ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 20.

1. *Beiträge zur Theorie der elektrischen Entladung in Gasen; von H. Sieveking.*

(Gekürzte Karlsruher Habilitationsschrift.)¹⁾

Faradays Theorie der Entladung sagt aus, daß eine elektrische Entladung eintritt, sobald eine bestimmte Entladungsspannung erreicht ist, bei welcher die dielektrische Elastizitätsgrenze überschritten wird. Eine Bestätigung dieser Theorie glaubte Faraday in den Versuchen von Harris über Schlagweiten und Entladungsspannung zu erblicken. Die Faradaysche Theorie bezieht sich indes nicht eigentlich auf Elektrodenspannungen, sondern auf das Entladungspotentialgefälle. Nach Einführung dieser Größe oder des mit ihr gleichbedeutenden „Entladungsgradienten“ würde also nach Faradays Auffassung eine *disruptive* Entladung einsetzen, sobald der kritische Wert des Entladungsgradienten erreicht ist.

Die Messung des Entladungsgradienten stößt nun aber auf große Schwierigkeiten. Bekanntlich bestehen polare Verschiedenheiten. Der Entladungsgradient ist nach Faraday, G. Wiedemann und Rühlmann u. a.²⁾ am negativen Pol kleiner. Schwer zu erklären ist auch der Entladungsverzug.

Die Vermutung, daß eine positive Lufthülle an der Kathode störend wirke, ließ die Vermeidung des Kontaktes von Metall und Gas durch Verwendung elektrodensloser Röhren erwünscht

1) Freiburg i. Br., Speyer & Kaerner 1906; vgl. dort die Figuren, Skizzen und ausführlichen Tabellen.

2) Faraday, Exp. Unters. § 1501. p. 431, § 1503; G. Wiedemann u. R. Rühlmann, Pogg. Ann. 145. p. 384. 1872; W. C. Röntgen, Entl. d. El. in Isolatoren. Gött. Nachr. p. 396. 1878; K. v. Wesendonck, Wied. Ann. 39. p. 577. 1890 und 60. p. 209. 1897; J. Precht, Wied. Ann. 49. p. 150. 1893; H. Sieveking, Ann. d. Phys. 1. p. 291. 1901; F. Tamm, Ann. d. Phys. 6. p. 259. 1901; K. Przibram, Phys. Zeitschr. 4. p. 843. 1903; P. Ewers, Ann. d. Phys. 17. p. 781. 1905, u. Münchn. Habilitationsschr. Leipzig 1905.

erscheinen. Solche Versuche wurden zuerst von O. Lehmann¹⁾ ausgeführt. Neuerdings hat derselbe²⁾ gefunden, daß die *Weite* der Gefäße von Einfluß auf die Entladungsgradienten ist, wenn diese so gering ist, daß der Kathodendunkelraum, welcher sich *nach* Eintritt der Entladung bildet, eingeschränkt wird.

Ich wiederholte zunächst die Versuche von O. Lehmann mit großem Ballon. Die Versuche ergaben eine Bestätigung dafür, daß Influenz in der Glashülle stört, auch nach sorgfältigster Reinigung mit heißem destilliertem Wasser. Die Versuche erfolgten in der Weise, daß nacheinander ein Ballon von 20 cm Durchmesser, aus dem die Luft bis auf 0,002 mm Hg entfernt war und eine luftgefüllte Glaskugel von gleicher Beschaffenheit und Größe in das Feld eines Plattenkondensators gebracht wurden. Nach gemessener Exposition wurden die Platten abgeleitet und die Wandungen des Ballons mit einem entfernt aufgestellten Quadrantenelektrometer verbunden.

Es geschah dies durch Annäherung eines auf Schienen laufenden Wagens, auf dem ein Paraffinklotz ruhte. Zwei starke Drähte waren in denselben eingelassen; dieselben sind durch dünne Kupferdrähte mit dem Elektrometer verbunden. Zwei an Seidenschnüren aufgehängte Elektrophordeckel erzeugen das elektrische Feld; ein Bügel dient zum Ableiten beider Quadranten. Eine Verschiedenheit im Verhalten der luftleeren und der luftgefüllten Kugel *war nicht zu konstatieren*. Nur wenn die evakuierte Kugel in rasche Umdrehung versetzt wurde, ließ sich mit gut ausgeruhtem Auge eine schwache Entladung erkennen, ähnlich wie bei der Annäherung einer geriebenen Ebonitstange.

Trotz der Schwierigkeiten, welche sich der Bestimmung der Entladungsgradienten entgegenstellen, kann die Tatsache, daß sichtbare Entladung mit oder ohne Verzug erst nach Überschreiten einer bestimmten Spannung eintritt, als gesichert gelten. Bis jetzt liegen zwei Erklärungen dafür vor:

1. *Die Theorie von Faraday*. Dieselbe ist nicht ausreichend, die polaren Unterschiede der Entladungsvorgänge aufzuklären.

1) O. Lehmann, Elektr. Lichterschein. p. 39. 1898.

2) O. Lehmann, Boltzmann-Festschrift p. 287. 1904.

2. Die elektrolytische Theorie von J. J. Thomson.¹⁾

Die Unzulänglichkeit der ersteren suchte O. Lehmann²⁾ zu beseitigen durch Annahme einer konvektiven Strömung vor Eintritt der Entladung, welche wegen verschiedener Entladungsfähigkeit positiv und negativ elektrisierter Luft zunächst zur Bildung einer positiven Lufthülle an der Kathode führt.

Auch die elektrolytische Theorie macht die Annahme, daß bereits *vor* Eintritt der Entladung ein konvektiver, lichtloser Strom stattfindet, betrachtet aber den Entladungsvorgang nicht als prinzipiell davon verschieden, sondern lediglich als plötzliches automatisches Anschwellen dieses konvektiven Stromes, wobei die polaren Verschiedenheiten durch die verschiedenen Maße der positiven und negativen Ionen hervorgerufen werden.

Neuere Modifikationen der J. J. Thomsonschen Theorie von Kaufmann³⁾, G. C. Schmidt⁴⁾, Simon⁵⁾ u. a. machen dieselbe Aufnahme. Ein experimenteller Nachweis des lichtlosen, der Entladung vorhergehenden Stromes steht aber noch aus. Vorläufige Versuche von O. Lehmann⁶⁾ in dieser Richtung blieben unentschieden.

1. Schwierigkeiten der Untersuchung.

Die Schwierigkeiten, die der Lösung des Problems entgegenstehen, sind sehr erhebliche, nämlich:

A. Die Notwendigkeit der Verwendung der größten technisch herstellbaren Rezipienten.

Aus den umfassenden Untersuchungen O. Lehmanns auf dem Gebiete der elektrischen Entladungen ist ersichtlich, daß nur bei Anwendung sehr *weiter* Gefäße einfache Verhältnisse zu erwarten sind, in welchen durch die Gefäßwände der Dunkelraum nicht eingeschränkt wird. Schon der Umstand, daß solche großen Rezipienten bisher von gar keiner Seite

1) J. J. Thomson, Die Entlad. d. Elektr. d. Gase. Leipzig 1900.

2) O. Lehmann, Wied. Ann. 22. p. 330. 1884.

3) W. Kaufmann, Ann. d. Phys. 2. p. 158. 1900.

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

5) H. Th. Simon, Phys. Zeitschr. 6. p. 301. 1905.

6) O. Lehmann, Boltzmann-Festschrift p. 287. 1904 und Verhandl. d. Naturw. Vereins Karlsruhe XVIII. 1905.

gebraucht worden sind, läßt erkennen, daß die Handhabung dieser großen Apparate sehr viel umständlicher ist, als die gewöhnlich gebrauchten engen Röhren.

Ihre Notwendigkeit erhellt aus der von O. Lehmann beobachteten Erscheinung, daß schon bei 400 Volt Elektroden-spannung Entladungen bei Röntgenvakuum auftraten, falls der Dunkelraum genügend Platz hatte, seine normale Dicke anzunehmen. Die von mir benutzten Rezipienten waren dieselben, welche bereits zu den erwähnten O. Lehmannschen Versuchen gedient hatten. Sie haben einen Inhalt von etwa 60 Litern, über diese Dimensionen hinauszugehen, war unmöglich.

B. Die zweite Schwierigkeit liegt in der Notwendigkeit mit bester herstellbarer Isolation zu arbeiten.

Die hypothetischen, unterhalb der Grenze der sichtbaren leuchtenden Entladung auftretenden Ströme sind, falls sie überhaupt existieren, wie aus den erwähnten, vorläufigen Versuchen zu schließen ist, von so niedriger Größenordnung, daß die Verwendung der gewöhnlich zur Verfügung stehenden *Galvanometer* von vornherein als aussichtslos zu betrachten ist. Es kämen höchstens Instrumente von der Empfindlichkeit des Einthovenschen Saitengalvanometers in Betracht. Dasselbe erlaubt Ströme von der Ordnung 10^{-12} Amp. nachzuweisen.¹⁾ Ein solches stand nicht zur Verfügung. Zur Messung der Stromstärke blieb somit nur die *elektrometrische* Methode übrig. Bei dieser ist aber die Dauer einer Messung beträchtlich und damit auch der durch fehlerhafte Isolation bedingte Verlust. Die Untersuchungen von Elster und Geitel über die Elektrizitätszerstreuung in Luft haben zur Folge gehabt, daß die früher üblichen Isolatoren Glas, Paraffin, Ebonit, Siegelack jetzt meist ersetzt werden durch Bernstein, Quarz und Schwefel. Wenn es gelingt, Stützen aus diesen Materialien mit Sicherheit vor einem Feuchtigkeitsüberzug zu schützen, so ist der Abfluß von Elektrizität über dieselben bekanntlich zu vernachlässigen gegenüber dem Verlust durch die Außenluft.

1) W. Einthoven, Ann. d. Phys. 12. p. 1059. 1903.

C. Luftleitung.

Wurde eine Kugel von 5 cm Durchmesser auf das Elektrometer aufgesetzt, so wurde das auf 4000 Volt geladene Instrument in weniger als 3 Stunden vollständig entladen. Daraus folgt, daß auch die *Luftleitung* beträchtliche Verluste verursachen kann. Es ist nicht möglich, für dieselben einen konstanten Wert in Abzug zu bringen, wie bei radiometrischen Messungen in einem geschlossenen Gehäuse. Im offenen Zimmer schwanken die Werte beträchtlich; das Anzünden einiger Flammen, noch besser das Rauchen einer Zigarre genügt häufig, um den Betrag der Zerstreuung auf etwa $\frac{1}{5}$ zu reduzieren. Um diese Verluste möglichst zu verkleinern, wurden die Zuleitungen möglichst vor direkter Berührung mit der Außenluft geschützt. Später wurde diese Schwierigkeit *ganz* umgangen durch Ladung des Elektroskopes im Rezipienten.

D. Empfindlichkeit der Meßinstrumente.

Endlich verlangen die Meßinstrumente einen hohen Grad von *Empfindlichkeit*, um Ladungsverluste in kurzer Zeit bemerkbar zu machen. Von der unteren Grenze der Größenordnung der in Betracht kommenden Werte kann man durch die Überlegung eine Vorstellung gewinnen, daß in dem Strome mindestens ein Ion (Elektron) sich bewegen muß, d. h. konstanter Strom besteht, indem 1 Elektron auf dem Wege ist. Sei l der Abstand des geladenen Konduktors von der mit Drahtnetz bedeckten zur Erde abgeleiteten Gefäßwand und v die Ionengeschwindigkeit, so ist die Zeit, die ein Ion braucht, um vom Konduktor an die Gefäßwand zu gelangen,

$$t = l/v;$$

die Ladung, die ein Ion mit sich führt, beträgt

$$e = 3,4 \times 10^{-10} \text{ E.S.E. },$$

oder

$$1,13 \times 10^{-19} \text{ Coulombs (= Elementarquantum).}$$

Unter der Annahme, daß nur *ein einziges* Ion sich in dauernder Bewegung zwischen dem Konduktor und der Gefäßwand befindet, ein Vorgang, der die untere Grenze der Stromstärke darstellt, betrüge letztere:

$$i = e/t.$$

Setzen wir

$$v = 3 \times 10^9 \text{ cm/Sek. (J. J. Thomson 1897),}$$

$$l = 25 \text{ cm,}$$

so wird

$$i = ev/l = \frac{1,13 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^9}{25} = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ Amp.}$$

Ein Strom von dieser Größenordnung läßt sich mit den gewöhnlichen Galvanometern nicht messen. Bedient man sich zur elektrometrischen Messung des Entladungsstromes eines Elektrometers von der Kapazität C , ist ferner V der Spannungsabfall in der Zeit t , so ist die Stromstärke

$$i = C \frac{V}{t}.$$

Sei

$$C = 10 \text{ elektrost. Einheiten,}$$

$$V/t = 500 \text{ Volt/Stunde} = \frac{500 \text{ E.S.E.}}{3600 \text{ Sekunde}} = \frac{500}{1080000} \frac{\text{E.S.E.}}{\text{Sek.}},$$

so wird

$$i = \frac{10 \cdot 500}{1080000} \text{ e.s.e.} = \frac{10 \cdot 500}{1080000} \cdot \frac{10^{-9}}{3} \text{ Amp.,}$$

somit

$$i \cong \frac{5}{3} \times 10^{-12} = 16 \times 10^{-13} \text{ Amp.}$$

Das heißt ein Strom, der nur etwa den zehnten Teil der Intensität desjenigen Stromes besitzt, der mit der dauernden Bewegung eines Ions verknüpft ist, müßte mit einem Spannungsabfall von 500 Volt pro Stunde am Elektroskop verbunden sein. Da der normale Verlust in freier Luft etwa eben so hoch ist, müßte bei Eintritt einer lichtlosen Entladung unter obiger Voraussetzung des Minimalstromes eine Verzehnfachung eintreten. Unter ganz ähnlichen Voraussetzungen berechnet O. Lehmann¹⁾ bei einer Elektronengeschwindigkeit von 10^7 m , einer Kapazität von $\frac{1}{9} \cdot 10^{-11} \text{ Farad}$ und einem Elektrodenabstand von 0,6 m den Spannungsverlust zu 2,34 Volt/Sek. oder 8400 Volt pro Stunde. Auch diese Größe muß sich mit einem Elektrometer, wie es oben beschrieben, ohne Schwierigkeit erkennen lassen.

1) O. Lehmann, l. c. p. 35.

2. Der Apparat.

Zwei tubulierte Luftpumpenglocken von je 30 Liter Inhalt wurden unter Zwischenkittung eines Zinkringes von 0,2 cm Dicke, 28 cm innerem und 32 cm äußerem Durchmesser aufeinander gekittet. In den einen Tubulus ist ein Quarzrohr eingesiegelt von 25 cm Länge und 2 cm Lichtweite. Mit Rücksicht auf die Zerbrechlichkeit des Quarzrohres wurde im Innern ein Bernsteinpfropfen eingesetzt, der das Gewicht der Elektrode unterstützte. Die Elektrode besteht aus einer Messingkugel von 5 cm Durchmesser; die gegenüberliegende Elektrode, eine bis zum Ende in Glas eingeschmolzene Messingstange, die in eine feine Spitze auslief. Dieselbe war während der Versuche dauernd geerdet. Das ganze elektrische Ei ist mit einem Netz aus Messingdraht ausgekleidet, das sich dem Innern möglichst in seiner ganzen Ausdehnung anschmiegt; getragen wird dasselbe von dem Zinkring. Es liegt ebenfalls an Erde. Das Ei ist horizontal auf einem Holzgestell gelagert und in zwei Drahringe eingesetzt, durch die ein starkes Magnetfeld erregt werden kann, dessen Kraftlinien parallel zur Längsachse des Eies verlaufen. Die Evakuierung erfolgte durch eine automatische Rapsche Quecksilberluftpumpe, die in etwa 36 Stunden ein Vakuum von $\frac{1}{100}$ bis $\frac{1}{1000}$ mm Hg erzielte. Die Druckmessung geschah mittels Manometer nach Mc.Leod. Die Leitung zum Manometer zweigte ab von der Leitung, die das elektrische Ei mit der Pumpe verband, was allerdings nur dann zulässig ist, wenn der Druck, wie es hier geschah, erst einige Zeit nach Abstellung der Pumpe abgelesen wird. Als Elektrizitätsquelle diente eine kleine Influenzmaschine mit Doppelrotation von 25 cm Scheibendurchmesser.

Um auf einem Konduktor ein beliebiges konstantes Potential herzustellen, kann man ihn mit der dauernd laufenden Maschine, zweckmäßig unter Anschaltung einer Kapazität und Zwischenschaltung eines großen Widerstandes zum Ausgleich von Potentialschwankungen verbinden. Einen Überschuß kann man durch Saugspitzen zur Erde leiten. Man muß darauf achten, daß die Spitze stets negativ elektrisch ist mit Rücksicht auf die bekannte Eigentümlichkeit der negativen Elektrizität, leichter aus Spitzen auszuströmen als die positive Elektrizität. Will man niedrigere Spannungen als 2000 Volt dauernd auf einem

Konduktor halten, so empfiehlt es sich, die Spitzenregulierung in ein evakuiertes Glasrohr zu bringen. Man kann so einen in der Nachbarschaft des elektrischen Eies befindlichen Konduktor auf jedes beliebige positive oder negative Potential zwischen 1500 und 10000 Volt bringen.

Zur Vermeidung von Ausströmungen und Influenzwirkungen ist es durchaus notwendig, die Elektrisiermaschine mit einem geerdeten Drahtnetz zu umgeben.

O. Lehmann hat bei seinen Versuchen gefunden, daß schon sehr kleine Fünkchen, z. B: beim Zellschalter eines Akkumulators oder am Kollektor einer Hochspannungsdynamomaschine dazu führen können, Entladungsverzüge aufzuheben, mithin die Werte des sogenannten Entladungsgradienten *bedeutend* zu ändern. Er benutzte aus diesen Gründen tunlichst *keine* Influenzmaschine, sondern falls stetige Änderung hoher Potentiale erwünscht war, einen großen Elektrophor. Um Sicherheit zu erhalten, daß bei der beschriebenen Versuchsanwendung mit der Influenzmaschine die unvermeidlichen Fünkchen nicht störten, wurden auch vergleichende Messungen mit einem solchen Elektrophor gemacht, wobei ebenfalls der Durchgang größerer Elektrizitätsmessungen vermieden wurde.

Endlich habe ich als Elektrizitätsquelle einen Hochspannungsakkumulator verwandt; derselbe hatte 1000 in Reihen à 20 geschaltete Zellen; die maximale Spannung betrug 2100 Volt. Die Ableitung des einen Poles zur Erde erfolgte über einen Glyzerinwiderstand.

3. Elektrizitätszerstreuung.

Die Messung erfolgte derart, daß bei langsamer Ladungszufuhr die Entladungsspannung bestimmt wurde; dann wurde wieder aufgeladen, bis die Spannung diesen Betrag fast von neuem erreichte mit einer Annäherung von etwa 50 Volt, darauf wurde der Abfall der Spannung in einer bestimmten Zeit beobachtet; abnorme Zerstreuungen in der Nähe des Entladungspotentiales waren *nicht* zu konstatieren. Doch waren infolge der Luftleitung die Werte so hoch, daß sich eine Einschließung des Elektroskopes ins Innere des Rezipienten notwendig machte. Ich verzichte daher hier auf die Wiedergabe der ersten Messungen und wende mich gleich zu den

4. Versuchen mit Innenladung.

Es kam darauf an, das ganze Elektroskop mit Zerstreuungskugel in das Vakuum einzuschließen und dort zu laden. Daß Elektroskope im Vakuum funktionieren, ist bekannt. Ausführlich handelt O. Lehmann¹⁾ (Entladungen p. 520ff.) darüber. Wollte man das Elektroskop selbst evakuieren, so würden große technische Schwierigkeiten entstehen. Wollte man ferner Entladungen im Innern des Elektroskopes untersuchen, so würden wieder die engen Dimensionen eine freie Ausbreitung der Entladung beeinträchtigen. Diese Schwierigkeiten fallen fort, wenn man das Elektroskop als ganzes in ein größeres Vakuumrohr einschließt. Dafür ergeben sich aber zwei weitere Schwierigkeiten. Die Dimensionen des einzuschließenden Elektroskopes sind naturgemäß klein; dadurch wird der Abstand zwischen dem isolierten Teil desselben und dem Gehäuse sehr klein und somit wird die Ladung sehr erschwert. Die in einigen Millimetern Abstand befindliche Gehäusewand bietet dem Übergang der Elektrizität einen bequemen Weg. Bei Drucken von 0,01 mm aufwärts habe ich überhaupt *keine* im Meßbereich des Instrumentes liegende dauernde Ladung erhalten können. Freilich vermehrt sich die auf p. 214 berechnete Stromstärke auf etwa das 10fache mit Verminderung des Abstandes. Andererseits wird die Kapazität des Elektroskopes kaum geändert durch Verlegung in den Rezipienten. Somit gestalten sich die p. 213 u. 214 berechneten Verhältnisse noch wesentlich günstiger, insofern der elektrometrisch gemessene Strom von $C \times 500$ Volt/Stunde nur noch etwa $\frac{1}{100}$ des Minimalstromes betragen würde.

Eine zweite Schwierigkeit bietet die Ladungszuführung.

Die beste Lösung der Frage ist ein im Vakuum bei vollständigem Luftabschluß *verschiebbares* Elektroskop. In einem der im hiesigen Institut vorhandenen großen Entladungsgefäße befindet sich eine Vorrichtung, die dies ermöglicht. Dieselbe besteht aus einem Barometerverschluß, den die Fig. 1 zeigt.

Das eingeschlossene Elektrometer ist ein von Günther & Tegetmeyer geliefertes Hochspannungselektrometer mit

1) Vgl. O. Lehmann, Verhandl. des Karlsruher Naturw. Vereins 15. p. 63 ff. 1902.

Bernsteinstütze, der Zerstreuungskörper eine Kugel von 1 cm Radius an einem mit Siegelack überzogenen Stift von 8 cm Länge. Die obere Elektrode ist eine Halbkugel aus Aluminium

Fig. 1.

von 2 cm Durchmesser, deren Wölbung nach unten zeigt. Das Gehäuse des Elektroskopes wird von einer der ganzen Länge nach mit Glas überzogenen Eisenstange getragen und ist durch dieselbe in leitender metallischer Verbindung mit dem Quecksilber des Barometerverschlusses. Letzteres sowie das Drahtnetz *N* sind dauernd geerdet durch Anschluß an die Wasserleitung. *R* ist ein Draht ring von 1100 Windungen.

Ehe ich das Elektroskop in den Rezipienten brachte, überzeugte ich mich davon, daß der Normalverlust nicht mehr als 50—100 Volt pro Stunde betrug, bei einer Anfangsspannung

von 2000 Volt. Nach Einführung in das elektrische Ei betrug die Zerstreuung 30—60 Volt/Stunden. Mit Beginn der Evakuierung wurde das Elektroskop auf +2100 Volt geladen. Nach 1 Stunde betrug die Spannung nur noch 700 Volt, der Druck war auf 5 cm gesunken. Nach 9 Stunden bei einem Druck von 0,18 cm Hg ließ sich das Elektroskop nicht höher laden als etwa 300 Volt; Spannungen unter 500 Volt mußten an einem außerhalb des Eies befindlichen Elektroskop gemessen werden, da die sichere Ablesung des eingeschlossenen Instrumentes infolge der störenden Trägheit der Nadel erst bei dieser Grenze möglich wurde. Die eigentlichen Messungen konnten daher erst bei einem Druck von 0,008 mm abwärts ausgeführt werden. Später habe ich diese Schwierigkeiten durch Einführung eines empfindlicheren Elektroskopes umgangen. Der Meßbereich eines Elektroskopes in der Elster und Geitel-schen Form wurde durch Anbringung zweier in Drahtschar-

nieren hängenden Aluminiumblätter bis auf etwa 1000 Volt erweitert. Die damit gemachten Beobachtungen werde ich im Abschnitt 8 unter Spitzenentladung anführen. Bei 0,008 mm gelang es, das Elektroskop¹⁾ auf +660 Volt zu laden. Nach 1 Stunde war die Spannung *vollständig* unverändert.

Die erste Messung mit negativer Elektrizität bei einem Druck von 0,007 mm und einer Spannung von 570 Volt ergab das gleiche Resultat. Bei einem Druck von 0,006 blieb eine positive Ladung von 1185 Volt 7 Stunden lang vollständig ungeändert. Eine Störung durch Trägheitseinflüsse der Elektrometernadel kam bei dieser Spannung nicht mehr in Frage, denn bei jeder Drehung des Elektrometers geriet dieselbe in lebhaftes Schwingungen. Bei einem Druck von 0,003 betrug die erreichbare Ladung 1804 Volt, bei 0,002 ca. 2400 Volt; eine bei 0,002 mm erteilte Ladung auf 2200 Volt zeigte in 14 Stunden *keine* Abnahme. Die Isolation des leeren Raumes für diese dicht bei der Entladungsspannung liegende Spannung ist also *vollständig*.

Das gleiche Resultat ergab eine Wiederholung des Versuches, bei der eine wesentlich größere Annäherung an die Maximalspannung erreicht wurde. Bei der höchsten Verdünnung ($p = 0,0015$) gelang es unter besonderer Vorsicht bei Zufuhr der Ladung über eine leicht mit Glycerin befeuchtete Schnur bis an die obere Grenze des Meßbereiches des Elektrometers, ca. +4000 Volt, zu bringen; auch diese Spannung war nach 14 Stunden vollständig erhalten.

5. Einwirkung des Magnetfeldes.

Die Erregung eines schwachen Magnetfeldes mittels des Drahttringes R brachte jede Ladung sofort zum Verschwinden bis auf einen kleinen Restbetrag. Bei einem Magnetisierungsstrom von 1,7 Amp. sank die Spannung sprunghaft um 600 Volt. Stärkeres Magnetfeld entlud total. Die Feldstärke des Ringes betrug 40 C.G.S. bei 1,7 Amp. Bei schwächerer Magnetisierung ($i = 0,5$ Amp.) erfolgte der Spannungsrückgang allmählich. Die Spannung sank beim Ein-

1) Das Elektroskop hatte eine Kapazität von 9 cm.

schalten um 450 Volt, dann bei dauernder Wirkung des Feldes in der ersten Stunde um 300 Volt, in der zweiten ebenfalls um 300 Volt. Ohne Magnetfeld hatte sich die Spannung mehrmals 12 Stunden unverändert gehalten.

Daß in diesem Fall, wo vor der Einwirkung des Magnetfeldes ein Verlust nachweisbar nicht auftritt, eine Zerstreuung durch den Magneten erfolgt, ist sehr schwer verständlich. Die Erscheinung bildet eine wesentliche Stütze für die Annahme des hypothetischen lichtlosen Stromes. O. Lehmann¹⁾ macht darauf aufmerksam, indem er schreibt: „Während sich nun unschwer Hypothesen ersinnen lassen, welche diesen Einfluß des Magneten während des Entladungsprozesses erklären, erscheint der Einfluß auf den *Eintritt* desselben völlig rätselhaft, wenn eine lichtlose Strömung vor der Entladung *nicht* vorhanden ist. Wie soll man sich z. B. denken, daß ein Konduktor, welcher auf +1300 Volt geladen, seine Ladung dauernd behält, sie sofort verliert, wenn ein schwaches Magnetfeld erregt wird, dessen Kraftlinien mit denen des elektrischen Feldes zusammenfallen und daß er in diesem Magnetfeld nicht einmal eine Ladung bis zu 420 Volt zu behalten vermag?“

Es bleibt — nach Ansicht von O. Lehmann — nur übrig, auf eine Strukturveränderung und damit verbundene Verminderung des Potentialgradienten zu schließen. Eine solche Strukturänderung wäre denkbar durch den Einfluß der magnetischen Kraft auf bewegte Elektronen im Molekül, welche elektrische Ströme darstellen. Ist ein bewegtes Ion vorhanden, so entsteht durch Erregen eines magnetischen Feldes eine Rotation, deren Geschwindigkeit von der Masse des Elektrons abhängen wird.

Riecke²⁾ hat für den Fall, daß die Niveauflächen mit der Oberfläche der Kathode konzentrische Zylinder sind, die Bahn eines Elektrons berechnet und findet eine Spirale, die sich asymptotisch einem Kreise nähert, dessen Halbmesser um so kleiner ist, je größer die magnetische Feldintensität ist; hiermit bringt er die Kontraktion des Dunkelraumes im Magnetfeld in Beziehung.

1) O. Lehmann, Boltzmann-Festschrift p. 287. 1904.

2) E. Riecke, Physik. Zeitschr. 3. p. 182. 1902.

Diese Kontraktion des Dunkelraumes ist vielleicht die Ursache der entladenden Wirkung des Magnetfeldes, denn die Ausbreitung des Dunkelraumes bei der Entladung wächst mit zunehmender Verdünnung; einer Kontraktion durch das magnetische Feld würde also ein Zustand weniger fortgeschrittener Verdünnung und somit unterhalb des „kritischen“ oder Umkehrpunktes, wo mit steigender Verdünnung der Gradient (die „Härte“) wächst, eine Abnahme der dielektrischen Festigkeit entsprechen.

Hiernach wäre auch verständlich, warum die entladende Wirkung des magnetischen Feldes nur bei großer Verdünnung zu beobachten ist.

Eine Deutung des ganzen Entladungsvorganges unter dem Einfluß des Magnetfeldes auch ohne schon vorhandene Strömung durch Entstehen von Magnetokathodenstrahlen ist schwierig, weil auch die positive Ladung bei Erregung des Feldes plötzlich verschwindet.

6. Einführung von Elektronen.

Die zuletzt beschriebenen Versuche hatten mir die Gewißheit verschafft, daß das Vakuum jede Leitfähigkeit (unterhalb der Entladungsspannung) verloren hatte.

Die in freier Zimmerluft stets vorhandene *Leitfähigkeit* beruht nach H. Geitel¹⁾ auf dem stets vorhandenen Gehalt von Radium- und Thoriumemanation und eventuell der Emanation anderer aktiver Substanzen, die vielleicht in langsamerer Umsetzung begriffen sein kann als die in bekannter Zeit abklingenden Radium- und Thoriumemanationen. Sie ist ferner zurückzuführen auf Spuren radioaktiver Substanzen in den Gefäßwänden und endlich bedingt durch eine wohl überall vorhandene leicht absorbierbare Strahlenart. Die im elektrischen Ei eingeschlossene Luft ist von solchen Einflüssen frei; etwa vorhandene Emanation wird beim Evakuieren mit fortgeführt, und da ferner die Ionisierungsfähigkeit eines Gases mit steigender Verdünnung abnimmt, so kann auch eine eventuell vorhandene minimale Aktivität der Glaswand oder eine Strahlung von außen aus dem Boden oder den Zimmerwänden

1) H. Geitel, Jahrbuch d. Elektronik 1. p. 137.

nicht bemerkbar werden. Es schien aber nicht ausgeschlossen, daß die Bestrahlung mit ultravioletem Licht, mit X-Strahlen oder einem intensiven Radiumpräparat trotz der hohen Verdünnung des Gases eine Ionisierung herbeiführen könnte. Bei einer Verdünnung auf 0,001 mm Hg, d. h. etwa ein Millionstel des normalen Druckes, sind nach Crookes in 1 ccm noch etwa 30 Billionen¹⁾ Moleküle enthalten. Es schien danach möglich, selbst bei großer Verdünnung, wie sie zur Erzielung höherer Spannung erforderlich war, noch eine beträchtliche Ionisierung zu erhalten.

Die künstlich eingeführten Elektronen hätten dann durch das elektrische Feld eine beträchtliche Geschwindigkeit erhalten müssen. Zur Ionenbildung durch Ionenstoß soll nach Townsend die bei einem Potentialgefälle von 20 Volt/cm erteilte Geschwindigkeit genügen.

Von einer Ionisierung durch ultraviolettes Licht mußte ich absehen, da die Einkittung eines Quarzfensters technische Schwierigkeiten gemacht hätte. Mit Röntgenstrahlen hatte bereits O. Lehmann Versuche gemacht. Er riet mir indes davon ab, eine Röntgenröhre zu verwenden, da dieselbe selbst bei größter Vorsicht leicht Anlaß zu störenden Spitzen- und Büschelentladungen gibt, falls nicht der ganze Apparat inklusive Induktorium in einen Blechkasten mit Aluminiumfenster eingeschlossen wird. Es war mir daher besonders lieb, daß mir durch die Liebenswürdigkeit des Hrn. Geh.-Rat Prof. Dr. Engler, dem ich dafür auch hier meinen besten Dank aussprechen möchte, ein Radiumpräparat zur Verfügung gestellt wurde. Dasselbe enthielt 10 mg RaBr_2 von Buchler & Co.

Ich überzeugte mich zuerst davon, daß das Präparat stark genug war, um eine Glasglocke von gleicher Dicke wie das elektrische Ei zu durchdringen. Ein Braunsches Elektrometer mit Bernsteinisolation stand auf einem Bronze-Luftpumpenteller; darüber eine mit Drahtnetz ausgekleidete Glasglocke. Die Ladungszuführung erfolgte durch einen im drehbaren Glasschliff befestigten Draht.

Das im *evakuierten* elektrischen Ei eingeschlossene Elektroskop zeigte sich indessen *vollständig unempfindlich* gegen die

1) J. Stark, Die Entladung in Gasen p. 17. Leipzig 1902.

Strahlung. Ich habe an verschiedenen Stellen das Präparat eine halbe Stunde und länger liegen lassen, ohne dadurch einen Spannungsrückgang zu erzielen. Wenn die Verdünnung nur bis 0,004 mm getrieben war, konnte ich die entladende Wirkung noch unschwer konstatieren. F. Soddy¹⁾ schreibt, daß die entladende Wirkung einer radioaktiven Substanz auf ein Elektroskop aufhören müßte, wenn man das Elektroskop unter die Glocke einer Luftpumpe brächte und dieselbe evakuierte. Das zeigt sich durch den Versuch vollständig bestätigt. Befindet sich das Radium unter dem Rezipienten, das Elektroskop draußen in unmittelbarer Nähe, so zeigt sich die entladende Wirkung sofort. Unmittelbar vor Wiedereintritt der Luft habe ich das Radium 4 Stunden dicht unterhalb der geladenen Elektrode liegen lassen, ohne eine Abnahme der Spannung zu erhalten. Sofort nach Eintritt der Luft ging die Ladung sichtbar herab und war im Verlauf einiger Minuten verschwunden. Ich habe dann versucht, eine Ionisierung im Innern des Eies zu erzielen, dadurch, daß das Radiumpräparat zusammen mit dem Elektroskop in das Innere eingeschlossen wurde. Der Deckel der Ebonitkapsel wurde ein wenig gelockert, um die Luft und Emanation nicht zu behindern; im übrigen blieb das Präparat durch Glimmer verschlossen. Ein starker Draht wurde herumgelegt und mit beiden Enden am Netz aufgehängt. Das Präparat befand sich dicht unter der Mitte des elektrischen Eies, etwa 10 cm vom Rande, ebenso weit von der Achse entfernt. Wie vorausszusehen, wurde die Evakuierung durch seine Anwesenheit sehr erschwert. Man kann bei großen Rezipienten nie ganz sicher sein, ob die Kittung vollständig einwandfrei gelungen ist; bisher war dies freilich bei allen Umkittungen der Fall gewesen. Bei dem hier in Frage kommenden Ei war es stets gelungen auf 1 bis 2 Tausendstel Millimeter zu evakuieren.

Bei Anwesenheit des Radiumpräparates habe ich im günstigsten Fall *einmal* einen Druck von 0,003 mm erhalten; am anderen Tage betrug der Druck bereits wieder 0,008. Ein kontinuierliches Pumpen über Nacht schien mir nicht ratsam

1) F. Soddy, Die Radioaktivität p. 13; übersetzt von G. Siebert. Leipzig 1904.

mit Rücksicht auf den hohen Preis des eingeschlossenen Radiums und die Zufälligkeiten, denen die großen evakuierten Gefäße ausgesetzt sind. Eine besondere Einwirkung auf das Quecksilber der Luftpumpe war nicht zu konstatieren.

Die normalen Entladungen bei Drucken zwischen 0,05 und 0,008 mm zeigten sich durch die Gegenwart der radioaktiven Substanz keineswegs beeinflußt.

Vor allem war es mir interessant, daß der Dunkelraum sich ganz wie sonst ausbildete, mit wachsender Verdünnung breiter wurde, bis er das halbe Ei ausfüllte und gerade an das Präparat heranreichte. In unmittelbarer Nachbarschaft des letzteren bildete sich ein zweiter Dunkelraum um den Fuß des Elektrometers herum, wenn letzteres ebenso wie das Netz an Erde lagen.

Nach G. C. Schmidt¹⁾ ist die Bildung des Dunkelraumes an der Kathode so zu erklären, daß an den Elektroden eine *Verarmung an Ionen* auftritt, die infolge der geringeren Wandlungsgeschwindigkeit der positiven Ionen an der negativen Elektrode sich besonders geltend macht und dadurch dort allein den Dunkelraum bedingt. Der Dunkelraum soll deshalb durch künstliche Ionisierung mittels Kathoden- und Kanalstrahlen oder durch Verwendung lichtempfindlichen Elektrodenmaterials zum Verschwinden gebracht werden. Eine solche Einschränkung des Dunkelraumes durch das Radium habe ich in *keiner* Weise beobachten können. Die Entladungserscheinungen boten keine Abweichungen dar von den vorher beobachteten.

Aus diesen Versuchen geht hervor, daß, im Gegensatz zu G. C. Schmidts Auffassung, wenn die Entladungsgefäße nur hinreichend *weit* gewählt werden, auch eine starke Ionisierung den Dunkelraum, wenn er sich frei ausbreiten kann, nicht beeinträchtigt. Es ist dies von Bedeutung, da die Auffassung des Dunkelraumes als Verarmungsbereich und das Verschwinden desselben bei künstlicher Ionisierung in engen Gefäßen eine Stütze für die elektrolytische Auffassung des Entladungsvorganges bilden.

Leider gelang es nicht, trotz ununterbrochenen zwölfstün-

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

digen Pumpens den Einfluß der Emanation fortzubringen. Sonst hätte nach den Versuchen von R. J. Strutt¹⁾ und W. Wien²⁾ die negative Ladung durch den Transport negativer Elektrizität durch die β -Strahlen sogar zunehmen müssen.

Eine Selbstaufladung des Elektrometers habe ich natürlich ebensowenig konstatieren können. Nach Strutt ist ferner die ionisierende Wirkung der α -Strahlen so stark, daß selbst bei dem niedrigsten Druck, den die Quecksilberpumpe erzielt, der Verlust die Ladung durch mitgeführte positive Elektrizität überdeckt. Da ein Teil der α -Strahlen durch das Glimmerplättchen ins Freie gelangt, so wird daselbst die ionisierende Wirkung der Emanation noch wesentlich unterstützt; es mußte also jede Ladung in kurzer Zeit verschwinden. Aus diesem Grunde sind die Versuche leider quantitativ nicht zu verwerten.

Zum Schlusse dieses Abschnittes sei auf die interessante Nebenerscheinung hingewiesen, daß das Radiumpräparat durch den mehrwöchigen Aufenthalt im hohen Vakuum bedeutend an Leuchtkraft und Fluoreszenzerregungsvermögen eingebüßt hat. Ich führe dies auf eine Bildung von Radiumoxybromid zurück.

7. Ladungsteilung.

Nach O. Lehmanns³⁾ früherer Ansicht entsteht der Dunkelraum an der Kathode durch Anhäufung einer mehr oder minder ausgedehnten positiven Lufthülle vor der Entladung, die dadurch zustande kommt, daß die positiven Elektronen des hypothetischen konvektiven Stromes vor der Entladung ihre Ladung schwerer an der Kathode abzugeben vermögen als die negativen an der Anode. Der Versuch, mittels Ladungsteilung eine solche Doppelschicht nachzuweisen, mißlang indessen, was dazu führte, die Hypothese aufzugeben⁴⁾, wenigstens soweit die Lufthülle durch einen der Entladung vorangehenden konvektiven Strom bedingt sein soll. Da auch diese Versuche nur vorläufige waren, habe ich zur Entscheidung

1) R. J. Strutt, *Phil. Mag.* November 1903.

2) W. Wien, *Physik. Zeitschr.* 4. p. 624. 1903.

3) O. Lehmann, *Verh. d. Naturw. Vereins zu Karlsruhe* 15. p. 87. 1902; *Sep.* 17. p. 55. 1904.

4) O. Lehmann, *Boltzmann-Festschrift* 1904.

der Frage die Kapazität des eingeschlossenen Elektrometers im Vakuum und im luftgefüllten Raume für positive und negative Elektrizität genau bestimmt, und zwar durch Ladungsteilung, die einfachste Methode, die hier, wo alle Isolation denkbar gut war, anwendbar war. Ich bemerke noch, daß die Versuche zeitlich vor den Versuchen mit Radium liegen; eine Infektion war also ausgeschlossen.

Wird die obere Elektrode des Eies mit einem Elektroskop verbunden und bei einer bestimmten, genau meßbaren Spannung mit dem im Ei befindlichen ungeladenen Elektrometer zur Berührung gebracht, so kann aus der resultierenden Spannung die Kapazität des letzteren ermittelt werden.

Eine Zinkkugel von 25 cm Durchmesser wurde an einer Schwefelstange von 15 cm Länge aufgehängt und mit der Elektrode *a* (Fig. 1), sowie einem empfindlichen Elektroskop verbunden. Die Kapazität des letzteren war bekannt und der Eichungstabelle des Instrumentes entnommen. Die Ladung erfolgte durch eine Batterie von 400 Kupfer-Zink-Magnesiumsulfat-Elementen, die in Paraffin eingeschmolzen und in Gruppen zu je 40 angeordnet waren.

Durch Ladungsteilung wurde die Summe der Kapazitäten von Elektroskop, Zinkkugel, Elektrode und Zuleitung zu 38 cm bestimmt.

Der Versuch erfolgte nun in der Weise, daß das System auf eine bestimmte Spannung geladen wurde und dann sich selbst überlassen blieb.

War die Spannung bis zu einem genau fixierten Punkt (30 Teilstriche = 237,6 Volt) gesunken, so wurde das vorher abgeleitete Elektrometer mit der Elektrode *a* in Berührung gebracht und die gemeinschaftliche Endspannung sofort abgelesen. Eine Wiederholung der Versuche zeigte recht gute Übereinstimmung.¹⁾

Berechnet man auf Grund der Versuchsergebnisse die Kapazitäten im Vakuum C' und im luftgefüllten Raum C'' , so erhält man $C' = 8,0$ cm; $C'' = 8,9$ cm, daraus $\kappa = 0,89$. Die Abweichung dieses Wertes von 1 ist auffallend hoch; vorerst

1) Vgl. die Originalarbeit.

läßt sich mit einiger Bestimmtheit nur behaupten, daß er kleiner als 1 ist.

Für eine genaue Bestimmung des Verhältnisses, die gewiß erwünscht wäre, müßte einmal eine leichtere Kommunikation beider Konduktoren ausgeführt werden, etwa durch eine Magnetnadel, ferner müßte die eingeschlossene Kapazität größer sein, um die unvermeidlichen Ablesefehler auszugleichen.

Um festzustellen, daß bei positiver und negativer Ladung sich keine Differenzen bei hoher Verdünnung des umgebenden Raumes zeigen, habe ich noch eine größere Anzahl von Messungen ausgeführt. So fand ich für das eingeschlossene Elektrometer als größte Differenz 0,2 cm, d. h. $2\frac{1}{2}$ Proz.; bei Anwendung größerer Spannungen ergab sich überhaupt keine Differenz der Mittelwerte für positive und negative Ladungsteilung.

Man kann übrigens leicht ausrechnen, daß ein Fehler in der Ablesung von 1 Volt bereits 0,2 cm Differenz der berechneten Kapazität bedingt; doch ist die Genauigkeit der Ablesung auf 1 Volt mit Spiegelablesung und Lupe zu erreichen.

8. Spitzenentladung im Vakuum.

Günstiger gestalten sich die Bedingungen für das Zustandekommen eines Stromes unterhalb der Entladungsgrenze, wenn als Elektrode eine Spitze dient. Es ist bekannt, daß zu einem kontinuierlichen Strom zwischen einer Spitze und einer gegenüberstehenden Platte eine Minimalspannung an der Spitze erforderlich ist, die in erster Linie durch die Gestalt der Spitze, durch Natur und Druck des umgebenden Gases, durch die Nachbarschaft anderer Konduktoren und andere Umstände beeinflusst wird. Verbindet man eine Scheibe mit einem Quadrantenelektrometer oder leitet sie über ein empfindliches Galvanometer zur Erde ab, so kann man genau bestimmen, bei welcher Spannung einer genäherten Spitze eine kontinuierliche Strömung gegen die Scheibe einsetzt. Die Spannung, bei der dies der Fall ist, heißt das *Minimumpotential*.

Es ist ferner bekannt, daß, wenn die Spannung einmal den erforderlichen Anfangswert erreicht hat, bei kontinuierlicher Elektrizitätszufuhr ein wesentlich kleinerer Wert genügt, um den Spitzenstrom aufrecht zu erhalten. Man kann so zwei

Minimumpotentiale für eine gegebene Versuchsanordnung bestimmen.

Die Spitze ist in eine Kugel von 1 cm Radius eingelötet und durch eine Schwefelstange von 10 cm Länge isoliert. An der Kugel befindet sich ein 4 mm dicker kurzer Messingstift, der durch Drehen des beweglichen Teiles mit einem von der oberen Elektrode ausgehenden γ -förmigen, vertikal abwärts gerichteten Messingstift in Kontakt gebracht werden kann. Die beiden Stifte sind am Ende mit Siegellack überzogen, um jede störende Spitzenwirkung daselbst auszuschließen. Die Spannungsmessung erfolgt mit einem Braunschen Elektrometer. Die Messungen umfassen ein Druckintervall von Atmosphärendruck bis Wasserpumpenvakuum. Durch allmähliche Elektrizitätszufuhr wurde die Kugelelektrode bis zur Entladungsspannung geladen, nachdem dieselbe bestimmt war, bis nahe an den gleichen Betrag geladen und durch Drehung des beweglichen Teiles der Kontakt mit der Spitze hergestellt. Die Spannung fiel dann auf den in der Tabelle mit V_s bezeichneten Wert.

Die obere Grenze des Meßbereiches des Elektrometers war 10000 Volt. Da diese Spannung nicht überschritten wurde, so ließ sich die Entladung der Kugelelektrode erst von einer bestimmten Druckverminderung an messen; die Grenze liegt etwa bei 350 mm Hg. Jede Beobachtung wurde dreimal hintereinander ausgeführt.

Tab. 1 (p. 229) gibt die Resultate einer Beobachtungsreihe mit einer Platinspitze aus 0,3 mm dickem Draht, oben geschärft, Länge 1,5 cm.

Die Übereinstimmung der einzelnen unmittelbar hintereinander gemachten Beobachtungen ist genügend genau. Dagegen läßt eine gesetzmäßige Beziehung zwischen den Kugel- und Spitzenpotentialen sich nicht erkennen. Oberhalb des Druckes von 340 mm war eine Entladung der Kugel wie aus der Tabelle ersichtlich, mit der Maximalspannung von 10 000 Volt überhaupt nicht zu erreichen.

Trägt man nach P. Ewers¹⁾ die Minimumpotentiale als Ordinaten, die Quadratwurzeln aus den Drucken als Abszissen auf, so ergeben sich nachstehende Kurven.

1) P. Ewers, Ann. d. Phys. 17. p. 813. 1905.

Tabelle 1.

Nr.	Druck in mm Hg	– Elektrizität		– Elektrizität		+ Elektrizität		+ Elektrizität	
		– Elektrizität		– Elektrizität		+ Elektrizität		+ Elektrizität	
		V_m Kugel	V_s Kugel	V vor Ver- bindung mit der Spitze	V_s Spitze	V_m Kugel	V_s Kugel	V vor Ver- bindung mit der Spitze	V_s Spitze
1	740	>10000	—	10000	5500 5600 5500	>10000	—	10000	7100 " " " "
2	640	>10000	—	10000	5500	>10000	—	10000	7000 " "
3	540	>10000	—	10000	5400	>10000	—	10000	6300 6400 6500
4	440	>10000	—	10000	5000	>10000	—	10000	6000 5900
5	340	10000 7000 6400	8000 2200	6000 " " " "	4500 4400 4600	9200	9000	9000	5600 5400 5500
6	240	7000 6000 4800	3000 2500 2000	4500 " " " "	3750 " " " "	9000	6200 6000	8500	5500 " "
7	140	5900 6000 " "	5200 " "	5900 6000 " "	4700 " " " "	7000	4500 5000 4500	6700	5400 " " " "
8	40	3700 " " " "	2400 " "	3700 " " " "	3200 " " " "	4200	1800 1200	4200	1200 " " " "

Diese beiden Größen stehen nach Hrn. Ewers in linearer Abhängigkeit, was zwischen den Drucken 140 und 540 mm für beide Elektrizitäten hier zutrifft.

Fig. 2.

Doch ist folgendes zu bemerken. Der steile Abfall für Elektrizität zwischen 140 und 40 mm beruht auf der für positive Elektrizität bei niedrigen Drucken charakteristischen Eigentümlichkeit (diese Erscheinung, die sich bei Kugelelektroden zeigt, tritt also bei einer *stumpfen* Spitze ebenfalls auf), bei Überladung bis auf einen wesentlich kleineren Restbetrag zu sinken als die negative dies tut. Die Reihe 7 in Tab. 1 hat für negative Elektrizität einen abnorm hohen Wert für die Spitzen V_s ; es muß dabei ein unaufgeklärter Zufall mitgewirkt haben. Ich habe dann die Versuche mit einer wesentlich feineren Spitze aus Silberplatin ausgeführt. Die folgende Tabelle und Kurve veranschaulicht die Resultate.

Tabelle 2.

$\sqrt{p}$	5,5	11,4	15,1 ²	18,8 ³	20,7	23	25	27,4
$V_{s/100} -$	15	17	18	22	24	28	28	32
$V_{s/100} +$	22	26	30	35	38	42	46	48

Hier ist die Beziehung weit besser erfüllt, daß das Minimumpotential und die Wurzeln aus den Drucken in linearer Ab-

hängigkeit stehen. Der Charakter der Entladung war in allen Fällen disruptiv; abnorme Zerstreuungen, die einen Schluß

Fig. 3.

auf lichtlose Entladung ziehen lassen würden, war in keinem Falle vorhanden.

9. Einfluß des Magnetfeldes.

Bei der Einwirkung eines Magnetfeldes auf die Spitzenentladung treten deutliche polare Unterschiede auf.

Zur Erzeugung des Feldes dienten zwei Drahtringe, von derselben Art wie der in Fig. 1 auf p. 218 abgebildete Ring *R*. Der Durchmesser eines Ringes beträgt 76 cm, die Windungszahl 450. Die Feldstärke eines solchen Ringes beträgt pro Ampère Magnetisierungsstrom 7 C.G.S.; also bei der Maximalstromstärke von 40 Amp. war $H = 280$ C.G.S.

Die Einwirkung auf die negative Spitzenladung überwiegt bei weitem. Ich glaube, daß dies darin seinen Grund hat, daß die Kraftlinien bei positiver Spitzenstrahlung eine ausgeprägtere Neigung zeigen in der Achse der Spitze zu verharren.¹⁾ Die negativen Kraft- und Strömungslinien werden stärker nach dem benachbarten Leiter, in diesem Fall das Drahtnetz, hingezogen. Wurde statt der Spitze die gegenüberliegende Kugel geladen und das Magnetfeld erregt, so zeigte sich ein stärkerer Einfluß des Feldes auf die positive Ladung.

¹⁾ Vgl. auch H. Sieveking, Inaug.-Diss. p. 40. Freiburg 1899 und A. Moehlmann, Inaug.-Diss. Freiburg p. 35. 1901.

Das Elektroskop wurde fast immer bis auf einen kleinen Restbetrag entladen; bei negativer Ladung war dieser Rest stets größer. Dies steht in Einklang mit O. Lehmanns¹⁾ Beobachtungen. Auffallend ist, daß das im allgemeinen geerdete Drahtnetz eine Ladung unter dem Einfluß des Magneten wieder bei negativem Vorzeichen viel leichter verliert als bei positivem.

Die entladende Wirkung des Magneten wird wesentlich schwächer, fast verschwindend klein, wenn die benachbarte Kugel nicht geerdet ist. Dies deutet wohl am meisten auf eine Strömung hin. Die entladende Wirkung des Magneten wächst im allgemeinen mit der Stromstärke, erreicht aber rasch ein Maximum; es tritt dann ein plötzlicher Abfall ein bis zu einem Restwert, der meist weit unter der Entladungsspannung liegt. Dieser Wert bleibt indessen selbst durch das stärkste Feld, das ich erregen konnte, unbeeinflußt.

10. Entladung unter Parallelschaltung von Kapazitäten.

Bei den bisher beschriebenen Versuchen könnte der Einwand geltend gemacht werden, daß der hypothetische lichtlose Strom nicht zu erkennen sei, weil bei der geringen Elektrodenkapazität der kleinste Elektrizitätsverlust die Spannung beträchtlich vermindere und daß dann die Hauptbedingung für diesen Strom, *unmittelbare* Annäherung an den Entladungsgradienten nicht mehr erfüllt sei. Der Strom könnte also vorhanden sein und wieder erlöschen.

Deshalb habe ich den Entladungsvorgang unter Anschaltung einer *Kapazität* untersucht.

Die Faktoren, die den Stromdurchgang durch eine Gasstrecke beeinflussen, sind 1. die äußere elektromotorische Kraft, 2. die Spannung an den Enden der Gasstrecke, 3. die Kapazität des Systems, 4. der Widerstand des Systems.

W. Kaufmann²⁾ hat für einen Entladungsvorgang die Bedingungen untersucht, unter denen eine kontinuierliche Gasentladung bei Veränderung dieser Faktoren intermittierend wird. Ich habe versucht, in der von ihm angestellten Rich-

1) O. Lehmann, Boltzmann-Festschrift p. 207. 1904.

2) W. Kaufmann, Ann. d. Phys. 2. p. 173. 1900.

tung messende Versuche zu machen. Es galt für eine gegebene Gasstrecke zuerst die *charakteristische Kurve*, die Abhängigkeit von Spannung und Stromstärke zu ermitteln; alsdann eine zur Entladungsstrecke parallel geschaltete Kapazität zu verändern und zu prüfen, ob bei einem bestimmten Wert der letzteren die kontinuierliche Entladung intermittent würde. Ich benutzte dazu das auf p. 218 abgebildete vertikal gestellte Ei. Die obere Elektrode war eine Stahlspitze, die untere bewegliche eine Magnesiumscheibe von 12 cm Durchmesser. Als Kapazitäten wurden zwei große Papierkondensatoren verwandt. Die Kapazität derselben wurde mit dem ballistischen Galvanometer gemessen und zu 4,2 und 6,8 Mikrof. bestimmt.

Der eine der Kondensatoren ist in 30 Abteilungen geschaltet, die einzeln angeschlossen werden können. Die Isolation ist für Spannungen bis 2000 Volt eine recht gute. Sei V_m die Spannung, bei der die Entladung einsetzt, V_s die Spannung während des Durchganges, so wird man, da die Differenz $V_m - V_s$ bei Drucken zwischen $\frac{1}{10}$ und $\frac{1}{100}$ mm für beide Elektrizitäten sehr verschieden ist, deutliche polare Unterschiede bekommen.

Unter sonst ganz gleichen Bedingungen (Druck, äußere elektromotorische Kraft, Abstand zwischen Scheibe und Spitze) erfolgte ein Durchgang der positiven Elektrizität mit einer Stromstärke von $\frac{1}{10}$ bis 1 Milliamp., während der Durchgang negativer Elektrizität sich nur mit dem Quadrantenelektrometer erkennen ließ. Der Strom konnte bei Versucherscheinungen stets durch das Magnetfeld des Ringes R eingeleitet werden, stieg aber nach Abstellen des Feldes stets an. Mit steigender Stromstärke stieg auch stets die Entladungsspannung. Beispielsweise war für $p = 0,05$ mm:

V_s (Volt)	+725	765	785	810	840	865
i (Skalenteile . .	15	17	23	26	28	35

Die Fundamentalbedingung für einen labilen Zustand, daß bei zunehmender Stromstärke die Spannung sinkt, also dE/di negativ wird, ist hier nicht erfüllt; es stand zu erwarten, daß infolgedessen durch Anschaltung von Kapazität die Entladungserscheinung nur im Moment des Anschaltens vorübergehend gestört, d. h. die Stromstärke dem Sinken der Spannung ent-

sprechend etwas gemindert würde, daß dagegen nach Vollzug der Ladung des Kondensators die Glimmentladung völlig unverändert fort dauern würde. Dies war in der Tat der Fall bei kleiner Kapazität. Wurde aber die Kapazität stufenweise vergrößert, so lagerte sich die von O. Lehmann entdeckte Kondensatorentladung über die Glimmentladung, welche aus der Kaufmannschen Theorie nicht abgeleitet werden kann, wenigstens weder in dessen Abhandlung noch in der neuesten Ausführung von H. Th. Simon¹⁾ Erwähnung findet.

Man erhält dabei prachtvolle Lichterscheinungen²⁾, welche für denjenigen, der sie noch nie gesehen hat, sehr überraschend sind. Als Ursache könnte man sich ein von der Wärmeleitung der Elektrode etc. abhängiges lokales Anwachsen der Temperatur denken, welches vorübergehend Umschlag der Glimmentladung in Funken bez. Lichtbogenentladung bedingt infolge der Bildung von Metaldampf an den erhitzten Stellen; durch den starken Strom und durch Oszillation der Ladung wird der Kondensator völlig entladen, auch wird Wärme zur Dampfbildung gebraucht, so daß die Temperatur wieder sinkt und die Glimmentladung fort dauert, bis wieder aufs neue Umschlag erfolgt. Wird die Kapazität so weit erhöht, daß überhaupt die blitzartigen Entladungen auftreten, so erfolgen sie in um so größeren Intervallen, je höher der Betrag der Kapazität ist.

Geändert wurde durch Zuschaltung der Kapazität nur die Zahl der in einer bestimmten Zeit erfolgenden stoßweisen Entladungen, ferner der Entladeverzug. Letzterer ließ sich durch kurze Erregung des Magnetfeldes immer beseitigen. Wurde der Kondensator nicht dauernd mit der Batterie verbunden, sondern durch eine automatische Vorrichtung lediglich die durch mangelhafte Isolation verlorene Elektrizität erneuert, so zeigte sich kein abweichendes Verhalten. Die automatische Vorrichtung bestand in einem für hohe Spannungen umgeänderten Quadrantenelektrometer, dessen Nadel einen Relaiskontakt schließen konnte, worauf für kurze Zeit die Verbindung des Kondensators mit der Batterie hergestellt wurde. Ein Läutewerk zeigte dies an und sorgte gleichzeitig für die

1) H. Th. Simon, Physik. Zeitschr. 6. p. 301. 1905.

2) O. Lehmann, Ann. d. Phys. 7. p. 7. 1902.

nötige Erschütterung, um die Elektrometernadel zurückzutreiben. Es gelang hier nicht, bei stundenlangem Unterhalten einer Spannung dicht *unterhalb* des Entladungsgradienten, eine Entladung zu erhalten, wie dies bei Erregung des axialen Magnetfeldes immer der Fall war.

Im Gegensatz zu den früher beschriebenen Versuchen sind hier die Bedingungen für das Zustandekommen des lichtlosen Stromes die denkbar günstigsten. Bei dem Auftreten desselben hätte sich aber eine Weiterionisierung durch Ionenstoß bilden müssen, da die Feldstärke annähernd konstant gehalten wurde und somit eine rasch gesteigerte Leitfähigkeit der Gasstrecke, die zu einer Entladung (vielleicht so rasch, daß eben nur Entladung zu bemerken) hätte führen müssen. Das war aber *nicht* der Fall.

Ergebnisse.

1. Wenn auch die Versuche über Spitzenentladung noch kein vollständig geklärtes Bild geben, so *beweisen* doch die Versuche mit Innenladung (Kap. 4), daß ein *lichtloser* Strom, wie ihn die elektrolytische Theorie fordert, *vor der* Entladung nicht vorhanden ist.

Bei sorgfältiger Auswahl des *Isoliermaterials* für die Stützen eines geladenen Konduktors und Vermeidung *jeder äußeren Luftleitung* ist die Isolation des Vakuums für Spannungen *unterhalb* der Entladungsgrenze eine *vollständige*. Eine Zerstreuung, die mit einem lichtlosen Strom *notwendig* verknüpft sein muß, ist *elektrometrisch nicht* nachzuweisen.

2. In *weiten* Gefäßen wird der *Dunkelraum* durch die Anwesenheit einer stark ionisierenden Substanz *nicht* beeinträchtigt, was gegen die Auffassung desselben als *Verarmungsbereich* im Sinne der *elektrolytischen* Theorie spricht.

3. Die Versuche über *Ladungsteilung* (Kap. 7) haben ergeben, daß eine *Ungleichheit* der Kapazität bei positiver und negativer Ladung nicht vorhanden ist, also auch die *früher* von O. Lehmann angenommene Doppelschicht *vor* Eintritt der Entladung *nicht* existiert.

4. Die von J. Elster und H. Geitel im luftgefüllten Raum nachgewiesenen außerordentlich schwachen Ströme, auf Grund deren Hr. Kaufmann die Charakteristik des licht-

losen Stromes aufstellt, sind in einem *vor jeder Ionisierung geschützten* Raum *nicht* vorhanden.

Die ganzen Versuche sprechen für den rein *disruptiven* Charakter des Entladungsvorganges.

5. Bekanntlich ist die elektrische Feldstärke *allein* nicht imstande, die entgegengesetzten Elektronen im Molekül ihrer gegenseitigen Attraktion zu entziehen. Man müßte also vom Standpunkt der Elektronentheorie mit O. Lehmann schließen, daß heftige innere Bewegungen im Molekül hinzukommen, welche durch Zentrifugalkraft etc. die Wirkung des Feldes unterstützen.

Eine Aufklärung dürfte vielleicht am ehesten durch genaues Studium der ebenfalls zunächst völlig rätselhaften magnetischen Einflüsse, der Verminderung des Entladungsgradienten und der Vermehrung der Ladungszerstreuung, zu erhoffen sein, wofern ein Magnetfeld auf die Elektronenbewegung im Molekül beschleunigend oder verzögernd einwirken, oder die dielektrische Festigkeit vermindern kann.

Karlsruhe, Physik. Inst. d. Techn. Hochschule, März 1906.

(Eingegangen 12. März 1906.)