ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 6.

1. *Ueber Elektrisirung der Luft durch Glimmentladung; von O. Lehmann.*

(Hierzu Taf. II, Figg. 1—28.)

Untersuchungen über elektrische Entladungen hatten mich zu der Ansicht geführt, zur Erlangung weiterer Aufklärung müsse die Anwendung grosser weiter Entladungsgefässe von besonderem Vorteil sein. In neuerer Zeit habe ich deshalb vorzugsweise Entladungsvorgänge in Gefässen von 30—40 cm Weite und 60—70 cm Länge mit kugelförmigen Elektroden von 7 cm Durchmesser untersucht, worüber später näher berichtet werden soll.

Als normale Entladungsart tritt in solchen grossen Gefässen die bekannte Glimmentladung¹⁾ auf, bestehend aus der blauen Glimmlichthülle an der Kathode und dem die Anode bedeckenden rötlichen positiven Glimmlicht. Der Raum zwischen diesen beiden die Elektroden vollständig umkleidenden Lichtmassen bleibt dunkel, die sogenannte positive Lichtsäule fehlt gänzlich. Im wesentlichen ist die Entladungsart identisch mit derjenigen, welche in freier Luft bei Anwendung weit voneinander abstehender spitzer Elektroden auftritt und auch in gleicher Weise als Glimm- oder Spitzenentladung bezeichnet wird.

Besonders merkwürdig ist der an der Kathode auftretende dunkle Kathodenraum. Seine Dicke hängt von der Gasdichte ab und wurde früher als einzig davon abhängig betrachtet. Sie ist, wie sich später zeigte, keine gleichmässige, sondern, wenn das Glimmlicht nicht die ganze Kathode bedeckt, am Rande stets etwas grösser.²⁾ Im vorigen Winter machte ich ferner gelegentlich die Beobachtung, dass sie sich auch bei

1) Vgl. O. Lehmann, Die elektr. Lichterscheinungen oder Entladungen, p. 9. W. Knapp, Halle 1898.

2) l. c. p. 305.

durchaus gleichbleibendem Gasdrucke innerhalb weiter Grenzen ändern kann, wenn sich die Stromstärke ändert.¹⁾ Als Elektrizitätsquelle diente dabei ein geladener Condensator von 8 Mikrof. Capacität. In dem Maasse als sich die Ladung erschöpfte, somit Stromstärke und Spannung geringer wurden, nahm die Dicke des dunkeln Kathodenraumes von etwa 2 cm bis zu etwa 20 cm zu, die blaue Glimmlightschicht schien allmählich von der Kathode gegen die Anode hin fortzuwandern, bis schliesslich beim Sinken der Spannungsdifferenz auf etwa 350 Volt der Stromdurchgang plötzlich aufhörte.²⁾

Neuerdings machte ich eine noch merkwürdigere Beobachtung in einem Gefäss, welches speciell zur Erzeugung von Canalstrahlen vorgerichtet war. Ebenfalls bei anscheinend ungeändertem Luftdruck, aber bei Anwendung eines Hochspannungsaccumulators als Stromquelle, wuchs die Dicke des dunkeln Kathodenraumes langsam, etwa in einer Stunde von 1 cm bis auf über 30 cm, sodass schliesslich die ganze Anode in denselben eingetaucht war und dadurch ein so hoher Widerstand sich geltend machte, dass selbst die volle Spannungsdifferenz des Accumulators von mehr als 2000 Volt nicht mehr ausreichte, den Stromdurchgang zu unterhalten, während anfänglich 450 Volt genügt hatten. Bei Anwendung höherer Spannung trat lebhafte Fluorescenz der Glaswand ein, die Dicke des dunkeln Raumes wurde aber bald wieder kleiner.

Ich hatte nun früher versucht, die Bildung des dunkeln Kathodenraumes auf Anhäufung elektrisirter Luft in der Nähe der Kathode zurückzuführen. Die neuen Beobachtungen schienen mit jener Annahme wohl verträglich und da, wie schon bemerkt, bei der Entladung in weiten Entladungsgefässen der grösste Teil des Gasinhaltes dunkel bleibt, ähnlich wie bei der Spitzenentladung in freier Luft, so schien es mir zweckmässig, zunächst in letzterem Falle, wobei keine Störungen durch Gefässwände auftreten, das Wandern, die Ausbreitung und Anhäufung elektrisirter Luft, überhaupt deren Eigenschaften näher zu untersuchen.

1) Vgl. auch A. Wehnelt, Strom- und Spannungsmessungen an Kathoden in Entladungsröhren, p. 5. S. Hirzel, Leipzig 1901.

2) Zuvor wurde die Lichterscheinung flackernd, auch wurde völlig lichtloser Stromdurchgang beobachtet.

Als Stromquelle diente eine gewöhnliche Influenzmaschine, durch einen Elektromotor in gleichmässiger Drehung gehalten und durch etwa 20 m lange, mit Guttapercha umkleidete und ausserdem durch dicke Kautschukschläuche hindurchgezogene Leitungsdrähte mit dem in einem anderen, sehr geräumigen Zimmer befindlichen Entladungsapparat verbunden. Dieser Apparat bestand aus einer an der Zimmerdecke aufgehängten, in eine Nähnnadel endigenden, bis auf etwa 2 cm von deren Spitze von einer starkwandigen, gut isolirenden Glasröhre umgebenen Elektrode, an welche der Zuleitungsdraht direct angelötet war und zwar, um Entweichen der Elektrizität zu hindern, so, dass der den Draht umgebende Kautschukschlauch noch in die Glasröhre hineinragte. Der Fussboden unter der aufgehängten Spitzelektrode war mit grossen Blechtafeln belegt, die gleichfalls an die Wasserleitung angeschlossen waren. Der Spitzelektrode konnte eine gleichbeschaffene und in gleicher Weise mit der Influenzmaschine verbundene auf dem Boden stehende zweite Spitzelektrode gegenübergestellt werden.

Um die kleinen Störungen im Gange der Influenzmaschine auszugleichen, war diese nicht direct mit dem Entladungsapparat verbunden, sondern zunächst (unter Einschaltung von Glycerinwiderständen) mit einer Batterie von sehr grossen Leydener Flaschen, welche somit die directe Elektrizitätsquelle für den Entladungsapparat darstellte. Zuweilen wurde auch an Stelle der gewöhnlichen Influenzmaschine eine 60plattige verwendet, bei welcher der Ueberschuss der Elektrizität durch einen Nebenschluss, bestehend aus zwei in der Mitte grösserer Blechscheiben eingesetzten in etwa 10 cm Abstand gebrachten Platinspitzen, fortgenommen wurde.

Zur Beurteilung der Constanz der Spannung der Flaschenbatterie war auf dieselbe ein Quadrantelektrometer aufgesetzt und ausserdem ein in der Nähe des Entladungsapparates (in etwa 2—3 m Entfernung) isolirt aufgestellter kleiner Gasbrenner durch eine die Wand durchdringende Leitung mit einem in einem dritten Zimmer stehenden Elektroskop verbunden. Jede Aenderung in der Leistung der Maschine machte sich infolge der Saugwirkung der Flamme alsbald durch eine Aenderung im Ausschlag des Elektroskopes bemerklich und konnte durch Regulirung des Elektromotors von der Beobachtungsstelle aus sofort berichtigt werden.

Was die Höhe der angewandten Spannung anbelangt, so war dieselbe in der Regel so bemessen, dass die Schlagweite zwischen Messingkugeln von 16,5 mm Durchmesser 14 mm betrug, zuweilen aber auch wesentlich grösser war. Die Stärke des der Spitze zugeleiteten Stromes war im Maximum etwa 3 Milliontel Amp., gewöhnlich vielleicht 10 mal kleiner.

Zunächst wurde nur die aufgehängte Spitzelektrode benutzt und der untere Pol der Influenzmaschine ebenso wie der Blechbelag des Fussbodens mit der Wasserleitung verbunden.

Könnte das Ausströmen der Elektrizität aus der Spitze verhindert werden und könnte die Elektrode als unendlich lang und der gegenüberstehende Blechbelag als unendlich ausgedehnt betrachtet werden, so wären die Niveauflächen des Potentials confocale Hyperboloide, welche Uebergangsformen zwischen der linearen Elektrode und der gegenüberstehenden ebenen Platte darstellen. Die Kraftlinien würden sich zu confocalen Ellipsoiden aneinanderreihen, welche die Hyperboloide senkrecht durchdringen. Es wurde ein Versuch gemacht, wenigstens annähernd die Verteilung dieser Niveauflächen zu ermitteln. Zu diesem Zwecke wurde die Spitze mit einer Glaskappe überdeckt, und diese mit dem die Elektrode umgebenden Glasrohr dicht verkittet, sodass ein Ausströmen der Elektrizität unmöglich war. Zur Messung des Potentials diente ein Wassertropfencollector, bestehend aus einer etwa 1,5 m langen, durch einen Schlauch mit einer isolirt aufgestellten Wasserflasche verbundenen Glasröhre, in welche ein blanker Draht bis nahe zur Mündung eingeführt war. Das andere Ende des Drahtes stand mit einer durch Guttapercha, Kautschuk und Ebonit wohl isolirten, die Zimmerwand durchdringenden Leitung mit einem im dritten Zimmer stehenden Braun'schen Elektrometer (für 10000 Volt) in Verbindung, dessen Gehäuse an die Wasserleitung angeschlossen war. Der durch diesen Tropfencollector ermittelte Verlauf der Niveauflächen ist in Fig. 1 (Taf. II) dargestellt.¹⁾ Die erste gezeichnete Niveaulinie über dem Boden entspricht dem Potential 1000 Volt, jede folgende einem um 1000 Volt höheren Werte, also die nächste der Spannung 2000 Volt etc.

1) Die Höhe der Spitze über dem Boden betrug 60 cm. Damit ist zugleich der Maassstab der Figur gegeben. Gleiches gilt für die folgenden Figuren.

Der Verlauf ist, wie man sieht, ungefähr der erwartete. Die Abweichungen erklären sich durch einige vorhandene Störungen, welche bei den folgenden Versuchen beseitigt wurden.

Könnte die Elektrizität aus der Spitze ausströmen und würde sich die Luft verhalten wie ein schlechter Leiter, etwa wie reines Wasser, so würde sich ein anderer Verlauf der Potentialverteilung herstellen; die Niveauflächen wären nunmehr Kugelflächen, mehr oder minder excentrisch zur Spitze gelegen und Uebergangsformen zwischen der als unendlich kleine Kugel gedachten Spitze und der gegenüberstehenden Platte darstellend. Die Kraftlinien wären Kreisbögen, welche von der Spitze ausgehen und den Boden senkrecht treffen.

Zur Ermittlung der Flächen gleichen Potentials könnte eine Sonde dienen, bestehend aus einem bis an die Spitze in eine Glasröhre eingeschlossenen Metalldraht, welcher ähnlich wie der Tropfencollector im vorigen Fall mit dem Elektrometer durch eine wohl isolirte Leitung verbunden ist. Derartige Sonden wurden in neuerer Zeit vielfach zur Bestimmung des Potentialgefälles bei Gasentladungen gebraucht. Sie müssen die richtigen Potentialwerte ergeben, wenn sich das Gas wie ein schlechter Leiter verhält, auf welchen das Ohm'sche Gesetz Anwendung findet.

Bei Vorversuchen ergab sich, dass es nicht zweckmässig ist, wenn, wie gewöhnlich, der Draht der Sonde nur in einer kleinen Spitze endigt, da dann die Dauer, bis die endgültige Ladung des Elektrometers eingetreten ist, so lang wird, dass nicht nur die Beobachtungen ausserordentlich viel Zeit beanspruchen, sondern auch die unvermeidlichen Mängel der Isolation und die Schwankungen im Gange der Influenzmaschine sich störend geltend machen. Darum wurde am Ende des Drahtes eine Messingkugel von 27 mm Durchmesser angebracht.

Ferner stellte es sich als zweckmässig heraus, die den Draht umgebende Glasröhre mittels zweier Ebonitpfropfen durch eine andere Glasröhre oder Messingröhre zu führen, da sonst auf der Glasröhre angesammelte Elektrizität wegen der mangelhaften Isolation des Glases dem Drahte und damit dem Elektrometer zugeführt werden kann.

Die so vorgerichtete Sonde von etwa 1,5 m Länge soll als „Kugelsonde“ bezeichnet werden. Sie war auf einem nach

Art eines Perspectives ausziehbaren Stativ befestigt, sodass sich die Kugel in alle Höhen zwischen dem Fussboden und der 4,4 m hohen Zimmerdecke bringen liess. Das Stativ stand auf Rollen, sodass die Kugel ausserdem in alle möglichen Abstände von der Elektrode bis zu der 5,1 m entfernten Wand des Zimmers gebracht werden konnte.

In der Regel wurden von 10 zu 10 cm fortschreitend, sowohl in horizontaler wie in verticaler Richtung die Potentiale in einer durch die Elektrode gehenden Ebene bestimmt, die Zahlen in ein Coordinatensystem eingetragen und sodann die Punkte gleichen Potentials miteinander verbunden. Diejenigen Punkte, bei welchen das Elektrometer beim Annähern der Sonde gegen die Elektrode eben noch keinen merklichen Ausschlag zeigte, sind in sämtlichen Figuren (Taf. II) durch die punktirte Curve verbunden. Die nächsten Niveaulinien entsprechen wie bei Fig. 1 (Taf. II) der Reihe nach den Potentialen 1000, 2000, 3000 Volt etc. Die innerste Curve entspricht gewöhnlich der Spannung 10000 Volt, der Grenze des Messbereiches des angewandten Elektrometers, zuweilen wurden aber auch noch 11000 und 12000 Volt geschätzt. In allen Fällen ist der Potentialunterschied zweier aufeinander folgender Niveaulinien in sämtlichen Figuren 1000 Volt.¹⁾

Die Fig. 2 (Taf. II) stellt die Ergebnisse eines der ersten Versuche dar bei verhältnismässig geringer Spannungsdifferenz zwischen Spitze (Höhe 60 cm, Ladung negativ) und dem Fussboden. Wie man sieht entspricht der Verlauf der Aequipotentiaallinien auch nicht entfernt der Annahme, die Luft besitze ein Leitungsvermögen wie ein schlechter Leiter. Wohl sind in der Nähe der Spitze die Niveauflächen ungefähr Kugelflächen, wie sie es der Theorie nach sein sollen; nach unten

1) Da die Versuche sehr zeitraubend waren und in der Regel jede Aufnahme einen ganzen Tag beanspruchte, während dessen die Leistung der Influenzmaschine aus verschiedenen Gründen nicht ganz gleichmässig gehalten werden konnte, zeigten die beobachteten Curven mannigfache Ausbiegungen nach der einen und anderen Seite. In den Figuren sind die Curven glatt ausgezogen, dem nach Augenmaass geschätzten mittleren Verlaufe entsprechend. Weit grössere Genauigkeit liesse sich natürlich erzielen bei Anwendung einer constanten Elektrizitätsquelle, die mir aber nicht zur Verfügung stand. Für die Zwecke der vorliegenden Untersuchung erscheint die Genauigkeit ausreichend.

hin erscheinen sie dagegen stark aufgebaucht, sodass sie die Bodenfläche, an welcher notwendig das Potential überall gleich Null sein muss, unter stumpfen Winkeln zu schneiden scheinen, anstatt ihr annähernd parallel zu gehen. Dieses Verhalten tritt besonders dann auffällig hervor, wenn man die Sonde im Abstand von wenigen Millimetern vom Boden von aussen gegen die Mitte zu verschiebt. Während bei der punktierten Curve das Potential noch gleich Null ist, steigt es beim Ueberschreiten dieser Grenze rasch an und wächst gegen die Mitte hin auf über 7000 Volt. Diesen hohen Wert würde man dort selbst dann noch erhalten, wenn etwa die Sonde in einen entsprechenden Ausschnitt des Fussbodens isolirt eingesetzt würde.

Es giebt nur eine einzige Erklärung für solchen eigentümlichen Verlauf der Niveauflächen, nämlich die, die Luft zwischen Spitze und Platte sei elektrisch, womit natürlich nichts darüber ausgesagt ist, ob die Luft im ganzen oder nur einzelne Teile derselben z. B. die Stickstoffmoleculé oder freie Atome, elektrisch sind. Jedenfalls kann nicht etwa, wie man zuweilen vermutet hat, Staub der Träger der Elektrizität sein, da die geringe Capacität der wenigen Staubteilchen¹⁾ bei weitem nicht im stande wäre, die verhältnismässig grosse Menge der übergehenden Elektrizität (einige Mikrocoulomb pro Secunde) zu übertragen und in staubfreier Luft elektrischer Wind, soweit nicht Zerstäubung der Elektrode in Frage kommt, überhaupt unmöglich sein würde.

Einem bekannten Satze zufolge kann im Innern eines

1) Die Capacität eines kugelförmig gedachten Staubteilchens von 0,002 mm Durchmesser ist rund 10^{-16} Farad., somit die Ladung, die es bei 100 000 Volt Spannung annimmt, rund 10^{-5} Mikrocoulomb. Um somit die beobachtete Stromstärke zu erhalten, müsste pro Secunde gegen eine Million solcher Staubteilchen mit der Spitze in Berührung kommen. Denkt man sich dieselben unmittelbar aneinander gereiht, so wäre die Länge der Reihe nahezu 2 m. Die Geschwindigkeit des Windes an der Spitze müsste also weit grösser als 2 m pro Secunde sein. Das Volumen der dicht aneinanderliegenden Staubteilchen wäre rund 0,008 cmm somit die im Laufe der Versuchsdauer elektrisirte und an den Wänden niedergeschlagene Staubmenge, wenn man die Dauer zu 10 Stunden annimmt, und das specifische Gewicht des Staubes gleich 1, gegen 0,3 g. Soviel Staub müsste deutlich wahrnehmbar sein und könnte am allerwenigsten durch Zerstäubung der feinen Spitze entstehen. (Vgl. auch O. Lehmann, Elektrische Lichterscheinungen oder Entladungen, p. 80 u. p. 106).

stromdurchflossenen Leiters keine freie Elektrizität vorhanden sein. Der Versuch beweist also mit Sicherheit, dass die Luft kein Leiter der Elektrizität ist, dass man nicht berechtigt ist, von einem Leitungsvermögen der Luft zwischen Spitze und Boden zu sprechen.

Erteilt man der Sonde, ehe sie der Elektrode genähert wird, etwa durch Berühren mit einem geriebenen Ebonit- oder Porzellanstab eine elektrische Ladung von gleicher Art wie die Ladung der Elektrode und bringt sie nun in die Nähe derselben, so bleibt die Ladung unverändert, bis eine Niveaufläche höheren Potentials erreicht wird, ein zweiter Beweis dafür, dass die Luft kein Leitungsvermögen besitzt.

Bringt man zwei Sonden, welche sich auf verschiedenen Niveaucurven befinden, miteinander in leitende Verbindung, welche an einer Stelle durch ein Funkenmikrometer unterbrochen ist, so springen so lange Funken über, bis die dem niederen Potential entsprechende Sonde die Spannung der anderen angenommen hat. Dieses höhere Potential behält sie bei, sowohl bei dauernder Verbindung mit der anderen Elektrode, wie getrennt von derselben. Auch dieser Versuch zeigt, dass die Luft kein Leitungsvermögen besitzen kann, denn sonst müsste jede Sonde das Potential des Ortes annehmen, an dem sie sich befindet. Der Versuch zeigt aber ferner, dass man beim Gebrauch von Sonden die Vorsicht anwenden muss, die Sonde entweder immer nur von Orten niederen Potentials zu solchen höheren zu bringen oder aber sie nach jeder Messung zu entladen.

War die Ladung der Sonde der der Elektrode entgegengesetzt, so verliert sie dieselbe bei der Annäherung an die Elektrode vollkommen und ladet sich alsbald auf den richtigen Potentialwert. Scheinbar besitzt also die Luft in der Nähe der Elektrode ein unipolares Leitungsvermögen.

Die Fig. 3 (Taf. II) zeigt, dass die Curven ungefähr ebenso verlaufen, wenn statt der an der Decke hängenden Spitzelektrode eine auf dem Fussboden stehende (Höhe 205 cm, Elektrisierung positiv) verwendet wird. Wird die elektrische Spannung vergrößert, so erhält das Curvensystem, wie Fig. 4 (Spitzenhöhe 24 cm, Elektrisierung negativ) und Fig. 5 (Taf. II) (Höhe 60 cm) zeigen, in der Mitte eine Ausbiegung, welche

bis zur Zimmerdecke (Höhe 441 cm) reichen kann, an welcher ebenso wie am Fussboden das Potential Null vorhanden ist.

Die Erklärung für das Auftreten der Elektrisierung der Luft wurde bereits von Faraday gegeben.¹⁾ Durch die Glimmentladung an der Spitze wird die Elektrizität an die Luft übertragen und die elektrischen Teilchen bewegen sich, den Kraftlinien folgend weiter, bis sie einen Körper niedrigeren Potentials treffen, an welchen sie die Ladung abgeben. Diese elektrisirten Teilchen, welche Giese als Ionen auffasst²⁾ sind nicht zu verwechseln mit den Elektronen, welche neueren Theorien zufolge den Durchgang der Elektrizität durch Gase vermitteln sollen. Da nämlich die negativen und positiven Elektronen ausserordentlich verschiedene Masse besitzen müssen, wäre anzunehmen, dass sie bei dem Fortwandern in der Luft sehr verschiedenen Widerstand erfahren, somit die Ausbreitung der elektrisirten Luft und demgemäss die Gestaltung der Niveauflächen bei negativer Ladung der Spitze eine wesentlich andere sein müsste als bei positiver. Der Versuch zeigt genau das Gegenteil; der Sinn der Elektrisierung hat keinen Einfluss auf die Verteilung der Potentialwerte.

Bewegung der Luft erwies sich nicht ganz ohne Einfluss auf die Bewegung der Ionen, doch wurden keine Messungen über die hervorgebrachten Ablenkungen der Stromlinien ausgeführt. Dass die Bewegungsrichtung des elektrischen Windes im allgemeinen nicht mit der Bahn der Ionen übereinstimmt, ist bekannt.³⁾

Würde man die Blechbelegung des Bodens mit Lycopodium bestreuen und nach dem Durchgang der Entladung darüber blasen, so entstände die bekannte Kundt'sche Staubfigur in Form eines scharf begrenzten Kreises, innerhalb dessen das Pulver an der Metallplatte haften bleibt. Im Dunkeln würde diese Fläche des Metalles von einem schwachen Glimmlichtnebel bedeckt erscheinen, da dort, wie auch der Verlauf der gezeichneten Niveaulinien lehrt, die elektrisirte Luft beim Auftreffen auf die Blechoberfläche so hohes Potentialgefälle erzeugt, dass daselbst Glimmentladung eintreten muss.

1) O. Lehmann, Elektrische Lichterscheinungen oder Entladungen, p. 58.

2) l. c. p. 110.

3) l. c. p. 101.

Denkt man sich alle Kraftlinien von der Spitze aus nach dem Umfang dieser Kreisscheibe gezogen, so könnte es scheinen, dass der gesamte convective Strom im Innern des so abgegrenzten Gebietes verlaufen müsste. Es müsste somit dieser Raum identisch sein mit dem in sämtlichen Figuren durch die punktirte Linie abgegrenzten Gebiet, es wäre dieses Gebiet das sogenannte „Entladungsgebiet“.¹⁾

Dass dies unmöglich zutreffen kann, folgt schon daraus, dass die punktirte Linie eine Niveaulinie, nicht eine Stromlinie ist, die Stromlinien also zu ihr senkrecht verlaufen müssen. Die von der Spitze nach dem Kreisumfang senkrecht zu den Aequipotentialflächen gezogenen Stromlinien schliessen ein kegelförmiges Gebiet ein, welches sehr viel kleiner ist, als das von der punktirten Curve umgrenzte Gebiet, in welchem überall elektrische Strömung, auch solche nach der Metallplatte hin vorhanden ist. Hieraus folgt, dass jenes durch die Kundt'sche Staubfigur bestimmte Gebiet keineswegs das Entladungsgebiet ist, in welchem allein Entladung stattfindet, sondern dass der Kreis lediglich diejenigen Punkte einschliesst, an welchen das durch den elektrischen Wind hervorgebrachte Potentialgefälle ausreicht Glimmentladung hervorzurufen. Ausserhalb des Kreises erfolgt die Abgabe der Ladung der Ionen an die Metallplatte ohne Glimmlichterscheinung und ohne einen Entladungsvorgang, welcher im stande wäre, *Lycopodium* in solchem Maasse zu elektrisiren, dass es an der Platte haften bleibt.

Hierdurch entsteht nun aber die weitere Frage, welches ist denn das wahre Entladungsgebiet? Zieht man allenthalben die von der Spitze ausgehenden Stromlinien senkrecht zu den beobachteten Niveauflächen, so erfüllen sie den ganzen Raum. Obschon also die Sonde ausserhalb der punktirten Curve keinen Strom mehr anzeigt, muss ein solcher dort dennoch vorhanden sein. In der That gelingt es durch Anwendung eines feineren Elektrometers und einer Sonde mit grösserer Oberfläche die Grenze, an der das Potential gleich Null gefunden wird, etwas weiter hinauszurücken. Der Umstand aber, dass die Sonde bei Ueberschreitung der punktirten Linie fast plötzlich ein verhältnismässig hohes Potential annimmt, beweist, dass hier

1) l. c. p. 82.

eine principielle Schwierigkeit vorliegt, dass die gewöhnlich gemachte Voraussetzung, die Sonde nehme wirklich unter allen Umständen das Potential des Ortes an, an dem sie sich befindet, ähnlich einer Sonde, welche in eine schlechtleitende, stromdurchflossene Flüssigkeit eingetaucht wird, unrichtig ist, dass vielmehr die Sonde, falls die Spannung unter einer gewissen Grenze bleibt, die Ladung elektrisirter Luft nicht oder nur schwer mehr annimmt und demgemäss die mit ihr bestimmten Aequipotentiallinien nicht die wahre sein können und ebensowenig die nach deren Verlauf construirten Stromlinien.

Um den wahren Verlauf der Niveau- und Stromlinien zu erfahren, kann der Tropfen- oder Flammencollector dienen, da ein solcher (namentlich ersterer) theoretisch das wahre Potential des Ortes, wo er sich befindet, anzeigen muss. Die Sonde wurde deshalb in einen Flammencollector verwandelt in der Art, dass durch eine seitliche Ansatzröhre am hinteren Ende der Glasröhre Gas eingeleitet und so die Röhre in einen Brenner verwandelt wurde. Die Kugel am Drahte wurde abgenommen und durch eine feine Spitze ersetzt, welche in den leuchtenden Teil der Gasflamme hineinragte. Um Störungen durch etwaige Ausströmungen von der Oberfläche der immerhin, namentlich in ihrem oberen Teil nicht vollkommen isolirenden Glasumhüllung der Elektrode auszuschliessen, wurde diese bis zu 65 cm Abstand von der Spitze mit Stanniol umkleidet, und dieser Ueberzug mit der Wasserleitung verbunden.

Die nunmehr gewonnenen Aequipotentialcurven nebst den senkrecht dazu verlaufenden Stromlinien, soweit diese innerhalb der punktirten Nullcurve liegen, sind in Fig. 6, Taf. II (Höhe der Spitze 205 cm, Elektrisierung positiv) dargestellt. Fig. 7, Taf. II giebt die unter ähnlichen Umständen (Spitzenhöhe 60 cm, Elektrisierung negativ) mit der Kugelsonde beobachteten Niveaulinien. Das starke Potentialgefälle am Boden wird, wie man sieht, durch die Flammensonde nicht angegeben, offenbar weil die Flamme alle Elektrizität an den Boden abgiebt.

Fig. 8, Taf. II endlich giebt zum Vergleich das System der elektrostatischen Niveau- und Kraftlinien, aufgenommen mit dem Flammencollector, nachdem über die Spitze eine Glaskappe gekittet war (Spitzenhöhe 60 cm, Elektrisierung negativ).

Die Fig. 9, Taf. II (Spitzenhöhe 236 cm, Elektrisierung positiv) stellt ein weiteres mit der Kugelsonde aufgenommenes System von Niveaulinien dar von solcher Ausdehnung, dass die punktierte Nulllinie bereits über den Rand der Zeichnung hinausgeht.

Wenn, wie aus den Figg. 2—9 zu schliessen, die Stromlinien von der Spitze nach allen Richtungen ausstrahlen, so muss die Strömung aufgehalten werden, falls, wie Fig. 10, Taf. II (Spitzenhöhe 171 cm, Ladung positiv) andeutet, senkrecht zu diesen Stromlinien eine Glasplatte aufgestellt wird. In dem abgebildeten Fall war die Länge der Glasplatte 1,8 m, die Breite 1 m. Sie war, wie die Fig. 10 zeigt, schräg zum Fussboden aufgestellt. Mit der Flammsonde würde es in diesem Falle nicht wohl möglich gewesen sein, den wahren Verlauf der Potentialcurven zu ermitteln, da durch die Flamme eine Störung in der Verteilung der Ladung auf der Glasplatte hervorgebracht worden wäre. Es wurde deshalb die Kugelsonde benutzt. Sie ergab auf der der Elektrode zugewandten Seite der Glastafel, wie die Curven der Fig. 10 zeigen, hohe Potentialwerte, auf der Rückseite dagegen, sowohl dicht an der Glasplatte, wie auch in dem leeren Raum dahinter, den Wert Null, vorausgesetzt, dass jeweils der durch Influenz in der Sonde zuerst hervorgebrachte Ausschlag des Elektrometers zunächst durch Ableitung beseitigt worden war.

In diesem Fall tritt der Unterschied zwischen der Wirkung von Kugel- und Flammsonde besonders deutlich hervor. Hinter der Glasplatte kann die Kugelsonde von elektrisirter Luft nicht getroffen werden, sie giebt deshalb, weil zuvor abgeleitet, das Potential Null an; die Flammsonde müsste dagegen ein Potential anzeigen, welches der Ladung der Glasplatte auf der anderen Seite entspricht, also in der Nähe der Glasplatte ungefähr ebenso hoch sein müsste, wie das auf jener Seite, vorausgesetzt, dass nicht etwa aus der Flamme so viel Influenzelektricität entweicht und auf der Glastafel sich festsetzt, dass hierdurch die Wirkung der Ladung auf der anderen Seite ganz oder teilweise compensirt wird, was bei vorübergehender ableitender Berührung der Sonde sehr wohl eintreten kann.

In der Nähe der Spitze dürften die mit der Kugelsonde

ermittelten Niveaulinien nicht viel von den wahren abweichen. Eine beträchtliche Verschiedenheit aber zeigt sich hinter der Glasplatte, wo die nach dem Verlauf der mutmaasslichen wahren Niveaulinien construirten Stromlinien die eingetragenen Niveaulinien auch nicht annähernd senkrecht durchschneiden.

Würde in den Fussboden eine Oeffnung gemacht, durch welche der elektrische Wind entweichen kann, so würde sich das System der Niveau- und Stromlinien auch durch diese Oeffnung hindurch fortsetzen. In welcher Weise es in Wirklichkeit geschieht, zeigt die mit der Flammsonde gemachte Aufnahme Fig. 11, Taf. II, bei welcher der von der Spitze (Höhe 236 cm, Elektrisierung negativ) ausgehende elektrische Wind auf eine Blechplatte (Format 134×160 cm) auftrifft, welche in der Mitte eine rechteckige Oeffnung von der Grösse 30×63 cm enthält. Diese Blechtafel war mit der Wasserleitung verbunden und somit ebenso wie der darunter befindliche Fussboden auf dem Potential Null. Man erkennt deutlich, dass der elektrische Wind selbst durch eine Oeffnung in einem zur Erde abgeleiteten Metallschirm hindurchgehen kann. Wurde die Oeffnung mit einem Drahtgitter mit etwa 1 cm weiten Maschen bedeckt, so war dies nicht mehr der Fall.

In allen betrachteten Fällen konnte die auftretende elektrisirte Luft nur die Elektrizität der Elektrode angenommen haben, der auftretende elektrische Wind war unipolar. Von besonderem Interesse erscheint es, welche Modificationen eintreten, wenn zwei entgegengesetzte elektrische Winde zusammenreffen, d. h. wenn beide Conductoren der Influenzmaschine isolirt und miteinander zugewendeten Spitzelektroden verbunden sind. Den Verlauf der elektrostatischen Niveau- und Kraftlinien, wie er sich durch Untersuchung des elektrischen Feldes in der Nähe der mit Glaskappen bedeckten, 31 cm voneinander entfernten Spitzen mittels des Flammencollectors ergab, ist in der Fig. 12 (Ladung oben negativ) und Fig. 13 (Ladung oben positiv), dargestellt. (Höhe der unteren Spitze 205 cm, der oberen 236 cm.) Man erkennt auch aus diesen Figuren die störende Wirkung der Flamme, insofern die höchsten Potentialwerte keineswegs an den Spitzen vorhanden sind, sondern an einer mehr oder weniger von der Spitze entfernt liegenden Stelle, der die Elektrode umhüllenden Glasröhre,

weil nämlich auf die Glaskappen über den Spitzen aus der Flamme soviel entgegengesetzt Elektrizität herangezogen wird, dass dieselben gewissermaassen wie Leydener Flaschen auf beiden Seiten gleich stark entgegengesetzt geladen sind, somit die Wirkung nach aussen beträchtlich vermindert wird. Ungefähr entspricht allerdings der Verlauf der Niveau- und Kraftlinien dem nach der Theorie vorauszusehenden.

Den mit der Flammensonde aufgenommenen Verlauf der Strom- und Niveaulinien bei freigegebenen Spitzen zeigen die Figg. 14 u. 15, Taf. II (Elektrisirung der oberen Spitze negativ). Da die Spannung an den beiden Polen der Influenzmaschine nicht genau gleich war, wurde derjenige Pol, welcher die höhere Spannung lieferte, mit einer Nähnadelspitze verbunden, welcher eine zum Erdboden abgeleitete Gasflamme in einiger Entfernung gegenüberstand. Die Entfernung wurde so geregelt, dass die Nulllinie des Potentials gerade mitten zwischen die beiden Spitzen fiel.

Die beiden Figuren lassen deutlich erkennen, dass die Ausbreitung positiv und negativ elektrisirter Luft in genau derselben Weise erfolgt. Aus dem Verlauf der Stromlinien ist ferner zu schliessen, dass, ebenso wie bei Anwendung nur einer Spitze, ein grosser Teil der elektrisirten Luft von der unteren Spitze zum Fussboden, von der oberen zur Zimmerdecke wandert, dass aber im übrigen die beiden elektrischen Winde sich durchdringen, sodass scheinbar zwei entgegengesetzte Ströme von einer Spitze bis zur anderen verlaufen.

Die Untersuchung mit der Kugelsonde ergab, dass der Vorgang nicht ganz so einfach verläuft. Die mit dieser Sonde gewonnenen Niveaulinien sind in Fig. 16, Taf. II (Höhe der Spitzen wie zuvor, Ladung oben negativ) dargestellt.¹⁾

Wurde die Sonde mehr und mehr der Mitte genähert, wo das Potential Null herrscht, so wurde die Ablesung des Elektrometers immer schwieriger, indem die Nadel beständige Unruhe zeigte und zuweilen um 1000 und mehr Volt auf und ab schwankte. Dies ist die Stelle, wo die beiden elek-

1) Die Unsymmetrie der Fig. 16, die grössere Ausdehnung des Systems der negativen Curven, mag darauf beruhen, dass ein kleiner Ueberschuss an negativer Elektrizität vorhanden war, oder dass die Kugelsonde diese leichter aufnimmt.

trischen Winde zusammentreffen und es ist somit anzunehmen, dass die Kugel bald stärker von dem einen, bald stärker von dem anderen elektrischen Wind getroffen wird, d. h. dass sich hier Wirbel ausbilden, ähnlich denjenigen, welche ich früher bei convectiver Entladung in schlechtleitenden Flüssigkeiten beobachtete.¹⁾

Dass aber auch eine gegenseitige Durchdringung der Winde stattfindet, dass zwischen den beiden Spitzen an derselben Stelle sowohl positiv wie negativ elektrisirte Luft vorhanden sein kann, lässt sich ebenfalls aus dem Verhalten der Kugelsonde deutlich erkennen, insofern sich an solchen Stellen die Luft scheinbar wie ein gewöhnlicher Leiter verhält. Wird die Sonde mit der Elektrizität einer Spitze geladen und in den zum Fussboden bez. zur Zimmerdecke verlaufenden unipolaren Strom gebracht, so bleibt die Ladung unverändert. Die Luft verhält sich, wie schon oben bemerkt, wie ein Isolator. Nähert man nun aber die Sonde mehr und mehr der Mitte, so verliert sie nach und nach die Ladung bis zu dem an dem betreffenden Orte herrschenden Potentialwert und zwar um so rascher, je näher sie sich der Nullfläche des Potentials in der Mitte befindet. In dieser selbst verliert sie jede ihr mitgeteilte Ladung sofort, mag diese positiv oder negativ sein. Man könnte geradezu durch Beobachtung der Entladungsdauer der Sonde an einer bestimmten Stelle des Entladungsgebietes auf den Procentsatz der herübergedrungenen entgegengesetzt elektrisirten Luft aus der anderen Hälfte des Entladungsgebietes einen Schluss ziehen.

Bringt man eine Sonde in den positiven Teil des Entladungsgebietes, eine zweite in den negativen und verbindet beide unter Zwischenschaltung eines Funkenmikrometers, so erhält man einen dauernden Funkenstrom.

Nicht anzunehmen ist, dass der von einer Seite kommende elektrische Wind entsprechend den Stromlinien sich verdichte und der Spitze auf der anderen Seite zuströme, um erst dort seine Elektrizität abzugeben; vielmehr wird ebenso wie bei der convectiven Entladung in Flüssigkeiten schon auf dem Wege ein gegenseitiger Ausgleich der beiden Elektrizitäten

1) l. c. p. 65.

stattfinden, wie auch daraus zu schliessen ist, dass bei rasch wechselnder Ladung der Spitze im einen und anderen Sinn (z. B. bei Zuführung von Wechselstrom) eine Ladung der Sonde überhaupt nicht mehr zu stande kommt, da die durch den einen Stromstoss hervorgerufene Wolke elektrisirter Luft durch die beim nächsten Stromstoss auftretende entgegengesetzt elektrisirte wieder entladen wird¹⁾ und nicht weiter fortschreiten kann. Wäre letzteres der Fall, so müsste die Luft bei Anwendung nur einer Spitze von hier an bis zum Fussboden wegen gleichzeitiger Anwesenheit beider Arten von Ionen sich wie ein Leiter verhalten, was nicht der Fall ist.

Nur bei sehr hohen Spannungen scheint eine Durchdringung der beiden elektrischen Winde von der einen Elektrode bis zur anderen möglich zu sein, da sich nur so die von mir früher beobachtete Erscheinung der elektrischen Doppelschatten²⁾ erklären lässt, welche bei schwächeren Spannungen ausbleibt.

Von welchen Umständen die Schnelligkeit des Ausgleiches der Ladungen entgegengesetzter elektrischer Winde abhängt, ist eine Frage, welche noch näher zu untersuchen wäre.

Sind die Spannungen auf den beiden Conductoren nicht gleich, sondern ist die Spannung auf einem Conductor etwa infolge schlechter Isolation desselben niedriger, so wird naturgemäss auch das System der Niveaulinien unsymmetrisch. Bei den Figg. 17, 18 u. 19 (Taf. II) (Höhe der Spitzen 205 und 236 cm, Elektrisirung der oberen negativ) ist jeweils die obere Spitze diejenige mit höherer Spannung. Die Nullcurve des Potentials ist nicht die Symmetrielinie zwischen den beiden Spitzen, sondern eine die untere positive Spitze vollkommen umschliessende Curve und zwar diejenige, welche der punktirten Curve am nächsten kommt. Bei der letzten der drei Figuren ist der Ueberschuss an negativer Elektrizität so gross, dass der Strom negativ elektrisirter Luft nicht nur bis zur Decke reicht, sondern auch die positive Elektrode völlig umgiebt. Alle drei Aufnahmen sind mit der Kugelsonde gemacht.

Den Verlauf der wahren Niveau- und Stromlinien, mit der Flammensonde aufgenommen, zeigt in einem ähnlichen Fall

1) In nächster Nähe der Elektrode zeigte sich ein Ueberschuss der einen Elektrizität ähnlich wie bei den bekannten Versuchen Himstedt's.

2) l. c. p. 98.

Fig. 20 (Spitzenhöhe wie zuvor, Elektrisirung der oberen Spitze positiv).

Befindet sich die untere Elektrode nahe dem Boden, so wird naturgemäss ein Teil des Ueberschusses von elektrischem Wind der oberen Elektrode vom Boden aufgenommen. Einen solchen Fall zeigen die Figg. 21, 22 u. 23 (Taf. II), bei welchen die positive Elektricität im Ueberschuss ist. (Die Spitzenhöhe bei den Figg. 21 u. 22 beträgt 60 und 24 cm, bei Fig. 23 236 und 205 cm, die Elektrisirung der oberen Spitze war bei den Figg. 21 u. 22 positiv, bei Fig. 23 negativ).

Bei der letzten derselben erfüllt die positiv elektrische Luft das ganze Zimmer und die punktirte Curve legt sich deshalb im grössten Teil ihres Verlaufes an Fussboden, Wände und Decke an.

Da sich, wie gezeigt, die entgegengesetzten elektrischen Winde zwischen den Spitzen gegenseitig durchdringen, so schien es von Interesse zu untersuchen, was geschieht, wenn man diese Durchdringung durch Zwischenschieben einer Glasplatte hindert. Der Abstand der Spitzen betrug wieder 31 cm. Die Grösse der mitten zwischen ihnen horizontal angebrachten Glasplatte $0,7 \times 1$ m. Um zu hindern, dass Elektricität durch Leitung von der oberen Seite der Glasplatte zur unteren gelangte, wurde nicht eine einfache Glasplatte benutzt, sondern eine Doppelplatte, bestehend aus zwei gleichen Glasplatten, welche durch zwischengelegte Paraffinklötzchen in 2 cm Abstand voneinander gehalten wurden. Das mit der Kugelsonde erzielte Ergebnis zeigt Fig. 24 (Taf. II) (Spitzenhöhen 205 und 236 cm, Elektrisirung der oberen Spitze negativ), die Flammen-sonde ergab die in Fig. 25 (Taf. II) dargestellten Curven.

Wie man sieht, bewegen sich die beiden elektrischen Winde um die Ränder der Glasplatten herum, und das System der Niveau- und Stromlinien erleidet, abgesehen von der Mitte, kaum eine merkliche Aenderung, da sich die auf den beiden Glasplatten angehäuften entgegengesetzten Ladungen in ihren Wirkungen nach aussen nahezu compensiren.

Um noch auf andere Weise die Ausbreitung des elektrischen Windes zu stören, wurde die Glasdoppelplatte horizontal einige Centimeter über der oberen Spitze und einige Centimeter von deren Zuleitung entfernt aufgestellt. Es er-

gab sich eine Störung der Curven, wie sie die eine Hälfte der Fig. 26 (Taf. II) darstellt. Hätte man auch auf die andere Seite symmetrisch zur ersten eine solche Glasplatte gebracht, so würde auch diese Seite in gleicher Weise gestört worden sein, man hätte also ein Curvensystem erhalten, wie es die ganze Fig. 26 darstellt. Die obere Elektrode ragt hier durch eine Oeffnung in einem isolirenden Schirm hindurch und man sieht, dass ein grosser Teil des elektrischen Windes oben aus der Oeffnung entweicht, unbekümmert um die Anwesenheit der entgegengesetzten Elektrode. Gleiches zeigt die Fig. 27, deren Curven mit der Kugelsonde aufgenommen wurden.

Wurde die Vereinigung der beiden elektrischen Winde gehindert durch eine in der Mitte zwischen den Spitzen horizontal befestigte Blechtafel vom Format 134×65 cm, so trat, wie Fig. 28, Taf. II zeigt, kaum eine merkliche Störung der Stromlinien ein, da beide elektrischen Winde ihre Elektrizität an die Blechtafel abgaben und somit in dieser die Vereinigung der Elektrizitäten in ähnlicher Weise erfolgte, wie wenn sich die Winde direct getroffen hätten.

Würde man an Stelle der einfachen Blechplatte eine aus zwei durch Paraffinklötzchen getrennt gehaltene Platten bestehende Doppelplatte benutzen und die beiden Tafeln unter Zwischenschaltung eines Funkenmikrometers metallisch verbinden, so würde man einen dauernden Funkenstrom erhalten, so wie dies schon oben bei der Verwendung zweier Sonden beschrieben wurde.

Die Hauptergebnisse unserer Untersuchung sind die folgenden:

1. Convective Fortführung der Elektrizität bei Glimmentladung an einer Spitze kann nicht als Folge einer Leitungsfähigkeit der Luft aufgefasst werden.

2. Ein elektrisch geladener Leiter (oder Isolator) in unipolar elektrischen Wind gebracht verliert seine Ladung nicht, falls die Elektrisirungen gleichartig sind, auch wenn sein Potential viel höher ist als das der elektrisirten Luft. Im entgegengesetzten Fall verliert er seine Ladung vollständig und erhält die entgegengesetzte entsprechend dem an der betreffenden Stelle herrschenden Potential.

3. Gewöhnliche metallische Sonden geben, namentlich bei niedrigen Potentialwerten, nicht den richtigen Verlauf der Niveauflächen und Stromlinien, wohl aber Tropfen- oder Flammen-collectoren, insoweit sie nicht selbst zur Aenderung des elektrischen Zustandes Veranlassung geben.

4. Positiv und negativ elektrisirte Luft breiten sich in gleicher Weise aus, die Elektrisierung kann somit nicht bedingt sein durch die Anwesenheit frei beweglicher, wesentlich verschieden gearteter elektrischer Teilchen (Elektronen).

5. Die convective Strömung erfüllt den ganzen Raum rings um die Spitze. Das durch die Kundt'schen Figuren abgegrenzte Gebiet ist nicht das Entladungsgebiet, sondern es ist der Raum, in welchem der elektrische Wind genügend hohe Spannung besitzt, um beim Auftreffen auf die Platte Glimmentladung hervorzurufen.

6. Hinter einer senkrecht zu den Stromlinien gestellten isolirenden Tafel entsteht ein von elektrisirter Luft freier Raum (elektrischer Schatten).

7. Der elektrische Wind vermag eine Oeffnung in einem zur Erde abgeleiteten Schirm merklich zu durchdringen, wenn dieselbe (bei der angewandten Empfindlichkeit des Elektrometers) über 1 cm Durchmesser besitzt, er dringt aber nicht in merklicher Menge durch ein abgeleitetes Drahtgitter mit kleineren Maschen. (Nur gültig für die speciellen Versuchsstände.)

8. Von zwei entgegengesetzt elektrischen Spitzen ausgehende elektrische Winde durchdringen sich unter Wirbelbildung der Luft, welche wechselnde Ablenkung der Stromlinien der elektrischen Teilchen bedingt.

9. In dem Gebiet, in welchem sowohl positiv wie negativ elektrische Luft vorhanden ist, ist die Luft scheinbar leitend.

10. Das Verhältniss der Entladungsgeschwindigkeiten gleicher und gleichhoch, aber ungleichnamig geladener Conductoren lässt einen Schluss ziehen auf das Mengenverhältniss positiv und negativ elektrischer Teilchen an der betreffenden Stelle.

11. Die von den beiden Spitzen ausgehenden Winde vereinigen sich auch bei gleicher Höhe der Spannung auf beiden Elektroden nur teilweise; ein grosser Teil geht unverändert zu den Wänden des Zimmers. Die elektrischen Teilchen

folgen also nicht den Kraftlinien, welche vor Beginn der Entladung vorhanden sind, sondern den Kraftlinien des von ihnen selbst geschaffenen elektrischen Feldes, welches von ersterem sehr verschieden ist.

12. Bei ungleicher Elektrizitätszufuhr zu den beiden Elektroden umhüllt die in reicherer Menge auftretende elektrisirte Luft auch die entgegengesetzte Elektrode.

13. Zwei Sonden, die sich nur in positivem oder nur in negativem elektrischen Wind befinden, geben bei der Verbindung nur so lange einen Strom, bis die am Orte des niedrigeren Potentials befindliche Sonde das Potential der anderen angenommen hat; dagegen geben zwei Sonden, von welchen sich die eine im positiven, die andere im negativen Wind befindet, einen dauernden Strom.

14. Wechselströme erzeugen keinen elektrischen Wind und machen auch die Luft nicht (scheinbar) leitend.

Karlsruhe, den 10. September 1901.

(Eingegangen 11. September 1901.)