diese Art von Ionisirung im Innern eines durchströmten Gases heisst geschichtet, sie liegt vor in der geschichteten positiven Lichtsäule. Man sieht, sowie einmal die Schichtung gegeben ist, bleibt sie bei constanter Spannung auch bestehen.

Der leuchtende, der Kathode zugekehrte Teil einer positiven Schicht ist eine Ionisirungspartie, in ihrem dunklen Ende ist die Ionisirung gering. Von dem Anfang einer Schicht, der Ionisirungspartie, gehen negative Ionen aus, durchlaufen die Schicht frei und geben in dem Anfang der nächst folgenden Schicht ihre kinetische Energie bei der Ionisirung durch Zusammenstoss ab. Eine jede Schicht bedingt durch ihre negativen Ionen und der an diesen in ihr vollbrachten Arbeitsleistung die Ionisirung in der nächst folgenden Schicht. Der ersten Schicht werden die ionisirenden negativen Ionen von der Kathode her geliefert.

Im leuchtenden Anfang einer Schicht ist die kinetische Energie der von der vorausgehenden Schicht her einfallenden negativen Ionen am grössten, demgemäss auch die von diesen hervorbrachte Ionisirung und die aus dieser resultirende Ionisation¹⁾,

1) J. Stark, Ann. d. Phys. 3. p. 507. 1900. Nach J. J. Thomson's Theorie (Phil. Mag. (5) 47. p. 267. 1899) ist das Gegenteil der Fall.

aus dem gleichen Grunde ist hier auch das Leuchten des Gases am stärksten.

Von dem Anfang einer Schicht gehen negative Ionen aus, durchlaufen bis in den Anfang der nächsten — im Durchschnitt genommen — eine Spannungsdifferenz frei und kommen dann hier zum Zusammenstoss. *Die Spannungsdifferenz zwischen dem Anfang einer Schicht und dem Anfang der nächsten, oder die Spannungsdifferenz, welche auf der Länge einer Schicht liegt, stellt angenähert die Ionisirungsspannung dar, welche die negativen Ionen im Innern eines Gases unter den gegebenen Umständen frei durchlaufen müssen, um ionisiren zu können.* Aus den bis jetzt vorliegenden in dieser Hinsicht noch sehr kümmerlichen Messungen seien folgende Zahlen mitgeteilt, die nur roh angenähert sind. In einem Falle war die mittlere auf einer positiven Schicht liegende Spannung für reinen Stickstoff¹⁾ 45 Volt, für Wasserstoff²⁾ 35 Volt.

Die Länge einer positiven Schicht stellt nach dem Vorausgehenden angenähert, nicht genau die mittlere freie Weglänge der negativen Ionen unter den gegebenen Verhältnissen dar. Sie hängt von dem Gasdruck und vor allem auch von der Ionisation ab, worauf ich bereits an anderer Stelle (Physik. Zeitschr. 2. p. 236. 1900) hingewiesen habe. Wichtig ist ferner für eine Theorie der Schichtung die Erkenntnis, dass in dem dunklen Ende einer jeden Schicht elektrische Convection stattfindet. Doch sei hier nicht weiter darauf eingegangen. Eine Theorie der Schichtung wäre verfrüht. Wir dürfen zufrieden sein, wenn wir zu einer systematischen experimentellen Erforschung der Erscheinung leitende theoretische Gesichtspunkte haben.

4. *Abhängigkeit der Schichtenlage.* — *In der geschichteten Ionisirung oder in der geschichteten positiven Lichtsäule wirken als Ionisatoren lediglich die negativen, nicht die positiven Ionen.* Hieraus erklären sich folgende Erscheinungen.

Die Lage der ersten Schicht wird durch die negativen Ionen bestimmt, welche von der Kathode herkommen, sie hängt darum ab von den Ionisungsverhältnissen an der Kathode. Je weiter sich das negative Glimmlicht von der Kathode weg erstreckt, desto weiter rückt von dieser die erste

1) W. P. Graham, Wied. Ann. 64. p. 49. 1898.

2) H. A. Wilson, Phil. Mag. (5) 49. p. 505. 1900.

Schicht und mit ihr die ganze positive Lichtsäule ab. Verschiebt man die Kathode, so verschiebt sich mit ihr die geschichtete positive Lichtsäule, wie wenn sie fest mit ihr verbunden wäre. Verschiebt man die Anode, so bleiben bei Constanthaltung der Stromstärke die Schichten unverändert liegen; aus der Anode wachsen neue Schichten heraus, in ihr verschwinden bereits vorhandene, je nachdem sie sich von der Kathode entfernt oder sich ihr nähert.

Taucht man eine Metallsonde in eine Schicht und verschiebt sie in ihr gegen die Kathode zu, so nimmt sie beim Uebergang in die nächste Schicht auf eine kurze Strecke die Schicht, aus der sie herauszutreten sucht, mit. Und mit dieser werden alle nach der Anode zu folgenden Schichten um ebensoviel verschoben, während die nach der Kathode zu folgenden unverändert liegen bleiben. Verlängert man eine Schicht, indem man ihr Gas durch einen Heizkörper stark erwärmt, so schiebt sie die nach der Anode zu liegenden Schichten zurück, die nach der Kathode zu liegenden verschiebt sie nicht (Ann. d. Phys. 3. p. 236. 1900). Taucht man eine Sonde kurz vor dem Anfang einer Schicht in die positive Lichtsäule, so fängt man den auf die Sonde auftreffenden Teil der negativen Ionen vor der Schicht ab; diese erhält nicht die zur Ionisirung nötige Energiezufuhr. Darum wird durch die Einführung der Sonde die Ionisirung gestört, die Schichte bewegt sich gegen die Sonde zu und haftet sich an sie.

III. Ionisirung in der Grenzfläche eines durchströmten Gases.

1. *Allgemeines.* — Aus der Grenzschicht eines durchströmten Gases gegen eine Metallelektrode werden die mit diesen gleichnamigen Ionen beständig weggeführt. Soll sie darum an dieser nicht verarmen, so müssen in ihr beständig wieder neue erzeugt werden. Dies kann durch den Stoss der entgegengesetzt geladenen Ionen geschehen, welche sich auf die Metallelektrode zu bewegen. Man hat dann Ionisirung durch Ionenstoss in der Grenzfläche des Gases. *In diesem Fall können unmittelbar der Oberfläche des Metalles nur die Ionen eines Vorzeichens ionisierend wirken und zwar diejenigen, welche auf die Elektrode sich zu bewegen;* denn diese allein können hier eine grosse kinetische Energie besitzen nach freier

Durchlaufung einer genügend grossen Spannungsdifferenz. Die von der Elektrode wegwandernden Ionen können es nicht, da sie unmittelbar an der Metalloberfläche erst sich zur freien Durchlaufung einer Spannungsdifferenz auf den Weg machen und darum erst ausserhalb der Grenzschicht eine grössere kinetische Energie angenommen haben. *In der Grenzfläche eines durchströmten Gases können aus diesem Grunde auch die positiven Ionen als Ionisatoren auftreten.*

Es sind nun zwei Fälle von Ionisierung durch Ionenstoss in einer Grenzfläche oder kurz von *Grenzionisierung* zu unterscheiden. Einmal können die an der Grenzfläche ionisierenden Ionen von einer entfernt liegenden Ionisierungspartie irgend welcher Art herkommen. In diesem Falle hat man lediglich die Ionisierung an der Grenzfläche in das Auge zu fassen, man hat eine *einfache Grenzionisierung*. Zweitens können jene Ionen in einigem Abstand von der Elektrode selbst erst wieder durch Ionenstoss erzeugt werden müssen. In diesem Falle hat man eine *zweifache Grenzionisierung*. Unmittelbar an der Oberfläche liegt eine Ionisierungspartie, in ihr wirken die auf die Elektrode zuwandernden Ionen. Etwas davon entfernt parallel mit ihr im Innern des Gases ist eine zweite Ionisierungspartie; in ihr wirken die Ionen entgegengesetzten Zeichens, welche von der Elektrode aus der ersten Ionisierungspartie herkommen. *Die zwei Ionisierungspartien bedingen sich gegenseitig, die eine liefert der anderen die in ihr zur Ionisierung notwendigen Ionen; indem diese die Spannungsdifferenz zwischen den zwei Ionisierungspartien frei durchlaufen, nehmen sie die zur Ionisierung notwendige kinetische Energie an. Diese Spannungsdifferenz ist gleich der Ionisierungsspannung derjenigen Ionen, welche zur Ionisierung mehr kinetische Energie benötigen, also der positiven.* Denn für die negativen Ionen reicht zur Ionisierung eine viel kleinere Spannungsdifferenz aus. Die Spannungsdifferenz, welche frei durchlaufen, die positiven Ionen zur Ionisierung befähigt, reicht darum auch für die negativen Ionen aus, erteilt ihnen eine viel grössere kinetische Energie als sie zur Ionisierung eigentlich benötigen.

Bei der einfachen Grenzionisierung zeigt sich der Einfluss der Gegenwart des Metalles auf die Ionisierungsarbeit. Bei der zweifachen Grenzionisierung gilt dies nur für die erste

Ionisierungspartie, welche unmittelbar an der Metallfläche liegt; die zweite Ionisierungspartie liegt bereits im Innern des Gases.

2. *Zweifache Grenzionisierung an der Kathode.* — Dieser Fall kommt vor beim Glimmstrom und beim negativen Spitzenstrom; der Vorgang ist hier und dort der gleiche. Er sei im nachstehenden für den Glimmstrom bei niedrigen Drucken behandelt. Hier treten nämlich für unser Auge die zwei Ionisierungspartien soweit auseinander, dass wir sie unterscheiden können, während sie bei höheren Drucken mikroskopisch nahe beieinander liegen.

Fig. 2 stellt die Lichtverteilung an einer Drahtkathode dar. Unmittelbar an dieser liegt die erste in Luft gelblich leuchtende Kathodenschicht, auf diese folgt der dunkle Kathodenraum, auf diesen die negative Glimmschicht. Fig. 3 stellt einen Ausschnitt aus diesen Gebilden dar.

Fig. 2.

Fig. 3.

Um Raum zu sparen, beschränke ich mich auf eine kurze Charakteristik der Ionisungsverhältnisse; ihre Begründung ergibt sich leicht aus den oben entwickelten Principien.

Von der negativen Glimmschicht gehen positive Ionen aus, durchlaufen den dunklen Kathodenraum frei, vermöge der hierbei angenommenen grossen kinesischen Energie ionisiren sie an der Kathodenoberfläche in der ersten Kathodenschicht das Gas. Von dieser Ionisierungspartie gehen hinwiederum negative Ionen aus, durchlaufen in entgegengesetzter Richtung den dunklen Kathodenraum frei und ionisiren in der negativen Glimmschicht vermöge ihrer grossen kinetischen Energie das Gas. Die negative Glimmschicht ist eine Ionisierungspartie, welche bereits im Innern des Gases liegt. Negative Glimmschicht und erste Kathodenschicht bedingen sich gegenseitig, indem sie einander die

Ionen zur Ionisirung liefern (vgl. Thomson, l. c.). *Gemäss der grossen kinetischen Energie der positiven Ionen hier, der negativen dort, ist hier wie dort die Ionisirung und damit auch die Ionisation gross; in der negativen Glimmschicht dagegen viel grösser, da die negativen Ionen nach Durchlaufung der gleichen Spannungsdifferenz wie sie für die positiven Ionen notwendig ist, eine grössere kinetische Energie angenommen haben, als sie eigentlich benötigen. Hier wie dort leuchtet das Gas unter dem Stoss der hoch temperirten Ionen.*

Das Minimum von Spannungsdifferenz zwischen negativer Glimmschicht und Kathode, der normale Kathodenfall, ist die Ionisierungsspannung der positiven Ionen für das betreffende Gas gegen das betreffende Metall; multiplicirt mit der Ionenladung giebt er das Minimum von kinetischer Energie, welches die positiven Ionen zur Ionisirung notwendig haben. In dem normalen Kathodenfall tritt die katalytische Wirkung der Metalle zu Tage; er ist eine für ein Gas und ein Metall charakteristische Constante, wie die nachstehenden Zahlen (Metalle geordnet nach dem Kathodenfall in steigender Reihe) zeigen.

	Alkalien	Al	Mg	Cu	Pt
Stickstoff			207		232
Wasserstoff			168		298

Die vorstehenden Zahlen sind nur angenähert richtig, da in ihnen die Spannungsdifferenz im Betrage von etwa 25 Volt enthalten ist, welche einer elektromotorischen Kraft in der Grenzschicht entspricht. Wie man sieht, ist die katalytische Wirkung eines Metalles, die Erniedrigung der Ionisierungsspannung, um so grösser, je mehr das Metall chemisch activ ist. Ohne diese katalytische Wirkung eines Metalles wäre die Ionisierungsspannung der positiven und negativen Ionen eine Constante für ein Gas ohne Rücksicht auf das Metall der Elektrode und hier ebenso gross, wie im Gasinnern.

Der Abstand zwischen Kathode und dem Saum des negativen Glimmlichtes, die Dicke des dunklen Kathodenraumes, ist mit Annäherung gleich der mittleren freien Weglänge der positiven Ionen unter den gegebenen Verhältnissen. Bei kleiner Ionisation

(geringe Stromdichte, normaler Kathodenfall) wird sie angenähert umgekehrt proportional dem Gasdruck sein; mit zunehmender Ionisation (zunehmender Stromdichte) wird sie kleiner.

Zur Unterstützung der hier vorgetragenen Anschauungen und hinwiederum zu ihrer eigenen Erklärung seien folgende Erscheinungen besprochen.

Bringt¹⁾ man in das negative Glimmlicht einen Körper, beispielsweise einen Stift parallel mit der plattenförmig gedachten Kathode, so wird dadurch die Strömung nicht geändert. Verschiebt man den Stift nach der Kathode zu, so ist das gleiche der Fall, solange er innerhalb der negativen Glimmschicht sich befindet. Tritt er aber in den dunklen Kathodenraum, so wirft er einen Schatten auf die Kathode; in seiner Projection auf diese fehlt das Licht der ersten Kathodenschicht. Zuvor konnten nämlich von dem zwischen Stift und Kathode liegenden Teil des negativen Glimmlichtes positive Ionen ausgehen und in der ersten Kathodenschicht ionisirend wirken; ist kein Glimmlicht mehr zwischen Stift und Kathode, so werden die positiven Ionen durch den Stift von der Kathode abgeschirmt.

Hat man eine plattenförmige Kathode senkrecht gestellt zu einem cylindrischen Rohr, so erhält man bei höheren Drucken und genügender Stromstärke folgende Glimmlichtverteilung. Der dunkle Kathodenraum reicht noch nicht an die Rohrwandung, die Kathode ist ganz mit Glimmlicht bedeckt. Bei Abnahme des Gasdruckes nimmt die Dicke des dunklen Kathodenraumes zu; man erhält bei niedrigem Drucke folgende Verhältnisse. Die Dicke des Kathodendunkelraumes ist grösser als der Abstand des Plattenrandes von der Rohrwand. Das negative Glimmlicht und die erste Kathodenschicht haben sich auf die centrale Partie der vorderen Kathodenseite concentrirt.

Man liest nun häufig, dass das negative Glimmlicht erst nur einen Teil der Kathode bedecke, mit abnehmendem Druck sich über die ganze Kathodenoberfläche ausdehne, dann aber sich wieder zusammenziehe und schliesslich nur von dem centralen Teil der Kathode ausgehe. Ich möchte mit Nach-

1) A. Wehnelt, Wied. Ann. 67. p. 421. 1899.

druck dagegen protestiren, dass man dies als das normale Verhalten des negativen Glimmlichtes hinstellt. Es ist vielmehr vollkommen abnormal und bedingt durch die Dimensionen der Kathode und des Stromgefässes. Ueberschreitet nämlich einmal die Grenze des Kathodendunkelraumes die Rohrwand, schiebt sich also diese gleichsam zwischen negatives Glimmlicht und Kathode, so können von dieser Seite keine positiven Ionen mehr kommen und an der Kathode ionisirend wirken und damit muss nach dieser Seite auch die Aussendung negativer Ionen und damit die Entwicklung des negativen Glimmlichtes aufhören. An der betreffenden Stelle der Rohrwand bildet sich dann eine starke negative Ladung. Wählt man um die Kathode herum den Gasraum genügend tief, so ist auch bei den niedrigsten Drucken die ganze Oberfläche der Kathode mit Glimmlicht bedeckt und sendet von allen Punkten Kathodenstrahlen aus.

3. *Zweifache Grenzionisirung an der Anode.* — Dieser Fall kommt nur im positiven Spitzenstrom bei höheren Drucken vor. Bei niedrigen Drucken ist er aus dem weiter unten angegebenen Grunde bis jetzt noch nicht sicher beobachtet worden. Bei höherem Druck liegen aber die zwei Ionisirungspartien so nahe bei einander, dass wir sie mit unserem Auge nicht trennen können. Nichts desto weniger müssen wir uns über diesen Fall von Ionisirung folgende Vorstellungen bilden.

Bei der zweifachen Grenzionisirung an der Anode liegt unmittelbar an deren Oberfläche eine Ionisirungspartie, in welcher die negativen auf die Anode zuwandernden Ionen das Gas ionisiren; etwas davon entfernt im Innern des Gases liegt die zweite Ionisirungspartie, in welcher die positiven Ionen ionisiren. Beide Ionisirungspartien bedingen sich gegenseitig. Die Spannungsdifferenz zwischen beiden ist wieder gleich der Ionisierungs- spannung der positiven Ionen. Da aber diese nunmehr im Innern des Gases wirken, nicht wie bei der Kathode an der Oberfläche des Metalles, so ist das Minimum von Spannungsdifferenz, das sie zum Ende der Ionisirung frei durchlaufen müssen, nunmehr grösser; sie werden bei der Ionisirung nicht mehr durch die katalytische Wirkung des Metalles unterstützt. Da bei den höheren Drucken die zwei Ionisirungspartien sehr nahe bei einander liegen, so lässt sich jene Ionisierungsspannung

mit Hilfe einer Sonde nicht direct bestimmen; man erhält mit dieser auch einen ausserhalb des Ionisierungsgebietes liegenden Spannungsbetrag. Man kann sie indess durch Extrapolation erhalten, indem man mit einer Sonde für verschiedene Drucke die Spannungsdifferenz zwischen der positiven Spitze und einem benachbarten Punkte bestimmt und deren Grenzwert für sehr kleine Drucke sucht. Mit abnehmendem Druck wächst nämlich einmal das Ionisierungsgebiet an die Sonde heran, andererseits wird der Abfall der Spannung ausserhalb jenes Gebietes kleiner. Für Luft hat als solchen Grenzwert E. Warburg ¹⁾ 530 Volt gefunden; dies ist also bei Vernachlässigung elektromotorischer Kräfte in der Grenzschicht angenähert die Ionisierungsspannung der positiven Ionen im Innern der Luft, 340 Volt ist sie in der Grenzfläche gegen Platin. Dieser Unterschied macht es schwer bei niedrigem Gasdruck einen positiven Spitzenstrom zu erhalten; es tritt nämlich dann leicht zweifache Grenzionisierung an der Kathode auf und macht die grössere Spannung beanspruchende zweifache Ionisierung an der positiven Spitze überflüssig, indem sie an die Anode negative Ionen zu einer einfachen Grenzionisierung liefert.

4. *Einfache Grenzionisierung an der Anode.* Kommen an einer Elektrode von einer Ionisierungspartie im Innern des durchströmten Gases Ionen an, so können sie an der Metalloberfläche mit so grosser kinetischer Energie eintreffen, dass sie dort das Gas durch ihren Stoss ionisieren. Dies ist der Fall der einfachen Grenzionisierung. Hierbei brauchen nicht die auf diese Weise an der Elektrode erzeugten Ionen entgegengesetzten Zeichens selbst in einigem Abstand im Gasinnern die heranfliegenden Ionen durch Ionisierung zu liefern.

Der Fall der einfachen Grenzionisierung kommt lediglich an der Anode vor. Hier nämlich können die negativen Ionen, welche beispielsweise von dem negativen Glimmlicht, der positiven Lichtsäule herkommen oder im Gasinnern durch einen secundären Ionisator erzeugt wurden, schon nach Durchlaufung einer kleinen Spannungsdifferenz ionisierend wirken, bei welcher die kinetische Energie der positiven Ionen noch lange nicht zur Ionisierung ausreicht. Umgekehrt kann an der Kathode

1) E. Warburg, Ann. d. Phys. 2. p. 295. 1900.

nicht die von den positiven Ionen frei durchlaufene Spannungsdifferenz, behufs einfacher Ionisirung genügend gross werden, ohne dass gleichzeitig, oder vielmehr schon viel früher, auch die kinetische Energie der negativen Ionen zur Ionisirung ausreichend gross wird und so zweifache Ionisirung eintritt.

Wie wir oben gesehen haben, ist die Ionisierungsspannung der negativen Ionen im durchströmten Gas kleiner als 50 Volt. Wie die Ionisierungsspannung der positiven Ionen an einem Metalle kleiner ist als im Gasinnern, so ist zu erwarten, dass auch diejenige der negativen Ionen an einem Metall, infolge von dessen katalytischer Mithülfe, kleiner ist als im Gasinnern. Dies ist in der That der Fall; bereits wenige Volt frei durchlaufener Spannungsdifferenz befähigen das negative Ion an der Anode zur Ionisirung. J. S. Townsend¹⁾ ionisirte ein verdünntes Gas zwischen zwei nahgestellten Elektroden mit Röntgenstrahlen und bestimmte diejenige Spannungsdifferenz oder Elektrodenspannung, bei welcher die Stromstärke den Zustand der Sättigung verlassend, wieder zu wachsen begann. Diese Spannungsdifferenz war die Ionisierungsspannung, welche die negativen Ionen frei durchlaufen mussten, um an der Oberfläche der Anode das Gas ionisiren zu können. Als Wert dieser Ionisierungsspannung für Luft an Messing giebt Townsend 5 Volt an. Dieser Wert dürfte allerdings zu klein sein.

Im Glimmstrom und im negativen Spitzenstrom ist die Anode in der Regel mit einer Lichthaut bedeckt; diese rührt her von der Ionisirung durch die auf die Anode zuschiessenden Ionen. Bringt man unmittelbar vor die Anode einen festen Körper, beispielsweise einen Stift, so wirft dieser einen Schatten auf die Anode, indem er die auf seine Projection zuschiessenden negativen Ionen abschirmt.²⁾ Den Anodenfall des Glimmstromes (20—40 Volt) darf man nicht gleich der Ionisierungsspannung der negativen Ionen setzen, nicht einmal mit Annäherung, da diese hier von der Grössenordnung der inneren elektromotorischen Kraft in der Grenzschicht ist.

Ueber die Erniedrigung der Ionisierungsspannung an der Oberfläche eines Metalles durch dessen katalytische Wirkung

1) J. S. Townsend, *Phil. Mag.* (6) 1. p. 198, 630. 1901.

2) C. Skinner, *Phil. Mag.* (5) 50. p. 572. 1900.

seien im Anschluss an das vorhergehende noch folgende Bemerkungen gemacht.

Bringt man einen Metallstift in den Gang der negativen Ionen, so wird an seiner Oberfläche die Ionisierung begünstigt. Da, wo die negativen Ionen noch nicht die zur Ionisierung notwendige Energie bei Abwesenheit des Metalles haben, wie in dem dunklen Teil einer positiven Schicht, können sie bei Anwesenheit des Metalles bereits ionisierend wirken. Ionisieren sie auch bei Abwesenheit des Metalles das Gas, so wird die Ionisierung durch Einführung eines Metalles an dessen Oberfläche verstärkt; Kathodenstrahlen ionisieren eine Gasschicht an einer Metallfläche stärker als im Gasinnern, auch wenn ihre Reflexion in Abzug gebracht wird. Es ist endlich zu erwarten, dass auch andere Ionisatoren als die stossenden Ionen in der Grenzschicht eines Gases gegen ein Metall eine kleinere Ionisierungsarbeit zu leisten haben, als im Gasinneren; dies mag von der Ionisierung durch Temperatur an einem erhitzten Körper und bei der Ionisierung durch ultraviolette und Röntgenstrahlen gelten.

5. *Ionisierung im Lichtbogen.* Den Lichtbogen habe ich bereits in meiner ersten Mitteilung (Ann. d. Phys. 4. p. 402. 1901) für eine selbständige Strömung erklärt, in welcher die Ionisierung durch den Stoss bewegter Ionen gegeben wird. In ihm wirken allerdings neben dem Ionenstoss auch die hohe Temperatur der neutralen Teilchen und das ultraviolette Licht ionisierend; insonderheit *hat an der negativen Elektrode eine kräftige lichtelektrische Zerstreuung statt*, denn wie das Lichtbogenlicht an negativ geladenen von ihm bestrahlten kalten Leitern Zerstreuung hervorbringt, so wirkt es mit noch viel grösserer Intensität an dem eigenen negativen weissglühenden Pol. Indes der ausschlaggebende Ionisator im Lichtbogen, der dessen grosse Ionisation bedingt und dem das ultraviolette Licht und die hohe Temperatur ihre Existenz verdanken, ist der Stoss bewegter Ionen. Dies kann man sich in folgender Weise klar machen.

Die Ionen im Lichtbogen besitzen jedenfalls keine kleinere mittlere kinetische Energie oder absolute Temperatur als die neutralen Teilchen. *Da sie sich in einem elektrischen Felde bewegen, so ist ihre kinetische Energie kurz vor dem Zusammen-*

stoss mit anderen Teilchen dank der frei durchlaufenen Spannungsdifferenz sogar immer grösser als die mittlere und auch maximale kinetische Energie der neutralen Teilchen; diese können darum von jenen beständig kinetische Energie zugeführt erhalten zum Ersatz der von ihnen durch Strahlung und Leitung verlorenen Energie. Vermöge ihrer grösseren kinetischen Energie wirken die Ionen viel stärker ionisierend als die neutralen Teilchen; auf sie ist aus diesem Grunde in erster Linie die grosse Ionisation im Lichtbogen zurückzuführen.

Als selbständige Strömung ist der Lichtbogen nicht unterhalb eines Minimalwertes der Elektrodenspannung möglich. *Der Minimalwert der Elektrodenspannung des Lichtbogens für einen sehr kleinen Elektrodenabstand ist die Ionisierungsspannung der in ihm als Ionisator thätigen Ionen unter den gegebenen Verhältnissen* (Temperatur, Art des Mediums); er liegt zwischen 30 und 40 Volt. Welcher Art diese ionisierenden Ionen im Lichtbogen, ob sie positiv oder negativ sind, dem Gas oder Metaldampf entstammen, hat die experimentelle Forschung zu ermitteln; jedenfalls sind im Lichtbogen auch freie negative Elektronen vorhanden infolge der lichtelektrischen Zerstreuung an der weissglühenden Kathode.

Göttingen, den 15. November 1901.

(Eingegangen 14. December 1901.)