ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 19.

1. *Potentialmessungen im Quecksilberlichtbogen; von Josef Pollak.*

(Ausgeführt mit Unterstützung der Gesellschaft zur Förderung deutscher Wissenschaft, Kunst und Literatur in Böhmen.)

(Hierzu Taf. II, Figg. 1 u. 2; Taf. III, Figg. A, B, C.)

I. Der Potentialverlauf im Lichtbogen.¹⁾

§ 1. Einleitung und Literaturübersicht.

Die meisten Forscher, die sich mit den Potentialverhältnissen im elektrischen Lichtbogen beschäftigten, beschränken sich in ihren Veröffentlichungen auf das Potentialgefälle unmittelbar an den Elektroden; die wenigsten behandeln auch die Potentialverteilung im Innern. Man begnügte sich da gewöhnlich mit der indirekt auch den Potentialverlauf charakterisierenden Formel für die Elektrodenspannung

$$e = a + b \cdot l$$

(a , b Konstante, l Bogenlänge), die schon von Edlund²⁾ 1867 aufgestellt und von den meisten seiner Nachfolger (so Ayrton u. Perry, Frölich, Peukert, v. Lang, Cross u. Shepard, Nebel, Luggin, Uppenborn, Duncan u. Rowland, S. P. Thompson, W. E. Ayrton, Frau Ayrton etc.) im Prinzip akzeptiert, wenn auch natürlich erweitert und umgearbeitet wurde.

Die Schuld an der mangelhaften Durchbildung dieses Gebietes trägt wohl der Umstand, daß man sich für derartige Untersuchungen entweder des gewöhnlichen Kohlelichtbogens oder eines solchen zwischen Metallelektroden in Luft von atmosphärischem Druck bediente, welche allerdings bei den kleinen Bogenlängen und den komplizierten Reaktionen an den Elektroden und im Innern nichts weniger, als dazu geeignet sind.

1) Hierzu die vorläufige Mitteilung in der Physik. Zeitschr. 6. p. 277. 1905.

2) E. Edlund, Pogg. Ann. 131. p. 586. 1867.

Fig. 1.

Fig. 1a.

Fig. 2.

Der erste Versuch, die Potentialverteilung im Innern des Lichtbogens direkt zu ermitteln, rührt von Lecher¹⁾ her. Er benutzte dazu einen dünnen Prüfstift aus Kohle, den er in einen Lichtbogen zwischen Kohlenelektroden einführte, und dessen Potentialdifferenz gegen die Elektroden er elektrometrisch bestimmte. Lecher stellte so fest, daß das Potential des Stiftes sich nicht stark ändert, wenn dieser entlang des ganzen Lichtbogens verschoben wird, während es unmittelbar an der positiven Elektrode einen Sprung von 36 Volt, an der negativen einen solchen von 10 Volt machte. (Der Kathodenfall ist so hoch angegeben, weil in ihm schon das Gefälle in der Dampfstrecke mitgemessen war.) Merkwürdigerweise konnte Lecher die Spitze seiner Sonde eine ziemliche Strecke senkrecht aus dem Lichtbogen ziehen, ohne ihr Potential wesentlich zu ändern. Bei Pt, Fe, Ag und Cu fand sich die bedeutende Einseitigkeit im Elektrodengefälle nicht.

Die Methode Lechers war vorbildlich für viele folgende Arbeiten. So wiederholte Luggin²⁾ bald nachher die Versuche, indem er sich zur Messung der Potentialdifferenzen einer Brückenmethode bediente. Uppenborn³⁾ versuchte Sonden aus verschiedenem Material, kehrte aber wieder zu dem einfachen Kohlenstift zurück; er verwendete für die Potentialmessungen ein Voltmeter (Spannungsgalvanometer). Weitere Arbeiten dieser Art am Kohlenlichtbogen mit verschiedenerlei Elektroden, veränderlichen Bogenlängen und Stromstärken rühren von Prof. Ayrton, Mather, Brousson, S. P. Thomson⁴⁾ her; die gründlichste ist von Frau Ayrton.⁵⁾ Die Resultate aller dieser Messungen, soweit sie uns hier angehen, bestätigen übereinstimmend die Ansicht, daß im Lichtbogen der größte Teil der Elektrodenspannung unmittelbar an den Elektroden konsumiert wird, während nur ein sehr kleiner Teil davon auf die Dampfstrecke entfällt und sich in dieser gleichmäßig verteilt. In ihrem Potentialgefälle konkurrieren

1) E. Lecher, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien, 95. II. p. 992. 1887.

2) H. Luggin, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien, 96. II. p. 759. 1887.

3) F. Uppenborn, Zentralblatt f. Elektrotechn. 10. p. 102. 1888.

4) S. P. Thompson, The Electrical Review, 37. p. 538. 1895.

5) H. Ayrton, The Electric Arc.

Kathode und Anode sehr ungleichartig, je nach ihrem Material, den Beimengungen, der Stromstärke und Temperatur.

Zwei bemerkenswerte Arbeiten neueren Datums, von dem Erfinder der Quecksilberdampflampe Hewitt¹⁾ und seinem Mitarbeiter Wills²⁾ liegen noch auf diesem Gebiete vor. Der erstere bestimmte mittels zweier, in der Mitte seiner Quecksilberlampen eingeschmolzenen Thermoelemente, die auch als Sonden für Potentialmessungen dienten, die Leitfähigkeit in der positiven Lichtsäule in ihrer Abhängigkeit vom Quecksilberdampfdruck bei verschiedenen Stromstärken und Röhrendurchmessern. Der zweite Autor arbeitet in einem Falle mit vier ähnlichen festen Sonden, in einem anderen mit zwei, im Abstände von 1 cm von den Elektroden eingeschmolzenen Sonden und beobachtet so das Gefälle in der positiven Lichtsäule, den Anoden-, den Kathodenfall und die lokalen Temperaturen bei verschiedenen Stromstärken. Sehr bedenklich scheint mir bei den allerdings recht schwierigen Messungen die in der Hewittschen Arbeit angewandte Methode, das Entladungsrohr von außen auf eine bestimmte Temperatur zu bringen, dann den Lichtbogen anzulassen und sofort das Potential abzulesen³⁾; der Dampfdruck soll dann nach der ursprünglichen Temperatur aus Tabellen entnommen werden.

In den nachstehend beschriebenen Messungen habe ich mich ebenfalls des Quecksilberlichtbogens bedient, weil dieser mit seinen einfach zu übersehenden Strömungslinien, seinen fast beliebig großen Elektrodenabständen, den geringen Temperaturen und der Abwesenheit komplizierter sekundärer Reaktionen die für unsere Zwecke einzig brauchbare Lichtbogenform darstellt.⁴⁾

§ 2. Apparate und Hilfsmittel.

Der in Figg. 1—4 abgebildete *spezielle Versuchsapparat* gestattet, in einen vertikalen Quecksilberlichtbogen eine Sonde,

1) P. C. Hewitt, Electrician 52. p. 447. 1904.

2) A. P. Wills, Electrician 54. p. 26. 1904.

3) „Immediately after starting the current the reading of the Kelvin voltmeter was taken. There was sufficient time to obtain these readings accurately before the current materially altered the vapour density.“

4) Die sehr interessante Arbeit von J. Stark, T. Retschinsky und A. Schaposchnikoff (Ann. d. Phys. 18. p. 213. 1905) erschien, nachdem die vorliegenden Versuche abgeschlossen worden waren und konnte hier leider nicht mehr benutzt werden.

Fig. 1.

Fig. 2.

deren Potential elektrometrisch bestimmt werden kann, einzuführen. Da ich beabsichtige, ihn noch zu anderen Versuchen zu benutzen, so mag er hier gleich genauer beschrieben werden.

Das Hauptrohr *A*, Fig. 1, trägt oben eine positive Elektrode *a* aus chemisch reinem Nickel, unten eine positive Hilfselektrode *c* aus Quecksilber und einen von vorne eingeschmolzenen, mit Ausnahme seiner Enden mit Glas überzogenen Platindraht *b*, Fig. 3, dessen innere Spitze in der Mitte des Rohrquerschnittes steht. Der Stiel und die Rückseite der Nickelelektrode sind durch ein übergeschobenes Glasröhrchen, das in einen tellerartigen Deckel endet (Fig. 2), vor Starkstromentladungen geschützt. Das Rohr *A* hat eine gleichmäßige Wandstärke und einen lichten Durchmesser von 45 mm, die Distanz *a—b*, gleich der normalen Lichtbogenlänge, beträgt 440 mm, die scheibenförmige Elektrode *a* hat 25 mm im Durchmesser und ist 3 mm stark, der obere Platinzuführungsdraht ist 2 mm dick. Das obere Ende von *A* ist nach der Detailzeichnung Fig. 2 zweistufig verjüngt und hat außen zwei Kühlschlangen *K*₁ *K*₂ übergeschoben, *K*₂ für den Lichtbogen, *K*₁ für die Einschmelzstelle des Platindrahtes.¹⁾ Nur die

1) Dieser Draht war mit maximal 10 Amp. dauernd und 15 Amp. momentan beansprucht.

Dampfdruckes an der Kathode des brennenden Lichtbogens ist nach Art des Schenkelmanometers das Rohr bei d auf 20 mm erweitert. Durch B wird das U-förmige Sondenrohr C eingeführt, das zur möglichsten Verhütung von Deformationen, soweit es außen oder im Quecksilber steckt, sehr starkwandig ist; der in den Lichtbogen hineinragende Teil i aber ist aus einem dünnwandigen, außen nur 4 mm starken Glasröhrchen. In i ist ein als Sonde dienender 0,5 mm dicker Platindraht k eingeschmolzen und bis auf seine Spitze mit Glas bedeckt. Ein blankes Ende von 1 mm Länge erwies sich bei der starken Ionisation als vollkommen hinreichend. Von k aus besorgt ein angelöteter Platindraht, der mit Seide übersponnen und in i noch durch Glimmer isoliert ist, die Zuleitung zum Elektrometer.

Beim Evakuieren steigt das Quecksilber aus F nach B , hier nach bekannter Art einen barometrischen Abschluß bildend, ohne die Beweglichkeit des Sondenrohres zu beeinträchtigen. Zur Verstellung des Quecksilberniveaus in A , die in der Folge notwendig wird, dient ein zweiteiliger Tauchkolben G aus Buxbaumholz. Der eine prismatische Teil p (Fig. 4) ist fest; der andere, entsprechend den Röhren B , C ausgeschnittene Teil q , der genau in p gleitet und so geführt wird, ist beweglich und mit einer Grob- und einer Feineinstellung seiner Höhenlage (m , n) ausgestattet. Sein eiserner Stiel l reicht bis ins Quecksilber herunter und dient so auch der Kathode zur Stromzuführung. Für das Sondenrohr C ist noch eine Führung vorhanden, die eine genaue Einstellung der Sonden spitze in die Mitte des Querschnittes von A erlaubt und eine präzise Führung und Feststellung der Sonde in allen Punkten der Rohrachse und senkrecht dazu ermöglicht. Ihre Einrichtung läßt sich in den Detailzeichnungen Fig. 3 verfolgen:

An das Glasrohr B ist ein kürzeres Metallrohr r_1 gekittet und von einem zweiten Messingrohr r_2 umgeben. Mittels einer oberen und zweier unteren Schrauben s_1 , ferner zweier oberen und eines unteren Federbolzen t wird r_2 in seiner Lage erhalten. Da die Schrauben- und Federbolzenpaare um je 120° voneinander abstehen, kann die Achse von r_2 in einem ziemlich weiten Spielraum gegen die Achse von B verstellt und geneigt werden. Ein auf r_2 drehbar angebrachter Arm u faßt

das Sondenrohr. Auch u ist in einer Führung h verschiebbar und fixierbar. Der mit h fest verbundene Ring z trägt eine Marke, die auf einer Gradteilung von r_2 die Winkelverdrehung der Sonde abzulesen ermöglicht. In dem Auge v von u gleitet endlich das mit Millimeterteilung versehene Rohr r_3 , welches über das eigentliche Sondenrohr C geschoben und daran festgekittet ist. r_3 kann sich in v nur auf- und abwärts bewegen, weil es durch einen Führungsschlitz und das Führungsschraubchen w an einer Verdrehung gehindert ist. Die beiden Klemmschrauben s_3 halten das Sondenrohr in jeder Lage fest. Man kann nun mittels der drei Schrauben s_1 die Sondenröhre so einstellen, daß ihre Auf- und Abwärtsbewegung sich genau parallel zur Achse der Hauptröhre A vollzieht. Dann bringt man durch Verschiebung und Drehung des Armes u die Sondenspitze k genau in den Mittelpunkt des Querschnittes von A , wovon man sich durch außen angebrachte Visierfäden überzeugt. Damit ist eine vollkommen zuverlässige Führung der Sonde geschaffen und ihre jeweilige Entfernung von den Elektroden an der Millimeterteilung von r_3 bequem ablesbar. Um das Sondenende an einen beliebigen Punkt quer zur Lichtbogenachse zu bringen, wird das Stellschraubchen s_4 gelüftet, z gedreht und der Verdrehungswinkel an der Kreisteilung von r_2 abgelesen, wodurch auch schon bei bekannter radialer Länge von k der Abstand des sondierten Punktes von der Rohrachse A gegeben ist.

Was noch die anderen Instrumente betrifft, so wurden verwendet:

Eine *automatische Quecksilberluftpumpe* Jaumannscher Konstruktion. Zum Dichten der Glasschliffe diente Fett.

Ein *Quadrantenelektrometer* der Edelmannschen Type, das als Multizellularelektrometer mit vier „Nadeln“ umgebaut worden war. Die Suspension bestand aus einem 0,02 mm dicken, von elastischen Nachwirkungen fast freien Platindraht, die Dämpfung aus einem Platinflügel in Schwefelsäure; von den vier Nadeln kamen nur drei, bez. eine zur Verwendung. Ablesung mittels Spiegel und Fernrohr, Abstand Spiegel-Skala = 1000 Skalenteile.

Die *Strom- und Spannungsmessung* geschah durchweg mit Westonschen Drehspulen-Gleichstrom-Instrumenten. Es wurden

benutzt ein Milliampèremeter mit verschiedenen Neben- und Vorschaltwiderständen, ein Ampèremeter bis 10 Amp. und ein Voltmeter bis 75 Volt.

Das *Quecksilber* habe ich sorgfältig mit verdünnter Kalilauge, Salpetersäure und destilliertem Wasser gewaschen, getrocknet, filtriert und im Vakuum destilliert. Jedoch konnte ich eine spätere Verunreinigung der Quecksilberelektrode infolge Bildung von Platin- und Nickelamalgam nicht vermeiden.

§ 3. Allgemeines über den Quecksilberlichtbogen und seine Zündung.

Der soeben beschriebene Versuchsapparat ist nach einer gründlichen Reinigung an die Luftpumpe angeschmolzen, evakuiert und seiner weiteren Trocknung überlassen worden. Wiederholt wurde er noch mit trockener Luft ausgespült und endlich bis zur Leistungsgrenze der Luftpumpe evakuiert. Für die beschriebenen Versuche benutzte ich die nachstehend skizzierte Schaltung Fig. 5. Es bedeuten darin: A_1, A_2 Aus- schalter, r_1, r_2, r_3 Regulierwiderstände und L einen induktiven Widerstand, der mit dem Lichtbogen in Serie geschaltet diesen beständiger macht. Für Meßzwecke dienen das oben erwähnte Elektrometer, das Ampère- und Voltmeter, ferner die drei Umschalter U_1, U_2, U_3 . Der negative Pol der Elektrizitätsquelle muß wegen der bekannten unipolaren Leitung an das Quecksilber gelegt werden, der positive Pol wird mit der Nickelelektrode verbunden, außerdem geht eine Abzweigung von der positiven Klemme über A_2 und r_3 zur Hilfselektrode c .

Zur *Zündung des Lichtbogens* wird $A_1 A_2$ geschlossen, der Tauchkolben G so weit gesenkt, daß das anfangs bei d stehende Quecksilber nach c überfließt und dann G wieder gehoben, so daß sich die Quecksilberoberflächen trennen und ein kurzer Lichtbogen zwischen $c-d$ sich bildet. Mittels r_3 wird dann eine passende Stromstärke, hier ca. 2—3 Amp. einreguliert. Die ionisierten Quecksilberdämpfe steigen allmählich in A empor und überbrücken endlich den Raum $a-d$ so, daß auch dieser Lichtbogen aufflammt¹⁾, allerdings, um gleich darauf zu

1) Diese Zündungsmethode ist eine Modifikation der von E. Weintraub (Phil. Mag. 7. p. 95 u. f. 1904) angegebenen.

verlöschen; denn infolge der starken Wärmeentwicklung lösen sich ungemein viele okkludierte Gase und Dämpfe von den Glaswänden und den Elektroden und ersticken den Lichtbogen. Unter fortwährendem Pumpen muß er immer wieder gezündet werden, bis er endlich beliebig lange und selbst bei großen Stromschwankungen brennt.¹⁾ Höchst merkwürdig sind die bei dieser Zündungsart auftretenden geschichteten Gasentladungen, die bei einer Elektrodendistanz von ca. 500 mm durch die sekundäre Ionisierung schon bei Span-

1) In einem derart behandelten Rohr ist die Einleitung des Lichtbogens auch mittels anderer Anlaßmethoden leicht möglich. Am bequemsten für vertikale Lichtbögen ist wohl die von C. P. Hewitt angegebene Zündung durch den Induktionsstoß einer im Nebenschluß befindlichen Induktionsspule (M. v. Recklinghausen, Elektrotechn. Zeitschr. 23. p. 495. 1902). Zur Erreichung der notwendigen Momentanspannung durch Unterbrechung des Nebenschlußstromes sind, wenn nicht außerordentlich große Selbstinduktionen zur Verfügung stehen, rasch unterbrechende Schalter anzuwenden. Gewöhnliche Auschalter, auch wenn sie unter Öl gesetzt werden, sind meist ungenügend, am besten sind dazu Vakuumunterbrecher.

Fig. 5.

nungen von 40 Volt in einer so prachtvollen Ausbildung erscheinen, wie sonst nur bei mehreren tausend Volt. Ich komme auf diese Erscheinung noch im zweiten Teile dieser Untersuchungen zurück.

Die *Anode a* unseres Lichtbogens ist je nach der Stromstärke in Dunkel- bis Hellrotglut; besonders bei hohen Stromstärken ist sie einer beträchtlichen Zerstäubung unterworfen. In der Regel genügt der 4 mm über der Anode angebrachte Glasdeckel, um sichtbare Entladungen von ihrer Rückseite abzuwehren. Bei sehr kleinen und sehr großen Stromstärken sitzt aber auch hier eine leuchtende Schichte. Im letzteren Fall bemerkt man oft, daß die sichtbare Entladung von der Rückseite der Anode verschwindet und dafür auf ihrer vorderen Fläche ein heller Punkt erscheint, der sprungweise seine Lage ändert.

An der *Kathode* ist jener Punkt, an dem die Ionisierung durch hohe Temperatur und stärkste Verdampfung statthat, also die *eigentliche Basis des Lichtbogens* durch die bekannte weißglühende Stelle charakterisiert, die unter einem eigentümlichen Summen auf der Quecksilberoberfläche eifrig umherirrt. Ihre Tiefe und der Kraterdurchmesser wachsen mit zunehmender Stromstärke. Das Umherirren könnte dadurch verursacht werden, daß sich die Lichtbogenbasis solche Stellen aussucht, wo infolge kleiner, immer vorhandener Verunreinigungen die Verdampfungsarbeit infolge Kapillardepression verkleinert wird. Da sich aber die hoch erhitzte Quecksilberoberfläche in leicht brodelnder Bewegung befindet und immer neue Verunreinigungen emporwirbelt, so muß die Lichtbogenbasis immerwährend überspringen. Dieses Wandern der Kathode ist Ursache von Strom- und Spannungsschwankungen, die sich bei präzisen Messungen, besonders in Kathodennähe, unangenehm fühlbar machen. Man kann es verhindern, indem man einen Platindraht *b*, Fig 3, im Quecksilber bis nahe an dessen Oberfläche anbringt. Die weißglühende Stelle haftet dann infolge Kapillardepression an der Drahtspitze fest. Nur dann ist das Bild der kathodischen Entladung genau zu beobachten. Unmittelbar an dem Krater sitzt ein helleuchtender Punkt, auf ihn folgt der dunkle Kathodenraum und auf diesen die „positive Lichtsäule“. Bei Stromstärken von etwa 7 Amp. an wächst die leuchtende

Stelle am Krater bedeutend, hebt sich von der Quecksilberoberfläche kugelig ab, und endet in einem mächtigen rötlich gefärbten Dampfkegel, dessen Farbe von den mitgerissenen Platinpartikelchen herrührt. Der Dampfstrahl endet in einem dunkeln Raum, auf welchen wieder die positive Lichtsäule folgt.

Unter dem Einfluß des elektrischen Stromes und der Wärme bilden sich Platin-, Nickel-, Eisenamalgame. Eisen- oder Nickelanoden werden durch die öftere Zündung des Lichtbogens unter fortwährendem Pumpen so rein, daß sie sich auch in kaltem Zustande ohne weiteres amalgamieren.

§ 4. Durchführung der Versuche.

Ist der Lichtbogen $a-d$ auf die oben beschriebene Art gezündet, so wird der nun überflüssige Hilfslichtbogen $c-d$ unterbrochen, das Quecksilber durch Senken des Tauchkolbens G bis über die Spitze von b gehoben und auf dieser Höhe konstant durch G erhalten. Eine Regulierung des Quecksilberniveaus ist nicht nur wegen des wechselnden Barometerstandes vor der Messung, sondern auch während derselben notwendig, da mit Verschiebung der Sonde auch die Quecksilberhöhe je nach Eintauchtiefe des Sondenrohres variiert. Nach jeder Veränderung der den Lichtbogen bestimmenden Größen muß bei genauen Messungen so lange abgewartet werden, bis wieder konstante Verhältnisse eintreten. Dieses ist dann der Fall, wenn sich zwischen der Wärmeproduktion im Lichtbogen und der Wärmeausstrahlung ein Gleichgewicht hergestellt hat. Eine Kontrolle dafür gestattet das Thermometer J (Fig. 1).

Mit den eigentlichen Messungen wurde nicht eher begonnen, als bis das Apparatthermometer und die Strom- und Spannungsmesser einen stationären Zustand des Lichtbogens anzeigten. Da die Rohrwände und Elektroden bei brennendem Lichtbogen immer noch ein wenig Gase abgaben, wurde während der Messung die Luftpumpe in Betrieb gelassen. Jede Meßreihe ist ohne Unterbrechung durchgeführt. Schrittweise wurde die, vorher genau in die Rohrachse eingestellte Sonde in verschiedene Abstände von den Elektroden im Lichtbogen gebracht, am Elektrometer das Potential zwischen Sonde und Anode und hierauf nach Umlegung des Schalters U_2 (Fig. 5, p. 225) jenes zwischen Sonde und Kathode abgelesen.

Das Elektrometer war durchweg mit Doppelschaltung benutzt worden. Sein Gehäuse war geerdet. Während jeder Beobachtung wurde auch mittels U_1 (Fig. 5, p. 225) die Verbindung der Elektrometernadel mit den Quadrantenpaaren vertauscht. Ist α der von der Tangente auf den Kreisbogen reduzierte, im Fernrohr abgelesene mittlere Nadelausschlag in Skalenteilen und k die Elektrometerkonstante, so ist die gesuchte Potentialdifferenz

$$V = k \cdot \sqrt{\alpha}.$$

Die Meßergebnisse sind in § 6 in Tabellen und Kurven zusammengestellt. Zur richtigen Beurteilung der Resultate wird es aber vielleicht nicht überflüssig sein, vorerst auf einzelne Eigentümlichkeiten der angewandten Methode näher einzugehen.

§ 5. Fehlerquellen.

Wenn von den Fehlern der Meß- und Ableseinstrumente abgesehen wird, so nimmt *die Störung, welche durch Einführung der Sonde im Lichtbogen hervorgerufen wird*, hier den breitesten Raum ein. Von den wichtigeren Einflüssen, die hier in Frage kommen, sehe ich folgende:

- a) Eine Querschnittsverengung, dadurch eine Änderung der Ionengeschwindigkeit in Größe und Richtung;
- b) Ionenadsorption an der Wand der Sonde;
- c) Änderung der lokalen Temperatur infolge der Wärmekapazität der Sonde;
- d) teilweise Beschattung der Elektroden, dadurch eine Änderung ihrer Stromdichte.

Freilich ist eine solche Analysierung des Sondereinflusses ohne eine Art von Vergewaltigung nicht möglich, da alle diese Erscheinungen untereinander zusammenhängen. Im allgemeinen dürfte aber bei unserer Anordnung die Sondenstörung desto größer sein, je größer die Ionengeschwindigkeit, je größer die Ionenkonzentration, je höher die Temperatur und je größer die Oberfläche des Sondenrohres im Lichtbogen sind.

ad a) Die Querschnittsverengung durch das Sondenrohr beträgt 0,8 Proz., jene durch die Quersonde 2,1 Proz. Hauptsächlich der letztere Teil, und zwar in den beiden äußersten Lagen der Sonde, ist wirksam.

ad b) Die Ionenentziehung an der Sondenoberfläche durch die sog. elektrische Kontaktkraft ist desto größer, je stärker die Ionisierung und je kleiner das ionisierte Dampfvolumen im Verhältnis zur Sondenoberfläche ist. Sie ist in der obersten Stellung der Sonde am bedeutendsten, dürfte aber auch da, infolge der auf ein Minimum herabgedrückten Sondendimensionen nicht allzu groß sein. In den meisten Fällen habe ich tatsächlich beim Abwärtsbewegen der Sonde ein Sinken der Elektrodenspannung um einige zehntel Volt am Voltmeter beobachtet.¹⁾ Die Sondenröhre ist meist ihrer ganzen freien Länge

Fig. 6.

nach mit einem kaum bemerkbaren dunkleren Saum umgeben, ein Zeichen für eine schwächere Ionisierung ihrer nächsten Umgebung.

ad c) Weniger schwerwiegend ist die Störung, die unmittelbar nach Verschiebung der Sonde in der Temperaturverteilung und dadurch auch in der Ionenkonzentration eintritt. Durch längeres Abwarten vor der Ablesung läßt sich

1) In der oben zitierten vorläufigen Mitteilung habe ich diesem Einfluß eine viel größere Rolle zugeschrieben. Der Irrtum war durch mehrere Ungenauigkeiten der Messung entstanden, was ich hiermit berichtige.

der Fehler beheben. Zur Illustrierung dieses Einflusses dürfte die Fig. 6, p. 229 beitragen. Sie gibt zwei Kurven des Potentialverlaufes wieder, die während einer vollständigen Aufwärts- und daranschließenden Rückbewegung der Sonde aufgenommen wurden, wobei die Rückverschiebung absichtlich möglichst rasch geschah, so daß die Sondenröhre nicht genügend Zeit hatte, ihre Temperatur auszugleichen. Die Ursache dieses hysteresisartigen Verhaltens dürfte hauptsächlich auf die angeführten Temperaturänderungen zurückzuführen sein, weniger auf etwa sich bildende stellenweise Ladungen der Sondenröhre, da diese bei der starken Ionisierung rasch neutralisiert werden können.

ad d) Dieser Fehler tritt vor allen oben angeführten wohl am sichtbarsten hervor und äußert sich unangenehm dadurch, daß er gerade die interessante Sondierung in der Nähe der Elektroden beeinträchtigt.¹⁾ Unterbricht man den Lichtbogen bei hochgehobener Sonde, so hebt sich nach der Abkühlung die beschattete Stelle scharf von der übrigen, mit feinen Quecksilbertröpfchen wie mit Tau bedeckten Anode ab.

Ziemlich bedeutende Fehler können dadurch entstehen, daß die Sonde bei ihrer Längsbewegung nicht genau in der Rohrachse bleibt. Bei den stellenweise sehr kleinen Potentialgradienten können solche Ungenauigkeiten den Charakter der Kurve bedeutend fälschen. Bei den vorliegenden Messungen dürfte diese Fehlerquelle entfallen.

Etwaige Zweifel, ob die Sonde genau das Potential der betreffenden Stelle annimmt, sind bei der hier auftretenden starken Ionisation und der Gegenwart von Ionen beiderlei Vorzeichen gegenstandslos. Vielmehr habe ich immer beobachtet, daß das Sondenpotential Schwankungen willig und rasch folgt. Nur in unmittelbarer Nähe der Kathode ist Vorsicht nötig, da der kathodische Raum, welcher von dem negativen Dampfstrahl nicht bestrichen wird, sehr ionenarm ist, so daß sich beim Flackern dieses Dampfkegels die Potentialverhältnisse leicht verschieben können.

Eine merkwürdige Fehlerquelle bildet *der zur Beruhigung der Lichtbogenbasis angebrachte Platindraht b*. Bei den dort herrschenden hohen Temperaturen tritt eine Amalgamierung

1) Vgl. p. 238.

des Platins und dadurch eine Verunreinigung der Kathodenoberfläche ein. Das hat aber auf die Potentialverteilung im Lichtbogen kaum Einfluß, weil das Platin an der Elektrizitätsübertragung in der Dampfstrecke keinen Anteil nimmt. Auch eine Zerstäubung findet an der Drahtspitze statt, aber die losgerissenen Platinpartikelchen werden alsbald an der Glaswand abgeschieden; der sich so in der Nähe der Kathode ansetzende Platinspiegel war nach wochenlangem Betrieb beträchtlich. Mit der Stromstärke steigt auch die Zerstäubung sehr an und eine deutliche Rotfärbung des Dampfstrahles wird sichtbar. Viel

Fig. 7.

bedeutender fällt indessen die Herabsetzung der kathodischen Verdampfungs- (und vielleicht auch der Ionisierungs-)arbeit als Folge der dort auftretenden Kapillarkräfte ins Gewicht. Die merkwürdige Rolle, die der Platindraht dabei spielt, wird durch das Diagramm (Fig. 7) ein wenig veranschaulicht:

Die Kathodenoberfläche des Hauptlichtbogens wurde mittels des Tauchkolbens so weit gehoben, daß der Draht b gerade ganz vom Quecksilber bedeckt war und das bekannte Herumirren der Lichtbogenbasis eintrat. In diesem Zustande wurde die sogenannte Charakteristik des Lichtbogens (I, Fig. 7) $e = f(i)$ aufgenommen, indem durch Änderung des Vorschaltwider-

standes die Potentialdifferenz an den Elektroden, e , und so auch die Lichtbogenstromstärke, i , variiert wurden. e und i sind erst abgelesen worden, wenn das Apparatthermometer einen stationären Zustand anzeigte.¹⁾ Nach der Beobachtung eines jeden Punktes wurde aber für einen Augenblick das Quecksilberniveau durch den Tauchkolben so weit gesenkt, daß sich die umherwandernde Lichtbogenbasis an der Platindrahtspitze festsetzte; Elektrodenspannung (e') und Stromstärke (i') wurden wieder beobachtet, das Quecksilber auf seine ursprüngliche Höhe gehoben und ein neuer Punkt von I einreguliert. Die aus den Koordinaten e', i' erhaltene Kurve ist die Linie II (Fig. 7); je zwei zusammengehörige Punkte beider Kurven sind durch strichlierte Linien verbunden. Aus unserem Diagramm sieht man folgendes: Innerhalb der beobachteten Grenzen vermindert der Platindraht b die Elektrodenspannung und *setzt die Stromarbeit an der Kathode bei allen Stromstärken annähernd um den gleichen Betrag herab. Die Verminderung der Potentialdifferenz bezieht sich nur auf den Kathodenfall. Sie ist in unserem Falle (innerhalb 5—8 Amp.) von der Stromstärke fast unabhängig und beträgt im Mittel 0,76 Volt.*²⁾

§ 6. Die Meßresultate.

Die Mittel der Messungen und ihr Gebrauch sind im vorhergehenden so weit erörtert, daß die eigentlichen Meßdaten ohne weiteres angeschlossen werden können.

Die Tab. I, p. 233, beziehen sich auf den Potentialverlauf in der Lichtbogenachse. a bedeutet darin die Entfernung der Sondenspitze von der Nickelanode in Millimetern, i die konstant gehaltene Lichtbogenstromstärke, e die am Voltmeter beobachtete Elektrodenspannung. α_1 ist die Elektrometerablesung, die der Potentialdifferenz V_1 zwischen Sonde und Anode entspricht, α_2 die analoge für V_2 , Sonde—Kathode. Für beide α sind der Kürze halber die Mittelwerte aus den zwei Beobachtungen mit kommutierter Nadelverbindung hierher gesetzt

1) Nur in den beiden äußersten Punkten im linken Teil der Kurve konnte der stationäre Zustand nicht abgewartet werden, da der Lichtbogen bei den kleinen Stromstärken dem Auslösen nahe war.

2) Wenn auch die drei unsicher beobachteten Punkte in den Mittelwert einbezogen werden, so steigt dieser von 0,76 auf 0,91 Volt.

worden. α_1' und α_2' sind daraus durch Reduktion der Tangente auf den Kreisbogen gebildet worden. Die Elektrometerkonstante war

$$k_1 = 1,9737.$$

Die Meßreihe ist für eine vollständige Auf- und Abwärtsbewegung ohne Unterbrechung aufgenommen.

I. Potentialverlauf im Innern des Lichtbogens.

$$i = 6,70 \text{ Amp.} \quad t_s = 18,0^\circ \text{ C.} \quad t_a = 31,2^\circ \text{ C.} \quad p = 1,33 \text{ mm.}$$

$$k_1 = 1,9737.$$

α mm	e Volt	α_1 Skalenteile	α_2 Skalenteile	$\sqrt{\alpha_1'}$	$\sqrt{\alpha_2'}$
10	22,0	8,4	—	2,898	—
20	22,0	8,9	72,3	2,983	8,495
30	22,0	9,5 ₅	—	3,090	—
40	22,0	10,7 ₅	—	3,279	—
50	22,0	11,6 ₅	63,8 ₅	3,413	7,986
100	22,0	17,6	53,9 ₅	4,195	7,340
150	22,0	24,2 ₅	42,1 ₅	4,924	6,488
200	22,0	32,0	34,0	5,656	5,829
250	21,9	40,4 ₅	25,4	6,359	5,039
300	21,9	50,9	18,4	7,132	4,290
350	21,8	61,7	12,1 ₅	7,854	3,486
400	21,8	72,6 ₅	9,1	8,518	3,016
410	21,8	—	10,4	—	3,225
420	21,9	69,2	9,6	8,313	3,098
420	21,8	68,2 ₅	9,4	8,257	3,066
410	21,7	—	8,8 ₅	—	2,975
400	21,8	68,7 ₅	8,8 ₅	8,287	2,975
350	21,8	61,9	11,6 ₅	7,864	3,413
300	21,9	52,0	17,5 ₅	7,209	4,189
250	22,0	43,3 ₅	24,1	6,583	4,909
200	22,0	34,1	32,1	5,839	5,665
150	22,0	26,2	40,7 ₅	5,119	6,382
100	22,0	18,4	51,3 ₅	4,290	7,163
50	22,0	12,1 ₅	62,5	3,486	7,901
40	22,0	11,4 ₅	—	3,384	—
30	22,0	10,2	—	3,194	—
20	21,8	8,8 ₅	70,2 ₅	2,975	8,376
10	22,0	8,1 ₅	—	2,855	—

Der Tabelle sind ferner beigelegt: Die wegen der Wärmestrahlungsverhältnisse wichtige mittlere Zimmertemperatur t_z , der Vollständigkeit halber die Angabe des Apparatthermometers t_a , und endlich der aus der Niveaudifferenz bd (Fig. 1) gemessene Quecksilberdampfdruck p an der Kathode. Letzterer ist allerdings mit einem Kathetometer, das nur 0,1 mm abzulesen gestattete und schlecht aufgestellt war, bestimmt. Die Stromstärke i ist aus der für t_z geltenden Lichtbogencharakteristik so gewählt, daß sie nahe dem Minimum der Kurve, aber schon in deren aufsteigenden (stabilen) Ast lag.

Die einem gleichen a entsprechenden $\sqrt{\alpha'}$ der Tab. I, p. 233 sind zu einem Mittelwerte $(\sqrt{\alpha'})_m$ in der Tab. I A zusammengezogen und aus diesen durch Multiplikation mit k_1 endlich die gesuchten V_1, V_2 gefunden.

I A. Potentialverlauf im Innern des Lichtbogens.

(Dazu Taf. II.)

a mm	e_m Volt	$(\sqrt{\alpha'})_m$	$(\sqrt{\alpha'_2})_m$	V_1 Volt	$-V_2$ Volt	$V_1 - V_2$ Volt
10	22,0	2,876	—	5,6s	—	—
20	21,9	2,979	8,435	5,8s	16,6s	22,5s
30	22,0	3,142	—	6,2o	—	—
40	22,0	3,331	—	6,57	—	—
50	22,0	3,450	7,943	6,81	15,6s	22,49
100	22,0	4,242	7,251	8,37	14,31	22,6s
150	22,0	5,021	6,435	9,91	12,7o	22,61
200	22,0	5,747	5,747	11,34	11,34	22,6s
250	21,9s	6,471	4,974	12,77	9,82	22,59
300	21,9	7,170	4,239	14,1s	8,37	22,52
350	21,8	7,859	3,449	15,51	6,81	22,32
400	21,8	8,402	2,995	16,5s	5,91	22,49
410	21,7s	—	3,100	—	6,12	—
420	21,8s	8,285	3,082	16,3s	6,0s	22,4s

Mittelwert des mit Elektrometer gemessenen Potentials $V_1 - V_2$: 22,534 Volt

„ „ „ Voltmeter „ „ „ e : 21,92s „

Mit Rücksicht auf die Umständlichkeit der Messungen darf wohl die Übereinstimmung der elektrometrisch gefundenen Elektrodenpotentialdifferenzen $V_1 - V_2$ untereinander als gute bezeichnet werden. Vergleicht man aber die Zahlen $V_1 - V_2$ mit der jedes-

maligen Voltmeterablesung e , so findet man einen mittleren Unterschied von 0,61 Volt zwischen den beiden. Ich habe vergeblich danach gesucht, diese Differenz durch Fehler in den Instrumenten aufzuklären. Das Elektrometer war einen Tag vor den Messungen geeicht und das Voltmeter dabei mitkontrolliert worden; letzteres wies innerhalb seiner Beobachtungsfehler von max. 0,1 Volt keine Differenzen auf.¹⁾ Hätte aber die zu kleine Anzeige durch den Zuleitwiderstand von den Elektroden zum Voltmeter erklärt werden können, so hätte dieser 25,9 Ω betragen müssen, während er in Wirklichkeit nur 0,2 Ω war. Etwaige Kontaktpotentiale der Sonde kommen, abgesehen von der Größenordnung der fraglichen Differenz, nicht in Betracht, weil sie bei der Bildung der Mittelwerte sich aufheben müßten. Es wäre aber möglich, daß in dem Lichtbogen rasche Schwankungen auftreten. Da das Elektrometer den quadratischen, das Voltmeter nur den einfachen Mittelwert bildet, müßte die erstere Ablesung überwiegen. Allerdings konnte ich solche Schwankungen nicht konstatieren. Sobald die Lichtbogenbasis an den erwähnten Platindraht b gebunden war, standen alle Instrumentenzeiger vollkommen ruhig. War in den Stromkreis des Lichtbogens die Primärspule eines Induktoriums eingeschaltet, so konnte man an der sekundären Spule keine Spannung konstatieren. Doch ist es nicht ausgeschlossen, daß man Unstetigkeiten mittels empfindlicherer Methoden nachweisen könnte. — Die Richtigkeit des ermittelten Potentialverlaufes wird übrigens von diesen Differenzen nicht beeinflußt, da jede Meßreihe ohne Unterbrechung und ohne Veränderung der Versuchsanordnung durchgeführt worden war.

Der Potentialverlauf in der Nähe der Elektroden ist noch separat untersucht und die Meßergebnisse in den Tab. IIa, II b, p. 236, 237 zusammengestellt worden. Wie oben sind wieder durch Zusammenziehung je zweier, einem gleichen a entsprechenden Beobachtungen die Zahlen in II A, II B, p. 236, 237 erhalten. Die beiden Meßreihen sind an zwei ver-

1) Nach der genauen Durchrechnung der Tabellen konnte ich leider die Elektrometerkonstante nicht kontrollieren, da ich das Instrument nur geliehen hatte und rasch wieder abliefern mußte. Daß seine Konstante sich hätte so stark ändern können, ist zwar denkbar; freilich wurden an dem Elektrometer nach seiner Eichung von mir keine Änderungen vorgenommen.

schiedenen Tagen und unter nicht ganz gleichen Verhältnissen aufgenommen. Deswegen weisen die Temperaturen t_z , t_a und die Werte e kleine Differenzen auf. Jedoch sind die Resultate mit der in den Tab. I angeführten ganz gut vergleichbar. In den gleichbezeichneten Kurven Taf. II, Fig. 1 ist der Potentialverlauf graphisch wiedergegeben. Die beiden Kurven II sind in doppeltem Maßstabe gezeichnet. Die darunter befindliche, in gleichem Längenmaßstabe gezeichnete Fig. 1a soll ungefähr die Lichtverhältnisse in der Entladungsröhre versinnlichen; ihre Schraffierung ist am stärksten an Orten der maximalen Helligkeit.

II a. Potentialverlauf in der Nähe der Anode.

$i = 6,70$ Amp. $t_z = 18,8^\circ$ C. $t_a = 31,6^\circ$ C. $k_1 = 1,9737$.

a mm	e Volt	α_1 Skalenteile	$\sqrt{\alpha'_1}$
50	21,9	11,4s	3,384
40	21,8	10,1s	3,186
30	21,8	9,2	3,033
20	21,8	8,3s	2,890
15	21,8	8,1	2,846
10	21,8	7,9	2,811
6	22,0	8,1s	2,855
6	22,1	8,3s	2,890
10	21,8	8,0s	2,837
15	21,8	8,2s	2,872
20	21,8	8,4s	2,907
30	21,8	9,3s	3,058
40	21,8	9,9s	3,154
50	21,8	11,1	3,332

II A. (Dazu Taf. II.)

a mm	e_m Volt	$(\sqrt{\alpha'_1})_m$	$\sqrt{V_1}$ Volt
6	22,0s	2,872	5,67
10	21,8	2,824	5,57
15	21,8	2,859	5,64
20	21,8	2,898	5,72
30	21,8	3,045	6,01
40	21,8	3,170	6,2s
50	21,8s	3,358	6,6s

II b. Potentialverlauf in der Nähe der Kathode.
 $i = 6,70$ Amp. $t_z = 16,1^\circ$ C. $t_a = 27,9^\circ$ C. $k_1 = 1,9737$.

a mm	e_k Volt	α_2 Skalenteile	$\sqrt{\alpha'_2}$
60	22,1	10,7	3,271
50	22,1	9,75	3,122
40	22,1	9,15	3,025
30	22,1	8,9	2,983
20	22,1	9,5	3,082
10	22,1	10,45	3,233
7	22,3	11,55	3,399
7	22,2	11,55	3,399
10	22,1	10,55	3,248
20	22,1	9,6	3,098
30	22,1	10,15	3,186
40	22,1	8,65	2,941
50	22,1	9,35	3,058
60	22,2	10,5	3,240

II B. (Dazu Taf. II.)

a mm	e_m Volt	$(\sqrt{\alpha'_2})_m$	$-V_2$ Volt
7	22,25	3,399	6,71
10	22,1	3,240	6,39
20	22,1	3,090	6,10
30	22,1	3,084	6,09
40	22,1	2,983	5,89
50	22,1	3,090	6,10
60	22,15	3,255	6,42

Zu der Linie des Potentialverlaufes gehören noch die Differentialkurven in Fig. 2, Taf. II. In der einen ist der Potentialgradient, also *die elektrische Feldstärke in der Röhrenachse*

$$X = \frac{\partial V}{\partial x}$$

dargestellt, die andere gibt nach dem Poissonschen Satz

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -4\pi\rho$$

die Divergenz an den verschiedenen Punkten wieder. Man bemerkt folgendes:

In der „positiven“ Lichtsäule ist das Potentialgefälle vollkommen konstant, ein Überschuß an Ionen bestimmten Vorzeichens ist nicht vorhanden. Im dunkeln Kathodenraum nimmt der Potentialgradient gegen die Kathode bis nahezu Null ab, ebenso in dem kurzen dunkleren Intervall an der Anode. Unmittelbar an den Elektroden erreicht das Potentialgefälle natürlich seinen Höchstwert.

Von einigem Interesse sind die Kurven II A, II B, Fig. 1, Taf. II. II A zeigt in der Anodennähe eine fast horizontale Tangente; das relative Maximum bei Punkt a_6 ist nur auf eine, durch starke Annäherung der Sonde verursachte Potentialerhöhung zurückzuführen. Das Voltmeter zeigt in dieser Sondenstellung eine Erhöhung von e um 0,25 Volt an.

Merkwürdiger ist das Bild der Potentialverteilung für die Kathodennähe. Es ist wohl möglich, daß die Kurve zwischen den Punkten a_5 und a_6 in Wirklichkeit annähernd horizontal verläuft und die hier gefundene Form auch nur dem Sonden- einfluß zuzuschreiben ist. Eine plötzliche Erhöhung der Voltmeteranzeige bei Annäherung der Sonde wie bei der Anode habe ich allerdings nicht beobachtet. Nur wenn die Sonde auf 7 mm herangeschoben wurde, also das relative Minimum bei a_8 schon überschritten war, stieg die Elektroden- spannung um etwa 0,15 Volt. Mehr darf man die Sonde, ohne sie zu gefährden, nicht nähern. — Die Frage, ob die gefundene Kurve den wirklichen Potentialverlauf an der Kathode angibt, lasse ich vorderhand unentschieden und will ihre Lösung noch mit feineren Mitteln versuchen.¹⁾

Auf eine Eigentümlichkeit des Lichtbogens möchte ich noch hinweisen. Wie bekannt und auch hier schon erwähnt, hat der Lichtbogen eine V-förmige Charakteristik. Bei Änderung der Stromstärke verhalten sich eben der Kathoden- und Anodenfall, das Potentialgefälle in der „positiven Lichtsäule“ ungleichartig und bringen bei ihrer Konkurrenz den Extremwert der Elektroden- spannung hervor; dazu trägt noch die veränderliche Länge des Kathodendunkelraumes bei. Im linken Teile der Kurve (Fig. 7, p. 231) ist der Lichtbogen labil und ändert seine Stromgrößen bei der geringsten Ursache sprunghaft, wenn ihm nur Ohmscher Widerstand vorgeschaltet ist. Denn schneidet etwa die den Ohmschen Widerstand charakterisierende Gerade III in unserem Diagramm p. 231 die Licht-

1) In der bereits zitierten Arbeit von Stark, Retschinsky und Schaposchnikoff, die sich ebenfalls mit Potentialsondierungen im Quecksilberlichtbogen beschäftigt, weist die Potentialkurve für die Nähe der Kathode ein derartiges relatives Minimum nicht auf. Da bei Erscheinen dieser Abhandlung meine Versuchsanordnung bereits zerstört war, konnte ich leider die Versuche nicht wiederholen.

bogencharakteristik in den Punkten (e_1, i_1) und (e_2, i_2), so ist bei unverändertem äußeren Widerstand der Lichtbogen caet. par. nur mit den beiden Stromstärken i_1, i_2 existenzfähig, zwischen welchen Werten er häufig pendelt. Nimmt man nun die Kurven des Potentialverlaufes für ein solches Paar von Stromstärken auf, wie es die beistehende Fig. 8 zeigt¹⁾, so findet man,

Fig. 8.

daß der Potentialsprung nur an der Anode stattfindet, während die übrigen Kurventeile sich parallel zu sich selbst verschieben. *Der Sitz der Unstetigkeiten im labilen Teil der Charakteristik dürfte daher lediglich die positive Elektrode sein.* Das Verhalten der Anode könnte vielleicht durch Gase, die sich dort — etwa elektrolytisch — abscheiden, bedingt sein.

II. Entwicklung der Potentialverteilung während der „Zündung“ des Lichtbogens.

§ 1. Einleitung.

In § 3 des I. Teiles dieser Untersuchungen habe ich die Bildung einer geschichteten Entladung erwähnt. Für die

1) Die beiden Kurven sind nur für eine Aufwärtsbewegung der Sonde, sonst wie die auf Taf. II aufgenommenen. Ihre e und i gehören natürlich einer anderen Charakteristik als der auf p. 231 angegebenen an.

Übergangsgeschwindigkeit dieser Entladung in den Lichtbogen ist bei der Weintraubschen Zündungsmethode die Höhe des Vakuums nicht gleichgültig. Vielmehr gibt es einen kritischen Druck, bei welchem der Lichtbogen $a-d$ (Fig. 5, p. 225) fast momentan nach Einleitung des Hilfslichtbogens angeht. Sonst entwickelt sich die Entladung viel langsamer, ja es kann oft Stunden dauern, bevor man den Hauptlichtbogen auf diese Art in Gang bringt, namentlich wenn Wasserdampf vorhanden oder die Anode nicht metallisch rein ist.

Die Ionisierung in dem Hilfslichtbogen dehnt sich sichtbar auch auf seine nächste Umgebung aus. Über dem Lichtbogen schwebt eine blaßgrünlich gefärbte Schichte von Dämpfen, die an der Entladung noch teilnehmen, nach oben übergeht sie in einen dunklen Raum, der wieder in einer schmalen, nach oben spitz zulaufenden Schichte von blaßrosa Färbung endigt. Da der Hilfslichtbogen eine bedeutende Wärmestrahlung hat, steigt die Temperatur im Entladungsrohr allmählich und mit ihr hebt sich auch die blaßgrünliche Schichte, die etwa die Rolle der Aureole eines gewöhnlichen Lichtbogens vorstellt. Soweit die noch sichtbare Ionisierung vorherrscht, ist auch die Wand des Entladungsrohres mit kondensiertem Quecksilber belegt. Verhindert man die Wärmeableitung, etwa durch Umwickeln des Hauptrohres mit Watte, so wird der Ionisierungsvorgang der oberen Partien sehr beschleunigt. Einen bedeutenden Anteil daran dürfte die ultraviolette Strahlung des Hilfslichtbogens haben, sie allein nützt aber gar nichts, wenn das Rohr gekühlt wird.

Hat sich endlich das obere sichtbare Ende der ionisierten Dämpfe bis nahe an die Anode geschoben und beginnen sich auch an dieser Quecksilbertröpfchen anzusetzen, so tritt eine neue Entwicklungsphase ein: Eine geschichtete Entladung, zunächst von den Quecksilbertröpfchen ausgehend und sich allmählich über die ganze Anodenoberfläche verbreitend, setzt ein. Bis dahin waren zwischen $a-d$ (Fig. 5, p. 225) Ströme von größerer Ordnung als 10^{-5} Amp. nicht nachzuweisen, mit der geschichteten Entladung treten Stromstärken von 10^{-3} Amp. ein. Ist der äußere Widerstand des Stromkreises nur so groß, wie ihn der Lichtbogen braucht, so wächst die Stromstärke unter gleich-

zeitiger Vorgrößerung der Schichtenlänge rasch an. Das Ansetzen neuer Schichten kann man dabei selten und nicht mit Sicherheit konstatieren, vielmehr sieht es sich so an, als ob die Schichtung wie aus einer elastischen Haut bestünde, auf deren unteres Ende ein Zug ausgeübt wird, während das obere Ende an der Anode festgehalten ist; denn es dehnen sich alle Schichten und auch ihre dunkeln Zwischenräume fast proportional ihrer ursprünglichen Länge aus. Erhöhung des Luftdruckes oder Abkühlung des Entladungsrohres hat ein Zusammenziehen der Schichten zur Folge.

Hat das unterste Schichtenende fast die Kathode erreicht, so tritt ein zweiter Sprung in der Stromstärke ein, die Entladung übergeht in den normalen Lichtbogen. —

Da nun schon einmal der Apparat für Sondierungen eingerichtet war, habe ich die Potentialverteilung in einigen Phasen dieser geschichteten Entladung zu messen versucht. Die Resultate lasse ich, da sie vielleicht eines allgemeineren Interesses nicht entbehren, hier folgen. Während der Messungen mußte natürlich ein bestimmter Zustand der Schichtung festgehalten werden. Das geschieht einfach dadurch, daß man den ionisierenden Hilfslichtbogen brennen läßt, aber das Anwachsen der Stromstärke $a-d$ und den Übergang in den Lichtbogen durch Vorschalten großer, regulierbarer Widerstände verhindert. Die Gasentladung hält dann beliebige Zeit an, nur sind die Schichten unter Stromschwankungen in immerwährenden Vibrationen begriffen. Es rührt das hauptsächlich von dem Herumirren der Kathode des Hilfslichtbogens und den damit verbundenen Schwankungen der sekundären Ionisierung her, ein Umstand, der nicht vermieden werden konnte, weil der Apparat ursprünglich nicht für diese Versuche eingerichtet war.

§ 2. Meßresultate.

Die Durchführung der Messungen war der im § 4 I. Teil beschriebenen sehr ähnlich. Die in Fig. 5, p. 225 angeführte Schaltung wurde im Prinzip beibehalten. Nur wurden die Vorschaltwiderstände r_1 r_2 entsprechend vergrößert, vor die Anode a kam ein Westonsches Milliampèremeter und noch eine Induktionsspule zur Dämpfung der Stromschwankungen; die leitende Verbindung von dem — Pol der Batterie zum

Draht b war unterbrochen. Das zum Bestimmen der Potentialdifferenzen angewandte Elektrometer bekam nur eine Nadel. In der Ablesung der Instrumente änderte sich auch nichts, nur habe ich wegen der überaus schwierigen und zeitraubenden Durchführung der Sondierung infolge der Schichtenschwankungen nicht in jeder Sondenstellung beide Teile V_1 und V_2 (Potential zwischen Sonde–Anode und Sonde–Kathode) beobachtet, sondern mich namentlich in den ersten zwei Meßreihen in der Regel nur auf die Ablesung des kleineren Elektrometersausschlages beschränkt und nur in einigen in annähernd gleichem Abstand voneinander gelegenen Punkten auch die zweite Potentialdifferenz bestimmt. Bei jeder Beobachtung wurde aber die Verbindung der Nadel mit den Quadranten kommutiert.

Jede Versuchsreihe ist ohne Unterbrechung durchgeführt, fragliche Punkte später kontrolliert worden.

Klemmenspannung und Stromstärke des ionisierenden Hilfslichtbogens waren in allen drei untersuchten Fällen konstant. Das Quecksilberniveau bei d wurde mittels des Tauchkolbens auf konstanter Höhe gehalten.

Die erste untersuchte Entwicklungsphase hatte etwa das in Fig. a, Taf. III angedeutete Aussehen. Unmittelbar an der Anode sitzt die Anodenschichte, an diese reihen sich drei weitere gut entwickelte Schichten an, deren Länge und dunkle Zwischenräume gegen die Kathode zu wachsen. Außerdem sind undeutlicher, aber noch bemerkbar, drei weitere Zwischenschichten vorhanden. Die Farbe ist grünlichblau, ein prachtvolles Dunkelviolett bildet den Übergang zu den dunkeln Zwischenräumen. Den stärksten Längsvibrationen (von zirka 10 mm) unterliegt die unterste Schichte. Den Schwankungen entsprechend ist auch die Stromstärke unstetig, sie wächst, wenn die Schichten sich verlängern. Zeitweise stehen die Schichten fast ganz still, ohne daß ich einen zuverlässigen Grund dafür angeben kann. Die gegen die Kathode wachsende Schichtenlänge dürfte ihren Grund darin haben, daß Temperatur und Ionisation gegen die Kathode zu wegen des dort brennenden Hilfslichtbogens zu nehmen.

Die Sonde nimmt das Potential viel langsamer an, als im Lichtbogen, in der Nähe der Anode nimmt dasselbe oft ruckweise sehr stark zu, um wieder ebenso zu fallen. Die

meisten Elektrometerablesungen aber lassen sich, wenn man sich auf das kleinere von den Potentialen V_1 , V_2 beschränkt, oft recht genau machen, in der Regel um so genauer, je kleiner der Elektrometerausschlag ist; denn die Schwankungen der Nadel nehmen quadratisch mit der Potentialdifferenz zu.

Der nach der Kompressionsmethode gemessene Gasdruck p' war in allen drei Fällen fast gleich und betrug 0,031 mm. Der tatsächlich während der Entladung herrschende war wegen des Quecksilberdampfdruckes besonders im dritten Falle höher. Er hätte mit Schenkelmanometer und einem guten Kathetometer gemessen werden müssen, das mir jedoch nicht zur Verfügung stand.

A. Potentialverlauf in der geschichteten Gasentladung, 1. Phase.

$i_1 = 3,35$ Amp. $e_1 = 15,0$ Volt. $t_2 = 16,0^\circ$ C. $p' = 0,031$ mm. $k_{II} = 3,1427$.

a mm	$10^8 \cdot i$ Amp.	e Volt	$(\sqrt{\alpha_1'})_m$	$(\sqrt{\alpha_1'})_m$	V_1 Volt	$-V_2$ Volt	$V_1 - V_2$ Volt
8	8	48,8	7,382	—	23,2 ₀	—	—
10	53	47,7	6,101	8,984	19,1 ₇	28,2 ₃	47,4 ₀
20	11	48,5	—	5,586	—	17,5 ₆	—
30	16	48,2	—	5,431	—	17,0 ₇	—
40	19	48,0	—	4,136	—	13,0 ₀	—
50	13	48,3	—	3,450	—	10,8 ₄	—
65	nicht beob.	nicht beob.	11,657	3,728	36,6 ₃	11,7 ₂	48,3 ₅
80	20	47,8	—	3,464	—	10,8 ₉	—
95	20	48,0	—	3,162	—	9,9 ₄	—
110	14	48,3	—	2,793	—	8,7 ₈	—
125	11	48,3	—	2,608	—	8,2 ₀	—
140	23	47,8	—	2,450	—	7,7 ₀	—
155	33	47,7	—	2,408	—	7,5 ₇	—
160	12	48,5	—	2,419	—	7,6 ₀	—
170	5	48,3	13,216	2,280	41,5 ₃	7,1 ₇	48,7 ₀
230	6	48,5	13,197	2,490	41,4 ₇	7,8 ₃	49,3 ₀
300	9	48,7	13,345	2,318	41,9 ₄	7,2 ₈	49,2 ₂
370	31	48,0	13,251	3,180	41,6 ₄	6,8 ₃	48,4 ₀
440	8	48,2	13,472	2,049	42,3 ₄	6,4 ₄	48,7 ₈
460	52	47,7	13,221	1,910	41,5 ₅	6,0 ₀	47,5 ₅

In vorstehender Tabelle sind Resultate der besten Meßreihe, die ich erhalten habe, wiedergegeben, einzelne fragliche Punkte sind wiederholt kontrolliert. Es bedeuten:

a die Entfernung der Sonde von der Anode in Millimetern, e die mittels Voltmeter abgelesene mittlere Elektrodenspannung $a-d$ (Fig. 5, p. 225), i die mittlere Entladungsstromstärke in Milliampère abzüglich der vom Voltmeter konsumierten, e_i und i_i die betreffenden Größen des ionisierenden Hilfslichtbogens. Für die Elektrometeranzeige wurden der Kürze halber gleich die Quadratwurzeln $(\sqrt{a'})_m$ aus den mittleren, auf $\arctg \alpha$ reduzierten Fernrohrablesungen hierher gesetzt. Durch Multiplikation dieser Zahlen mit der Elektrometerkonstanten

$$k_{II} = 3,1427$$

findet man wie früher die gesuchten Potentialdifferenzen V_1 und V_2 in Volt. Den Einzelbeobachtungen i kommt keine eigentliche Bedeutung zu. Sie hätten gleichzeitig mit e und α von verschiedenen Personen abgelesen werden müssen, während ich zu allem allein war. Ich habe sie nur hierher gesetzt, um ihre Veränderlichkeit zu zeigen. Außerdem traten noch ziemlich regelmäßige Stromschwankungen von ca. 10—15 Proz. auf. Jedoch wäre es nicht richtig, aus der Unstetigkeit der Stromstärke einen Schluß auf die Undurchführbarkeit der Sondierung zu ziehen. Die Potentialdifferenz an den Elektroden e ist, wie man sieht, immerhin ziemlich konstant. Ihre regelmäßigen Schwankungen betrugen ca. 4 Proz. Für die Sondierung ist der Umstand günstig, daß die anodischen Schichten, welche die größten Potentialdifferenzen aufweisen, am wenigsten vibrieren.

Der Unterschied zwischen den Größen $V_1 - V_2$ und e findet seine ausreichende Erklärung in den Potentialschwankungen.¹⁾

Der so bestimmte Potentialverlauf ist auf Taf. III in Fig. A graphisch dargestellt. Zur Konstruktion der Kurve ist aus den gefundenen $V_1 - V_2$ das Mittel genommen und damit die obere Grenzlinie (bei 48,47 Volt) gezogen. Von dieser aus sind die Punkte a 8 und a 10, für die nur V_1 bekannt ist, abgetragen. Die Ordinaten der übrigen Punkte sind von der Abszissenachse gerechnet.

Die Fig. a , deren Längenmaßstab derselbe wie in der von A ist, gibt ungefähr das zugehörige Schichtungsbild.

Wie man bemerkt, werden die Schichten gegen die Anode

1) Vgl. p. 235.

zu kürzer, ihre Potentialdifferenzen immer größer. In unmittelbarer Nähe der Anode glaube ich, soweit man bei dem starken Flimmern beobachten konnte, noch eine Menge ganz kurzer Schichten wahrgenommen zu haben. Es stünde das mit dem angedeuteten Schichtenbild auch im Einklang und es liegt der Gedanke nahe, *ob das, was wir hier als „Anodenfall“ messen, nicht bloß der Mittelwert von stark wechselnden Potentialdifferenzen eines Komplexes von subtilen Schichten ist, dessen Analyse sich unseren rohen Mitteln entzieht.*

Ich habe viele solche Kurven wie die *A* auf Taf. III aufgenommen, zwischen den meisten aber keine gute Übereinstimmung erzielt. Bei manchen war der Abfall in der Nähe der Anode kein so plötzlicher, alle aber zeigten dieselbe wellenartige gegen die Kathode sich verflachende Form. Bemerken möchte ich noch, daß in der Nähe des Punktes *a* 380 die uns interessierende Potentialdifferenz $V_1 - V_2$ der geschichteten Entladung eigentlich den Nullwert erreicht. Denn der Raum zwischen *a* 380 und der Kathode mit annähernd konstantem Potentialgradienten gehört schon dem Bereich des ionisierenden Hilfslichtbogens an. Potentialdifferenzen zwischen der oberen Anode und der Sonde werden innerhalb dieses Raumes nur konstatiert, weil die erstere auch leitend mit der positiven Elektrode des Hilfslichtbogens verbunden war. —

Durch Ausschalten äußerer Widerstände möge die Stromstärke der geschichteten Entladung erhöht werden. Die Schichten dehnen sich aus, werden stark kugelig und die Spitze der letzten schiebt sich bedeutend nach unten vor. Die Farbe ist, wie bei den vorigen, grünlichblau, gegen die Kathode heller werdend.

Die Messungen waren leichter durchzuführen, als die vorigen, da Schichten und Stromstärke ruhiger waren. Die regelmäßigen Stromschwankungen betrugen ca. 8 Proz., die regelmäßigen Spannungsschwankungen ca. 3 Proz. Dementsprechend ist die Differenz zwischen den Zahlen $V_1 - V_2$ und e kleiner.

Die Tabelle auf p. 246 enthält unter denselben Bezeichnungen, wie die vorige die Mittelwerte aus zwei ziemlich gut übereinstimmenden Meßreihen. Dazu gehört die im selben

Maßstab wie Fig. A ausgeführte Fig. B, Taf. III. Die Punkte a 8 bis a 80 sind von der oberen Potentiallinie, von a 80 ab von der Abszissenachse aufgetragen.

B. Potentialverlauf in der geschichteten Entladung, 2. Phase.

$i_l = 3,35$ Amp. $e_l = 15,0$ Volt. $t_z = 16,3^\circ$ C. $p' = 0,031$ mm. $k_{II} = 3,1427$.

a mm	$10^2 \cdot i$ Amp.	e Volt	$(V_{\alpha_1'})_m$	$(V_{\alpha_2'})_m$	V_1 Volt	$-V_2$ Volt	$V_1 - V_2$ Volt
8	34	41,8	4,937	8,813	15,5 ₂	26,1 ₂	41,6 ₄
10	40	41,2	4,775	—	15,0 ₁	—	—
20	35	42,4	5,359	—	16,8 ₄	—	—
30	35	42,4	5,658	7,870	17,7 ₃	24,7 ₃	42,5 ₁
40	38	42,1	5,983	—	18,8 ₆	—	—
60	33	42,5	6,702	—	21,0 ₆	—	—
80	36	42,5	7,301	6,083	22,9 ₁	19,1 ₂	42,0 ₆
110	40	42,2	—	5,385	—	16,9 ₂	—
140	40	41,8	—	4,973	—	15,6 ₃	—
170	35	42,5	8,853	4,583	27,8 ₂	14,4 ₆	42,2 ₂
200	45	40,5	—	4,095	—	12,8 ₇	—
230	40	41,0	9,292	3,564	29,2 ₆	11,2 ₆	40,4 ₆
260	40	41,5	—	3,332	—	10,4 ₇	—
290	35	41,8	—	3,114	—	9,7 ₉	—
330	40	41,7	11,070	2,490	34,7 ₉	7,8 ₂	42,6 ₁
380	40	42,5	—	2,230	—	7,0 ₁	—
430	40	42,0	11,161	2,121	35,0 ₇	6,6 ₇	41,7 ₄
460	40	41,5	—	2,074	—	6,5 ₂	—

Durch weiteres Ausschalten von Widerständen kann man die Stromstärke a — d so weit erhöhen, daß die Entladung schon in den Lichtbogen übergeht, ohne jedoch als solcher selbständig (d. h. nach Abschalten des ionisierenden Hilfslichtbogens) existieren zu können. In dieser Form zeigt die Lichtsäule noch Einschnürungen, die auf eine Schichtung hindeuten. Die Potentialkurve zeigt aber noch deutliche Wellenform. Das Potential ist, wenn auch noch wegen der herumirrenden Kathode leicht schwankend, doch gut ablesbar. Es kommen fast nur regelmäßige Stromschwankungen im Betrage von 1—2 Proz. und regelmäßige Spannungsschwankungen von ca. 2 Proz. vor. So wie früher sind auch auf p. 247 die Mittelwerte von zwei gut übereinstimmenden Beobachtungsreihen zusammengestellt und in Fig. C auf Taf. III graphisch dargestellt.

C. Potentialverlauf in der Entladung, 3. Phase. (Übergang in Lichtbogen).
 $i_t = 3,35$ Amp. $e_t = 15,0$ Volt. $t_z = 16,8^\circ$ C. $p' = 0,031$ mm. $k_{II} = 3,1427$.

α mm	$10^1 \cdot i$ Amp.	e Volt	$(V_{\alpha_1'})_m$	$(V_{\alpha_2'})_m$	V_1 Volt	V_2 Volt	$V_1 - V_2$ Volt
8	16,5 ₅	28,2	2,341	7,117	7,3 ₆	22,3 ₇	29,7 ₃
13	16,5	28,7	2,547	6,766	8,0 ₀	21,2 ₆	29,2 ₆
20	16,6	28,5	2,605	6,654	8,1 ₉	20,9 ₁	29,1 ₀
30	16,6	28,3	2,710	6,483	8,5 ₂	20,3 ₇	28,8 ₉
50	16,5	28,5	2,932	6,479	9,2 ₁	20,3 ₆	29,5 ₇
65	16,5	28,5	3,082	6,140	9,6 ₉	19,3 ₀	28,9 ₉
80	16,6	29,0	3,633	5,701	11,4 ₂	17,9 ₂	29,3 ₄
100	16,6	29,0	3,765	5,504	11,8 ₃	17,3 ₀	29,1 ₃
130	16,6	29,2	4,165	5,174	13,0 ₉	16,2 ₆	29,3 ₆
180	16,6	29,0	4,736	4,613	14,8 ₈	14,5 ₀	29,3 ₈
230	16,5	29,2	5,320	—	16,7 ₂	—	—
280	16,6	29,0	5,595	3,633	17,5 ₈	11,4 ₂	29,0 ₆
330	16,6	28,8	—	3,050	—	9,5 ₉	—
380	16,6	28,5	6,632	2,510	20,8 ₄	7,8 ₉	28,7 ₃
420	16,6	28,4	—	2,252	—	7,0 ₈	—
440	16,5 ₅	28,4	6,901	2,189	21,6 ₉	6,8 ₈	28,5 ₇
460	16,6	28,3	—	2,120	—	6,6 ₆	—

In Anbetracht der großen Abweichungen einzelner $V_1 - V_2$ vom Mittelwerte könnte es scheinen, als ob die Wellenform unserer Kurven mehr auf Beobachtungsfehler als auf wirkliche Potentialdifferenzen zurückgeführt werden könnte. Deswegen habe ich viele Schichtungsphasen und wiederholt untersucht und nur jene Kurven benutzt, die untereinander sowohl der Lage der einzelnen Wellen, als auch ihren Potentialdifferenzen nach Übereinstimmung zeigten; so daß unsere Kurven, wenn auch ohne strenge quantitative Bedeutung, doch Anhaltspunkte für die Potentialentwicklung bei der Zündung geben.

Die drei Kurven auf Taf. III zeigen die Potentialentwicklung beim Übergang der geschichteten Entladung in den Lichtbogen so deutlich, daß eine weitere Besprechung, die sich vorderhand doch nur auf spekulativem Gebiet bewegen könnte, mir jetzt überflüssig erscheint. Gelegentlich weiterer Untersuchungen hoffe ich aber noch darauf zurückzukommen.

Erwähnenswert wäre vielleicht der Umstand, daß der Lichtbogen nicht selbständig existenzfähig scheint, solange noch

an der Kurve seines Potentialverlaufes Wellen, die auf eine Schichtung hindeuten, wahrnehmbar sind.

Zum Schluß dieser bescheidenen Arbeit möchte ich nicht verfehlen, dem Hrn. Prof. Dr. J. Puluj (Prag) meinen Dank dafür auszusprechen, daß er mir die Durchführung der Untersuchungen ermöglicht hat, indem er mich von den Berufsgeschäften sehr entlastete.

Die Versuche wurden mir durch eine Subvention erleichtert, die mir die „*Gesellschaft zur Förderung deutscher Wissenschaft, Kunst und Literatur in Böhmen*“ durch Vermittelung des Hrn. Prof. Dr. E. Lecher (Prag) gewährte, wofür ich auch diesen beiden meinen besten Dank sage.

Prag, Deutsche technische Hochschule, 12. November 1905.

(Eingegangen 16. Dezember 1905.)