

**9. Ueber die Abhängigkeit des Charakters
elektrischer Dauerentladung in atmosphärischer
Luft von der dem Entladungsraume continuirlich
zugeführten Elektricitätsmenge, nebst einem An-
hange zur Kenntniss der Kugelblitze;
von Max Toepler.**

(Gekürzte Habilitationsschrift.)

Die Mannigfaltigkeit der elektrischen Entladungserscheinungen in freier Luft von Atmosphärendruck erschwert ein Ueberblicken derselben; in vorliegender Arbeit soll nun versucht werden, sie von einem noch nicht gebräuchlichen Gesichtspunkte aus, welcher eine übersichtliche Zusammenfassung gestattet, zu behandeln.

Schaltet man in den Schliessungskreis einer galvanischen Kette oder Accumulatorenatterie einen nicht zu grossen Schlagraum, so fliesst durch letzteren ein Strom. Stromstärke und Spannung im ganzen Stromkreise reguliren sich hier derart, dass in der Stromquelle ein constanter, durch die elektromotorische Kraft der Kette gegebener, willkürlich variabler Sprung der Spannung herrscht. Die Ohm'schen Widerstände im Leiterkreise in Verbindung mit dem eigentümlichen Gaswiderstande der sich im Schlagraume ausbildenden Entladungsform (Glimmen, Büschel etc.) reguliren hier die Stromstärke als abhängig variable Grösse.

Andererseits kann man sich den Fall denken, dass an irgend einer Stelle eines Leiterkreises (mit Schlagraum) eine Elektricitätsquelle liegt, welche die Eigentümlichkeit besitzt, dass durch sie beständig ein constanter Strom von willkürlicher Stärke erzeugt wird, und kann dann nach der sich herstellenden Verteilung der Spannung auf dem Stromkreise und der im Schlagraume auftretenden Entladungsform als abhängig variabler Grössen fragen.

Die letztere Fragestellung gewinnt dadurch praktisches Interesse, dass wir (wie in Abschnitt I näher gezeigt werden wird) in den vielplattigen Influenzmaschinen in der That

Stromquellen der zweitgenannten Art besitzen. Die in vorliegender Arbeit angegebenen Versuche zeigen aber weiter, dass die Einführung der Stromstärke als unabhängig variable Grösse auch an und für sich zweckmässig ist. Die mitgeteilten Beobachtungen ergeben nämlich, *dass die Entladungsform im Schlagraume im wesentlichen durch die Geschwindigkeit der Elektrizitätszufuhr zu den Elektroden eindeutig bestimmt ist.*

In vorliegender Arbeit will ich also versuchen, eine zusammenfassende Darstellung der Abhängigkeit des Entladungsvorganges im Schlagraume von der (mittleren) Stromstärke zu geben, und zwar ausschliesslich für Elektrizitätsentladung durch gewöhnliche Luft von Atmosphärendruck. Schon dieses Gebiet hat einen so grossen Umfang, dass ich mich im wesentlichen auf allgemein orientirende Beobachtungen und Messungen beschränken musste. Eine überwiegende Berücksichtigung hat von mir die Entladung zwischen einer zugespitzten und einer plattenförmigen (Halbleiter-) Elektrode gefunden; in diesem Falle erhält man besonders einfache Entladungsvorgänge.

I. Influenzmaschine als Stromquelle; Elektrodenkapazität.

Als Stromquelle diente bei meinen Versuchen eine 60 plat-
tige Toepler'sche Influenzmaschine. Diese lieferte mit *maximaler* Umlaufgeschwindigkeit ihrer 60 beweglichen Glasscheiben (d. h. für etwa 20 Umdrehungen derselben in der Secunde):

bei 5000 Volt Spannungsdifferenz der Conductoren	2,1 Tausendstel Amp.,		
„ 40000 „ „ „ „	1,9 „ „		
„ 60000 „ „ „ „	1,7 „ „		
„ 80000 „ „ „ „	0,5 „ „		
„ 90000 „ „ „ „	0,1 „ „		

Hierdurch ist der Stromstärken-Spannungsbereich meiner Untersuchungen in vorliegender Arbeit gegeben.

Bei vielplattigen Influenzmaschinen, die mit einem Systeme von schrägen Conductoren versehen sind, ist die Elektrizitätsmenge, welche von den rotirenden Glasscheiben auf die Saugvorrichtungen (Spitzenkämme) der Maschinenconductoren abströmt, bekanntlich der Rotationsgeschwindigkeit der Scheiben nahe proportional, und nahezu *unabhängig* von der Spannung auf den Conductoren.

Gleichgültig, ob der Elektrizitätsfluss im Schlagraume nahe continuirlich (z. B. in Form eines Büschellichtbogens) oder ausgesprochen zeitlich discontinuirlich (als Funkenstrom) erfolgt, gleichgültig ferner, wie gross hierbei die (mittlere) Spannungsdifferenz der Elektroden ist, die benutzte 60 plattige Influenzmaschine entwickelt in der Zeiteinheit angenähert die gleiche (der Rotationsgeschwindigkeit der Maschinenscheiben proportionale) Elektrizitätsmenge.¹⁾

Erst bei grösseren Spannungsdifferenzen als 50 000 Volt nimmt die von den rotirenden Scheiben auf die Maschinenconductoren abfliessende Elektrizitätsmenge rasch ab (wobei im Innern der Maschine der einer Nutzniessung unzugängliche Strom im Systeme der sogenannten Querconductoren zunimmt). Die Abnahme der gelieferten Stromstärke bei sehr hohen Spannungen ist natürlich gegebenenfalles bei Interpretation der im Schlagraume auftretenden Entladungserscheinungen zu berücksichtigen.

Die zunächst etwas eigentümlich erscheinende Einführung der mittleren Stromstärke (fortgeführten Elektrizitätsmenge) als einer *unabhängig* Variablen, der Entladungsform und der Spannungsdifferenz der Elektroden als abhängig variabler Grössen erscheint nach dem Gesagten durchaus gerechtfertigt.

Elektrodenkapazität: Die Auflösung des constanten Maschinenstromes in eine Reihe von Stossentladungen im Schlagraume ist bedingt durch die Möglichkeit, auf den *Leiterteilen* beiderseits des Schlagraumes Elektrizität anzuhäufen.

Ich will unter „*Elektrodenkapazität*“ bei jeder Elektrode die gesamte elektrische Capacität (in Centimetern oder Farad) aller derjenigen Leiterteile verstehen, welche in gutleitender, *metallischer* Verbindung mit dem Einströmungspunkte der Elektrizität in den Schlagraum stehen, und demnach unter Umständen ihre Ladung in letzteren momentan einströmen lassen können.

Sind die Elektroden metallisch mit den Maschinenconductoren verbunden, oder erfolgt die Entladung einfach zwischen den auseinandergezogenen Maschinenconductoren, so ist hiernach die Elektrodenkapazität beiderseits je vom Schlagraume

1) Vgl. hierzu auch Tab. IX im XI. Abschnitte der vorliegenden Arbeit.

bis zu den rotirenden Glasscheiben (der eigentlichen Stromquelle), also die Maschinenconductoren mit umfassend, zu rechnen. Sind *sehr grosse* Widerstände (Flüssigkeitssäulen, Halbleiter) in die Zuleitungen zu den Schlagraumelektroden eingeschaltet, so zählt die Elektrodencapacität nur vom Schlagraume bis zu diesen Widerständen. Ist das Material der Elektrode selbst ein Halbleiter, so ist ihre Elektrodencapacität als *sehr klein* anzusehen.

Ist die Elektrodencapacität beiderseits des Schlagraumes *verschieden* gross, so erfolgt, wie gleich hier vorausgreifend bemerkt sei, der Entladungsvorgang derart, als ob beiderseits die *kleinere* Elektrodencapacität vorhanden wäre; dies gilt jedoch nur so lange, als der Unterschied beider Capacitäten nicht allzugross ist.

II. Klassifikation der Entladungsformen.

Der Durchgang der Elektrizität durch einen Luftraum hängt in qualitativer und quantitativer Hinsicht mit sehr vielen verschiedenartigen Grössen zusammen. Man kann hier unterscheiden — zunächst die in jedem einzelnen Falle *willkürlich festgelegten* Grössen, wie Intensität der Stromzuführung, Schlagweite, Elektrodengestalt, Elektrodencapacität, Luftdruck im Schlagraume, magnetische Feldstärke, Temperatur in ihm, die Gasart, welche den Schlagraum erfüllt (feuchte, trockene Luft) etc. — andererseits aber Grössen wie die Spannungsdifferenz der Elektroden, die Grösse und Gestalt der Fläche, aus welcher die Elektrizität wirklich in den Schlagraum eintritt, die Wirkung des Stromes auf die Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden, die Art der räumlichen Ausbreitung des Elektrizitätsflusses im Schlagraume, die Aenderung des elektrischen Feldes durch die Menge und Verteilung der je gerade im Schlagraume befindlichen elektrischen Teilchen, die chemische Veränderung des Gases im Schlagraume (Ozonisierung eventuell Ionisierung), die Wärmeerzeugung durch den Strom selbst etc., vor allem auch das mehr oder minder energische Mitreissen der Luft (Ausbildung von Gebläsen ¹⁾ durch den Strom). Diese zweit-

1) A. v. Obermayer hat hierbei Windgeschwindigkeiten bis zu 2 m/sec nachgewiesen; vgl. Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien 93. p. 419. 1886.

genannten Factoren lassen sich zwar auch zum Teil willkürlich beeinflussen, sind aber doch im grossen und ganzen nur als *sich selbst gegenseitig regulirende* anzusehen.

Bei Anstellung von Entladungsversuchen (mit constanter Stromzuführung) verfährt man nun derart, dass man für eine bestimmt getroffene Wahl der erstgenannten, willkürlichen Grössen beobachtet, was im Schlagraume vor sich geht. Es ist nun zweierlei möglich; entweder die gegenseitige Selbstregulirung der zweitgenannten Grössen führt zu einem nahezu stationären Zustande des Elektricitätsflusses im Schlagraume oder nicht. In ersterem Falle sprechen wir von einer (zeitlich) nahe continuirlichen Entladung (*Dauerentladung*), wie z. B. im Flammenbogen, in letzterem Falle dagegen von zeitlich discontinuirlicher Stossentladung, deren hervorragendster Repräsentant der Funkenstrom ist.

Formen der nahe continuirlichen Entladung: Die Gesamterscheinung des nahe continuirlichen Entladungsvorganges kann nun, wie die Beobachtung lehrt, sehr verschiedenartig sein. So unterscheidet man

Glimmentladung,
Büschelentladung,
Büschellichtbogen ¹⁾,
Flammenbogen.

Diese Unterscheidung stützt sich zunächst nur auf eine ganz specielle Eigenschaft des Entladungsvorganges, nämlich auf seine Lichterscheinung; sie erweist sich aber auch sonst als recht zweckmässig. Zu berücksichtigen ist hierbei freilich, dass sich überall lückenlose Uebergänge zwischen den einzelnen Entladungsformen beobachten lassen, dass also die Klassification nicht immer streng durchführbar ist. Auch dürfte mit den genannten die Zahl der zweckmässigerweise voneinander überhaupt zu unterscheidenden Entladungsformen, wenigstens bei grösserer Schlagweite ²⁾, noch nicht erschöpft sein.

1) Diese Entladungsart habe ich früher eingehender untersucht; vgl. Wied. Ann. **63**. p. 109. 1897; Abhandl. d. naturw. Gesellsch. Isis in Dresden 1898. p. 3, sowie Beibl. **22**. p. 596. 1898; schliesslich Wied. Ann. **66**. p. 660. 1898 und **69**. p. 680. 1899.

2) Vgl. die Angaben über die „Streifenentladung“ in Abschn. XXII.

Formen zeitlich discontinuirlicher Entladung: Wenn im Schlagraume ein Elektrizitätsfliessen nur stossweise mit sich wiederholender Unterbrechung stattfindet, so beobachtet man solche Entladungserscheinungen, welche sich auffassen lassen als ein wiederholtes *kurzdauerndes* Auftreten von Formen der nahe continuirlichen Entladung.

Positiver und negativer Anteil jeder Entladung.

A. Bei Anwendung *symmetrischer* Versuchsanordnung zwischen gleich beschaffenen, gleich grossen Metallelektroden bilden sich keineswegs die einfachsten Entladungsvorgänge aus.

Alle Entladungserscheinungen lassen hier mehr oder minder deutlich einen positiven (der Anode zugelegenen) und einen negativen Anteil (nach der Kathode hin) unterscheiden. Das Grenzgebiet zwischen beiden Anteilen heisst „ausgezeichnete Stelle“. ¹⁾

Eine gleich intensive Entwicklung des positiven und negativen Anteles ist — auch bei ganz symmetrischer Versuchsanordnung — nur selten. Meist überwiegt der positive Anteil.

Es wurde im Vorangehenden stillschweigend angenommen, dass die Entladungsform beider Anteile der Gesamterscheinung gleichartig ist, dass z. B. beide Anteile die Gestalt der Büschelentladung haben, oder beide diejenige des Büschellichtbogens besitzen etc. Dies ist indessen keineswegs immer der Fall; nicht allzu selten beobachtet man z. B., dass der

1) Am schärfsten findet sich die ausgezeichnete Stelle meist in der Lichterscheinung der Büschelentladung ausgeprägt; sie ist hier das Gebiet des Aufeinandertreffens des positiven und negativen Gebläses. Bezüglich der ausgezeichneten Stelle beim Büschellichtbogen vgl. Abhandl. Isis l. c., sowie Beibl. l. c. Bezüglich des Flammenbogens vgl. u. a. O. Lehmann, Wied. Ann. 63. p. 297. Fig. 9. 1897. Auch die Funkenentladung lässt die ausgezeichnete Stelle erkennen, entweder direct (als dunkle Intermittenzstelle, vgl. P. Riess, Pogg. Ann. 137. p. 451. 1869) oder besser noch bei Beobachtung des Funkens mit dem Schlierenapparate (vgl. A. Toepler, Pogg. Ann. 134. p. 199, sowie Taf. III, Fig. 4—8. 1868); besonders deutlich erscheint die ausgezeichnete Stelle oft in der Spur auf Russ etc. gleitender Funken (vgl. Abhandl. Isis l. c. Photograph 22; K. Antolik, Wied. Ann. 3. p. 483. 1878).

eine Anteil die Form der Büschelentladung, der andere die des Büschellichtbogens zeigt.¹⁾

*Jeder Anteil erscheint hiernach bis zu einem gewissen Grade als ein selbständiges Gebilde.*²⁾

B. Durch besondere Wahl der Versuchsbedingungen lässt sich der eine oder andere Entladungsanteil bis zu hohem Grade *willkürlich* unterdrücken. Man beobachtet nämlich, dass einerseits die Gestalt der Elektroden, andererseits die Elektroden-capacität die Lage der ausgezeichneten Stelle beeinflussen. *Steht ein plattenförmiger Halbleiter* (Schiefer, Basalt) *einer spitzen Metallelektrode von nicht zu kleiner Capacität gegenüber, so ist der Entladungsanteil der Halbleiterplatte in der Regel fast ganz unterdrückt*; dies ist daran zu erkennen, dass hier die ausgezeichnete Stelle unmittelbar an den Halbleiter herangerückt ist.

Entladungen mit weitaus überwiegendem, positivem Anteile will ich im Folgenden kurz als *positive Entladungen*, oder auch als Entladungen positiven Charakters bezeichnen, zur Unterscheidung von *negativen Entladungen*, bei denen der negative Anteil überwiegt.

Eine *vollständige* Unterdrückung des positiven oder negativen Anteiles habe ich nur selten beobachten können. Meist blieb bei überwiegend negativer Entladung wenigstens eine schwache positive Glimmlichthaut an der Anode sichtbar, bei überwiegend positiver Entladung wenigstens das erste negative Licht (das sogenannte helle Kathodenlicht gasverdünnter Räume); in der Regel blieb jedoch auch noch das zweite Licht (entsprechend dem sogenannten ziegelroten Lichte beim Büschellichtbogen bez. dem Pinsel der negativen Büschelentladung)³⁾ erhalten.

Wir haben hiernach, als die Grenzfälle *einseitiger* Entwicklung des nahe continuirlichen Entladungsvorganges, das Auftreten folgender Entladungsformen zu erwarten:

1) Vgl. Abhandl. Isis l. c. Fig. 14.

2) Vgl. hierzu auch O. Lehmann, Elektr. Lichtersch. p. 10, sowie Taf. IV. Figg. 10 u. 11. Hr. O. Lehmann nennt derartige Entladung mit verschiedenartigen Anteilen „*gemischte* Entladungsarten“.

3) Vgl. Abhandl. Isis, l. c. p. 12; Wied. Ann. 66. p. 670. Fig. 4. 1898; Beibl. 22. p. 596. 1898.

I. Ueberwiegend *positive Entladung*

positiver Anteil		negativer Anteil (verkümmert)	
Glimmentladung	} combinirt mit	{	Glimm- bez. Büschel- entladung.
Büschelentladung			
Büschellichtbogen			
Flammenbogen			

II. Ueberwiegend *negative Entladung*

positiver Anteil (verkümmert)		negativer Anteil	
Glimmentladung	{ combinirt mit	{	(Glimmentladung)
			Büschelentladung
			Büschellichtbogen
			Flammenbogen

C. Eine dritte Gruppe von Entladungserscheinungen bilden diejenigen, welche nur *eine einzige Elektrode* besitzen, wie z. B. die Elmsfeuer. An die Stelle der zweiten Elektrode mit unterdrücktem Anteiile tritt hier ein ausgedehnter Luftraum (eventuell eine Wolke etc.), welcher die Zerstreung der aus der Elektrode ausströmenden positiven oder negativen Elektricität übernimmt. Der im vorher besprochenen Falle schon überwiegende Entladungsanteil erscheint hier gänzlich isolirt.

Es schliessen sich den letztgenannten endlich diejenigen Entladungsvorgänge an, bei denen von einer bestimmten festbegrenzten Elektrode überhaupt nicht gesprochen werden kann; hierher gehören z. B. Blitze zwischen den Wolken, die Funken in einer kleinen Oeffnung einer Wand zwischen zwei mit Wasser (oder Luft) gefüllten Räumen¹⁾ etc.

In vorliegender Arbeit wird die *zweite Gruppe* von Entladungserscheinungen, bei denen in endlichem Schlagraume *ein Anteil der Entladung möglichst unterdrückt* ist, umfassend behandelt werden. Ihre Untersuchung liegt deshalb am nächsten, weil einerseits die Entladungsvorgänge hier noch nicht so complicirt sind, wie bei der ersten Gruppe, und andererseits ein eingehendes Studium der letzten, einfachsten Gruppe unerfüllbare Ansprüche an die verfügbaren Spannungen und zugleich Stromstärken stellen würde.

Dem Vorangegangenen wird sich die Zusammenstellung der Beobachtungsergebnisse im fünfzehnten Abschnitte unmittelbar anschliessen.

1) Vgl. A. Righi, Atti della Acc. dei Lincei 1. p. 329. 1877.

Beobachtungen und Messungen I.
(Grenzstromstärken.)

III. Versuchsanordnung.

In Fig. 1 a und 1 b ist die im Folgenden zumeist benutzte Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Es bedeutet in Fig. 1 a: M eine 60 plattige Toepler'sche Influenzmaschine;

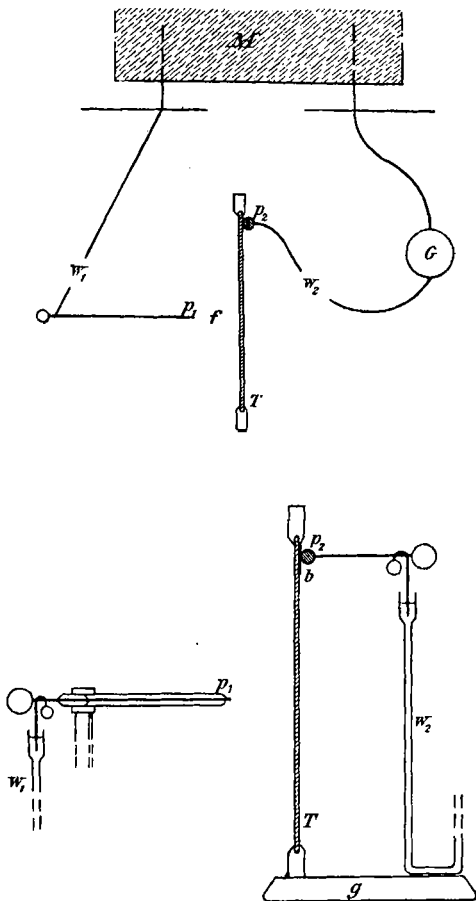


Fig. 1 b.

w_1 und w_2 zwei Wasserwiderstände (je ca. 5 Millionen Ohm); G ein Wiedemann'sches Galvanometer mit wenigen gut isolierten Windungen, isoliert aufgestellt. Die Stromleitung führte

einerseits von dem einen Maschinenconductor metallisch bis zum Widerstande w_1 und von diesem wieder metallisch bis zur Elektrode p_1 , andererseits metallisch von dem anderen Maschinenconductor durch das Galvanometer G nach w_2 , von w_2 dann metallisch bis zu dem kleinen Stanniolbelege b auf der Rückseite der Schieferplatte T . Irgend welche Funkenbildung auf den Zuleitungen (infolge mangelnden Contactes) war sorgfältig vermieden. Fig. 1b zeigt eingehender die meist benutzte Anordnung der Elektroden des Schlagraumes f . Ein 0,15 cm starker, vorn (bei p_1) abgerundeter Stahlstab (Stricknadel) war fast seiner ganzen Länge nach von einer 1 cm weiten Glasröhre conaxial umgeben. Das Stahlstabende p_1 überragte das bis auf 0,2 cm Weite verjüngte Glasrohrende um 0,2 cm. Die andere Elektrode wurde gebildet von einer 0,2 bis 0,3 cm starken, 23 cm hohen, 16 cm breiten ebenen Schieferplatte.¹⁾ Eine Elektrizitätsausstrahlung der Schiefertafelränder war durch Tränken und Ueberziehen ihrer Holzfassung mit Paraffin möglichst vermieden. Als Unterlage diente eine 2 cm starke, ihrerseits wieder auf einer ausgedehnten Glasplatte aufliegende Paraffinplatte (g).

IV. Grenzstromstärke zwischen positiver Glimmentladung und Funkenstrom bez. positiver Büschelentladung.

Die Versuchsbedingungen waren hier so gewählt, dass der positive Anteil der bei grösserer Stromstärke auftretenden Entladungsarten (Büschel, Funkenstrom oder Büschellichtbogen) eine überwiegende, den Schlagraum völlig oder wenigstens fast vollständig erfüllende Ausdehnung zeigte. Bei der Glimmentladung war hierbei die Lichterscheinung an der Anode auf das Auftreten der bekannten, bläulich-violetten Lichthaut beschränkt; die Kathode zeigte entweder einen oder mehrere mattblaue Lichtpunkte oder schwach entwickelte Büschel.

Wird bei Glimmentladung die mittlere Stromstärke langsam vermehrt, so steigt die Spannungsdifferenz der Elektroden. Schliesslich erreicht man aber eine Stromstärke, bei der die

1) In den zunächst folgenden Abschnitten ist die Anordnung der Elektroden etwas geändert.

Glimmentladung in Büschelentladung oder (bei nicht verschwindend kleiner Elektrodenkapazität) in einen Funkenstrom übergeht. Die Stromstärke, bei welcher diese Aenderung der Entladungsform eintritt, sei als die „Grenzstromstärke der positiven Glimmentladung“ bezeichnet.

In Tabelle I ist für Schlagweiten von 1—10 cm die Grenzstromstärke in tausendstel Ampère angegeben, wie sie sich bei verschiedener Wahl der Elektroden ergeben hat.

Bei den Messungen der ersten bis fünften Horizontalreihe diente als Kathode (an Stelle der Schieferplatte der Fig. 1) eine Zinkkugel von 40,1 cm Durchmesser. Der negative Influenzmaschinenpol war bei Reihe 1 bis 4 zur Erde abgeleitet, das Galvanometer war also hier keinen erheblichen Spannungen ausgesetzt; bei Reihe 5 bis 7 war dagegen kein Punkt des Stromkreises zur Erde abgeleitet. Reihe 3 und 4 unterscheiden sich nur dadurch, dass die Beobachtung ihrer Werte an verschiedenen Tagen erfolgte. Nur bei Reihe 7 waren die Widerstände w_1 und w_2 (vgl. Fig. 1) ausgeschaltet (durch Metallbügel überbrückt).

Tabelle I.

	Durchm. der Anode in cm	Durchmesser der Kathode in cm	Luftdruck in cm Hg	Zimmertemp. in °Cels.	Grenzstromstärke der positiven Glimmentladung in Milliamp. bei einer Schlagweite (in cm) von									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Spitze	40,1	74,8	18,1	0,115	0,111	0,105	0,122	0,107	0,126	0,118	0,107	0,115	—
2	0,5	40,1	75,1	18,7	—	0,298	0,321	0,313	0,304	0,302	—	—	—	—
3	1,0	40,1	75,4	20,1	—	—	0,203	0,204	0,203	0,206	—	—	—	—
4	1,0	40,1	74,7	18,1	—	(0,191)	0,225	0,241	0,248	0,271	—	—	—	—
5	1,0	40,1	74,7	18,1	—	—	0,241	0,233	0,245	0,241	0,273	—	—	—
6	1,2	Spitze	74,7	20,3	—	0,20	—	0,15	—	0,17	—	0,19	—	0,20
7	1,2	Spitze	74,7	20,3	0,101	0,120	0,128	0,114	0,104	0,104	0,117	0,123	0,115	0,12

Die Tabellenwerte sind mit wenigen Ausnahmen Mittel aus je fünf Bestimmungen.

Die Wertefolgen der Tabelle zeigen, dass die Grenzstromstärke der positiven Glimmentladung gegen Funkenstrom bez.

positive Büschelentladung hin von der Schlagweite nahezu unabhängig ist.¹⁾

Wiederholte Beobachtungen bestätigten diese Thatsache. Dabei war aber, wie auch Tabelle I zeigt, die Grösse der Grenzstromstärke von Fall zu Fall sehr verschieden; sogar mit gleicher Versuchsanordnung und den gleichen Elektroden erhielt ich an verschiedenen Tagen verschiedene Absolutwerte. Nach allem scheint mir der Wert der Grenzstromstärke, bei welcher jeweilig der Uebergang von positiver Glimmentladung in Funkenstrom oder Büschelentladung eintritt, weniger von der Grösse der Elektrode, als von deren Oberflächenbeschaffenheit und damit zusammenhängend von der Ausbildung des wirklich glimmenden Oberflächengebietes abzuhängen.

V. Existenzbereiche der einzelnen positiven Entladungsarten.

Die benutzte Versuchsanordnung war diejenige der Fig. 1 a; nur war die Schiefertafel S entfernt und p_2 stand p_1 gegenüber. Als Anode p_1 diente eine Messingkugel von 0,5 cm Durchmesser, als Kathode p_2 eine solche von 2,5 cm Durchmesser.

War die Schlagweite gross, z. B. 7 cm lang, so zeigten sich bei allmählicher Steigerung der mittleren Stromstärke im Schlagraume nacheinander folgende Entladungserscheinungen.²⁾

Bei schwächstem Strome erschienen an der Anode *zischende Lichtfäden*; waren diese gut entwickelt, so bildete jede dieser in nahe gleichen Zeitintervallen auftretenden

1) Nähert man sich bei möglichst gleichmässiger Stromzufuhr der Grenzstromstärke der positiven Glimmentladung, so ändert sich in vielen Fällen deren Aussehen; es entsteht ohne Unstetigkeit ganz allmählich an der Anode eine rötliche züngelnde oder flackernde, geräuschlose Lichtspitze, welche mehr als 0,5 cm lang werden kann. Diese Weiterbildung der Glimmentladung habe ich früher (Wied. Ann. 66. p. 660. 1898) schon als Büschelentladung aufgefasst, und daher (l. c.) von einer constanten Grenzstromstärke der positiven Büschelentladung gesprochen.

2) Jede derselben ist bei jeweilig constant gehaltener Stromstärke beliebig lange zu erhalten.

Der negative Anteil war hier (metallische Kathode) nicht gänzlich unterdrückt, füllte jedoch in allen Fällen höchstens 1 cm der Schlagweite. An der Kathode traten bei sehr geringer Stromstärke zischende (bläuliche) Lichtfäden, später Büschel oder rötliche Lichtfäden auf.

Einzelentladungen je eine baumartige, fein verästelte Lichtfigur, den bekannten, an Reibungselektrisirmaschinen bei hoher Spannung und grosser Schlagweite jederzeit zu beobachtenden gewöhnlichen, intermittierend *stossweise vorschliessenden* positiven *Büschel*. Schon bei weniger als 0,004 Tausendstel Ampère trat an die Stelle dieser zeitlich discontinuirlichen Entladung die bekannte, nahe continuirliche geräuschlose Glimmentladung; die Anode ist hierbei nur bedeckt mit einer matten bläulichen Lichthaut; der ganze Schlagraum lichtlos. Der Stromstärkenbereich der Glimmentladung reicht dann bis zu der im vorigen Abschnitte eingehender untersuchten Grenzstromstärke, welche in dem speciell vorliegenden Falle nur 0,056 Milliamp. betrug. Wurde diese Stromintensität überschritten, so erschien ein prasselnder Funkenstrom, gebildet von hellen weissen Funken. Dieser verschwand dann erst wieder bei Ueberschreiten von 0,44 Milliamp. mittlerer Stromstärke. An seine Stelle trat eine intensive, nahe continuirliche positive Büschelentladung.¹⁾ Bei wesentlich stärkerem Strome wurde dann die Büschelentladung häufiger und häufiger von einzelnen rötlichen Funken durchsetzt, und bei etwa 1,20 Milliamp. bestand die Entladung wieder in einem Funkenstrome, nur besaßen die einzelnen Funken jetzt nicht weisse, sondern rötliche Färbung. Zur Ueberführung dieses Funkenstromes in einen Büschellichtbogen (mit überwiegendem positiven Anteile) reichte bei der ins Auge gefassten grossen Schlagweite (7 cm) die maximale Maschinenstromstärke (2,1 Milliamp.) nicht hin.

Bei allmählicher Stromschwächung erschienen bei nahe denselben Stromstärkewerten alle die genannten Entladungsformen in umgekehrter Folge wieder.

Ebenso, wie soeben für 7 cm Schlagweite angegeben, wurden bei sonst ungeänderter Versuchsanordnung die einzelnen Grenzstromstärken auch für kleinere Schlagweiten bestimmt. Es ergab sich (Stromstärken in Milliampère):

1) Diese nahe continuirliche Büschelentladung erfolgt bei geringer Stromintensität meist gänzlich *geräuschlos*; erst bei grösserer Stromstärke hört man in der Regel ein mehr oder minder starkes Rauschen oder Sausen, manchmal auch einen hohen pfeifenden Ton. Die Geräuschbildung ist offenbar durch die Luftbewegung im Büschel veranlasst. Vgl. auch Abschnitt XIII.

Tabelle II.

Luftdruck 75,1 cm. Zimmertemperatur 18,7° C.

	Stoss- weise Ent- ladung	Glim- men	Fun- ken- strom	Bü- schel	Fun- ken- strom	Bü- schel- licht- bogen
Schlagweite $f = 1,8$ cm	0,024	0,1024	—	—	0,62	
„ $f = 3,5$ „	0,004	0,080	—	—	1,20	
„ $f = 5,2$ „	< 0,004	0,060	0,72	0,72	ca. 1,7	
„ $f = 7,0$ „	< 0,004	0,056	0,44	1,20	> 2,0	

Die Tabellenwerte sind in Fig. 2 eingetragen (Stromstärken als Ordinaten, Schlagweiten als Abscissen) und die zusammengehörigen Werte dann zu den stark gestrichelten Curvenzügen verbunden.

Die Verteilung der einzelnen Entladungsarten im Schlagweitenstromstärkenbereiche, wie sie Tab. II und Fig. 2 angiebt, kann für Entladung positiven Charakters als typisch angesehen werden. In quantitativer Hinsicht freilich wird die specielle Lage der Existenzbereiche der einzelnen Entladungsarten von zahlreichen Grössen wesentlich beeinflusst.

Ueber den Einfluss von Grösse und Gestalt der Elektroden kann ich Bestimmtes nicht angeben. Eine *spitze* Anode begünstigt die Ausbildung der Büschelentladung, im übrigen wird jedoch an dem durch Fig. 2 wiedergegebenen Bilde wenig geändert. So zeigt Fig. 3 die Verteilung der Bereiche der einzelnen Entladungsformen für den speciellen Fall, wo eine Messingspitze als Anode einer Messingkugel von 0,5 cm Durchmesser als Kathode gegenüberstand; die Versuchsanordnung war sonst die gleiche, wie sie bei Tab. II und Fig. 2 benutzt wurde; die wirklich gemessenen Werte sind markirt.

Auf den Einfluss der Elektrodenkapazität werde ich im nächsten Abschnitt eingehen.

Es ist bekannt und schon öfters hervorgehoben, dass die Elektrizitätsentladung zwischen *gleichgestalteten*, *gleichgrossen* Elektroden von *gleicher* Elektrodenkapazität doch einen *überwiegenden* positiven Anteil zeigt. Auch für diesen Fall, d. h. bei der so viel benutzten völlig symmetrischen Versuchsanordnung, gelten demnach angenähert die Betrachtungen der letzten Abschnitte. Figg. 2 und 3 geben also auch den Typus der Ver-

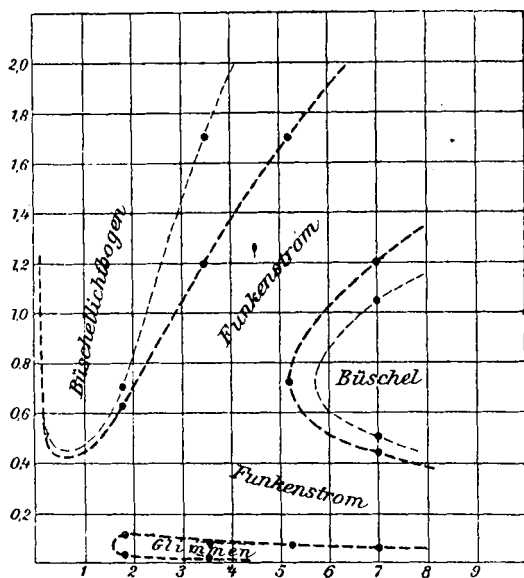


Fig. 2.

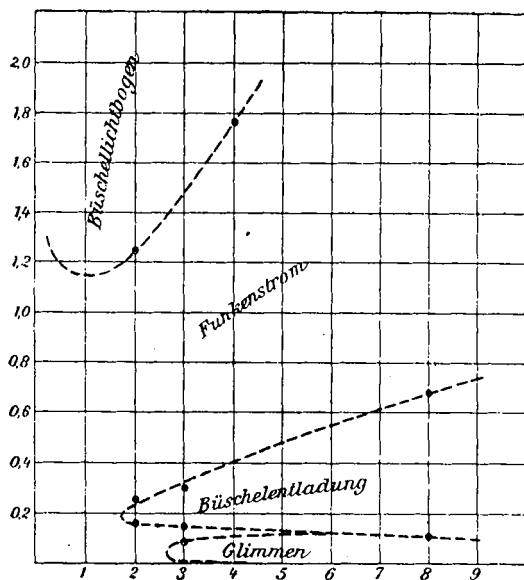


Fig. 3.

teilung der Existenzbereiche der einzelnen Entladungsarten bei ganz symmetrischer Versuchsanordnung.

VI. Einfluss der Elektrodenkapazität.

Die Versuchsanordnung, welche die Werte der zweiten Tabelle gegeben hatte, wurde nur insofern geändert, als die beiden *Elektrodenkapacitäten* (vom Schlagraume bis zu den Wasserwiderständen je durch seitliches Anfügen eines 80 cm langen, in eine Messingkugel von 6 cm Durchmesser frei endigenden Metallstabes) *erhöht* wurden. Es ergab sich jetzt:

Tabelle III.

Luftdruck 75,1 cm. Zimmertemperatur 18,7° C.

	Stoss- weise Ent- ladung	Glim- men	Fun- ken- strom	Bü- schel	Fun- ken- strom	Bü- schel- licht- bogen
Schlagweite $f = 1,8$ cm	—	—	—	—	—	0,70
„ $f = 3,5$ „	< 0,004	0,076	—	—	—	ca. 1,7
„ $f = 5,2$ „	ca. 0,002	0,066	—	—	—	> 2,0
„ $f = 7,0$ „	< 0,004	0,056	0,50	1,04	—	> 2,0

Die Messungsergebnisse der Tab. III sind gleichfalls in Fig. 2 eingetragen, und ergeben die dünn gestrichelten Curvenstücke.

Ein Vergleich der schwach gestrichelten, für vergrößerte Elektrodenkapazität geltenden, mit den stark gestrichelten, einer kleineren Elektrodenkapazität entsprechenden Curven zeigt die Richtigkeit des Satzes: Eine Vergrößerung der Elektrodenkapazität veranlasst nach allen Seiten hin eine Vergrößerung des Bereiches des zeitlich discontinuirlichen Elektricitätsflusses (Funkenstromes).

Nach dem Vorangehenden ist vorauszusehen, dass bei *verschwindend kleiner Elektrodenkapazität* zeitlich discontinuirliche Entladung überhaupt nicht mehr auftreten wird, dass also bei Stromvermehrung die positive Glimmentladung unmittelbar in die nahe continuirliche Büschelentladung, und diese direct in Büschellichtbogen übergehen wird. Diesem idealen Grenzfalle kommt die in Fig. 1a und 1b angegebene Versuchsanordnung (Schieferplatte als Kathode) schon recht nahe.

In der That beobachtet man in diesem Falle (besonders leicht, wenn man eine sehr feine Spitze wählt), dass der Uebergang der räumlich sehr beschränkten Lichterscheinung des Glimmens in die ausgedehntere des positiven Büschels ganz allmählich erfolgt. Das blaue Glimmlicht nimmt bei Stromverstärkung zunächst rötliche Färbung an, dann erscheint lautlos, ganz allmählich aus dem Dunkel auftauchend, ein vom roten Glimmlichte zunächst noch durch ein dunkel gebliebenes Gebiet getrennter, dünner, bläulicher, 1—3 cm langer, beiderseits zugespitzter Lichtstrich (vgl. Fig. 4). Dieser bildet sich dann weiter zu dem positiven, nahe continuirlichen, fast ge-

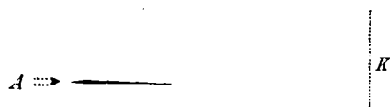


Fig. 4.

räuschlosen Büschel aus. In gleicher Weise erfolgt der umgekehrte Vorgang bei langsamer Stromschwächung.

Einen ganz allmählichen Uebergang von positiver Büschelentladung in den positiven Büschellichtbogen habe ich, wenigstens bei grösseren Schlagweiten, nicht beobachten können. Auch bei Anwendung der in Fig. 1b angegebenen Anordnung trat hier ein Funkenstrom auf, freilich nur aus rötlichen lichtschwachen, beinahe geräuschlosen Funken bestehend. Günstigstenfalls nahm jedoch die positive Büschelentladung schon Formen an, welche vor Auftreten der Funken an eine beginnende Schichtung erinnerten. Es bildeten sich nämlich in der blauen Krone des Büschels carminrote Lichtverdickungen.

VII. Grenzstromstärken bei rein negativer Entladung.

Im Einklange mit der Thatsache, dass man bei symmetrischer Versuchsanordnung meist Entladungen mit weit überwiegendem, positivem Anteile erhält, steht es, dass sich viel schwerer rein negative Entladung erzwingen lässt, als rein positive. Zwischen *Metallelektroden*, selbst wenn die Kathode spitz und die Anode plattenförmig ist, füllt, soweit ich beobachten konnte, der positive Anteil oft noch etwa ein Drittel

des Entladungsraumes.¹⁾ Selbst Halbleiterplatten, als Anode gewählt, unterdrücken den positiven Anteil nicht immer wie gewünscht.²⁾ Die bei den folgenden Versuchen benutzte Schieferplatte, welche *rein* negative Entladung gab, musste daher erst besonders ausgesucht werden; dieselbe Platte wurde dann auch bei den Potentialmessungen der späteren Abschnitte benutzt.

Als Kriterium dafür, dass eine Halbleiterplatte *rein* negative Entladung giebt, glaubte ich ihre Fähigkeit, einen *rein* negativen Büschellichtbogen zu geben, ansehen zu müssen. Letzterer zeigt als hervorragendste Eigentümlichkeit³⁾ einen ausgedehnten (etwa 0,5 cm langen), der Anode unmittelbar anliegenden Anodendunkelraum; die Anode selbst kann eine blaue Glimmlichthaut zeigen.⁴⁾

Bei schwächstem Strome kann an spitzen Elektroden eine negative Glimmentladung auftreten, sonst habe ich diese Entladungsform nicht beobachtet. Es genüge daher hier ihr Vorhandensein zu erwähnen.

Bei schwachem Strome findet der Elektrizitätsfluss in Form der bekannten, ruhig brennenden negativen Büschelentladung statt. Bei stärkerem Strome und grösseren Schlagweiten bilden sich meist, selbst an spitzer Kathode, nicht nur ein einziges, sondern mehrere negative Lichtbüschel aus; dies liess sich auch bei Anstellung der nachfolgend mitgeteilten Messungen nicht immer vermeiden.

Erreicht man eine bestimmte Stromstärke, die Grenzstromstärke der negativen Büschelentladung, so geht diese bei kleiner Elektrodencapazität unmittelbar in den negativen Büschel-

1) Auch bei meinen in Wied. Ann. 66. p. 660. 1898 mitgeteilten Messungen (Metallelektroden) war bei spitzer Kathode die Entladung keine *rein* negative.

2) So ist bei dem Abhandl. Isis l. c. abgebildeten Photogramm 11 eines Büschellichtbogens der positive Anteil doch noch ca. 1 cm lang, obgleich eine Basaltplatte als Anode diente.

3) Vgl. Abhandl. Isis l. c. p. 13.

4) Die Abbildungen Wied. Ann. 63. p. 115. Figg. 10 u. 11; Abhandl. Isis l. c. Photogr. 17, 19 u. 21, sowie Wied. Ann. 69. p. 681. Fig. 2 zeigen *rein* negativen Büschellichtbogen. Der dunkle Anodenraum ist hier nichts anderes, als die ausgezeichnete Stelle zwischen dem den ganzen übrigen Schlagraum erfüllenden negativen und dem bis auf die Glimmlichthaut unterdrückten positiven Anteile.

lichtbogen über. In der Mitte des negativen Büschels bildet sich hierbei zunächst eine rötliche Lichtspitze aus¹⁾, welche dann bei geringster Stromverstärkung rasch länger und länger wird, und so schliesslich den Büschellichtbogen bildet.

Bei nicht verschwindend kleiner Elektrodenkapazität treten zuerst an der Kathode zischende Lichtfäden, dann der bekannte, nahe continuirlich brennende negative Büschel, dann Funkenstrom, schliesslich der Büschellichtbogen auf. Also tritt wieder, ganz wie bei positiver Entladung, zwischen den nahe continuirlichen Entladungsformen ein zeitlich discontinuirlicher Elektrizitätsfluss auf.

Als die Versuchsanordnung genau die in Figg. 1 a und 1 b angegebene, mit Einschaltung der Widerstände w_1 und w_2 war, erschien nur noch ganz vorübergehend ein Funkenstrom zwischen Büschelentladung und Büschellichtbogen, oft auch blieb er ganz aus. Die beiden ersten Reihen der folgenden Tabelle geben die Grenzstromstärken Büschel-Funkenstrom und Funkenstrom-Büschellichtbogen. Die Grenzstromstärkenwerte der beiden letzten Reihen erhielt ich, als die Kathodencapazität durch metallische Ueberbrückung des Widerstandes w_1 bis zu den rotirenden Maschinenscheiben ausgedehnt, also bedeutend vergrössert war.

Tabelle IV.

Luftdruck = 74,5 cm. Zimmertemperatur = 19,0° C.

Schlagweiten f in cm	1	2	3	4
Kleine Kathodencapazität.				
Grenzstromst.: neg. Büschel = Funkenstrom	0,34	0,54	0,66	0,80
„ : Funkenstrom = Büschellichtbogen	0,38	0,57	0,70	0,88
Vergrösserte Kathodencapazität.				
Grenzstromst.: neg. Büschel = Funkenstrom	0,35	0,54	0,69	—
„ : Funkenstrom = Büschellichtbogen	0,47	0,82	1,14	—

VIII. Ueber eine neue negative Entladungsart.

Ich vermutete, dass vielleicht bei künstlicher Verhinderung der Stromstreuung des negativen Büschels eine dem positiven Büschel ähnliche Entladungserscheinung auftreten würde. Dies ist bis zu gewissem Grade in der That der Fall.

1) Vgl. M. Toepler, Wied. Ann. 63. p. 115. Fig. 11. 1897.

Die Versuchsanordnung war folgende. Ähnlich, wie in Fig. 1b angegeben, war ein 0,15 cm starker Stahlstab fast seiner ganzen Länge nach von einer 0,7 cm weiten Glasröhre umhüllt. Das vordere Ende der Glasröhre war jedoch hier bis auf eine 0,1 cm weite Oeffnung zugezogen; diese enge Glasrohröffnung ragte über das abgerundete Ende des Eisenstabes um 0,2 cm hinaus. Dieser Kathode stand ein 0,5 cm starker, vertical gestellter Messingstab als Anode gegenüber. Kathode und Anode waren metallisch mit den Maschinenconductoren verbunden.

Bei schwachem Strome zeigte sowohl die Eisenkuppe, als auch die Glasrohröffnung je ein negatives Büschel (Diaphragmen-

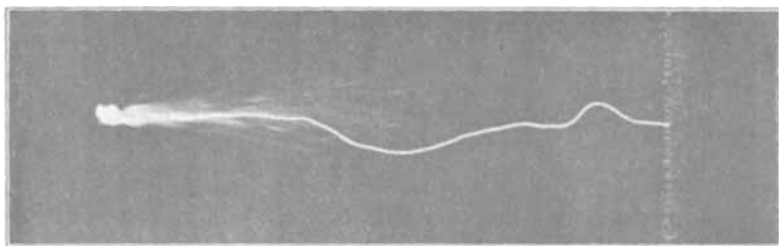


Fig. 5.

wirkung). Bei stärkerem Strome traten aus dem Glasrohre züngelnde, carminrote Lichtfäden hervor. Diese wurden mit weiter vermehrtem Strome länger und länger. Jeder dieser Lichtfäden liess deutliche, wenn auch unregelmässige Schichtung erkennen. Währenddem zeigte die Anode immer nur zahlreiche Glimmlichtpunkte. Der ganze Entladungsvorgang erfolgte *völlig geräuschlos*. Die negativen Lichtfäden konnten schliesslich bis etwa $\frac{2}{3}$ des Schlagraumes erfüllen, dann aber ging die Entladung in einen Funkenstrom über. Fig. 5, die Reproduktion eines mit 2 Sec. Expositionszeit aufgenommenen Photogrammes, zeigt (in natürlicher Grösse) die in Rede stehende Art von negativer Entladung bei grösstmöglicher Ausdehnung derselben, absichtlich aber auch noch zum Vergleich einen einzigen Funken.

Die in Fig. 5 abgebildete Entladungsform ist wohl als eine specielle Form von negativem Büschellichtbogen aufzufassen, bei welchem die Lichterscheinung den Schlagraum noch

nicht ganz überbrückt. Der erste Ansatz zur Bildung der beschriebenen eigentümlichen Form negativer Entladung *ohne* künstliche Bahnverengerung ist meiner Meinung nach schon die Bildung einer roten Lichtspitze in der Mittelaxe des gewöhnlichen Büschels, wie sie die bereits mitgeteilte Photographie¹⁾ eines negativen Büschels zeigt. Ich halte es für wahrscheinlich, dass die negative Büschelentladung bei grosser Schlagweite stets zunächst in einen der hier beschriebenen Entladungsform ähnlichen *halben* Büschellichtbogen übergehen wird.

Beobachtungen und Messungen II.

(Spannungsdifferenzen.)

IX. Versuchsanordnung.

Schaltet man parallel zu der Hauptschlagweite, in welcher eine nahe continuirliche Entladungsart herrscht, einen Nebenschlagraum (im Folgenden stets mit F' bezeichnet) mit *grossen* kugelförmigen Elektroden, so lassen sich Spannungsmessungen folgendermassen ausführen. Man nähert, während im Hauptschlagraume dauernd nahe continuirliche Entladung bei constanter, willkürlich gewählter Stromstärke stattfindet, die grossen Polkugeln der Nebenschlagweite einander ganz allmählich mehr und mehr, bis *zum ersten Male* im Nebenschlagraume ein Funken bez. Funkenstrom auftritt. Die *Anfangspotentialdifferenz* der so gefundenen Nebenschlagweite F' ist dann gleich der *Entladungspotentialdifferenz* in der Hauptfunkenstrecke. Man kann aber auch eine bestimmte Nebenschlagweite F' fest einstellen und dann die Stromstärke im Hauptschlagraume so lange langsam ändern, bis zum ersten Male bei F' eine Entladung einsetzt; in diesem Falle erhält man die zu einer (durch die Wahl der Länge F') festgelegten, bestimmten Spannungsdifferenz zugehörige Stromstärke. Die Grösse des Anfangspotentials für jede beliebige Länge der Nebenschlagweite F' wird hierbei als bekannt vorausgesetzt. Zu berücksichtigen ist freilich, dass man in den Fällen, wo die Spannungsdifferenz nicht constant, sondern Schwankungen von kurzer Dauer ausgesetzt ist, durch Bestimmung der Neben-

1) M. Toepler, Wied. Ann. 63. p. 115. Fig. 11. 1897.

schlagweite keine mittleren, sondern die maximalen Spannungsdifferenzen erhält. Da während des Vorhandenseins irgend einer Dauerentladung (Glimmen, Dauerbüschel, Büschellichtbogen), soweit ich beobachten konnte, bei constanter Stromstärke eine nahezu constante Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden herrscht, so unterscheiden sich die gemessenen Spannungsdifferenzenmaxima von den Spannungsdifferenzenmitteln nicht erheblich. Nur in der Nähe des Ueberganges einer

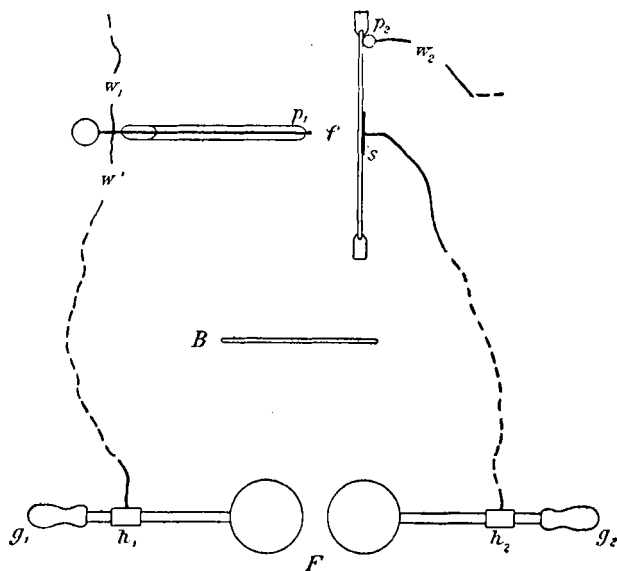


Fig. 6.

nahe continuirlichen Entladungsart in eine andere treten auch bei kleiner Elektrodencapacität relativ grosse Spannungsschwankungen auf. Die Anwendung einer Nebenschlagweite zur Messung der grossen in Frage kommenden Potentialdifferenzen (20 000—90 000 Volt) empfiehlt sich zu orientirenden Messungen deshalb, weil sie eine sehr rasche Einstellung gestattet.

Die Einzelheiten der zu Spannungsmessungen benutzten Versuchsanordnung sind in Fig. 6 schematisch dargestellt. Die Nebenschlagweite *F* besass Messingpolkugeln von je 6 cm Durch-

messer; diese waren an Messingstäbe von 0,6 cm Durchmesser angeschraubt, welche durch die Metallhülsen h_1 und h_2 gehalten wurden. Letztere wurden von zwei je 41 cm hohen Glasstützen getragen, deren gegenseitiger Abstand 30 cm betrug. Da die beiden Metallstäbe (mit ihren Polkugeln) in den Hülsen h_1 und h_2 leicht verschieblich waren, so liess sich die Schlagweite F mittels der isolirenden Handhaben g_1 und g_2 rasch vergrössern oder verkleinern. Gegenseitige Belichtung der Schlagräume f und F verhinderte die Ebonitplatte B . Um wirklich die Spannungsdifferenz der Elektroden der Hauptschlagweite f zu messen, wäre h_1 und h_2 metallisch mit p_1 und einem auf die Vorderseite der Schieferplatte (p_1 gegenüber) aufzuklebenden Stanniolbelege zu verbinden gewesen. Hierdurch wäre jedoch die Elektrodencapacität beiderseits f sehr vermehrt worden. Um dies zu vermeiden, war einerseits der Wasserwiderstand w' eingeschaltet, andererseits der mit der Nebenschlagweite F metallisch verbundene Stanniolbeleg auf der Rückseite der Schieferplatte angebracht (s in der Fig. 6). Bei der gewählten Anordnung giebt die Nebenschlagweite F freilich genau genommen nicht die gesuchte Spannungsdifferenz zwischen p_1 und der Vorderseite der Schieferplatte, sondern diese vermehrt um den Spannungsabfall von s quer durch die Platte. Letzterer ist aber sicher nur relativ gering; selbst als p_1 bis zur Berührung der Schieferplatte genähert und s direct mit p_2 verbunden war, sodass der Strom quer durch die Platte von s nach p_1 ging, ergab sich bei vollem Gange der Maschine (d. h. bei 2 Milliamp.) nur eine Nebenschlagweite F von etwas über 0,1 cm. Hieraus ist zu schliessen, dass bei der in Fig. 6 angegebenen Art der Nebenschaltung die Spannungsdifferenz bei F im *ungünstigsten* Falle nur bis zu 5000 Volt grösser sein kann als die gesuchte Spannungsdifferenz zwischen p_1 und der p_1 zugekehrten Seite der Schieferplatte.

Im Folgenden ist zur bequemerem Orientirung stets ausser der gemessenen Nebenschlagweite F (in cm) auch noch die F entsprechende Spannungsdifferenz (Anfangspotential) in Volt angegeben (vgl. die diesbezügliche Anmerkung in Abschnitt XIX).

X. Abhängigkeit der Spannungsdifferenz der Elektroden von der Stromstärke, und Grenzspannung bei (negativer Büschel- und) positiver Glimmentladung.

Für gleiche Schlagweite und gleiche Stromstärke ist die Spannungsdifferenz der Elektroden wie bekannt (vgl. die Literaturangaben Abschnitt XVII und XXIII) bei positiver Entladung in Form von Glimmen (Spitze = Anode) nahe die gleiche wie bei negativer Büschelentladung (Spitze = Kathode).

Vermehrt man (bei gleichbleibender Schlagweite f) die Stromstärke, so nimmt die Spannungsdifferenz zwischen Spitze und (Halbleiter-)Platte rasch zu, und erreicht bei der Grenzstromstärke ihren grössten Wert, die „Grenzspannung“.

Für die fest eingestellte Hauptschlagweite f von 4,3 cm Länge (Versuchsanordnung der Figg. 1 a und b) wurden folgende Messungen ausgeführt (Tabelle V). Bei fest eingestellter willkürlicher Schlagweite F wurde, mit schwachem Strome in f beginnend, dessen Stärke langsam vermehrt, bis bei F' ein Funkenstrom auftrat. Es wurde also diejenige Stromstärke bestimmt, bei welcher die (Entladungs-)Spannungsdifferenz im Hauptschlagraume soeben den Wert der Anfangspotentialdifferenz bei F erreichte. Es ergab sich:

Tabelle V.

Luftdruck = 75,2 cm. Zimmertemp. = 18,9° C. Schlagweite f = 4,3 cm.

Schlagweite F in cm	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25
dementspr. Pot. Diff. in Volt	25200	32600	39700	46400	52800	58900	64600
zugehörige Stromstärke in M.-A.	bei pos. Glimmen	0,034	0,075	—	—	—	—
	bei neg. Büschel	0,038	0,088	0,120	0,168	0,258	0,336
						0,336	0,464

Bei Ueberschreiten von 0,464 Tausendstel Ampère ging die negative Büschelentladung im Hauptschlagraume in einen Funkenstrom über; demnach war hier 0,464 Milliamp. die Grenzstromstärke und 64600 Volt das Grenzpotential der negativen Büschelentladung. Dagegen betrug die Grenzstromstärke der positiven Glimmentladung nur 0,08 Milliamp.

Mit der gleichen Versuchsanordnung (vgl. Figg. 1a und 6) wurden mehrere Tage später für verschiedene Schlagweiten f die Grenzspannungen der negativen Büschel- und positiven Glimmentladung bestimmt. Die Tab. VI giebt die Mittelwerte aus je fünf Einzelbestimmungen.

Tabelle VI.

Luftdruck = 74,9 cm. Zimmertemperatur = 18,6° C.

Schlagweite f in cm	2	3	4	5	7	11
Grenzspannung bei $\left\{ \begin{array}{l} F \text{ in cm} \\ \text{neg. Büschelentl.} \end{array} \right.$	0,78	1,41	2,05	2,50	—	—
$\left\{ \begin{array}{l} \text{in Volt} \\ \text{pos. Glimmentl.} \end{array} \right.$	26100	44100	60200	70000	—	—
Grenzspannung bei $\left\{ \begin{array}{l} F \text{ in cm} \\ \text{pos. Glimmentl.} \end{array} \right.$	0,61	0,92	1,42	1,73	1,98	2,6
$\left\{ \begin{array}{l} \text{in Volt} \\ \text{Minimalspannung} \end{array} \right.$	20700	30200	44300	52400	58400	72200
bei pos. Büschelentl. $\left\{ \begin{array}{l} F \text{ in cm} \\ \text{in Volt} \end{array} \right.$	—	0,70	0,81	0,88	1,20	1,9
	—	23700	27000	29100	38300	56500

Die Grenzspannung bei negativer Büschelentladung (erste und zweite Reihe) ist, wie man sieht, beträchtlich grösser als diejenige bei positiver Glimmentladung (dritte und vierte Reihe), entsprechend der Thatsache, dass die Grenzstromstärke der ersteren Entladungsart grösser ist als diejenige der letzteren. Die Grenzspannungen verhalten sich bei gleicher Schlagweite etwa wie 4 : 3.

Die Bedeutung der Werte der beiden letzten Reihen der Tabelle ist erst im nächsten Abschnitte angegeben.

Die Grenzspannungsdifferenz des positiven Glimmens an der stumpfen Spitze (gegenüber einer Platte) habe ich bei Gelegenheit weiterer Messungen noch öfters bestimmt (vgl. Tab. VIII und XII); die erhaltenen Werte schwanken zwischen weiten Grenzen. Ein wesentlicher Grund zu Unregelmässigkeiten liegt in dem grossen Einflusse, welchen schon kleine Störungen in der Stromzufuhr auf die Grenzstromstärke und Grenzspannung der positiven Glimmentladung ausüben. Schon die kleinste Unterbrechungsstelle in der Stromzuleitung zur Anode oder auch Kathode ändert den Wert der Grenzspannung. (Näheres über den Einfluss einer Lücke in den Zuleitungen ist aus Abschnitt XIV zu ersehen.)

Tab. VII giebt Grenzspannungsdifferenzen der positiven Glimmentladung zwischen Elektroden von verschiedener Grösse. Bei den angegebenen Bestimmungen standen die zusammengehörigen Elektroden der Hauptschlagweite f und Nebenschlagweite F untereinander und mit den Maschinenconductoren in *metallischer, lückenloser* Verbindung. Die Elektrodenkapazität war also hier recht erheblich, beiderseits auf *mindestens* 50 cm zu schätzen. Eine gegenseitige Belichtung beider Schlagräume war wie immer ausgeschlossen.

Als stumpfe Spitze (erste bis dritte und zehnte Tabellenreihe) diente der stets benutzte, 0,15 cm starke Stahlstab mit abgekugelter Ende (vgl. Fig. 1b). Die Elektrizitätszufuhr zu den Messingkugelanoden des Hauptschlagraumes erfolgte durch einen 0,2 cm starken, von einem dünnen Glasröhrchen eng umhüllten Messingstab. Als Kathode dienten Messingkugeln und eine Zinkkugel von 40 cm Durchmesser. Kathode und Anode waren stets beide isolirt aufgestellt, nur bei Beobachtung der Werte der fünften Horizontalreihe war die Kathode zur Erde abgeleitet.

Bei jeder Elektrodencombination wurde die Grenzspannungsdifferenz des positiven Glimmens wiederholt (an verschiedenen Tagen) bestimmt. In Tab. VII habe ich aber nicht Mittelwerte, sondern je diejenige Wertefolge mitgeteilt, welche die grössten Absolutwerte ergeben hatte; die grössten Grenzspannungsdifferenzen entsprechen den störungsfreiesten Versuchsbedingungen.

In Reihe eins, sieben und zwölf der Tabellen sind *Anfangspotentialdifferenzen* (vgl. Abschnitt XVI) angegeben. Zu ihrer Bestimmung verfuhr ich folgendermaassen. Es wurde für jede Schlagweite wiederholt die Spannungsdifferenz der Elektroden ganz allmählich, von kleinsten Werten ausgehend, erhöht, bis überhaupt eine Elektrizitätsentladung eintrat. Ist die Nebenschlagweite F klein, so beginnt der Entladungsvorgang jeweilig mit einem Funken *bei* F . Vergrössert man die Schlagweite F successive und wiederholt immer wieder den Versuch, so erreicht man schliesslich eine Länge F , bei welcher soeben jedem Funken bei F ein *mit Geräusch und Lichtentwicklung* verbundenes Austreten von Elektrizität aus der Anode des Hauptschlagraumes f in letzteren voraufgeht. Es wurde somit

Tabelle VII.

					Hauptschlagweite <i>f</i> in cm							
		Durchm. der Anode in cm	Durchm. der Kathode in cm	Luftdruck in cm Hg	Zimmertemp in °Cels							
1	Spitze	40	75,5	18,3	Anfangspotentialdifferenz	in Volt	< 5400	< 6900	< 9100	< 9800	< 10500	
2	Spitze	40	75,5	18,3	Grenzpotentialdiff. d. Glühmens	"	23600	36600	45200	54100	62000	
3	Spitze	40	75,1	17,3	Spannungsdifferenz b. Büschel	"	(kein Büschel)		32900	40000	47800	
4	0,5	2,5	75,3	18,9	Grenzpotentialdiff. d. Glühmens	"	41100	58900	66000	71100	79800	
5	0,5	2,5	75,3	18,9	"	"	43300	60100	67900	—	—	
6	0,5	3,0	75,3	19,1	"	"	45900	64500	74300	82000	—	
7	0,5	40	75,3	19,3	Anfangspotentialdifferenz	"	< 18100	< 20700	< 23600	< 26300	< 27300	
8	0,5	40	74,2	18,0	Grenzpotentialdiff. d. Glühmens	"	34700	53900	67700	82500	< 88300	
9	0,5	40	74,2	18,0	Spannungsdifferenz b. Büschel	"	(keine Büschelentl.)			45500	—	
10	1,0	Spitze	74,7	20,3	Grenzpotentialdiff. d. Glühmens	"	25200	40500	52300	62000	—	
11	1,0	3,0	75,0	19,4	"	"	—	66200	77200	84400	—	
12	1,0	40	76,1	19,0	Anfangspotentialdifferenz	"	< 26400	< 32000	< 34300	< 39900	< 42800	
13	1,0	40	75,1	17,3	Grenzpotentialdiff. d. Glühmens	"	38900	58400	70900	85200	—	

diejenige Nebenschlagweite festgestellt, deren Anfangspotentialdifferenz sicher ein wenig grösser war als die gesuchte Anfangspotentialdifferenz des Hauptschlagraumes.

Die dritte und neunte Tabellenreihe giebt Spannungsdifferenzen bei positiver Büschelentladung. Der Existenzbereich letzterer war hier infolge der hohen Elektrodenkapazität wesentlich beschränkt (vgl. Fig. 11). Die Angaben sind daher genau genommen weder als Minimalspannungsdifferenz noch als Grenzspannungsdifferenz der positiven Büschelentladung im Sinne des nächsten Abschnittes anzusehen, sondern als Zwischenwerte.

XI. Spannungsdifferenz der Elektroden bei nahe continuirlicher positiver Büschelentladung.

Die in den vorangehenden Abschnitten und auch hier benutzte Versuchsanordnung (Figg. 1a und 6) war der Ausbildung einer zeitlich discontinuirlichen Entladung so wenig günstig, dass sich nach Ueberschreiten der Grenze der Existenzfähigkeit der positiven Glimmentladung in der Regel kein Funkenstrom, sondern höchstens einige discontinuirlich auftretende, stossweise erscheinende Büschel bildeten. Dann aber erschien sogleich der ruhige und geräuschlose positive Dauerbüschel. Hierbei ging die Spannungsdifferenz der Elektroden ganz auffallend herunter. Die Nebenschlagweite F konnte dementsprechend jetzt wieder wesentlich kleiner gemacht werden als dem Grenzpotentiale der positiven Glimmentladung entsprach, ohne dass bei F eine Entladung aufgetreten wäre. Die *fünfte Reihe der sechsten Tabelle* giebt an, wie weit F verkleinert werden konnte, bis endlich bei F ein Funkenstrom auftrat. Diese Werte sind Minimalwerte der Spannungsdifferenz für die positive Büschelentladung, da die Potentialdifferenz bei der Büschelentladung mit der Stromstärke weiterhin wieder etwas wächst. Dies zeigt die folgende Tabelle VIII (Versuchsanordnung wie bei Tabelle VI, vgl. Figg. 1b und 6).

In der ersten Verticalcolumnne der Tabelle sind die Grenzstromstärken und die zugehörigen Grenzspannungen der positiven Glimmentladung angegeben.

Tabelle VIII.

Luftdruck = 74,9 cm. Zimmertemperatur = 18,6° C.

		Glimmen	positive Büschelentladung			
Schlagw. f gleich 2 cm	Stromst. in M.-A.	0,044	0,10	0,80	1,20	
	F in cm	0,76	0,65	0,75	0,75	—
	in Volt	25600	22000	25200	25200	
Schlagw. f gleich 5 cm	Stromst. in M.-A.	0,064	0,32	0,70	1,20	1,76
	F in cm	1,52	0,92	1,10	1,20	1,20
	in Volt	47000	30200	35500	38300	38300
Schlagw. f gleich 8 cm	Stromst. in M.-A.	0,064	0,55	0,72	1,12	1,44
	F in cm	ca. 1,9	1,36	1,42	1,55	1,55
	in Volt	56500	42800	44900	47800	47800

Um für nahe continuirliche, einstiellige, positive Büschelentladung die Abhängigkeit der Potentialdifferenz der Elektroden von der Schlagweite bei gleichbleibender Stromstärke festzustellen, diente mir wieder die in Figg. 1a und 6 angegebene Versuchsanordnung. Zugleich nahm ich jedoch die Gelegenheit wahr, die Unabhängigkeit der von der benutzten 60 plattigen Influenzmaschine bei constantem Gange derselben gelieferten Stromstärke von der Spannungsdifferenz zwischen ihren Conductoren zu prüfen. Ich liess daher die Maschine ohne Rücksicht auf ihre verschiedene Beanspruchung durch zwei Laboratoriumsdiener nach den Schlägen eines Metronoms in *möglichst gleichmässigem Gange halten*; beobachtet wurde dann die (bei Dauerbüschel von verschiedener Länge f) gelieferte Stromstärke und je zugleich auch die Spannungsdifferenz der Elektroden des Schlagraumes f bei der sich herstellenden Stromstärke. Es ergab sich als Mittel aus je 10 Bestimmungen:

Tabelle IX.

Luftdruck = 76,2 cm. Zimmertemperatur = 21,3° C.

Hauptschlagweite f in cm	Stromstärke in M.-A.	Nebenschlagweite F in cm	Spannungsdiff. in Volt
2,5	0,602	0,63	21400
5,0	0,600	1,03	33500
7,5	0,609	1,40	43800
10,0	0,601	1,83	54800
12,5	0,581	2,28	65300

Wie ein Vergleich der zweiten und vierten Verticalcolumnne der neunten Tabelle zeigt, lieferte die benutzte 60 plattige Influenzmaschine in der That bei constanter Rotationsgeschwindigkeit ihrer Scheiben stets den gleichen Strom, unabhängig von der Spannungsdifferenz der Maschinenconductoren; eine wesentliche Abnahme der Stromstärke trat erst oberhalb 60000 Volt ein.

Wählt man als Anode nicht wie bisher eine stumpfe Metallspitze, sondern eine grössere Metallkugel, so bilden sich an ihr bei grosser Schlagweite und starkem Strome häufig *mehrere* lang gestielte, gleichzeitig brennende positive Büschel aus.

Erfolgt die Büschelentladung in Form eines *einzigen* langgestielten Büschels, so ist die Spannungsdifferenz der Elektroden während der Büschelentladung bei gleicher Schlagweite nahezu *unabhängig* von der Grösse der Anode. Dies zeigt Tab. X. Es wurden hier (Versuchsanordnung im übrigen wieder wie Figg. 1a und 6) als Anode p_1 nacheinander eine stumpfe Messingspitze und Messingkugeln von verschiedenem Durchmesser benutzt. Die rückseitigen 0,2 cm starken Zuleitungen zu ihnen waren in jedem Falle mit Glas und Siegelack umhüllt, um Elektrizitätsausströmen aus ihnen zu verhindern.

Tabelle X.

Luftdruck = 75,3 cm. Zimmertemperatur = 16,7° C.

Durchmesser der Pol- kugel (Anode)	Schlagweite f gleich 3 cm					f gleich 8 cm	
	Spitze	$d = 1,0$ cm		$d = 2,5$ cm		Spitze	$d = 1,0$ cm
Stromstärke in M.-A. .	0,40	1,12	0,64	1,20	1,84	0,36	0,32
Spannung bei $\left\{ \begin{array}{l} F \text{ in cm} \\ \text{Büschelentl. in Volt} \end{array} \right.$	0,69	0,75	0,74	0,81	0,81	1,41	1,55
	23400	25200	24900	27000	27000	44100	478

XII. Positive Glimm- und positive Büschelentladung bei grosser Schlagweite.

Bei den in Tab. XI angegebenen Messungen war die Versuchsanordnung der Figg. 1a und 6 auch insofern abgeändert, als der Halbleiterplatte eine horizontale Lage, der anderen Elektrode eine verticale Stellung gegeben war. Die hier be-

nutzte Schieferplatte war 30 cm breit, 50 cm lang, 0,5 cm stark; ihre Rückseite war durchaus mit Stanniol belegt und letzteres mit dem einen Pole des nebengeschalteten Funkenmikrometers metallisch verbunden, ebenso natürlich auch mit dem einen (negativen) Influenzmaschinenconductor. Um Elektrizitätsverluste zu vermeiden, lag die Schieferplatte auf einer sie allerseits weit überragenden Glasplatte, ausserdem aber waren auch noch die Ränder der Schieferplatte dick mit Paraffin überzogen. Als gegenüberstehende kleinere Elektrode diente wieder der schon oft benutzte, 15 cm lange, 0,15 cm starke, bis auf sein abgekugelter Ende von einer Glasröhre umgebene Eisencylinder. Die Messungen erfolgten (wie bei Tab. V) in der Weise, dass (für die Hauptschlagweiten $f = 5, 10$ und 15 cm) jedesmal diejenige Stromstärke abgelesen wurde, bei welcher soeben in der fest eingestellten Nebenschlagweite F' ein Funkenstrom auftrat.

Tabelle XI.

Luftdruck = 74,7 cm. Zimmertemperatur = 16,8 ° C.

	Stromstärke in M. A. bei der Spannung von			
	32600 Volt ($F = 1,0$ cm)	46400 Volt ($F = 1,5$ cm)	58900 Volt ($F = 2,0$ cm)	70000 Volt ($F = 2,5$ cm)
neg. Entlad. $f = 5$ cm	—	0,138	0,248	0,360
pos. Entlad. $f = 5$ „	0,031	—	—	—
neg. Entlad. $f = 10$ „	0,015	0,040	0,096	0,149
pos. Entlad. $f = 10$ „	0,018	0,040	0,094	—
neg. Entlad. $f = 15$ „	—	0,027	0,053	0,087
pos. Entlad. $f = 15$ „	—	0,028	0,050	0,077

Die Angaben der Tabelle beziehen sich auf negative Entladung in Form eines einzigen Büschels und auf positive Glimmentladung.

Ferner wurde mit der gleichen Versuchsanordnung die Grenzstromstärke der positiven Glimmentladung, sowie die zugehörige Grenzpotentialdifferenz festgestellt; ausserdem wurde auch noch bestimmt, wie tief jedesmal die Potentialdifferenz sank bei Eintritt der (einstieligen) positiven Büschelentladung. Es ergab sich:

Tabelle XII.

Luftdruck = 74,7 cm. Zimmertemperatur = 16,8 cm.

	Grenzstromstärke d. posit. Glimment- lad. in M.-A.	Grenzspannung der pos. Glimment- ladung in Volt	Minimalspannung der pos. Büschel- entlad. in Volt
$f = 5$ cm	0,0767	41100 ($F = 1,3$ cm)	29700 ($F = 0,9$ cm)
$f = 10$ „	0,0944	60200 ($F = 2,05$ „)	51100 ($F = 1,68$ „)
$f = 15$ „	0,0944	74000 ($F = 2,68$ „)	71800 ($F = 2,58$ „)

Während der Büschelentladung stieg auch hier wieder (vgl. Tab. VIII) die Spannungsdifferenz der Elektroden nur wenig mit wachsender Stromstärke. So fand sich z. B. für 10 cm Schlagweite bei 1,0 Milliamp. 53 600 Volt ($F = 1,78$ cm), und bei 1,36 Milliamp. 56 500 Volt ($F = 1,90$ cm).

XIII. Beobachtungen am positiven Büschel und negativen Büschellichtbogen.

Positive Büschelentladung. Bei kleiner Schlagweite (bis ca. 5 cm), aber nicht zu kleiner *constanter* Stromstärke (ca. 0,5 Milliamp.), erscheint die nahe continuirliche Büschelentladung als ein schmaler, nahezu geradliniger, die Elektroden verbindender Lichtstreif (von etwa 0,01 qcm Querschnitt). Seine Färbung ist bei geringer Stromstärke nach der Anode zu carminrot, nach der Kathode zu bläulich. Unmittelbar an der Kathode (Halbleiterplatte) verbreitert sich die Lichterscheinung zu einer auf der Kathodenplatte aufliegenden mattbläulichen Lichtscheibe; letztere erreicht bis zu 5 cm Durchmesser.¹⁾

Entfernt man bei *constanter* Stromstärke die Elektroden mehr und mehr, so verlängert sich der Lichtstrich zunächst. Weiterhin aber verdickt und vergrößert sich die Lichtscheibe an der Kathode, und schliesslich entwickelt sich aus ihr die Krone des Büschels. Bei kleiner Schlagweite überblickt man

1) Vgl. Wied. Ann. 63. p. 110. 1897, Figg. 1 und 2; die in diesen Figuren abgebildeten Entladungsprocesse zeigen links von der Halbleiterplatte (hier Zwischenelektrode) negativen Büschellichtbogen, rechts dagegen (nahe continuirliche) positive Büschelentladung.

also zunächst gewissermaassen nur den Stiel des Büschels und erst bei grösserer Schlagweite tritt dann sozusagen die Krone aus der Halbleiterplatte hervor. So überblickt man z. B. für etwa 0,6 Milliamp. erst bei 12—15 cm Schlagweite das vollentwickelte Büschel.

Das allmähliche Entstehen eines positiven Büschels in grossem Schlagraume bei allmählicher Stromverstärkung ist schon im sechsten Abschnitte (vgl. Fig. 4) geschildert.

Zwischenkörper im Schlagraume. Ebenso wie man bekanntlich bei nahe continuirlicher positiver Glimm- oder negativer Büschelentladung einen kleinen Körper in den Schlagraum (zwischen Spitze und Platte) halten kann, ohne wesentliche Störung des Charakters des gesamten Entladungsvorganges, ebenso kann man auch in die Krone des nahe continuirlichen Büschels einen Leiter, Halbleiter oder Nichtleiter einführen. Der Zwischenkörper wird einfach von dem bläulichen Lichte der Büschelkrone umspült; nach der Kathodenplatte zu bildet sich hierbei ein Schattengebiet, nach der Anode zu eine Lichtverdichtung (wohl infolge der Stauung des von der Spitze ausgehenden Gebläses). Es kann z. B. der isolirt aufgestellte Experimentator ruhig einen Finger normal zur Axe des Büschels in dessen Krone einführen, ohne dass die nahe continuirliche Büschelentladung zerstört wird; andererseits hat (günstigenfalls) der Experimentator nur das Gefühl, dass er seinen Finger in ein Gebläse schwach erwärmter Luft hält.

Bei den geschilderten Versuchen nimmt der in die Krone des Büschels gehaltene kleine Körper die Spannung an, welche an der Einführungsstelle in dem Büschel herrscht. Dies ist jedoch keineswegs nötig. Führt man in die Krone des Büschels einen Leiter von *bestimmter, unveränderlicher* Spannung ein, so regulirt sich selbstverständlich umgekehrt die Spannung auf den Elektroden in leicht zu übersehender Weise derart, dass sich im Büschel an der Einführungsstelle des Leiters von selbst die Spannung des letzteren herstellt.¹⁾ Dies geht so weit, dass man z. B. einen *zur Erde abgeleiteten* Draht normal zur Büschelaxe in die Krone des Büschels einführen und

1) Das Gleiche ist natürlich auch bei den übrigen nahe continuirlichen Entladungsformen anzunehmen, nur fällt es hier nicht so in die Augen, wie gerade bei der positiven Büschelentladung.

dann (langsam) in letzterer *hin- und herbewegen* kann, ohne dass hierdurch die Ausbildung des positiven Büschels gestört würde. Nähert man z. B. den Draht der Anode, so sinkt auf letzterer die Spannung und steigt entsprechend auf der Kathode.

Büschellichtbogen. Gewissermaassen mit Umgehung der hohen Grenzspannung von Glimmen oder Büschelentladung kann man (in ganz analoger Weise, wie dies für den Flammenbogen bekannt ist) einen längeren Büschellichtbogen erhalten durch allmähliche, vorsichtige Vergrösserung des zunächst kleinen Schlagraumes, *während in ihm schon ein Büschellichtbogen vorhanden ist.* Die relative Verlängerung lässt sich freilich beim Büschellichtbogen nicht so weit treiben, wie beim Flammenbogen, wo sie bekanntlich bis zu mehr als dem Hundertfachen der eigentlichen Schlagweite gehen kann.

Mit Hilfe von *zwei* 60plattigen Influenzmaschinen, welche mir vorübergehend zur Verfügung standen, erhielt ich in der eben angegebenen Weise zwischen Spitze und Halbleiterplatte einen negative Büschellichtbogen von 14—15 cm Länge; die Stromstärke betrug hierbei etwa 3 Milliamp. Dagegen war für positiven Büschellichtbogen nur eine Länge von 7 bis 8 cm zu erzwingen.

Bei grosser Schlagweite (15 cm) war die Lichtgestalt des rein negativen Büschellichtbogens folgende. In der Nähe der Kathode bestand der Büschellichtbogen wie immer aus einer Reihe scharf getrennter Lichtschichten. Weiter ab von der Kathode wurde die Schichtung immer unklarer. Immerhin liessen sich bis etwa 8 cm Abstand 9—10 Lichtschichten gut unterscheiden. Weiterhin bestand dann der Büschellichtbogen in einem ungeschichteten Lichtbände; dieses verbreiterte sich nach der Anodenplatte zu ein wenig und zeigte schliesslich die Tendenz, in mehrere wenig divergirende Aeste zu zerfallen; jedoch betrug hierbei der Gesamtquerschnitt der Lichterscheinung in der Nähe der Anode doch nur höchstens 0,5 qcm.

Die Färbung des Büschellichtbogens war der grossen Stromstärke entsprechend kaum mehr carminrot, sondern eher ziegelrot.

Bei starkem Strome beginnen auch die ursprünglich dunklen

Zwischenräume Licht auszusenden. Hierdurch wird die Schichtung für das Auge weniger auffallend; an Stelle hellerer und dunklerer Stellen unterscheidet man jetzt nur noch verschieden gefärbte Gebiete längs der Entladungsbahn.

Schliesslich sei noch auf folgendes aufmerksam gemacht. Mit Anwendung des Wehneltunterbrechers geben Inductionsapparate bekanntlich eine eigentümliche, nahe continuirliche Entladung. Dieselbe ähnelt in Gestalt und Färbung dem kurzdauernden ungeschichteten gelblichen Büschellichtbogen, welcher bei wenig verlangsamter Entladung grosser Leydener Batterien dem Initialfunken folgt. Die Annahme erscheint naheliegend, dass die in Rede stehende nahe continuirliche Ruhmkorffentladung nichts anderes ist, als ein Büschellichtbogen mit relativ hoher Stromintensität; eine Schichtung, wie sie dem von mir untersuchten Büschellichtbogen eigen ist, kommt freilich schon wegen der Inconstanz in der Stromzufuhr nicht zur Ausbildung.

Elektrostatische Ablenkung der Entladungsbahn. Nähert man elektrisch geladene Körper einem Büschellichtbogen, so wird seine Bahn abgelenkt. Dies lässt sich leicht in auffallender Weise folgendermaassen zeigen. Mit der Zuleitung zur spitzen Kathode *a* (vgl. Fig. 7) sei der bewegliche Draht *d* verbunden. Nähert man sein freies Ende *b* dem Büschellichtbogen, so wird dieser abgelenkt.¹⁾ Ja man kann, wie die Figur zeigt, das Drahtende *b* bis in die normale Verbindungslinie

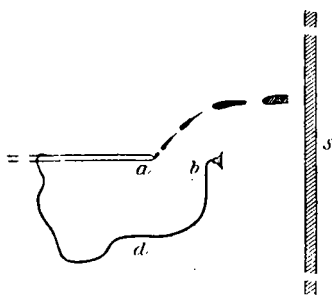


Fig. 7.

von *a* nach der Schieferplatte *s*, d. h. an Punkte der ursprünglichen Bahn des Büschellichtbogens verschieben, ohne dass der (die Spitze *b* in grossem Bogen umgehende) Büschellichtbogen erlischt.

1) In ähnlicher Weise wird auch eine nahe continuirliche positive einstiellige Büschelentladung zwischen *a* und *s* abgelenkt, nur springt hier der Ausgangspunkt der Entladung sehr leicht von *a* nach *b* über. Letzteres ist dadurch zu erschweren, dass man den Draht *d* bei *b* nicht in eine Spitze, sondern in eine Metallkugel (z. B. von 2 cm Durchmesser) endigen lässt.

Wie die Figur angiebt, findet nicht nur von a aus Elektrizitätsentladung in Form von Büschellichtbogen, sondern gleichzeitig auch von der Drahtspitze b durch ein negatives Büschel statt. Ich möchte nur darauf hinweisen, dass meist bei gleicher Versuchsanordnung *in mehrfacher Art eine stationäre Stromspaltung möglich ist*, je nachdem der Entladungsprocess eingeleitet wird. In dem besprochenen Falle war das Drahtende erst dann an die Stelle b gebracht worden, als von a nach s schon ein Büschellichtbogen bestand. Wäre dagegen die relative Lage der Elektroden a , b und s schon ursprünglich die in der Figur angegebene gewesen, und wäre dann, von kleinsten Werten ausgehend, die Stromstärke bis zu dem gleichen Werte wie im vorigen Falle gesteigert worden, so würde jetzt bei b ein Büschellichtbogen, bei a ein (schwacher) Büschel die Elektrizitätsentladung vermitteln, wobei die Spannungsdifferenz der Elektroden eine kleinere sein würde, als im vorher besprochenen Falle.

XIV. Einfluss stossweiser Elektrizitätszufuhr zu den Elektroden.

Die Versuchsanordnung, ähnlich der im XII. Abschnitte, war die in Fig. 8 schematisch dargestellte. Die plattenförmige Elektrode (s) wurde hier gebildet durch eine einseitig mit Stanniol belegte grosse Glasplatte; die Stanniolbelegung bedeckte eine Kreisfläche von 60 cm Durchmesser. In der Zu-

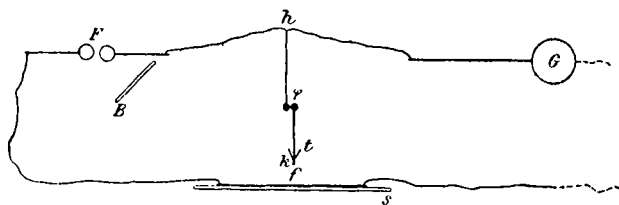


Fig. 8.

leitung zur kleinen Elektrode war eine variable Funkenstrecke φ eingeschaltet. Die Abstände $h F$ und $h G$ betrugen je mehr als 100 cm. Eine gegenseitige Belichtung der Funkenstrecken f , F und φ war durch die undurchsichtige Ebonitblende B und durch den mit Siegelack innen überzogenen

Glastrichter t verhindert. Als kleine Elektrode k diene eine Messingkugel von 0,5 cm Durchmesser.

An Stelle des nahe continuirlichen positiven Glimmens erscheinen bei Vorschaltung einer Funkenstrecke φ zahlreiche kurze (zunächst nur bis 1 cm lange) Lichtfäden. Bei stärkerem Strome erscheint die Anode umgeben von einer Strahlenkrone; bei grosser Schlagweite (ca. 15 cm) habe ich diese Entladungsform mit Strahlen bis zu 5 cm Länge beobachtet. Man erkennt in letzterem Falle, dass die Strahlenhülle gebildet wird aus zahllosen kurzen, gestielten, positiven Büscheln. Die Vorschaltfunkenstrecke φ bewirkt hiernach, dass schon bei schwachem Strome an Stelle des Glimmens eine besondere Entladungsart — die *positive Streifenentladung* (vgl. Abschnitt XXII) — erzeugt wird, bestehend aus einer Anzahl kurzer, fadenförmiger positiver Büschel (vgl. Fig. 4). Erst bei einer Stromstärke, welche *wesentlich grösser* ist, als für $\varphi = 0$ die Grenzstromstärke für positive Glimmentladung, erscheint Büschelentladung, den Schlagraum wieder in Form eines einzigen grossen Büschels voll überbrückend.

Bei negativer Entladung tritt an der kugelförmigen Kathode in der Regel auch schon bei constanter Stromzufuhr ($\varphi = 0$) negative Streifenentladung (in Form zischender Lichtfäden an der Kathode) auf; nur ausnahmsweise bildet sich ein wohl entwickelter negativer Büschel. Bei Vorschaltung der Funken φ tritt überhaupt nur noch Streifenentladung auf. Aus den zahlreichen zunächst leicht unterscheidbaren einzelnen Lichtfäden wird bei Stromverstärkung auch hier eine die Kathode fast lückenlos umgebende mattblaue Lichthülle. Die Dicke derselben ist bei gleicher Stromstärke etwas kleiner als diejenige bei positiver Streifenentladung; auch fehlt der rötliche Kern, welcher bei *positiver* Streifenentladung aus den Stielen zahlreicher, positiver Büschel hervorgeht; sonst ähneln sich jedoch die positive und negative Streifenentladung sehr.

Bei stossweiser Elektrizitätszufuhr ist die grösste Spannungsdifferenz (Grenzspannung), welche überschritten werden muss, ehe einstielige positive Büschelentladung bez. *Funken* erhalten wird, viel niedriger, wenn die Elektrizitätszufuhr zur kleinen Elektrode stossweise, als wenn dieselbe allmählich geschieht; es ergab sich

Tabelle XIII.

Luftdruck = 75,6 cm. Zimmertemperatur = 18,3° C.

	Grenzspannungen (Funkenpotentiale) für positive Entladung bei			
	$\varphi = 0$		$\varphi = 0,05$ cm	
	(langsame Stromvermehrung)		(rasche Stromvermehrung)	
	F in cm	in Volt	F in cm	in Volt
Hauptschlagweite $f = 5,0$ cm	2,1 (1,9—2,2)	61300	1,05 (0,9—1,1)	34100
„ 9,9 „	3,29 (3,1—3,5)	85800	1,74 (1,62—1,90)	52600
„ 15,0 „	> 3,6	> 91000	2,92 (2,88—3,00)	78600
„ 18,0 „	—	—	ca. 3,6	ca. 91000

Im zweiten Falle der Tabelle ($\varphi = 0,05$ cm) wurden die Versuche so angestellt, dass die Influenzmaschine bei metallisch verbundenen Maschinenconductoren in constantem Gange erhalten wurde (sodass sie etwa 1 Milliamp. lieferte); die metallische Verbindung wurde dann *plötzlich gelüftet*, sodass jetzt die zuvor verschwindend kleine Spannungsdifferenz bei f und F rasch in die Höhe ging.

(Bemerkung während des Druckes: Ein Vergleich der Wertefolgen in Tab. XIII mit denen der Tab. XII zeigt, dass die Grenzspannung der positiven Streifenentladung (bei $\varphi = 0,05$ cm) nur wenig höher ist als die Minimalspannung bei positiver einstieliger Büschelentladung. Nach allem scheint sich durch Vorschalten von φ die Abhängigkeit der Spannung von der Stromstärke z. B. bei 10 cm Schlagweite in der Weise zu ändern, wie es Fig. 9 (Stromstärke als Abscisse, Spannung als Ordinate) zeigt; der Spannungsverlauf für $\varphi = 0$ ist schwach, derjenige für $\varphi > 0$ stark gestrichelt.)

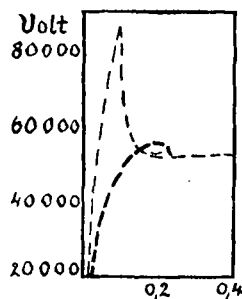


Fig. 9.

Die angegebenen Thatsachen lassen sich natürlich auch zur Discussion der Erscheinungen bei der bekannten Stossentladung von Inductionsapparaten heranziehen.

Zusammenfassung.

Der zusammenfassenden Besprechung der Entladungsvorgänge bei Schlagweiten von 1 bis 8 cm und Stromstärken bis zu 2 Tausendstel Ampère sei folgendes voraus bemerkt.

In der Einleitung (vgl. Abschnitt II) war schon hervorgehoben worden, dass die Art des im Schlagraume auftretenden Entladungsvorganges in jedem einzelnen Falle bedingt ist durch das Ergebnis der gegenseitigen Selbstregulierung verschiedener einander beeinflussender Veränderungen des Schlagraumzustandes. Wenn sich nun auch für jede bestimmte Stromstärke und Schlagweite, wie die Beobachtung ergibt, in der Regel auch eine bestimmte Entladungsart ausbildet, so wird man doch von dieser eine von Fall zu Fall oder auch nur dauernd sich bis ins einzelne gleich bleibende Aus- und Durchbildung nicht erwarten dürfen. Wie man sich jederzeit leicht überzeugt, und wie ein Vergleich meiner Tabellenangaben untereinander zeigt, ist die Unsicherheit der Erscheinungen sogar *recht erheblich*. Wenn ich trotzdem versuche, in der folgenden Zusammenstellung in qualitativer und auch quantitativer Hinsicht ein zusammenhängendes Bild der Abhängigkeit der Entladungsvorgänge von der mittleren Stromstärke zu geben, so kann damit nur beabsichtigt sein, die Verhältnisse so zu schildern, wie sie unter den gleichen Versuchsbedingungen zwar in der Regel angenähert immer wieder auftreten, von denen aber beträchtliche Abweichungen (besonders in quantitativer Hinsicht) keineswegs selten sind.

A. Spitze Elektrode¹⁾ gegenüber einer ausgedehnten Platte.

XV. Existenzbereiche der einzelnen positiven und negativen Entladungsarten.

Bei verschwindend kleiner Elektrodencapazität treten im Schlagraume nur nahe continuirliche Entladungsvorgänge auf; zeitlich ausgesprochen discontinuirliche Entladung (wie stoss-

1) Hierunter ist im Folgenden speciell eine *stumpfe* Spitze (Endkrümmung etwa 0,5 mm) gemeint.

weiser Büschel etc. oder gar Funkenstrom) kommt *nicht* zur Ausbildung.

Bei Entladung rein positiven Charakters (spitze Anode, plattenförmige Halbleiter-Kathode) zeigt die Anode, wenn man von schwächster Stromintensität ausgeht, bei deren Steigerung zunächst das bekannte positive Glimmen, dieses geht allmählich in nahe continuirliche positive Büschelentladung über, und bei noch wesentlich grösserer Stromstärke erscheint dann der positive Büschellichtbogen.

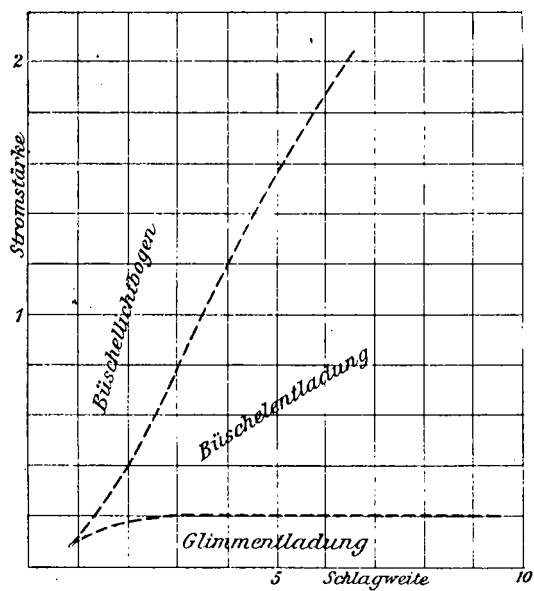
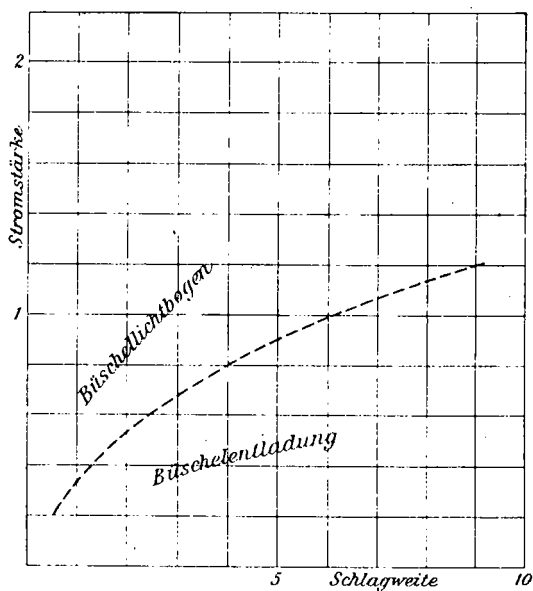
Bei Entladung negativen Charakters (spitze Kathode, plattenförmige Halbleiter-Anode) tritt zuerst die bekannte negative Büschelentladung auf¹⁾; bei hinreichender Stromstärke erscheint dann der negative Büschellichtbogen.

Obgleich der Uebergang irgend einer Entladungsart in die nächstfolgende (bei verschwindend kleiner Elektrodenkapazität) in vollkommen allmählicher Weise erfolgt (vgl. die Schilderung dieser Uebergänge in Abschnitt VI und VII), so findet doch die Aenderung der Entladungsform (wenigstens bei Schlagweiten über 1 cm) innerhalb eines sehr geringen Aenderungsgebietes der Stromstärke statt. Man kann demnach recht wohl je von einer *bestimmten* Stromstärke, der „Grenzstromstärke“ sprechen, bei welcher der ins Auge gefasste Uebergang stattfindet.

Bei verschiedenen Schlagweiten erhält man für die Grenzstromstärke zwischen den gleichen Entladungsformen im allgemeinen verschiedene Werte; die Grenzstromstärken sind also Functionen der Schlagweite. Figg. 10a u. 10b zeigten, erstere für positive, letztere für negative Entladung, die Abhängigkeit der Grenzstromstärken von der Schlagweite.

Die Grenzstromstärke zwischen positiver Glimm- und positiver Büschelentladung ist nahezu constant, unabhängig von der Schlagweite (vgl. Abschnitt IV, Tabelle I). Dagegen nimmt die Grenzstromstärke zwischen positiver Büschelentladung und positivem Büschellichtbogen mit der Schlagweite rasch zu. Die Grenzstromstärke der negativen Büschelent-

1) Unter welchen Voraussetzungen der negativen Büschelentladung bei allerschwächsten Strömen eventuell eine negative Glimmentladung vorausgehen kann, bleibe dahingestellt.

Fig. 10^a (positive Entladung)Fig. 10^b (negative Entladung)

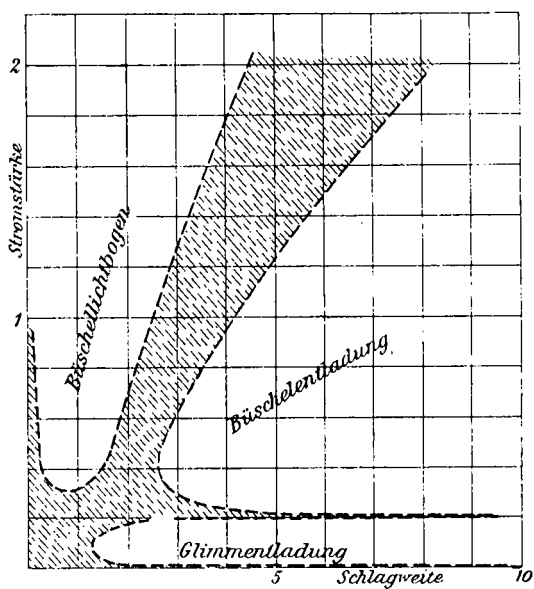


Fig. 11^a (positive Entladung)

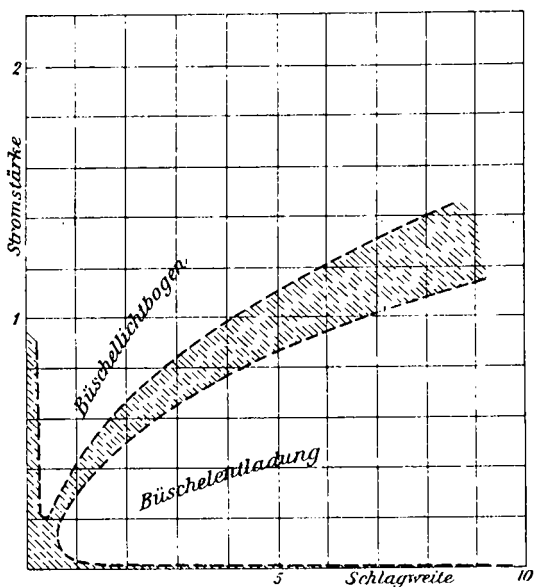


Fig. 11^b (negative Entladung)

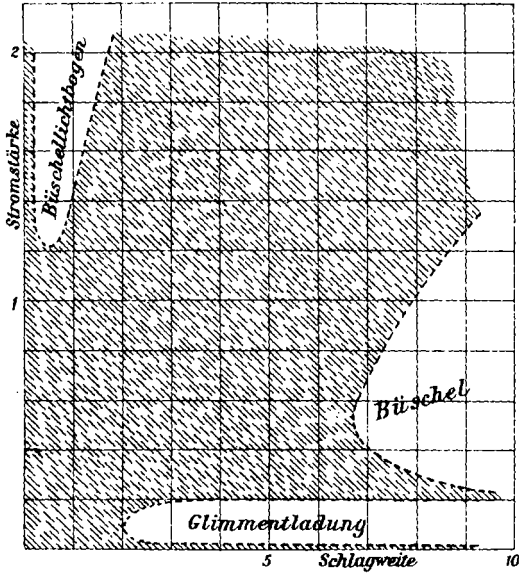


Fig. 12^a (positive Entladung.)

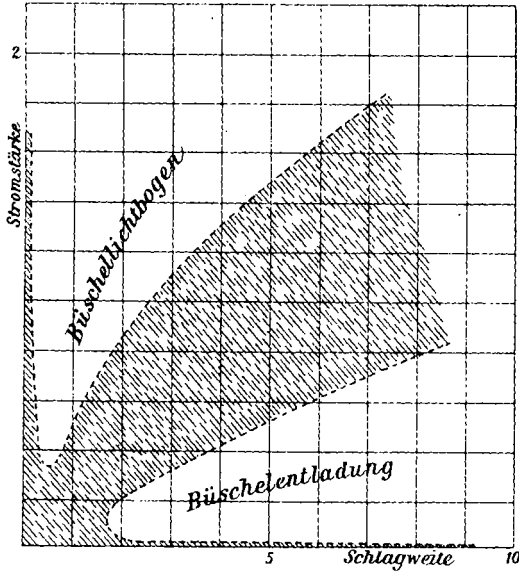


Fig. 12^b (negative Entladung.)

ladung gegen den negativen Büschellichtbogen wächst gleichfalls mit zunehmender Schlagweite.

Hervorzuheben ist, dass man nahezu die gleichen Grenzstromstärken erhält, ob man die Uebergänge bei zunehmender oder bei abnehmender Stromstärke beobachtet.

Jeder der nahe kontinuierlichen Entladungsarten kommt also, wie Figg. 10 a u. 10 b zeigten ein bestimmter Schlagweiten-Stromstärkenbereich zu, innerhalb dessen sie und nur sie allein (unter normalen Verhältnissen) existenzfähig ist.

Der vorangehend besprochene Fall verschwindend kleiner Elektrodencapazität ist ein Grenzfall, den man zwar, genau genommen, experimentell nicht vollkommen verwirklichen kann, dem man aber doch schon mit der von mir benutzten, in Fig. 1 a und 1 b angegebenen Versuchsanordnung recht nahe kommt.

Ist die Elektrodencapazität nicht verschwindend klein, so erfolgt der Uebergang zweier nahe kontinuierlicher Entladungsarten ineinander nicht mehr allmählich, sondern es tritt an allen Uebergängen zeitlich discontinuirliche Entladung auf. Die Erscheinungsform der zeitlich discontinuirlichen Entladung kann sehr verschieden sein; zahlreiche, zischende Lichtfäden, stossweise auftretende Büschel, halbe Funken, vor allem aber der eigentliche *Funkenstrom*.

In Figg. 11 a und 11 b ist für positive und negative Entladung das Stromstärken-Schlagweitengebiet der zeitlich discontinuirlichen Entladung (wie man es für etwa 10 cm Elektrodencapazität beobachten könnte) schraffirt.

Bei Vergrößerung der Elektrodencapazität verbreitert sich das Gebiet der discontinuirlichen Entladung allseitig. Von der hiermit verbundenen Zurückdrängung der Gebiete nahe kontinuierlicher Entladung wird besonders stark der positive und negative Büschellichtbogen getroffen.¹⁾ Bei etwa 50 cm Elektrodencapazität nimmt die zeitlich discontinuirliche Entladung ungefähr das in Figg. 12 a und 12 b schraffirt dargestellte Stromstärken-Schlagweitengebiet ein.

1) Dies ist der Grund, weshalb der Büschellichtbogen so lange übersehen wurde.

Spannungsdifferenz der Elektroden.

XVI. Anfangspotentialdifferenz.

Die Spannungsdifferenz, bei welcher eine Entladung, d. h. ein Abströmen der Elektrizität aus den Elektroden in den Schlagraum überhaupt beginnt,¹⁾ heisst die „*Anfangspotentialdifferenz*“,²⁾ gleichgültig, welches die zuerst entstehende Art der Entladung ist, also auch dann, wenn die Entladung den Schlagraum *nicht* in sichtbarer Weise *überbrückt*.³⁾

Die Anfangspotentialdifferenz für die von positiver oder negativer Elektrode ausgehende Entladung unterscheidet sich, wenn überhaupt, so höchstens um etwa 5 Proc.⁴⁾ Sie wächst mit der Schlagweite und erreicht für unendlich grosse Schlagweiten einen *endlichen* Grenzwert ($A\infty$); dies ist diejenige Spannung, welche auf einer frei im allseits unelektrischen Raume befindlichen isolirten Elektrode nicht überschritten werden kann, ohne dass von der Elektrodenoberfläche aus spontan Elektrizitätsentladung in den freien Raum hinein erfolgt.⁵⁾

Der Wert der Anfangspotentialdifferenz hängt vor allem von der Gestalt und Grösse der Schlagraumelektroden ab.

1) Ich sehe hier ab von der event. im Schlagraume stattfindenden minimalen, rein elektrolytischen Elektrizitätsleitung.

2) Ausser der Anfangspotentialdifferenz hat man noch zu unterscheiden die „Entladungspotentialdifferenz“, d. h. die Spannungsdifferenz der Elektroden, während im Schlagraume eine Entladung (Glimmen, Büschel etc.) stattfindet, ausserdem die verschiedenen „Funkenpotentialdifferenzen“, bei denen speciell ein Funkenstrom im Schlagraume einsetzt. Eine allgemein gebräuchliche Nomenclatur besteht bisher leider noch nicht; vielfach werden auch die genannten verschiedenen Begriffe nicht scharf genug unterschieden.

3) Insofern bei nicht zu grossen Schlagraume die bei nicht verschwindend kleiner Elektrodenkapazität und Elektrodengrösse zuerst (beim Ueberschreiten der Anfangspotentialdifferenz) auftretende stossweise Entladung einen Funkenstrom bildet, *kann* die Anfangspotentialdifferenz zugleich auch die Bedeutung einer Funkenpotentialdifferenz (vgl. Abschnitt XVIII) haben. Ist der Schlagraum gross im Vergleiche zum Durchmesser der kleineren Elektrode, so ist dies indessen in der Regel *nicht* der Fall.

4) Vgl. A. Heydweiller, Wied. Ann. 48. p. 226. 1893.

5) A. Heydweiller, l. c. p. 231.

An sehr *spitzen* Elektroden (gegenüber einer Platte) erreicht die Anfangspotentialdifferenz überhaupt keinen hohen Wert¹⁾, wenigstens im Vergleiche zu den an der gleichen Spitze möglichen Entladungspotentialdifferenzen. Selbst an der bei den Messungen zu vorliegender Arbeit von mir meist benutzten, kaum noch als stumpfe Spitze zu bezeichnenden Elektrode (0,15 cm starker Stahlcylinder mit abgekugelmtem Ende) erreichte die Anfangspotentialdifferenz noch nicht 12000 Volt (vgl. Tab. VII erste Reihe).

XVII. Potentialdifferenz der Elektroden während des Vorhandenseins irgend einer Entladungsart im Schlagraume (Entladungspotentialdifferenz).

Spitze gegenüber Halbleiterplatte, Elektrodencapacität verschwindend klein.

Da für eine bestimmte Schlagweite und Stromstärke nur eine bestimmte (positive oder negative) Entladungsart existenzfähig ist, so gehört auch zu jeder Schlagweite und Stromstärke nur je *ein* Wert der Spannungsdifferenz für positive oder negative Entladung. Der Einfachheit halber will ich im Folgenden bei positiver und negativer Entladung stets nur die Absolutwerte der Spannungsdifferenz ins Auge fassen und von ihrem Vorzeichen absehen.

In den beiden nachstehenden Tabellen habe ich den Versuch gemacht, auf Grund meiner Messungen für verschiedene Schlagweiten und Stromstärken die zugehörigen Spannungsdifferenzen anzugeben.

Tabelle XIV.

Rein positive Entladung (spitze Anode, plattenförmige Kathode).

Stromst. in Milliamp.	Spannungsdifferenz der Elektroden in Volt bei Schlagweiten von					
	2,5 cm	5,0 cm	7,5 cm	10,0 cm	12,5 cm	15,0 cm
0,1	27000*	42500*	53000*	62000*	69000*	74000*
0,3	19000	30000	39000	51100	62500	71800
0,6	21400	33500	43800	54800	65300	—
1,0	21500	35000	45500	55600	—	—
1,5	6500	36000	46300	55600	—	—
2,0	6400	11000	46300	—	—	—

1) Vgl. J. Precht, Wied. Ann. 49. p. 170. 1893.

Die Werte der Spannungsdifferenzen für positive Glimmentladung sind mit einem Sternchen (*) versehen, diejenigen für positive Büschelentladung sind in liegender, die für positiven Büschellichtbogen in stehender Schrift gedruckt.

Tabelle XV.

Rein negative Entladung (spitze Kathode, plattenförmige Anode).

Stromst. in Milliamp.	Spannungsdifferenz der Elektroden in Volt, bei einer Schlagweite von					
	2,5 cm	5,0 cm	7,5 cm	10,0 cm	12,5 cm	15,0 cm
0,05	—	—	39000	47000	54000	60000
0,1	27000	40000	51000	60000	68000	74000
0,3	8000	64000	77000	—	—	—
0,6	7400	12400	—	—	—	—
1,0	6900	11600	—	—	—	—
1,5	6500	11000	15000	—	—	—
2,0	6400	10500	14500	—	—	—

Die Spannungsdifferenzen für negative Büschelentladung sind mit liegenden, die für negativen Büschelbogen mit stehenden Ziffern angegeben.

Die Tabellen sollen natürlich nur eine Uebersicht über den allgemeinen Charakter der Abhängigkeit der Spannungsdifferenz von Schlagweite und Stromstärke geben; im einzelnen Falle werden natürlich je nach der Natur (Oberflächenbeschaffenheit etc.) der benutzten Elektroden erhebliche Abweichungen in quantitativer Hinsicht auftreten.

Bei der folgenden, eingehenderen Besprechung der Spannungsverhältnisse beschränke ich mich auf die Betrachtung des speciellen Falles der *Abhängigkeit der Spannungsdifferenz von der Stromstärke bei der constanten Schlagweite von etwa 5 cm* (vgl. hierzu Fig. 13). Die Angaben der obenstehenden Tabellen gestatten dann ohne weiteres die Betrachtungen auf andere Schlagweiten zu übertragen.

A. Positive Entladung (spitze Anode, plattenförmige Halbleiterkathode).

Die Art der Abhängigkeit der Spannung von der Stromstärke bei constanter Schlagweite (5—6 cm) ist aus Fig. 13 (stark gestrichelter Linienzug) zu ersehen.

Positive Glimmentladung. Mit wachsender Stromstärke¹⁾ steigt die Spannungsdifferenz rasch an und erreicht bei der Grenzstromstärke einen grössten Wert, die „Grenzpotentialdifferenz“ der positiven Glimmentladung.

Positive Büschelentladung. Beim Uebergange vom positiven Glimmen zu positiver Büschelentladung sinkt die Spannungsdifferenz sehr rasch erheblich; in dem von mir untersuchten speciellen Falle (vgl. Tab. VI) bei allen Schlagweiten von 1 bis 8 cm auf etwa $\frac{2}{3}$ des Wertes der Grenzpotentialdifferenz der

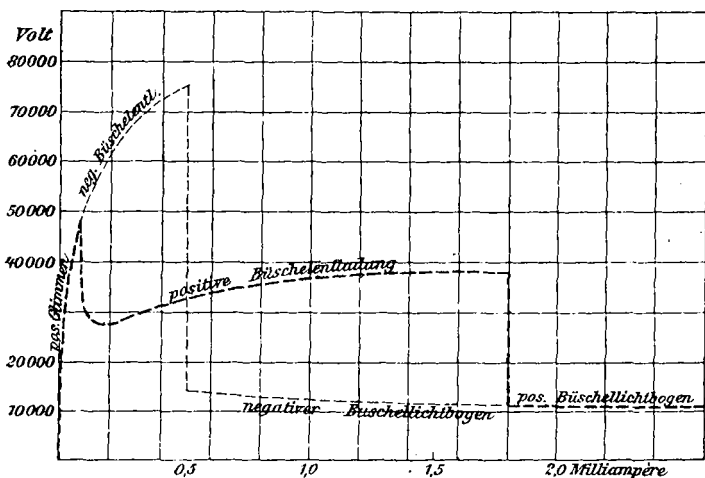


Fig. 13.

Glimmentladung. Bei positiver Büschelentladung steigt die Spannung wieder mit der Stromstärke, und zwar erst rascher, dann langsamer, um schliesslich fast constant zu werden (vgl. Tab. VIII).

*Positiver Büschellichtbogen.*²⁾ Der Uebergang von positiver Büschelentladung in den positiven Büschellichtbogen ist wieder von einem erheblichen Potentialsturze begleitet. Beim Büschel-

1) Ueber die Verhältnisse bei sehr schwachem Strome vergleiche Abschnitt XX.

2) Meine Messungen (Wied. Ann. 66. p. 674. 1898) beziehen sich freilich nur auf den *negativen* Büschellichtbogen, indessen ist es wahrscheinlich, dass die daselbst gefundenen Spannungsverhältnisse nahezu auch für den positiven Büschellichtbogen gelten.

lichtbogen fällt die Spannung ganz langsam mit wachsender Stromstärke.

B. *Negative Entladung* (spitze Kathode, plattenförmige Halbleiteranode).

Negative Büschelentladung. Die Spannungsdifferenz wächst rasch mit der Stromstärke (vgl. den schwach gestrichelten Linienzug in Fig. 13). Der bei der Grenzstromstärke erreichte grösste Wert, die Grenzspannungsdifferenz, ist für gleiche Schlagweite stets wesentlich grösser als die Grenzpotentialdifferenz der positiven Glimmentladung (vgl. Tab. VI).

Negativer Büschellichtbogen: Der Spannungssturz beim Uebergange der negativen Büschelentladung in den Büschellichtbogen ist ein sehr grosser. Beim negativen Büschellichtbogen nimmt die Spannungsdifferenz langsam ab mit wachsender Stromstärke.¹⁾

Ueberblicken wir die verschiedenen Entladungsarten positiven und negativen Charakters (vgl. Fig. 13), so erkennen wir folgendes:

Bei gleicher Stromstärke und gleicher Schlagweite ist die Spannungsdifferenz der Elektroden für positive Glimm- und negative Büschelentladung angenähert die gleiche²⁾; bezüglich der Spannungsverhältnisse sind demnach diese beiden Entladungsformen in Parallele zu stellen. Ebenso ist wohl anzunehmen, dass die Spannungsdifferenz bei positivem und negativem Büschellichtbogen nahe die gleiche ist. Die gestielte positive Büschelentladung steht isolirt.³⁾

Mit wachsender Stromstärke folgen sich, wie man sieht, die Entladungsarten schrittweise derart, dass die Spannungsdifferenz der Elektroden (beim Uebergange) sprungweise kleiner wird. Der Grund hierfür dürfte sein, dass hierbei — wie schon die Lichterscheinungen zeigen — die Stromdichte von Entladungsform zu Entladungsform grösser wird. Sowohl bei positivem Glimmen als auch bei negativem Büschel findet die

1) Vgl. M. Toepler, Wied. Ann. 66. p. 674. 1898.

2) Vgl. auch A. v. Obermayer, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien 93. p. 940. 1886, sowie E. Warburg, Wied. Ann. 67. p. 82. 1899.

3) Vgl. jedoch Abschnitt VIII.

Entladung auf breit gestreuter Bahn statt¹⁾; im Büschellichtbogen ist die Stromdichte viel grösser; die (einstielige) positive Büschelentladung steht zwischen beiden.

Um einen vollen Ueberblick über die Abhängigkeit der Spannungsdifferenz von der Stromstärke (bei einer bestimmten Schlagweite) zu gewinnen, hätte man noch zu berücksichtigen, dass bei allerschwächsten Strömen eventuell der Entladung unter Lichtentwicklung ein lichtloses Elektrizitätsfliessen durch den Luftraum, wie durch einen Elektrolyten, vorhergehen kann ($p = k_1 + k_2 \cdot i$; p Spannungsdifferenz, i Stromstärke, k_1 und k_2 Constanten). Andererseits wird bei immer weiter vermehrter Stromstärke der Büschellichtbogen schliesslich in einen Flammenbogen übergehen; für letztere Entladungsart gilt dann bekanntlich angenähert die Gleichung

$$p = c_1 + \frac{c_2}{i},$$

wo c_1 und c_2 Constanten bedeuten. Zwischen diesen beiden Beziehungen steht der Fall $p = \text{const.}$, welcher, wie oben gezeigt wurde, nahezu für Büschellichtbogen und positive Büschelentladung gilt.

XVIII. Elektrodenkapazität klein,
aber nicht verschwindend klein; Spitze gegenüber Platte. —
Funkenpotentiale!

Der Einfachheit halber sei im Folgenden angenommen, dass die Capacität beider Elektroden die gleiche ist.

Die Vergrösserung der Elektrodenkapazität ändert, soweit ich bemerken konnte, nichts an dem Potentialverhalten *während* des Vorhandenseins einer der nahe continuirlichen Entladungsarten im Schlagraume. Dagegen ist, wie in Abschnitt VI und XV ausführlich behandelt wurde, der allmähliche Uebergang der einzelnen Entladungsarten ineinander gestört. Es erscheint hier zeitlich discontinuirliche Entladung. Ihr Auftreten, bedingt durch das Vorhandensein nicht verschwindend kleiner Elektrodenkapazität, wird offenbar *verursacht* durch den Potentialsturz, welcher, wie aus dem letzten Abschnitte hervorgeht, bei allen Uebergängen stattfindet.

1) Vgl. die diesbezüglichen Messungen von Hrn. E. Warburg l. c.
Annalen der Physik. IV. Folge. 2.

Die discontinuirliche Entladung, welche man bei verschwindend kleiner Stromstärke beobachtet, wird in Abschnitt XX eingehend behandelt werden.

Wir betrachten hier zunächst den Uebergang von positivem Glimmen in positive Büschelentladung. Ist die Elektrodenkapazität nicht zu klein, so schiebt sich zwischen den Stromstärkenbereich für die nahe continuirliche Glimm- und den Bereich der nahe continuirlichen Büschelentladung zeitlich discontinuirliches Elektrizitätsflessen ein (und zwar bei kleiner Elektrodenkapazität in Form von stossweise vorschliessenden Büscheln, bei grösserer als Funkenstrom). Dieses bildet sich wahrscheinlich folgendermaassen. Beim Uebergange wird plötzlich infolge Widerstandsverminderung im Schlagraumgebiete in der Nähe der Spitze ein Teil der auf den Elektroden angehäuften Elektrizität zum raschen Einströmen in letzteren gebracht; eine kurzverlaufende, stossweise, partielle Elektrodenentladung erfolgt. Das in Bildung begriffene Büschel kann hierbei seinerseits sogleich in eine Art plötzlich und vorübergehend auftretenden Büschellichtbogen bez. in einen Flammenbogen von sehr kurzer Dauer, d. h. in einen Funken übergehen. Steigt die Stromstärke hierbei momentan vorübergehend sehr hoch, so erscheint dieser Funken weiss, sonst rötlich. Die mehr oder minder entladenen Elektroden brauchen infolge ihrer (grossen) Capacität Zeit zur Aufladung; dann erst entsteht ein zweiter Stossbüschel oder Funken. Es erscheint also eine Reihe zeitlich discontinuirlich auftretender Büschel oder ein Funkenstrom. Vermehrt man die Stromstärke, so folgen sich die Stossentladungen in immer kleineren Zeitintervallen; immer weniger kann der Schlagraum zwischen zwei Entladungen in den ursprünglichen Zustand (bezüglich seiner Temperatur, Leitfähigkeit etc.) zurückkehren; die Reihe von Stossbüscheln geht schliesslich in nahe continuirliche Büschelentladung über.

Für den Uebergang der negativen Büschelentladung in den negativen Büschellichtbogen gelten ähnliche Betrachtungen. Die einzelnen Funken des hier auftretenden Funkenstromes sind immer relativ (bei der gleichen Elektrodenkapazität) sehr *stark*, entsprechend dem bei diesem Uebergange stets sehr grossen Potentialsturze (vgl. Fig. 13).

Wird die Grenzstromstärke der positiven Büschelentladung überschritten, so tritt zunächst stossweise Funkenentladung *zwischen der Anode und der Krone des Büschels*, d. h. also ein Strom von *halben* Funken auf; bei grösserer Stromintensität werden diese halben Funken allmählich immer länger, und schliesslich erst bilden sich Funken aus, welche den Schlagraum voll überbrücken.

Es bleibt endlich noch derjenige Funkenstrom zu besprechen, welcher *für kleinste Schlagweiten* bei allen Stromstärken zu beobachten ist. Ueberblickt man die Reihenfolge der Entladungserscheinungen, welche bei *constanter* Stromstärke (z. B. 1 Milliamp.), aber abnehmender Schlagweite eintreten (vgl. Figg. 11a und 11b) und bedenkt man, dass bei mikroskopisch kleiner Schlagweite für alle Stromstärken schliesslich ein *Flammenbogen* zwischen den Elektroden auftreten wird ¹⁾, so liegt der Gedanke nahe, dass der in Rede stehende Funkenstrom nichts anderes ist, als diejenige zeitlich discontinuirliche Entladung, welche sich zwischen den Bereich des Büschellichtbogens und des Flammenbogens bei nicht verschwindend kleiner Elektrodenkapazität einschieben muss. An einer ideal feinen Spitze würde man sicher bei *sehr* kleinen Schlagweiten discontinuirliche Entladung des genannten Ursprunges beobachten können; an stumpfen Spitzen hängt jedoch die Ausbildung eines Funkenstromes damit zusammen, dass die Anfangspotentialdifferenz bei kleinen Schlagweiten einen *relativ* hohen Wert besitzt.

Jeder Funkenstrom besteht nur dann aus einer Reihe zeitlich äquidistanter, gleichartiger Funken, wenn sein (Stromstärken-)Existenzbereich gross ist, also bei grosser Elektrodenkapazität. Dies gilt jedoch auch nur unter der weiteren Einschränkung, dass man sich den Grenzen seines Existenzbereiches nicht nähert. In der Nähe letzterer, bei kleiner Elektrodenkapazität also überhaupt, sind die Funkenströme

1) Von der Ausbildung eines regelrechten Flammenbogens kann natürlich bei den geringen hier in Frage kommenden Stromstärken (bis 2 Milliamp.) noch keine Rede sein. Ein glühend *roter* Punkt, welcher bei 2 Milliamp. und allerkleinster Schlagweite dauernd zwischen Metallelektroden zu beobachten ist, kann wohl als der erste Ansatz zur Ausbildung des Flammenbogens aufgefasst werden.

äusserst unregelmässig. Mit wachsender Stromstärke kann sich schon am Funkenstrome die Annäherung an die nächstfolgende nahe continuirliche Entladungsart durch eine Abnahme der *mittleren* Spannungsdifferenz der Elektroden zeigen.

Funkenpotentiale. Bei Entladung in Form von Funken spricht man von einem „Funkenpotential“.

Meist versteht man unter Funkenpotentialdifferenz wohl diejenige Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden, welche soeben überschritten werden muss, damit speciell ein Funken bez. Funkenstrom ausbricht, gleichgültig, ob im Schlagraume schon vorher Glimmen oder Büschelentladung vorhanden war, oder nicht. Nach dem Vorangegangenen ist *dieser* Begriff des Funkenpotentials *vieldeutig*; sowohl das Anfangspotential (vgl. Abschnitt XV) als auch das Grenzpotential der positiven Glimmentladung, wie auch das Grenzpotential der negativen Büschelentladung etc. kann die Bedeutung eines Funkenpotentials annehmen. Für eine bestimmte Schlagweite wären also unter Umständen fünf verschiedene Funkenpotentiale zu unterscheiden.

Versteht man dagegen, wie es wohl auch geschieht, unter Funkenpotential in engerem Sinne diejenige Spannungsdifferenz, bei welcher für allmählich vom Nullwerte aus vergrösserte (mittlere) Stromstärke überhaupt *zum ersten Male* ein Funkenstrom auftritt, so ist die Vieldeutigkeit wenigstens in den meisten Fällen vermieden.

Solange die Funkenpotentialdifferenz (im engeren Sinne) zugleich Anfangspotentialdifferenz ist, besitzt sie die gleichen Absolutwerte bei positiver und negativer Entladung; bei grösseren Schlagweiten ist, wie man aus den Angaben der vorangehenden Abschnitte ersehen kann, die positive Funkenpotentialdifferenz wesentlich kleiner als die negative.

B. Kugelelektroden.

XIX. Anfangspotentialdifferenz.

Anfangspotentialdifferenzen zwischen Kugelelektroden sind vielfach gemessen worden¹⁾; es genüge hier, zur Orientirung

1) Vgl. die Arbeiten von Hrn. A. Heydweiller, Wied. Ann. 40. p. 464. 1890 u. 48. p. 213. 1893; daselbst findet sich auch eine kritische Sichtung älterer Arbeiten mit ausführlicher Litteraturangabe.

Steht einer isolirten Kugel speciell eine gleichgrosse abgeleitete gegen-

auf die Angaben von Anfangspotentialdifferenzen in Tab. VII zurückzuweisen.

XX. Stossentladung (Funken) bei schwächstem Strome.

Sehr wenig wissen wir über den Einfluss der Elektroden-grösse auf die Erscheinungen und speciell die Spannungsdifferenz von Kugelelektroden während des Verlaufes der verschiedenen nahe continuirlichen oder auch zeitlich discontinuirlichen Entladungsarten. Selbst die dürftigen Angaben des vorliegenden und des nächsten Abschnittes meiner Arbeit beruhen daher im wesentlichen auf Vermutungen, im Gegensatze zu der auf Thatsachen gegründeten Darstellung der vorangehenden Abschnitte.

über, und kennt man die Anfangspotentialdifferenz zwischen ihnen für irgend eine Schlagweite, so kann man, wie Hr. Heydweiller gezeigt hat, die Anfangspotentialdifferenz für jede beliebige andere Schlagweite berechnen.

In dem Falle, dass jede Kugelelektrode 6 cm Durchmesser hat, findet man, unter Zugrundelegung einer Spannungsdifferenz von 38300 Volt bei 1,2 cm Schlagweite, folgende Werte der Anfangspotentialdifferenzen:

Schlagw. F in cm	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2
Anfangspotentialdifferenz in Volt	20390	29680	38300	46440	54060	67890	80160	90900	100400

Soweit experimentelle Potentialbestimmungen reichen (bis 1,6 cm Schlagweite), stimmen die berechneten Werte mit den beobachteten gut überein.

Auf einen Vergleich der zu messenden Spannungen mit den bei verschiedenen Schlagweiten F zwischen zwei Metallkugeln von je 6 cm Durchmesser herrschenden Anfangspotentialdifferenzen gründen sich alle meine in vorliegender Arbeit mitgetheilten Messungen von Spannungsdifferenzen. Die zu leichter Orientirung zu den gemessenen Schlagweiten F beigefügten Potentialdifferenzenangaben in Volt sind aus der vorstehenden Tabelle durch graphische Interpolation gefunden. Die angegebenen Werte setzen freilich genau genommen voraus, dass die eine Elektrode gleiche Spannung besitzt wie der umgebende Raum (zur Erde abgeleitet ist); solange jedoch die Schlagweite F kleiner ist als der Radius der Elektroden, dürfte es gleichgültig sein, ob die weitere Umgebung beider Elektroden mit einer Elektrode gleiche Spannung besitzt oder nicht.

Ist an einer *ideal feinen Spitze*, welche in nicht zu kleinem Abstände einer plattenförmigen zweiten Elektrode gegenübersteht, das Anfangspotential erreicht, so setzt die positive Entladung wohl sogleich mit nahe continuirlichem Glimmen ein; weder für kleine noch für grosse Elektroden Capacität tritt bei Beginn der Entladung zeitlich discontinuirliches, stossweises Fließen der Elektricität auf. Der Verlauf der Spannungsdifferenz als Function der Stromstärke dürfte (für *sehr*

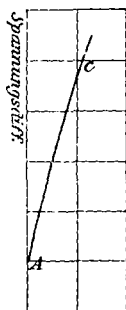


Fig. 14a.

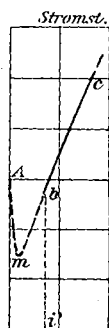


Fig. 14b.

feine Spitze) etwa der in Fig. 14a angedeutete sein; *A* bedeutet die Anfangspotentialdifferenz und zugleich Minimumpotentialdifferenz der Glimmentladung, *AC* den Verlauf der Potentialdifferenz für die Glimmentladung bei zunehmender Stromstärke.

Das in Fig. 14a angegebene Verhalten ist jedoch wohl nur als ein idealer Grenzfall anzusehen. Selbst feine Spitzen zeigen, wie Hr. W. C. Röntgen nachgewiesen hat¹⁾, immer

noch eine *höhere* Anfangspotentialdifferenz als die Minimumpotentialdifferenz beim Glimmen; ist nämlich einmal nahe continuirliche Glimmentladung eingeleitet, so kann man die Stromstärke wesentlich verkleinern, das Glimmen erhält sich. Man hat wohl anzunehmen, dass bei nicht ideal spitzer Anode (bez. Kathode) der Verlauf der Spannungsdifferenz bei Glimmentladung als Function der Stromstärke etwa der in Fig. 14b skizzirte ist. Die Constanz der von Hrn. W. C. Röntgen in der angedeuteten Weise erhaltenen Minimumpotentialdifferenz spricht dafür, dass bei *Spitzen* wirklich bei Stromschwächung Glimmentladung bis zum Umkehrpunkte *m* der Fig. 14b existenzfähig bleibt. Bei grösseren (Kugel-)Elektroden scheint es aber nicht mehr möglich zu sein, die Glimmentladung ohne künstliche Hilfsmittel bis zu einer Spannungsdifferenz, welche auffallend kleiner ist als die Anfangspotentialdifferenz, zu erhalten.

1) W. C. Röntgen, Götting. Nachr. 1878. p. 396; vgl. J. Precht, Wied. Ann. 49. p. 174. 1893.

Ist die Elektrodencapacität einer grösseren (kugelförmigen) Elektrode nicht verschwindend klein, so tritt nach Ueberschreiten der Anfangspotentialdifferenz stets zunächst stossweise, zeitlich discontinuirliche Entladung¹⁾ auf. Erst wenn die mittlere Stromstärke einen bestimmten Wert i' überschreitet, erscheint die nahe continuirliche Glimmentladung. Nach dem Gesagten ist die Veranlassung zu dem Auftreten des discontinuirlichen Elektrizitätsfließens zu Beginn der Entladung — ebenso wie für die Funkenströme beim Uebergange zweier nahe continuirlicher Entladungsarten in einander — ein Potentialsturz; dieser ist hier gegeben in der Differenz zwischen Anfangspotentialdifferenz und der Minimumpotentialdifferenz des Glimmens (d. h. durch $[A-m]$ in Fig. 14b).

XXI. Glimmen und Büschel an Kugelelektroden.

Ein dauernd ungestörtes Glimmen findet, wie schon bemerkt ist, an grösseren Elektroden in der Regel nur bei Spannungsdifferenzen statt, welche *grösser* sind als die Anfangspotentialdifferenz. Nur wenn die Grenzspannungsdifferenz des Glimmens (gegen die Büschelentladung hin) grösser ist als die Anfangspotentialdifferenz, ist demnach nahe continuirliche Glimmentladung *überhaupt* dauernd existenzfähig.²⁾ Die Abhängigkeit des Wertes der Anfangspotentialdifferenz einerseits, der Grenzpotentialdifferenz des positiven Glimmens andererseits von der Schlagweite ist nun im allgemeinen eine derartige,

1) Die Form der hier auftretenden stossweisen Entladung hängt vor allem auch ab von der Schlagweite und der Stromstärke. So erhielt ich z. B. bei positiver Entladung zwischen einer kleinen Messingkugel von 0,5 cm Durchmesser und einer solchen von 3 cm Durchmesser bei etwa 2 cm Schlagweite einen Funkenstrom, bei 4 cm Schlagweite stossweise Büschelentladung, bei etwa 6 cm zuerst stossweise (intermittierend) auftretendes Glimmen und erst bei etwas grösserer Stromstärke Stossbüschel; häufig beobachtet man auch bei grosser Schlagweite nur stossweises Glimmen, welches dann bei hinreichender Stromstärke direct in nahe continuirliche Glimmentladung übergeht.

2) Ich sehe von den Fällen ab, bei denen die Ausbildung der Glimmentladung in bekannter Weise durch passende Ueberzüge über die Elektrode oder dergleichen besonders begünstigt ist.

wie sie Fig. 15 zeigt (vgl. die Angaben in Tab. VII). Es ist anzunehmen, dass Glimmentladung nur für Schlagweiten grösser als s (bei Werten der Spannungsdifferenz, welche dem schraffierten Gebiete $\beta\gamma\delta$ angehören) dauernd bestehen kann. Für Schlagweiten kleiner als s würde nach Ueberschreiten der

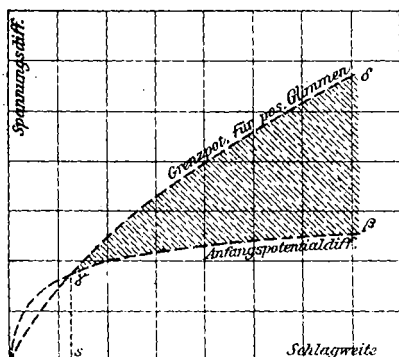


Fig. 15.

Anfangspotentialdifferenz so gleich Büschelentladung auftreten, oder bei nicht zu kleiner Elektrodenkapazität nur Funkenstrom.

Ueberblickt man die Werte zusammengehöriger Anfangspotentialdifferenzen und Grenzspannungsdifferenzen des positiven Glimmens an Anoden von wachsender Grösse (vgl. Abschnitt X, Tab. VII), so erkennt man,

dass die Anfangspotentialdifferenz viel rascher mit dem Anodendurchmesser zunimmt, als die Grenzspannungsdifferenz. Es ist hiernach vorherzusehen, dass die Schlagweite s der Fig. 15 mit wachsender Anodengrösse erst langsam, dann aber schneller und schneller zunimmt. Da aber Glimmen bei kleinerer Spannung als die Anfangspotentialdifferenz in der Regel nicht existenzfähig ist, so ist zu vermuten, dass positive Glimmentladung an grossen, metallischen Kugelanoden schliesslich überhaupt nicht mehr auftreten wird. Schon an einer blanken Metallkugel von 3 cm Durchmesser dürfte positives Glimmen bei weniger als 10 cm Schlagweite nicht dauernd existenzfähig sein.

Da negative Glimmentladung, soweit ich bemerken konnte, überhaupt nur an spitzen Elektroden, d. h. an solchen mit kleiner Anfangspotentialdifferenz auftritt, so ist wohl anzunehmen, dass die Grenzspannungsdifferenz des negativen Glimmens (gegen die negative Büschelentladung hin) bei allen Schlagweiten nur sehr kleine Absolutwerte besitzt.

Die Grenzstromstärke der positiven Glimmentladung ist an der gleichen Kugelelektrode (ebenso wie an einer Spitze) angenähert constant, unabhängig von der Schlagweite (vgl. Tab. I). Ihr Absolutwert an verschiedenen, verschieden grossen Anoden

troden, nur selten, erst recht nicht bei Anwendung einer unregelmässig gestalteten kleinen Elektrode (Gesteinsstück, wie Basalt etc.).

An der Oberfläche grosser Elektroden findet nämlich das Ausströmen (bez. Einströmen) von Elektrizität in der Regel unter *gleichzeitiger Ausbildung verschiedener Entladungsformen an verschiedenen Oberflächenteilen statt.*¹⁾

C. Grosse Schlagweiten.

XXIII. Positive Entladung; grosse Schlagweiten (8–20 cm); Spitze gegenüber Platte.

Bezüglich der Abhängigkeit der Spannungsdifferenz von der Schlagweite (und zum Teil auch Stromstärke) bei positiver Glimm- und negativer Büschelentladung liegen Messungen von Hrn. A. v. Obermayer vor.²⁾ Wie bei kleinen Schlagweiten, so fand sich für die genannten Entladungsarten auch noch bis zu 15 cm Schlagweite unter gleichen Versuchsbedingungen annähernd die gleiche Spannung (vgl. l. c. p. 941). Bei gleichbleibender Stromstärke nähert sich die Spannungsdifferenz mit wachsender Schlagweite einem oberen Grenzwerte (l. c. p. 417).

Für die Art und Weise, wie für positive Glimm- und negative Büschelentladung die Spannung mit der Stromstärke zunimmt, giebt Tab. XI (Abschnitt XII) der vorliegenden Arbeit einen Anhalt.

Die Grenzstromstärke, bei welcher die positive Glimm- in positive Büschelentladung übergeht, war für kleine Schlagweiten als nahe constant anzusehen. Dies gilt (vgl. Tab. XII) auch noch für grössere Schlagräume. In letzterem Falle ist zu berücksichtigen, dass unter der Grenzstromstärke diejenige

1) So tritt z. B. an einer Gesteinsecke Büschel- oder Streifenentladung auf, während gleichzeitig die benachbarten Kanten oder Flächen positives Glimmen zeigen. — An einer (Messing-) Kugel von 1 cm Durchmesser habe ich bei grösseren Schlagweiten (12–15 cm) oft ein Glimmen der Kugeloberfläche zugleich mit einstieler positiver Büschelentladung beobachtet; im nächsten Oberflächengebiete rings um die Ansatzstelle des Büschelstieles fehlte hierbei das Glimmen.

2) A. v. Obermayer, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss. zu Wien 93. p. 409 u. 924. 1886.

Centimeter langen) *Lichtfaden*, ohne Krone, gleichend dem in Fig. 4 abgebildeten positiven Büschel (an einer Spitze, im ersten Stadium der Entwicklung). Letztere Büschelform ist besonders dann zu beobachten, wenn sich an der Kugelanode *mehrere* positive Büschel gleichzeitig zeigen.

Auch der negative Büschel, welcher ja stets nur kurz ist, besitzt an einer grösseren Kugelkathode eine andere Gestalt als an einer Spitze. Bildet sich, was weitaus die Regel ist, an der Kugelkathode nicht ein einziger negativer Büschel, sondern mehrere Büschel gleichzeitig, so erscheinen diese als *dünne Lichtfäden*; in dieser Entwicklungsform *ähneln* der *negative* Büschel auffallend dem oben geschilderten kurzen, fadenförmigen *positiven* Büschel.

Die fadenförmigen Büschel sind bei grossem Schlagraume und grosser mittlerer Stromstärke häufig so zahlreich, dass die Kugelelektrode allseitig nahezu gleichmässig von einer Strahlenkrone umgeben erscheint, und es nahe liegt, diese Lichterscheinung als eine besondere Entladungsart anzusprechen. In der That ist die genannte Lichterscheinung als ein Anfang zur Ausbildung nahe continuirlicher positiver bez. negativer Streifenentladung anzusehen.

XXII. Zur Streifenentladung.

Meine Auffassung bezüglich der als positive oder negative Streifenentladung zu bezeichnenden Entladungsformen sei kurz durch die folgende Nebeneinanderstellung klargelegt.

	Glimmentladung	Büschelentladung
Ausgangsform:	ein einziger Glimmpunkt	ein einziges einstieliges Büschel
Uebergang:	zahlreiche discr. Glimmpunkte	zahlreiche kurze Büschel
Endform:	zusammenhängende Glimmlichthaut	„ <i>Streifenentladung</i> “.

Positive und negative Streifenentladung entstehen demnach durch Zusammenschmelzen zahlreicher positiver bez. negativer Büschel.

In einheitlicher Form erfolgt jedoch leider die Elektrizitätsentladung aus grossen Elektroden, selbst aus Kugelelek-

dürfte wesentlich von der Ausdehnung des jeweilig glimmenden Oberflächengebietes abhängen; er scheint für Anoden von etwa 0,5 cm Durchmesser ein Maximum (ca. 0,3 Milliamp.) zu erreichen, und dann für grössere Anoden wieder abzunehmen. Beobachtet man die Lichterscheinung an einer Oberfläche, deren Glimmen nahe daran ist, in Büschelentladung überzugehen, so bemerkt man, dass an vielen Oberflächenstellen das bläuliche Glimmen in rötliche, etwa 0,05 cm hohe kegelförmige Lichtspitzen (kleine Flämmchen) übergeht, welche oft unstät auf der Oberfläche sich hin- und herbewegen. Schliesslich bricht aus einer dieser carminroten Lichtspitzen ein positiver Büschel hervor. Zum Ausbruche einstieliger positiver Büschelentladung scheint hiernach nur erforderlich zu sein, dass an einem beschränkten Oberflächengebiete eine bestimmte Stromdichte überschritten wird. Voraussichtlich ist diese *locale* Grenzstromdichte für alle Anoden die gleiche.

Auch die nahe continuirliche positive (und negative) einstielige Büschelentladung ist bei Spannungsdifferenzen, welche wesentlich kleiner sind als die jeweilige Anfangspotentialdifferenz, nicht dauernd existenzfähig. Dies gilt jedoch nicht mehr für den Büschellichtbogen, und wie bekannt, erst recht nicht für den Flammenbogen. Ganz allgemein dürfte der Satz gelten: Je kleiner die Elektrodenkapazität, je gleichmässiger die Stromzufuhr und je grösser die Stromintensität ist, um so leichter lässt sich nahe continuirliche Entladung bei Spannungsdifferenzen, welche kleiner sind als die jeweilige Anfangspotentialdifferenz, dauernd ungestört erhalten.

Bei positiver einstieliger Büschelentladung herrscht (bei derselben Stromstärke) zwischen Elektroden der verschiedensten Grösse angenähert die gleiche Spannungsdifferenz (vgl. Abschnitt XI, Tab. X). Ob für die negative einstielige Büschelentladung ein Gleiches gilt, wäre noch zu untersuchen. Für den Büschellichtbogen (und Flammenbogen) ist wohl auch ohne weiteres anzunehmen, dass die Spannungsdifferenz der Elektroden von der Elektrodengrösse nicht wesentlich abhängt.

An einer grösseren Kugelanode besitzt der *kurze* positive Büschel stets nur eine verkümmerte Krone, gebildet aus wenigen *schwach* divergirenden Lichtfäden; oft besteht der positive Büschel sogar nur aus einem einzigen (zwei und mehr

Stromintensität zu verstehen ist, bei welcher das Glimmen an der Spitze *überhaupt* in ein einstieliges Büschel übergeht, auch wenn das Büschel den Schlagraum zunächst noch *nicht* völlig *überbrückt*. Der Absolutwert der Grenzstromstärke (und der zugehörigen Grenzspannungsdifferenz) ist natürlich an verschiedenen (mehr oder minder stumpfen) Spitzen ein verschiedener.

In Fig. 16 ist (nach Tab. VI und XII) für Schlagweiten (als Abscissen) bis zu 15 cm der Verlauf der Grenz-

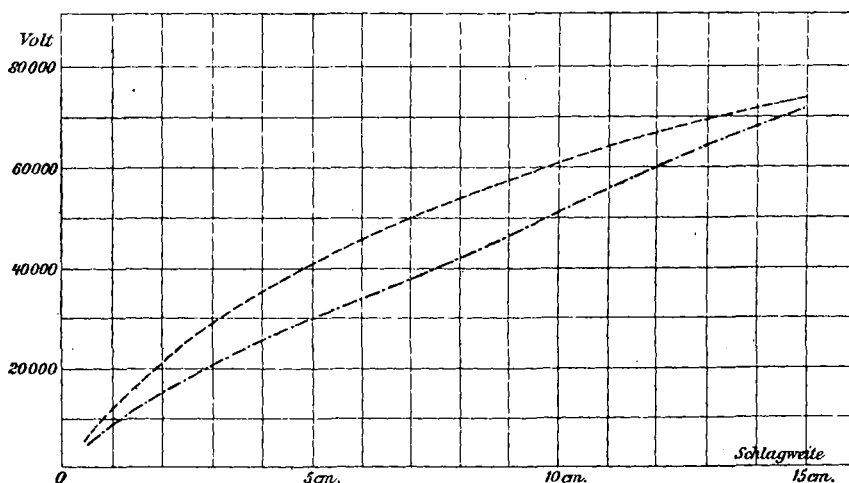


Fig. 16.

potentialdifferenz der positiven Glimmentladung (gestrichelte Curve) und der hierauf jedesmal beobachtete kleinste Spannungswert bei positiver Büschelentladung (strichpunktirte Curve) eingezeichnet. Letztere zeigt einen eigentümlichen Verlauf. Die Grösse des Potentialsturzes beim Uebergange von positivem Glimmen in positives Büschel nimmt bei wachsender Schlagweite zunächst zu, oberhalb 10 cm aber wieder ab; bei ca. 20 cm Schlagweite ist derselbe fast verschwunden. *Bei sehr grossen Schlagweiten dürfte demnach der Uebergang vom Glimmen einer Spitze in positive Büschelentladung an derselben überhaupt nicht mehr von einer merklichen Abnahme der Spannungsdifferenz begleitet sein.* Das Auftreten der Büschelentladung würde sich

dann nur noch darin äussern, dass die rasche Zunahme der Spannungsdifferenz mit der Stromstärke bei Glimmentladung ziemlich unvermittelt in eine viel langsamere bei Büschelentladung übergeht.

XXIV. Eine einzige Elektrode; Elmsfeuer.

Ueberblickt man die Lichterscheinungen, welche sich für die einzelnen Entladungsarten in verschieden grossen Schlagräumen zwischen einer kleinen Elektrode und einer ausgedehnten *Halbleiterplatte* bei je *constant erhaltener Stromstärke* ausbilden, so bemerkt man folgendes:

Bei Vergrösserung des Schlagraumes ändert sich die Lichtgestalt der Entladung, soweit sie schon im kleineren Schlagraume ausgebildet war, nicht mehr wesentlich; die einzelnen Lichtteile behalten ihre relative Lage zur kleineren Elektrode bei.¹⁾

Da wohl ohne weiteres anzunehmen ist, dass bei *sehr* grosser Schlagweite eine Aenderung derselben auf die bei einer bestimmten Stromstärke sich ausbildende Lichterscheinung an der kleinen Elektrode keinen Einfluss mehr haben kann, so besagt der ausgesprochene Satz eigentlich nur, dass der Entladungsprocess in der Nähe der kleinen Elektrode auch schon dann fast ausschliesslich von dieser aus regulirt wird, wenn ihr die Halbleiterplatte noch relativ nahe steht.

Auf Grund des angegebenen Satzes und unter Berücksichtigung der Ausbildung der Lichterscheinung der einzelnen nahe continuirlichen Entladungsformen bei den grössten bisher erreichten Schlagweiten lässt sich nun ein wohl im allgemeinen zutreffendes Bild der Lichterscheinungen gewinnen, welche *an einer kleinen hervorragenden, alleinstehenden Elek-*

1) Der oben speciell für die *Lichterscheinung* der Entladung ausgesprochene Satz besitzt vielleicht auch in allgemeinerer Fassung, d. h. auch für das thermische Verhalten etc., eine wenigstens angenäherte Gültigkeit.

Im Gegensatz zu allen übrigen Entladungsformen haftet die Lichterscheinung des *positiven Büschellichtbogens* nicht an der kleineren Elektrode, sondern an der Halbleiterplatte (d. h. der Kathode, Abhandl. Isis, I. c. p. 8 *fälschlich* Anode genannt); ich sehe daher von ihm bei den folgenden Betrachtungen ganz ab.

trode gegenüber einer *sehr entfernten* plattenförmigen Elektrode von grosser Ausdehnung bei Stromstärken bis etwa 2 Milliamp. auftreten werden.

Bei *positiver* Entladung wird die hervorragende Elektrode bis zu einer Stromstärke von etwa 0,1 Milliamp. nur Glimmen zeigen. Kommt es bei weiterer Stromverstärkung zur Bildung eines einstieligen positiven Büschels, so dürfte dieses bei 0,5 Milliamp. eine Höhe von etwa 12—15 cm. besitzen. Oft jedoch wird die Glimmentladung in positive Streifenentladung übergehen. In diesem Falle ist für 1—2 Milliamp. die Ausbildung einer kugeligen Lichthülle von höchstens 5 cm Radius um das Ende der Anode vorherzusehen.

Bei *negativer* Entladung erscheint bei schwachem Strome Glimmen, bei stärkerem bildet sich wohl nur an sehr feinen Spitzen und bis zu Stromstärken von etwa 0,5 Milliamp. ein *einziges* wohlentwickeltes (bis 1 cm grosses) negatives Büschel aus; in der Regel dürfte jedoch, besonders an ausgedehnten Elektroden, sogleich negative Streifenentladung auftreten. Bei 1—2 Milliamp. bildet diese eine Lichthülle von höchstens 3 bis 5 cm Radius um die Elektrode.

Die voranstehenden Angaben sind wohl auch auf die Lichterscheinungen des bekannten Elmsfeuers an einer hervorragenden, alleinstehenden Spitze (hohen Blitzableiter gegenüber ausgedehnter Wolkenbank) übertragbar.¹⁾

Wird die Elektrode nicht von einer stumpfen Spitze oder kleinen Kugel gebildet, sondern von irgend einem unregelmässig gestalteten Halbleiter (Basaltblock, feuchten Felsgipfel, bez. auch feuchten Rasen etc.), so bilden sich natürlich an allen hervorstehenden Oberflächenteilen zahllose discrete glimmende Punkte, eventuell auch zeigen einzelne Oberflächengebiete eine zusammenhängende Glimmlichthaut. In quantitativer Hinsicht ist nach dem Verhalten von Basaltstücken als Elektrode anzunehmen, dass eine *glimmende* Fläche von 1 Quadratmeter Grösse wohl im günstigsten Falle bis zu

1) Es sei darauf hingewiesen (vgl. A. v. Obermayer, Meteor. Zeitschr. 5. p. 325. 1888), dass bei Elmsfeuer in vielen Fällen als zweite Elektrode sogar relativ *nahe* Gegenstände, z. B. der Spitze entgegenfallende elektrisch geladene Schneeflocken oder Graupelkörner anzusehen sind.

1 Amp. abgeben oder aufnehmen kann. In Hinsicht auf den Abschnitt über Kugelblitze sei hierzu noch bemerkt, dass die Lichterscheinung des Glimmens, wie bekannt, eine wenig auffallende ist, sodass dieselbe bei Tag oder auch Nachts, wenn die Aufmerksamkeit durch eine andere in der Nähe befindliche einigermaassen helle Lichterscheinung abgelenkt wird, leicht zu übersehen ist. Auch bei Tage leicht bemerkbare Lichterscheinungen treten erst dann auf, wenn die Strömungsintensität (an Kanten, Ecken) so gross wird, dass Streifenentladung oder positive Büschelentladung sich bildet.

Anhang.

Zur Kenntniss der Kugelblitze.

Ausser den Elmsfeuern tritt uns in der Natur noch eine eigentümliche Art nahe continuirlicher Elektrizitätsentladung entgegen, die sogenannten „Kugelblitze“.¹⁾

Unter den Entladungsformen, welche bisher auf die verschiedenste Weise hergestellt worden sind, ist sicher keine mit den Kugelblitzen völlig identisch. Jedoch haben wir in dem Büschellichtbogen einen Entladungsprocess zu experimenteller Verfügung, welcher in der verschiedensten Hinsicht dem in Kugelblitzen stattfindenden ähnelt; verschieden sind eigentlich nur die räumlichen Dimensionen des Entladungsvorganges. Ganz besonders in die Augen fallend ist diese Aehnlichkeit, wenn man die Kugelblitze mit den Leuchterscheinungen vergleicht, welche bei Büschellichtbogen in etwas *verdünnter* Luft (von etwa 5 cm Quecksilberdruck) zu beobachten sind.²⁾

1) Schilderungen von Kugelblitzen finden sich in F. Arago's Werken⁴ p. 25—49 (herausgeg. v. W. G. Hankel); noch zahlreichere, bis in neuere Zeit reichende „Beispiele von Kugelblitzen“ hat Hr. Sauter in der „Beilage zum Programme des Kgl. Realgymnasiums in Ulm zum Schlusse des Schuljahres 1891—1892“ (Ulm 1892) zusammengestellt. Der Kürze halber werde ich im Folgenden Beispiele von Kugelblitzen aus letztgenannter Sammlung einfach mit *S* und Angabe der Beispielsnummer (also z. B. *S*, 14) citiren.

2) Hr. A. Righi hat zuerst auf die grosse Aehnlichkeit, welche zwischen Kugelblitzen und der von ihm in gasverdünnten Räumen untersuchten Form von sehr verlangsamter Entladung grosser Leydener Batterien, einem speciellen Falle von Büschellichtbogen, besteht, ausdrücklich aufmerksam gemacht; vgl. Lum. Electr. 42. p. 501. 1891.

Ueberträgt man, natürlich unter Beachtung der geänderten Grössenverhältnisse und mit Berücksichtigung des erwähnten Beobachtungsmateriales über Kugelblitze die am Büschellichtbogen festgestellten Gesetze, Beziehungen und Eigentümlichkeiten auf die Kugelblitzentladung, so lässt sich letztere in folgender, zum Teil in das Wesen des Entladungsmechanismus eindringender Weise zusammenfassend schildern.

Beginn des Entladungsprocesses bei Kugelblitzen. — Der gesamte Entladungsvorgang wird (von seltenen Ausnahmen vielleicht abgesehen) eingeleitet durch einen gewöhnlichen (sogenannten Linien- oder Zickzack-)Blitz.¹⁾ Dies gilt sowohl für Entladung zwischen zwei Wolken, als auch zwischen Wolke und Erde. In diesem *Initialblitze* gleichen sich diejenigen Elektrizitätsmengen aus, welche in ihn an seinen Endpunkten in *kürzester* Zeit einströmen können. Von der Menge dieser unmittelbar verfügbaren Elektrizität hängt die Intensität des Initialfunkens ab; sie ist wohl in der Regel nicht unerheblich, doch sind auch Kugelblitze beobachtet worden, bei denen der Initialfunken wahrscheinlich nur sehr schwach war.

Die Bahn des Initialblitzes verbleibt für kurze Zeit in einem Zustande der Art, dass in ihr Elektrizität leichter bewegt werden kann, als im umgebenden Luftraume; der Blitz hinterlässt einen Endladungscanal. Wird bald nach der Blitzentladung neue Elektrizität in den beiderseitigen Ursprungsgebieten des Blitzes frei, oder erfolgt aus fernerliegenden Wolkenteilen ein nachträgliches Zuströmen von Elektrizität, so kann der Entladungscanal von einer Reihe von Nachentladungen in Form wie der von gewöhnlichen Blitzen benutzt werden. Es ist jedoch auch möglich, dass im Entladungscanal ein nahe continuirliches Fliessen von Elektrizität eintritt.²⁾ Ohne geeignete Beobachtungshilfsmittel bemerkt man

1) Vgl. S(15), (24), (29), (39), 45, 46, 91, 94, 116, 118, 123, 126, (129), 132, 137, 138, 141, 166, 213; in all diesen Fällen von Kugelblitzen ging ein gewöhnlicher Blitzschlag dem Erscheinen durch Leuchtmasse des Kugelblitzes *unmittelbar voraus*. — Auch die verlangsamte Entladung grosser Leydener Batterien wird bekanntlich durch einen Initialfunken eingeleitet (vgl. Wied. Ann. 63. p. 115. 1897). Die Intensität des Initialfunkens hängt von der Elektrodencapazität ab.

2) Dass ein Elektrizitätsnachfliessen auf der Bahn des Initialblitzes thatsächlich bei intensiven Blitzschlägen *in der Regel* stattfindet, hat Hr.

das Nachfliessen natürlich nur in den seltenen Fällen, in denen der Initialblitz schwach, das Nachfliessen stark und langdauernd erfolgt ¹⁾, oder wenn der Entladungs canal (vielleicht vom Winde verschoben) noch während der Nachentladung seine Bahn wesentlich änderte. ²⁾

Erfolgt der Elektrizitätsnachfluss sehr gleichmässig, so findet günstigenfalls eine regelmässige Lichtschichtung, Leuchtmassenbildung längs der Entladungsbahn statt ³⁾ (Perlschnur- oder Rosenkranzblitze und Kugelblitze).

Die Leuchtmasse. — Bei langdauerndem, nahe continuirlichem Elektrizitätsflusse zwischen Wolke und Erde kommt es im Entladungs canale fast ausnahmslos nur zur Bildung einer *einzigen* Leuchtmasse; nach ihrer Gestalt wird der ganze Entladungsprocess bekanntlich Kugelblitz genannt.

Aus welchen Gründen nur an einer oder mehreren Stellen der Entladungsbahn eine intensive Lichtentwicklung (Bildung einer Leuchtmasse, Lichtkugel, Flamme oder dergl.) stattfindet, ob an der leuchtenden Stelle ein besonders hoher Wert des Potentialgradienten herrscht, ob es eventuell an ihr zur Ausbildung eines Luftwirbels kommt etc., lässt sich zur Zeit noch nicht sagen; wir kennen ja doch selbst für den Büschellichtbogen noch nicht die nötigen und hinreichenden Bedingungen zur Ausbildung von Leuchtmassen. Anzunehmen ist wohl, dass die Leuchtmasse zugleich eine etwas verengte Stelle der Entladungsbahn bezeichnet.

Die Grösse der Leuchtmasse wird sehr verschieden angegeben, meist faust- bis kopfgross. Ihre *Gestalt* ist wohl stets nur in erster Annäherung als eine Kugel zu bezeichnen.

Ogden N. Rood (*American Journ. of Science and Arts* 5. March 1873) nachgewiesen. Nach seinen Beobachtungen und Messungen zeigen fast alle Blitzschläge entweder nahe continuirliches Nachfliessen oder eine Reihe von Nachentladungen.

1) F. Arago, l. c. p. 36 „Blitze, welche das Ansehen eines Feuerstromes hatten“; vgl. auch S 4.

2) Vgl. die Blitzphotographie von Hrn. H. Kayser, *Wied. Ann.* 25. p. 131. 1885.

3) F. Arago, l. c. p. 36 „Blitz, der sich vor seinen (Prof. Munke's) Augen in eine grosse Menge kleiner Kugeln auflöste“; vgl. auch S 93 und S 183.

Oft besitzt die Leuchtmasse etwa eiförmige Gestalt; ihre Längsaxe zeigt wahrscheinlich, ähnlich wie diejenige der Leuchtmassen des Büschellichtbogens, die jeweilige Richtung der elektrischen Strömung an. Oft auch ist die Leuchtmasse nach einer Seite hin flammen-, kerzenlicht- oder birnförmig zugespitzt.¹⁾ Da die Leuchtmassen sowohl bei positivem wie bei negativem Büschellichtbogen ihre spitze Seite der Anode, die breitere der Kathode zuwenden, so ist vielleicht das Gleiche bei der Leuchtmasse des Kugelblitzes der Fall.

Die Begrenzung der Lichterscheinung ist keine scharfe; die eigentliche Leuchtmasse dürfte meist von einer lichtschwachen, eventuell auch anders gefärbten Lichthülle umgeben sein.²⁾ Letztere kann einseitig, seltener wohl auch zweiseitig im Entladungscanale sehr lang ausgezogen sein. Der ganze Kugelblitz erscheint dann als längliches Lichtband³⁾; die eigentliche Leuchtmasse als etwas verdickte hellste Stelle, wahrscheinlich meist das der Kathode zugekehrte Ende des Leuchtbandes bildend. Diese verlängerte Lichterscheinung bildet schon den Uebergang zu dem oben citirten „Feuerströme“, d. h. zu einer Lichtentwicklung auf der *ganzen* Entladungsbahn.

Die Farbe der eigentlichen Leuchtmasse ist bei geringer Strömungsintensität bläulich, dann dunkel- oder carminrot, ziegelrot, gelbrot, schliesslich weisslich; in den allermeisten

1) Meteorol. Zeitschr. p. 355. 1892: „unten breiter, oben zugespitzt“; p. 189. 1896: rosafarbener Kugelblitz „birnförmig gestaltet, das breitere Ende gelblich“, 12 cm breit, 18 cm lang. S 94 „bläuliche Flamme, welche wie eine Birne geformt war, die Spitze nach unten geneigt“.

2) S 94: bläuliche Flamme in gelblicher Hülle; S 125: hellrote Kugel mit handbreitem bläulichen Saume; vgl. auch Arago, l. c. p. 42.

Beim Büschellichtbogen besitzt die carminrote Leuchtmasse eine ziegelrote oder gelbliche Hülle; bei sehr grosser Stromstärke (ca. 3 Milliamp.) findet beiderseits der eigentlichen Leuchtmasse, und schliesslich im ganzen Entladungscanale eine Lichtentwicklung von gelblicher oder ziegelroter Färbung statt (vgl. Abschnitt XIII).

3) Meteorol. Zeitschr. p. 252. 1895: „leuchtende kleine Säulchen“ bis 2 m lang; l. c. p. 244. 1895: „feurige Schlangenlinie“; S 18: „Cylinder“; S 35: „leuchtende Fackeln“; S 89: Kugel „verlängerte sich und richtete sich schief gegen ein Loch“; S 92: „roter geschweiffter Feuerball“. Vgl. auch S 98.

Fällen wird die Leuchtmasse als dunkel-, feurig- oder carminrot geschildert.

Die in der Leuchtmasse sich relativ eng zusammendrängenden Strömungsfäden treten nach unten mehr auseinander. Am Boden verbreiten sie sich wohl in der Regel auf ein grösseres Flächegebiet, und endigen daselbst in einzelnen Lichtbüscheln, discreten Glimmlichtpunkten, oder auch in Flächenstücken mit zusammenhängender Glimmlichthaut. Dass die letztgenannten Lichterscheinungen bei Kugelblitzen bisher nur selten beobachtet wurden¹⁾, erklärt sich durch ihre relativ sehr geringe Helligkeit (vgl. die Angabe zu Ende des Abschnittes XXIV). Auch ist es sehr wohl möglich, dass die Stromfäden unter Umständen (auf Wasseroberflächen etc.) lichtlos endigen.

Bewegung der Leuchtmasse. — Eine Verschiebung des Entladungscanales durch Luftströmungen (Wind)²⁾ oder auch wohl unter dem Einflusse elektrischer Kräfte wird an einer Horizontalverschiebung der Leuchtmasse sichtbar. Jedoch findet in der Regel ausserdem noch während der Dauer der nahe continuirlichen Entladung eine (Vertical-)Verschiebung der Leuchtstelle längs des Entladungscanales statt; man beobachtet bei Kugelblitzen ein Aufsteigen oder auch Herabfallen der Leuchtmasse. Wie das Verhalten der Leuchtmassen beim Büschellichtbogen lehrt³⁾, kann schon allein eine Aenderung der Stromstärke, wie sie ja während des Verlaufes der Kugelblitzentladung stets erfolgen dürfte, die Lage der Leuchtmasse ändern.⁴⁾ Es ist jedoch wahrscheinlich, dass oft auch eine Verschiebung der Leuchtstelle im Entladungscanale stattfindet,

1) F. Arago, l. c. p. 37; S 60, 114, 164; [Meteorol. Zeitschr. p. 189. 1896.

2) S 125, 132.

3) Vgl. Abh. Isis, l. c. p. 18.

4) Senkt sich z. B., wie öfters beobachtet wurde [vgl. F. Arago, l. c. p. 41; S 98, (134)], eine Leuchtmasse zuerst herab und steigt dann wieder auf, ohne den Erdboden berührt zu haben, so könnte dies Verhalten darauf hindeuten, dass der Erdboden Kathode war, und dass die Stromstärke im Entladungscanale zuerst zugenommen, dann wieder abgenommen hat.

welche der bei constanter Stromstärke erfolgenden „Wanderung“ der Leuchtmassen des Büschellichtbogens analog ist.¹⁾

Viele von den zunächst auffallenden und ungewöhnlichen Eigentümlichkeiten des Kugelblitzes erklären sich ungezwungen durch die Annahme, dass längs der Entladungsbahn (mit Ausnahme vielleicht der nächsten Nähe der Ansatzpunkte am Boden) ein relativ geringer Potentialgradient herrscht. Wahrscheinlich ist derselbe sogar noch nicht so gross wie beim Büschellichtbogen, d. h. noch kleiner als etwa 1700 Volt pro Centimeter. Ebenso wie der Büschellichtbogen bei dem in Abschnitt XIII, Fig. 7 der vorliegenden Arbeit angegebenen Experimente dem Metalldrahte *ab* ausweicht, ebenso weicht häufig die Entladungsbahn des Kugelblitzes, also auch dessen Leuchtmasse, dem Menschen (oder auch Gebäuden etc.) aus.²⁾ Wie aber bei dem angeführten Experimente der Ansatzpunkt des Büschellichtbogens plötzlich von *a* nach *b* überzuspringen vermag, ebenso kann auch die Ansatzfläche der Kugelblitzentladung (ganz oder teilweise) auf den menschlichen Körper übertreten, sodass letzterer ganz oder zum Teil von dem nahe continuirlichen Strome des Kugelblitzes durchflossen wird, natürlich unter Auslösung entsprechender Schmerzempfindung, eventuell auch mit Hinterlassung von Brandwunden an den Ansatzstellen.³⁾

Die Leuchtmasse des Kugelblitzes dringt wie bekannt auch ins Innere der Häuser, in Zimmer, Küchen etc. ein. Dies ist nach der angegebenen Auffassung über das Wesen der Kugelblitze nicht auffallend, besonders wenn man bedenkt, dass ja auch sehr intensive Elmsfeuer im Innern von Gebäuden (in Zimmern, Treppenhäusern) beobachtet worden sind⁴⁾, und da allgemein anzunehmen ist, dass über jeder Fläche mit intensiver Elektrizitätsabgabe oder -Aufnahme eine Leuchtmasse existenzfähig ist.

Als Analogon zu dem Auftreten oder Eindringen einer Leuchtmasse in Gebäuden sei folgender Versuch erwähnt.

1) Vgl. Abh. Isis l. c. p. 20 u. 21.

2) F. Arago, l. c. p. 44. S 30, 66, 78, 213.

3) Vgl. S 14, 85, 102, 147, 164, 169, 213.

4) Vgl. besonders F. Arago, l. c. p. 39, sowie Meteorol. Zeitschr. p. 222. 1893.

Zwischen zwei horizontalen Schieferplatten w und b , entsprechend Wolke und Erdboden, bestehe ein Büschellichtbogen; durch schwache Luftbewegung lässt sich seine Lage leicht verschieben. In den Zwischenraum zwischen die Schieferplatten sei nun mit isolirender Handhabe ein kleines, unregelmässig gestaltetes Halbleiter- oder Leiterstück d (entsprechend etwa dem Dache eines Hauses) gehalten, so zwar, dass es der unteren Schieferplatte näher stehe als der oberen; der untere Zwischenraum entspricht dann den Zimmern. Wird nun der Büschellichtbogen gegen das Zwischenstück hingeweht, so kann er letzteres umgehen. Er kann aber auch auf dasselbe überspringen. In letzterem Falle teilt er sich in zwei Büschellichtbogen, einen zwischen b und d , und einen zweiten zwischen d und w ; der Körper d (das Dach) wird zur *Zwischenelektrode*. Beide so entstandenen Büschellichtbogen sind recht unabhängig voneinander; jeder kann für sich Bewegungen seiner Bahn in seinem Schlagraume erleiden, jeder kann sich, wenn nötig, verlängern oder verkürzen (z. B. bei Heben und Senken des Körpers d) etc.; ja es kann sogar der eine Büschellichtbogen in dem einen Schlagraume, z. B. zwischen d und w *erlöschen* (ausgeblasen werden), der untere zwischen b und d (also der Kugelblitz im Zimmer) bleibt ruhig bestehen, wenn nur zwischen d und w (Dach und Wolke) eine hinreichende Elektrizitätsmenge durch Glimmen oder Büschelentladung übergeführt wird.

Der in das Haus eindringende Teil der Entladungsbahn kann dann seinerseits kleinere Metallteile (Thürschlösser, Ofenthüren, Ofenrohre, Treppengeländer etc.) umgehen; es können aber diese Metallteile auch wiederum zu neuen Zwischenelektroden werden. Letzteres kann mit einer ruckweisen Verschiebung des dem Metalle naheliegenden Bahnstückes nach ersterem hin verbunden sein; befindet sich gerade in der Nähe jener Bahnstelle eine Leuchtmasse, so scheint diese nach dem Metallgegenstande hinzuspringen.¹⁾

Der geschilderte Teilungsprozess kann sich beliebig fortsetzen, sodass die Entladungsbahn im Hause schliesslich aus zahlreichen Schlagräumen und zwischenliegenden Halbleiter-

1) F. Arago, l. c. p. 41.

oder Leiterstücken besteht. Auch kann sich wohl eine Entladungsbahn in mehrere nebeneinander verlaufende Bahnäste teilen. In jedem Schlagraume kann eventuell eine Leuchtmasse auftreten.

Es sei noch erwähnt, dass nach Beobachtungen am Büschellichtbogen¹⁾ eine Leuchtmasse, welche im Entladungscanale wandernd auf eine Zwischenelektrode trifft, an dieser spurlos und lautlos verlöschen (in ihr allmählich gewissermaassen versinken) kann, und dass dann häufig unmittelbar nachher an der anderen Seite der Zwischenelektrode eine neue Leuchtmasse hervortreten wird; es hat dann ganz den Anschein, als habe *ein und dieselbe* Leuchtmasse ungestört den Metallgegenstand passiert.²⁾

Ende des Entladungsprocesses bei Kugelblitzen. — Der Abschluss des gesamten Entladungsvorganges findet manchmal völlig *lautlos* statt. Das Fließen der Elektrizität im Entladungscanale hört einfach auf, die Leuchtmasse hebt sich lautlos in die Lüfte oder erlischt spurlos³⁾; öfters hört man im letzteren Falle ein brausendes Geräusch, einen *schwachen* Knall oder dergleichen.⁴⁾

In den meisten Fällen wird jedoch von einer heftigen Detonation am Schlusse der Gesamtentladung berichtet. Es ist dann wohl anzunehmen,⁵⁾ dass der Entladungskanal des Kugelblitzes wieder einer gewöhnlichen Blitzentladung, einem *Endblitze*, als Bahn diene.⁶⁾ Im Folgenden sei zugleich mit

1) Ueber den Einfluss von Bahnverengerungen und Zwischenelektroden auf wandernde Leuchtmassen vgl. die Versuche von A. Righi, Lum. Elektr. 42. p. 614 u. 616. 1891.

2) Nach laienhafter Ausdrucksweise sollen Leuchtmassen durch Schlüssellöcher (vgl. S 147) etc. gegangen sein.

3) F. Arago, l. c. p. 41; S 34, 61, (66), 129, 135, 140.

4) S 81, 82, 101, 121, 123, 129, 132, 137.

5) In *vielen* Fällen dürfte freilich der etwa zur Zeit des Verlöschens der Leuchtmasse gehörte intensive Knall, das Krachen oder dergl. nichts anderes als der zum *Initialblitze* gehörige Donner gewesen sein.

6) Wie Hr. Ogden Rood (vgl. l. c. Beobachtung Nr. 4) angiebt, ist das Auftreten von Endblitzen am Schlusse des nahe continuirlichen Elektrizitätsflusses *häufig* zu beobachten und zwar auch schon bei Blitzschlägen, deren Gesamtdauer viel weniger als eine Secunde (z. B. ca. $\frac{1}{44}$ sec) beträgt.

der Beantwortung der Frage nach der Entstehungsursache des Endblitzes die Erklärung dafür gegeben, warum bei einzelnen Kugelblitzen die Bewegung der Leuchtmasse völlig geräuschlos erfolgt, bei anderen nicht.

Ein längerdauerndes, dem Initialblitze folgendes Nachfließen von Elektrizität setzt voraus, dass grosse Elektrizitätsmengen erst *allmählich* zur Entladung verfügbar werden. Hierzu ist es aber nicht nötig, dass auf *beiden* Seiten der Entladungsbahn eine nahe gleichstarke Hemmung des Elektrizitätsflusses stattfindet. Wie wir in vorliegender Arbeit sahen, setzt das Auftreten nahe continuirlicher Entladung irgend welcher Art nicht voraus, dass beide Elektroden Halbleiter sind; es genügt, dass wenigstens *eine* Elektrode sich wie ein Halbleiter verhält. Wenn nun auch Wolke und Erde meist beide bis zu gewissem Grade als Halbleiter aufzufassen sind, so wird doch in der Regel die durchschnittliche Leitfähigkeit¹⁾ in dem einen Endgebiete der Entladungsbahn des Kugelblitzes wesentlich geringer sein als in dem anderen. Das vor Ausbildung der Entladung zwischen Wolke und Erde befindliche starke Potentialgefälle dringt dann während der Entladung (entlang vielfach verzweigter Entladungsäste) in die *schlechter* leitende Elektrode ein; längs des zwischen Wolke und Erde befindlichen Entladungscanals und *auf oder in der besser leitenden Elektrode herrscht nur ein geringer Spannungsabfall*. Regulirt wird der nahe continuirliche Elektrizitätsfluss in der schlechter leitenden Elektrode.

Ob bei einer Kugelblitzentladung die Erde die (durchschnittlich) besser- oder die schlechterleitende Elektrode ist, wird sich, wie leicht einzusehen ist, vor allem in der Ver-

1) Leitfähigkeit im gewöhnlichen Sinne besitzt natürlich eine Wolkenelektrode nicht. Es ist vielmehr anzunehmen, dass in einer Wolke die auf zahllose einzelne discrete Massenteilchen verteilte Elektrizität nur dort *überhaupt* in merklicher Weise ins Fliessen kommt, wo ein bestimmter (eventuell in verschiedenen Wolkengebieten verschiedener) Mindestwert des Spannungsgefälles überschritten ist, dass aber auf einer einmal gebildeten Strömungsbahn ein Elektrizitätsnachfließen im allgemeinen um so leichter (bei um so kleineren Gradienten) erfolgt, je mehr Elektrizität (innerhalb kurzer Zeit) schon durch die Strombahn geflossen ist (vgl. die Beobachtungen über die Bildung von Gleitfunken erster Art, Wied. Ann. 66. p. 1067. 1898).

schiedenheit des Einflusses zeigen müssen, welchen Inhomogenitäten in der Leitfähigkeit des Erdbodens auf den Entladungsprocess des Kugelblitzes ausüben.

Es sei der (feuchte) Erdboden die besserleitende Elektrode (die Regulirung der Entladung erfolge in der Wolke). In diesem Falle wird der Fusspunkt des vom Winde bewegten Entladungscanales *ohne Störung und ohne Geräusch* vom feuchten Erdboden auf kleine Metallteile (Dachrinne etc.), ja sogar auf das ausgedehnte Wasser- oder Gasrohrnetz einer Grossstadt, dann wieder auf feuchten Boden, auf Telegraphenleitungen etc. übertreten können, nichts scheint die Leuchtmasse in ihrem Dahinschweben zu stören. Nur wenn *in der Wolke* der Entladungsprocess plötzlich ein ausgedehntes Wolkengebiet mit *relativ guter* durchschnittlicher Leitfähigkeit erreicht, kann dieses zu rascher Entladung kommen; der Kugelblitz schliesst dann mit einem gewöhnlichen Blitze.

Wesentlich andere Erscheinungen als die eben angegebenen wird man am Fusspunkte des Entladungskanales beobachten, wenn die Wolke besser leitet als der Erdboden, wenn also an *letzterer* Stelle die Entladung gehemmt ist. Nur so lange der Fusspunkt über nahe homogenes Erdreich hinschwebt, erfolgt dies ruhig und geräuschlos. Jedes besserleitende Bodengebiet, jedes grössere Metallstück stört jetzt den nahe continuirlichen Elektrizitätsfluss. Die Leuchtmasse schwebt unter rasselndem oder knatterndem Geräusche über eine inhomogene Oberfläche dahin, springt krachend von einem Metallgegenstande zum anderen;¹⁾ ihre Begrenzung ist unstät, flackernde Flämmchen scheinen nach oben und unten von ihr auszugehen. Erreicht der Fusspunkt der Entladung in diesem Falle einen gutleitenden Gegenstand von *grosser* Ausdehnung (Capacität), so schliesst ein Endblitz unter heftigster Detonation die Kugelblitzentladung.²⁾

Die Ausgangspunkte der in einer nicht unmittelbar über dem Erdboden schwebenden Leuchtmasse eines Kugelblitzes vereinigten Stromfäden endigen wahrscheinlich häufig nicht auf

1) F. Arago, l. c. p. 41 „sprang unter Krachen auf das Geländer der Treppe“.

2) Eine Versuchsanordnung, welche langdauernde Entladung grosser Leydener Batterien mit Initial- und Endfunken herzustellen gestattet, ist in

einer *zusammenhängenden* Fläche; der Entladungscanal ist in der Nähe des Erdbodens in einzelne getrennte Entladungsstränge gespalten. Dies ist wohl die Voraussetzung dafür, dass sich, wie oft beobachtet ist,¹⁾ eine einzige ursprünglich vorhandene grosse Leuchtmasse gegen Ende der Entladung plötzlich *in mehrere kleinere Leuchtkugeln zerteilt*. In diesem Falle rückt einfach die zur Ausbildung einer Leuchtmasse günstige Stelle (Ort eines relativ grossen Gradienten?), sich zum Erdboden herabsenkend, schliesslich von der vereinigten Bahn auf die einzelnen Stromstränge, vielleicht einfach infolge allmählich sich ändernder Stromstärke.

Die Zerteilung einer Leuchtmasse kann *völlig geräuschlos* vor sich gehen.²⁾

Fig. 17 schematisch angegeben. Es bedeuten c_1, c_2, c_3, c_4 vier Capacitäten (Leydener Batterien), w_1 und w_2 zwei grosse Wasserwiderstände, e_1, e_2, e_3, e_4 vier Elektroden. Der Einfachheit halber

sei angenommen, dass $c_1 = c_2, c_3 = c_4, w_1 = w_2$ ist. Stehen sich die Kugelelektroden e_1 und e_2 etwas näher als e_3 und e_4 (oder ist e_1 und e_2 kleiner als e_3 und e_4), so beginnt die Gesamtentladung mit einem Initialfunken zwischen e_1 und e_2 . Die Intensität des Initialfunken hängt von der Grösse der Capacitäten c_1 und c_2 ab; die Dauer des Nachfliessens (Büschellichtbogens) von der Grösse der Widerstände w_1 und w_2 und der Capacitäten c_3 und c_4 . Bläst man von b aus gegen den Büschellichtbogen, so wird er nach e_3, e_4 hingeweht; kommt er hierbei letzteren hinreichend nahe, so beendet eine Funkenentladung von e_3 nach e_4 durch den Büschellichtbogen die Gesamtentladung (wie in Fig. 17 angedeutet ist). Durch Variation der Grössen c_1, c_2, c_3, c_4 und w_1, w_2 , sowie der Intensität des Blasens kann man nach Wunsch einen starken oder schwachen Initialfunken, einen lang- oder kurzdauernden Büschellichtbogen, einen starken oder schwachen Endfunken erzeugen. Ist der Widerstand w_1 (oder w_2) sehr klein, so erhält man auch einen Endfunken zwischen den Elektroden e_1 und e_4 (oder e_2 und e_3).

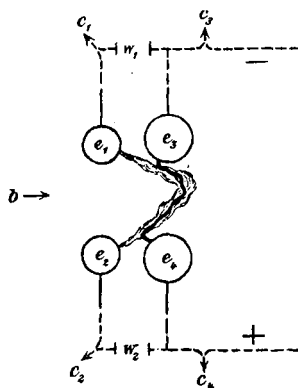


Fig. 17.

Funkenentladung von e_3 nach e_4 durch den Büschellichtbogen die Gesamtentladung (wie in Fig. 17 angedeutet ist). Durch Variation der Grössen c_1, c_2, c_3, c_4 und w_1, w_2 , sowie der Intensität des Blasens kann man nach Wunsch einen starken oder schwachen Initialfunken, einen lang- oder kurzdauernden Büschellichtbogen, einen starken oder schwachen Endfunken erzeugen. Ist der Widerstand w_1 (oder w_2) sehr klein, so erhält man auch einen Endfunken zwischen den Elektroden e_1 und e_4 (oder e_2 und e_3).

1) Vgl. F. Arago, l. c. p. 33. S, 29, 82, 85, 93, 114, 119, 135.

2) Meteor. Zeitschr. 1896. p. 25: „Zuerst zuckte aus der Höhe ein gewöhnlicher, ziemlich starker Blitzstrahl herab, der an der Stelle, wo er endete, eine feurige Kugel zurückliess. Von dieser Kugel zuckten zahl-

Endigt in dem Falle des Vorhandenseins einer nach unten (unterhalb der Leuchtmasse) vielverzweigten Strömungsbahn der Gesamtentladungsvorgang in einer (Zickzack-)Blitzentladung, so teilt sich der Endblitz nach der Erde hin. Es scheint in diesem Falle die Leuchtmasse im Augenblicke ihres Verschwindens nach allen Seiten hin Blitze auszusenden¹⁾; dieser Vorgang ist dann natürlich mit heftiger Schallentwicklung verbunden.

Stromstärke bei Kugelblitzen. — Der Initialblitz (und der Endblitz) verhält sich natürlich wie ein gewöhnlicher Blitzschlag; in ihm wird also *momentan vorübergehend* die Stromstärke bis auf mehr als 10000 Amp. steigen können.²⁾ Das langdauernde nahe continuirliche Elektrizitätsnachfliessen bei Kugelblitzen wird nur mit viel geringerer Stromstärke erfolgen. Auch wird letztere von Fall zu Fall sehr verschieden und selbst im einzelnen Falle nicht während der Gesamtdauer der Kugelblitzentladung constant sein. Im Folgenden sei versucht diese Stromstärke, wenigstens ihrer Grössenordnung nach, abzuschätzen.

Nehmen wir an, dass eine *nahe dem Erdboden* schwebende Leuchtmasse die Stromfäden von höchstens 4 qm glimmender Oberfläche zusammenfasst, so würden wir nach den Angaben am Schlusse des XXIV. Abschnittes auf eine Stromstärke von *höchstens 4 Amp.* schliessen können.

reiche Strahlen nach allen Seiten. Diese Strahlung hörte aber bald auf, und jetzt flogen von der Kugel viele einzelne Funken herunter wie Tropfen eines glühenden geschmolzenen Metalles.“ „Noch während der Sichtbarkeit der Tropfen erdröhnte bereits der starke Donner“ (letzterer rührte also vom Initialblitze her, ein Endblitz fehlte). Vgl. auch *S.* 119, 135. Auch beim Büschellichtbogen beobachtet man geräuschlose Teilung einer Leuchtmasse in neue, vgl. *Abh. Isis*, l. c. p. 16, sowie *Fig. 18*.

1) *Meteor. Zeitschr.* 1895. p. 247. Die Leuchtkugel „platzte mit schrecklichem Knall und es schien mir, als seien feurige Linien davon ausgegangen“. *F. Arago*, l. c., p. 46, „zersprengt plötzlich eine schreckliche Detonation die ganze Hülle (der 20 Fuss über einem Baume schwebenden Leuchtmasse) und sandte aus dieser Höllenmaschine ein Dutzend zickzackförmiger Blitzstrahlen, die nach allen Seiten hinfuhren.“ *Meteor. Zeitschr.* 1896. p. 25: „Im Moment des Zerspringens fuhr aus ihr (der Leuchtmasse) ein Blitzstrahl“.

2) Vgl. *F. Pockels*, *Wied. Ann.* 63. p. 195. 1897 und *Meteor. Zeitschr.* 1898. p. 41.

Einen zweiten Schätzungswert der Stromstärke im Kugelblitze erhalten wir folgendermaassen. Der Querschnitt einer Leuchtmasse des Büschellichtbogens beträgt bei 1 Milliamp. Stromstärke etwa 1 qmm, ihre Leuchtintensität ist hierbei freilich keine besonders starke; immerhin würde ein Raum von etwa einem Cubikdecimeter Inhalt mit der gleichen räumlichen Leuchtintensität ein sehr auffallendes, auch bei Tage weithin sichtbares Leuchtobject bilden. Nun wird die Leuchtmasse bei Kugelblitzen in den meisten Fällen als hühnerei- bis kindeskopfgross angegeben. Nehmen wir für letzteren Fall den Querschnitt der Leuchtmasse zu 150 qcm an und die Stromdichte gleich 1 Milliamp. pro qmm, so erhalten wir für den Kugelblitz eine *Stromstärke von 15 Amp.*

Aber auch noch auf einem dritten Wege gelangt man zu einer Abschätzung der Stromstärke bei Kugelblitzen. Wir wissen, dass die Elektrizitätsmenge, welche bei *starken* Blitzschlägen entladen wird, etwa 60 bis 100 Coulomb beträgt.¹⁾ Nehmen wir an, ein intensiver Kugelblitz entlade langsam die gleiche Elektrizitätsmenge, und berücksichtigen wir, dass in den meisten Fällen die angegebene Dauer des Kugelblitzes 5 bis 30 Secunden beträgt, so würde die Stromstärke in Kugelblitzen zu *20 bis 2 Amp.* anzunehmen sein.

Die auf drei ganz verschiedenen Wegen geschätzten Stromstärken zeigen der Grössenordnung nach auffallend gute Uebereinstimmung. Bei sehr kurzdauernden intensiven Kugelblitzen werden natürlich noch viel höhere Stromstärken vorkommen, im allgemeinen hat man aber doch schon die oben geschätzten Werte *als obere Grenzwerte* anzusehen. Recht wohl denkbar ist auch das Auftreten von Kugelblitzen mit wesentlich kleinerer Stromstärke; in der Krone des positiven Büschels findet schon bei einer Stromdichte von nur 0,05 Milliamp. pro qcm ein (schwaches) Leuchten statt; hiernach würde das Auftreten einer, wenn auch sehr lichtschwachen, bläulichen Leuchtmasse von Kindeskopfgrosse schon bei einer Stromstärke von 0,01 Amp. denkbar sein.

Dresden, den 1. März 1900.

1) E. Riecke, Götting. Nachr. 1895. p. 419.

(Eingegangen 16. Juni 1900.)
