7. Ueber die Entstehung der Spitzenentladung; von E. Warburg.¹⁾

§ 1. Eine Spitze werde einer Metalloberfläche gegenübergestellt, welche über ein Galvanometer zur Erde abgeleitet ist. Hält man alsdann die Spitze auf einem Potential, welches einen gewissen Werth überschreitet, so zeigt das Galvanometer einen constanten Strom an, welcher die Luft zwischen Spitze und Metalloberfläche durchsetzt. Es hat sich also unter dem Einflusse der electrischen Kräfte die Luft aus einem Isolator in einen Leiter von bestimmtem Leitungsvermögen verwandelt, sei es nur in der Nähe der Spitze, sei es in dem ganzen Zwischenraume zwischen Spitze und Metalloberfläche.

Ich habe mir die Frage vorgelegt, ob dieses Leitungsvermögen einige Tausendstel Secunden nach dem Anlegen des Potentials an die Spitze bereits seinen vollen Betrag erreicht hat.

§ 2. Zur Entscheidung dieser Frage benutzte ich folgende Versuchsanordnung. Die Spitze (Fig. 1) befindet sich in einer

Fig. 1

fast geschlossenen metallenen Hohlkugel, von welcher eine Leitung über eine Unterbrechungsstelle *I* zur Erde, eine andere über eine Unterbrechungsstelle *II* zu einem Electrometer führt. Zur Zeit Null wird bei geschlossenen Unterbrechungsstellen das

1) Mitgetheilt aus den Sitzungsber. der k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin vom 24. März 1898.

Potential V an die Spitze angelegt, zur Zeit t wird I , zur Zeit $t + \Theta$ wird II geöffnet. Die Ladung, welche das Electrometer anzeigt, rührt, da beim Anlegen des Potentials an die Spitze I geschlossen war, nicht von Influenz der auf Spitze und Zuleitung hingeflossenen Ladung her, sondern ist gleich der Electricitätsmenge e_m , welche in der Zeit Θ aus der Spitze durch Leitung ausgetreten ist, mag dabei diese Electricitätsmenge die Kugel erreicht haben oder sich noch in der Luft befinden.

Nachdem die Unterbrechungsstellen I und II wieder geschlossen sind, wird das Potential V an die Spitze dauernd angelegt, darauf wieder I und Θ Sec. später II geöffnet. Die

Fig. 2.

Ladung, welche das Electrometer jetzt anzeigt, ist die Electricitätsmenge e_c , welche beim constanten Strome in der Zeit Θ aus der Spitze durch Leitung ausgetreten ist. Die Vergleichung von e_m mit e_c entscheidet die gestellte Frage.

§ 3. Die Spitze stellte ich in folgender Weise her. Ein 0,25 mm dicker Platindraht wurde in ein Glasrohr eingeschmolzen, etwa 2 cm von der Einschmelzstelle in der Gebläselampe zum Glühen erhitzt und dann durchgerissen. Dabei bildet sich, wie die mikroskopische Betrachtung zeigt, eine regelmässig conisch geformte Spitze. In das Glasrohr wurde etwas Quecksilber gegossen, ein in dasselbe tauchender Kupferdraht vermittelte die Zuleitung zur Spitze.

§ 4. Als Kugel gebrauchte ich einen akustischen Resonator von 18 cm Durchmesser, die kleine Oeffnung desselben

wurde metallisch verschlossen, die grössere von 4 cm Durchmesser so weit metallisch gedeckt, dass das Glasrohr noch eben hindurchging. Die kürzeste Entfernung zwischen der Spitze und der Kugelwand betrug 5 cm.

§ 5. Die Anordnung einer der Unterbrechungsstellen *I* und *II* zeigt Fig. 2. *a* und *b* sind zwei auf Ebonit montirte Metallstücke, zwischen welchen ein um *e* drehbarer, bei *p* mit Platincontacten versehener Hebel leitende Verbindung herstellt. Diese wird aufgehoben, indem der Hebel im Sinne des Pfeils zurückgeschlagen wird. Die Zeit, zu welcher dies durch einen Anschlag bewerkstelligt wird, kann durch die Schraube *S* regulirt werden.

Zwei derartige Unterbrechungsstellen *I* und *II* sind, von möglichst geschlossenen, zur Erde abgeleiteten Metallhüllen umgeben, auf der Seite *A* des Schiessbolzens in dem Apparate angeordnet, welcher in diesen Annalen früher beschrieben und abgebildet wurde.¹⁾ Der Bolzen war auf seiner Hinterseite *A* in einer Ebene senkrecht zu seiner Richtung mit zwei Flügeln aus Ebonit versehen, durch welche die Hebel *I* und *II* nacheinander zurückgeschlagen wurden.

§ 6. Als Electricitätsquelle diente eine Voss'sche Electrisirmaschine, welche im Nebenzimmer durch einen Electromotor betrieben wurde. Die eine Electrode war zur Erde abgeleitet, die andere führte zu einer Leidener Batterie, welche mit einem Braun'schen Electrometer verbunden war (Fig. 2). Mit der Leidener Batterie war ausserdem eine in der Figur nicht gezeichnete Metallplatte verbunden, gegen welche eine zur Erde abgeleitete feine Metallspitze mikrometrisch verstellt werden konnte. Durch diesen Spitzennebenschluss wurde das am Braun'schen Electrometer *E* abgelesene Potential auf den gewünschten Werth gebracht.

§ 7. Sollte bei constantem Strome beobachtet werden, so war die Batterie direct mit der in die Kugel eintauchenden Spitze verbunden. Der Bolzen wurde ausgelöst, sofort die Batterie entladen und das Electrometer abgelesen.

Sollte kurz nach Anlegen des Potentials beobachtet werden, so war (Fig. 2) die Leidener Batterie mit dem Metallstück *m*,

1) Wied. Ann. 59. p. 3. 1896.

die Spitze mit der Messingröhre R verbunden, welche selbst mit dem Bolzen in metallischer Verbindung stand. Wenn nach Auslösung des Bolzens das Contactstück C auf m trat, so war das Potential an die Spitze angelegt (Zeitpunkt Null). Zur Zeit t wurde I , zur Zeit $t + \Theta$ II geöffnet. Das Metallstück m erhielt dabei eine solche Länge (4 cm), dass es von dem Contactstück C erst nach Oeffnen von II verlassen wurde. Ferner war es auf einer mit Millimetertheilung versehenen Schiene mit starker Reibung verschiebbar, sodass die Zeit t in reproducirbarer Weise regulirt werden konnte. Der Bolzen wurde vor Beendigung seines Weges durch einen Anschlag zur Erde entladen.

§ 8. Als electrometrische Vorrichtung zur Messung des Potentials, welches in der Zeit Θ durch die Ladungen e_c und e_m auf der Kugel hervorgebracht wurde und welches bei den Versuchen 150 Volt nie übertraf, benutzte ich, wie Precht¹⁾, ein Thomson'sches Quadrantelectrometer, dessen Nadel die normale Ladung erhielt, dessen eines Quadrantenpaar zur Erde abgeleitet und dessen anderes durch Influenz geladen wurde. Dazu war dasselbe (Fig. 1) mit einer Metallplatte J verbunden, welcher in passender Entfernung eine zweite, mit dem einen Contactstück der Unterbrechungsstelle II verbundene Metallplatte J' gegenüberstand. Der Zuleitungsdraht vom Electrometer zur Contactstelle war in ein von ihm isolirtes, zur Erde abgeleitetes Messingrohr eingeschlossen; auch das Electrometer mit den beiden Metallplatten befand sich in einem zur Erde abgeleiteten Metallkasten. Unter diesen Umständen erwies sich die Methode, deren Empfindlichkeit in weiten Grenzen verändert werden konnte, zweckentsprechend.²⁾

Fig. 3.

1) J. Precht, Wied. Ann. 49. p. 152. 1893.

2) Der Zuleitungsdraht bildete mit dem umhüllenden und von ihm an verschiedenen Stellen durch Schellack isolirten Messingrohr einen Condensator, welcher nicht frei von Rückstand war. Das Electrometer wurde deshalb stets zu derselben Zeit nach der Ladung abgelesen.

§ 9. Die Zeitmessungen endlich führte ich nach der Pouillet'schen Methode aus. Zur Bestimmung von Θ wurde (Fig. 3) aus einer Batterie von vier Accumulatoren, einem Widerstand von $100 \, \Omega$ und einem Galvanometer mit wenigen dickdräftigen Windungen (Widerstand $< 0,16 \, \Omega$) ein Schliessungskreis gebildet, welcher die Unterbrechungsstelle *II* enthielt; die Unterbrechungsstelle *I* bildete einen Kurzschluss für die Galvanometerleitung, welche noch einen Widerstand von $50\text{--}200 \, \Omega$ enthielt. Man schliesst *I*, dann *II* und löst den Bölzen aus. Dann geht der Batteriestrom während der Zeit Θ durch das Galvanometer. Aus dem erhaltenen Ausschlag, der Schwingungsdauer und dem Dämpfungsverhältniss des Galvanometers, endlich aus der Ablenkung, welche ein bekannter Theil der angewandten electromotorischen Kraft im Galvanometer hervorbringt, kann Θ berechnet werden.

Um t zu finden, ordnete ich neben dem Metallstück m eine dritte Unterbrechungsstelle *III* an, welche von dem Bolzen durch einen an C befestigten Stift geöffnet wurde. Die Zeit, zu welcher dies geschah, konnte durch eine Schraube regulirt werden. Das Zeitintervall t ist nun mit Schärfe deshalb nicht bestimmbar, weil, ehe das Contactstück C auf m auftrifft, ein Funke zwischen C und m überspringt. Die Unterbrechungsstelle wurde daher so regulirt, dass sie ein wenig, bevor C auf m traf, geöffnet wurde. Uebrigens ist die hieraus hervorgehende Unsicherheit nicht grösser als $0,002 \text{ sec.}$ Die Bestimmung des Intervalles zwischen den Zeitpunkten, zu welchen *III* und *I* geöffnet wurde, geschah in der beschriebenen Weise. Selbstverständlich wird durch die Unsicherheit in der Bestimmung von t die Schärfe in der Vergleichung von e_m und e_c nicht beeinträchtigt.

§ 10. Um die Sicherheit des Contactes zwischen m und C zu prüfen, ersetzte ich die Leidener Batterie durch eine kleine 68 gliederige Accumulatorenatterie, deren einer Pol z über einen Jodcadmiumwiderstand zur Erde abgeleitet, deren anderer Pol k über m nicht mit der Spitze, sondern mit der Kugel verbunden werden konnte. Die Ladung der Kugel erfolgte also nicht durch die Spitze, welche ganz ausser Spiel blieb, sondern direct durch die Batterie.

Es wurde nun erstens der Pol k dauernd an die Kugel an-

gelegt (Fall 1). Solange I geschlossen ist, sind beide Batteriepole zur Erde abgeleitet. Wird alsdann durch den Bolzen I geöffnet, so lädt sich die Kugel sofort zum Potential der Batterie, welches durch das Θ Sec. später abgetrennte Electrometer angegeben wird.

Zweitens wurde in der § 7 beschriebenen Weise der Pol k durch den Bolzen, also erst kurz vor Oeffnen von I , an die Kugel angelegt (Fall 2). Functionirte der Contact zwischen C und m sicher, so musste derselbe Electrometeraussschlag wie im vorigen Fall erhalten werden.

Es zeigte sich nun, dass dies nicht zutraf, wenn die Zeit t zu kurz war, d. h. wenn das Contactstück C vor Oeffnen von I einen zu kurzen Weg auf dem Metallstück m zurückgelegt hatte.

So ergab sich im Fall 1 die normale Electrometerladung gleich 94,5 Scalentheilen.

Betrug im Fall 2 der genannte Weg 4 mm, so wurde gar keine Electrometerladung erhalten. Betrug der Weg 5 mm, so war die Ladung wechselnd, sie belief sich z. B. in 10 aufeinander folgenden Versuchen bez. auf 94; 0; 73,3; 93,8; 92,2; 87,5; 34,3; 0; 0; 93,2.

Betrug endlich der Weg 7 mm, so wurde stets die richtige Ladung erhalten. Sie ergab sich z. B. in fünf aufeinander folgenden Versuchen gleich 95; 96; 95,3; 95; 95.

Die Zeiten t betrugen in den drei genannten Fällen 0,0050; 0,0057; 0,0071 sec.

Aus diesen Versuchen geht hervor, dass die Zeit t ohne Gefährdung des sicheren Contacts nicht kürzer als 0,007 Sec. gemacht werden durfte.

Woher die Unsicherheit des Contacts bei kürzeren Zeiten rührt, ob von einem Springen des Bolzens oder von anderen Umständen, habe ich nicht ermittelt.

§ 11. Die folgende Tabelle enthält die Ergebnisse einer mit sicherem Contact angestellten Versuchsreihe.

$$t = 0,00705 \text{ Sec.} \quad \Theta = 0,0035 \text{ Sec.}$$

V	e_c	e_m	$\frac{e_m}{e_c}$	$\frac{e_{c1} +}{e_{c1} -}$	$\frac{i +}{i -}$	$i \cdot 10^9 A$
- 8400	103,8	104,6	1,01			6,58
+ 8400	64,1	64,6	1,01	0,66	0,62	4,09
- 4800	55,7	55,5	1,00			1,38
+ 4800	31,7	31,4	0,99	0,57	0,56	0,77

Zu der Tabelle ist folgendes zu bemerken:

1. V ist das Spitzenpotential in Volt. Wurde es bei positiver Ladung unter 3100 Volt erniedrigt, so hörte der Strom auf (Röntgen's¹⁾ Minimumpotential); für negative Ladung war dieser Grenzwert weniger genau bestimmbar, lag aber jedenfalls dem für positive Ladung erhaltenen nahe.

2. Unter e_c und e_m sind die betreffenden Electrometerablenkungen gegeben, Mittel aus mehreren Versuchen, welche um einige Procente voneinander abwichen. Diese Ablenkungen sind den Werthen von e_c und e_m proportional. Die Werthe von e_c zeigen, dass, wie bekannt, bei gleichem absoluten Werth des Spitzenpotentials die Stromstärke für positive Ladung kleiner als für negative ist. Die 5. Columne giebt das Verhältniss der Stromstärken in den beiden Fällen hergeleitet aus den Werthen von e_c , die 6. Columne dasselbe Verhältniss hergeleitet aus Versuchen mit dem Galvanometer. Beide Verhältnisse stimmen ziemlich gut überein.

3. In der Tabelle entsprechen die auf $V = \pm 4800$ Volt bezüglichen Werthe von e grösserer Electrometerempfindlichkeit, als die auf ± 8400 bezüglichen, sind daher mit diesen nicht vergleichbar. Die durch das Galvanometer bestimmten Stromstärken in Ampere sind für die verschiedenen Fälle in der 7. Columne verzeichnet.

4. Endlich geht aus der 4. Columne das Hauptresultat hervor, dass 0,007 Sec. nach Anlegen des Potentials an die Spitze die Stromstärke bereits ihren definitiven Werth erreicht hat.²⁾

§ 12. An dieses Resultat knüpfe ich folgende Bemerkungen:

1. Verzögerungserscheinungen, wie sie bei der Funkenentladung zwischen Kugeln beobachtet werden, haben sich bei der Spitzenentladung nicht gezeigt; denn die Ladungen, welche

1) W. C. Röntgen, Gött. Nachr. 1878. Vgl. auch Precht a. a. O.

2) Versuche unter einer Glocke, innerhalb deren die Luft von atmosphärischem Staub befreit werden konnte, zeigten, dass dieser auf das Resultat ohne Einfluss ist. — Zeiten t kleiner als 0,007 Sec. entzogen sich aus den § 10 erörterten Gründen der Beobachtung; wenn bei zu kleinem t $e_m < e_c$ gefunden wurde, so konnte jedesmal nach der Methode des § 10 Unsicherheit des Contacts nachgewiesen werden.

0,007 Sec. nach Anlegen des Potentials an die Spitze in einigen Tausendsteln der Secunde beobachtet werden, ergeben sich bei mehrmaliger Wiederholung desselben Versuches innerhalb der Beobachtungsfehler constant.

2. Die Luft hat bei der Spitzenentladung schon 0,007 Sec. nach Anlegen des Potentials das dem constanten Strome entsprechende Leitungsvermögen erlangt.'

3. Es fragt sich, ob die Luft unter dem Einfluss der electrischen Kräfte nur in der Nähe der Spitze oder bis an die umgebende Metalloberfläche hinan leitend wird. Im ersten Falle würde ein Leitungsstrom nur bis zu *der* Entfernung von der Spitze fließen, bis zu welcher die Luft leitend geworden ist; von dort würde die Electricität durch Convection (den electrischen Wind) an die Metalloberfläche befördert werden. Im zweiten Falle würde der Leitungsstrom bis an die Metalloberfläche reichen, und der electrische Wind wäre eine secundäre Erscheinung. Die mitgetheilten Versuche lassen diese Frage unentschieden (vgl. § 2), scheinen aber nach der zweiten Auffassung leichter verständlich zu sein.

(Eingegangen 5. April 1898.)