Zur Kenntnis des Wechselstromlichtbogens in Flüssigkeiten.

Von **Sven Bodforss** und **P. Frölich** in Trondhjem.

Mit neun Abbildungen. (Eingegangen am 19. April 1922.)

Die Darstellung kolloidaler Metallösungen in organischen Lösungsmitteln gelingt, wie Svedberg ¹⁾ gezeigt hat, sehr leicht und bequem, wenn man eine von einem Kondensatorkreis gespeiste Hochfrequenzfunkenstrecke zwischen Elektroden aus den betreffenden Metallen brennen läßt. Svedberg benutzte zu diesen Arbeiten als Stromquelle ein großes Induktorium, das in gewöhnlicher Weise mit intermittierendem Gleichstrom betrieben wurde. Man erhält dadurch bekanntlich einen intermittierenden, unsymmetrischen Wechselstrom mit hoher Maximalspannung und von sehr verwickelter Kurvenform.

Um den Einfluß der verschiedenen Faktoren des Schwingungskreises auf der Metallzerstäubung unter möglichst einfachen Bedingungen etwas näher zu studieren, haben wir statt des Induktorienstroms einen symmetrischen Wechselstrom benutzt (Frequenz 48 in der Sekunde), der mit Hilfe eines Boasschen Transformators von beliebiger Spannung erhalten werden konnte. Die Einzelheiten der dabei gemachten Beobachtungen werden a. a. O. publiziert werden.

Bei der Aufnahme von Zerstäubungskurven mit Verwendung verschiedener Kapazitäten wurde beobachtet, daß man, besonders wenn die Kapazität genügend klein ist, mit steigender Stromstärke zuletzt in ein Gebiet kommt, wo die Versuche nicht mehr streng reproduzierbar sind. Wenn man in diesem Intervall Zerstäubungen ausführt, erhält man Werte, die bei denselben effektiven Stromstärken weit auseinander liegen können. Dieses Gebiet verschiebt sich mit zunehmender Kapazität in der Richtung nach größeren Stromstärken. Wenn die Versuche anfangen unregelmäßig auszufallen, ändert auch der Lichtbogen sofort seinen Charakter. Im „normalen“ Zustande brennt er ziemlich ruhig mit schwachem, singendem Geräusch und füllt, soviel man beobachten kann, den ganzen Raum zwischen den Elektroden aus; er fällt wie eine schmale, leuchtende Spalte vor. Tritt man aber durch Steigerung der Stromstärke (oder Verkleinerung der Kapazität) in das „anormale“ Gebiet ein, so bemerkt man sofort, daß der Lichtbogen unruhig wird und unter oszillierenden oder rotierenden Bewegungen nur am Rande der Elektroden brennt. Er sendet

¹⁾ Nova Acta Reg. Soc. Sc. Ups. 4, II, 1, 1907.

gleichzeitig einen scharfen, knisternden Schall aus. Das Hitzdraht-amperemeter ist, obgleich es stark gedämpft ist, gleichfalls sehr unruhig. Dieser unruhige Charakter des Bogens erklärt auch, weshalb die Zerstäubungsversuche hier nicht reproduzierbar sind.

Macht man aber eine große Anzahl Versuche in diesem Gebiet und nimmt den Mittelwert für die Punkte, die derselben effektiven Stromstärke entsprechen, so findet man, daß die Zerstäubungskurve mit steigendem I_{eff}^2 nicht mehr zunimmt, sondern abnimmt. Fig. 1 gibt einen solchen Versuch für zwei verschiedene Bogenlängen, 0,1 und 0,25 mm, wieder. Das Material ist Kupfer in Äthyläther. Die Konstanten des Schwingungskreises sind: $C = 1,0 \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$, $L = 250 \cdot 10^{-8} \text{H}$, Ohmscher Widerstand möglichst klein. Die Ordinate bedeutet die in der Minute zerstäubte Metallmenge in Milligramm; als Abszisse

Fig. 1.

ist das Quadrat der effektiven Stromstärke aufgetragen. Wir sehen, daß in beiden Fällen die Kurven zuerst mit steigender Stromstärke fast geradlinig ansteigen, dann tritt ein scharfer Diskontinuitätssprung ein, wonach die Kurven sinken, bei 0,1 mm Bogenlänge sehr unbedeutend, bei 0,25 mm sehr stark.

Um diese Erscheinung etwas näher zu untersuchen, wurden vor und nach dem Diskontinuitätspunkt Resonanzkurven aufgenommen. Es war ja a priori sehr plausibel, daß der veränderte Zustand des Lichtbogens auch den Funkenwiderstand und damit auch die Funken-dämpfung gleichzeitig verändert hatte, wodurch die abnehmende Zerstäubungsausbeute wenigstens zum Teil erklärt werden konnte. Diese Resonanzkurven sind in Fig. 2 wiedergegeben. Sie beziehen sich auf: Kupfer in Äthyläther, $C = 1,0 \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$, $L = 250 \cdot 10^{-8} \text{H}$, $l = 0,25 \text{ mm}$. Der Widerstand im Schwingungskreis ist möglichst klein, entsprechend dem Widerstand der Zuleitungsdrähte.

Es ergibt sich, daß sowohl die Frequenz als auch die Dämpfung konstant sind, und zwar $N = 1,81 \cdot 10^6$ und $\vartheta = 0,35$. Kurve *a* ist vor dem Diskontinuitätspunkt bei $I_{\text{eff}} = 0,95$, *b* hinter demselben bei $I_{\text{eff}} = 1,95$ Amp. aufgenommen. Die Resonanzkurven geben also keine Erklärung. Um das Phänomen weiter zu verfolgen, gingen wir dazu über, Potentialmessungen an den Elektroden während der Zerstäubung vorzunehmen, d.h. die Charakteristik des Wechselstromlichtbogens zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde mittels eines parallel zu den Elektroden geschalteten Elektrometers die zu jeder im Schwingungskreis abgelesenen Stromstärke zugehörige Spannung ermittelt. Als Spannungsmesser diente ein absolutes Elektrometer¹⁾ nach Bjerknes (auch nach Ebert und Hoffmann genannt), das wir uns selbst mit Hilfe des Mechanikers Herrn Holmerud hergestellt hatten. Herrn Dr. Y. Björnsthål in Upsala sind wir für wichtige Konstruktionsangaben zu großem Dank verpflichtet.

Der Herstellungskosten wegen mußte das Instrument einfach gestaltet werden. Da das besonders für Messungen hoher Spannungen sehr nützliche Instrument einer allgemeinen Verwendbarkeit fähig ist, haben wir eine Abbildung (Fig. 3) beigegeben, die eine Form zeigt, welche man sich selbst ohne besondere Schwierigkeiten herstellen kann.

Ein viereckiges Messinggehäuse, dessen eine Wand abnehmbar ist (diese Wand ist in der Abbildung entfernt

worden), trägt zwei verschiebbare Kondensatorplatten, die in isolierenden Schwefelpfropfen stecken. Zwischen den Platten hängt auf einem Quarzfaden ein 0,1 mm dünnes Aluminiumblatt, das unten einen ziemlich großen Flügel aus Glimmer trägt. Parallel zu dem Glimmerplättchen stehen zwei verschiebbare Platten, wodurch eine genügend starke Luftdämpfung erzielt werden kann. Der Glimmerflügel trägt einen kleinen plangeschliffenen Glasspiegel, der durch ein angebrachtes Fenster sichtbar ist. Stellt man durch Drehen des Torsionskopfes das Gehäuse so ein, daß das Aluminiumblatt mit den Kondensatorplatten

Fig. 2.

¹⁾ Vgl. z.B. Chwolson, Physik, IV, 2, S. 154.

einen Winkel von 45° bildet, und verbindet die Platten mit der zu messenden Potentialdifferenz (die eine Platte ist mit dem Gehäuse verbunden und dieses geerdet), so sucht sich das Blatt longitudinal zu stellen und dreht sich infolgedessen um einen Winkel, der eine Funktion der Potentialdifferenz V ist:

$$(1 + DV^2)\alpha = AV^2 + BV + C, \text{ (A, B, C, D Konstante).}$$

Diese Formel, deren genaue Gültigkeit eine besondere Konstruktion des Instruments voraussetzt, wurde aber nicht benutzt, sondern

Fig. 3.

das Instrument mit Hilfe eines Spannungswandlers (Fabrikat Siemens & Halske, Übersetzungsverhältnis $\frac{8000}{140}$) empirisch geeicht. Die mit Spiegel und Skale beobachteten Ausschläge wurden dann mittels der Eichkurve graphisch interpoliert. Das Instrument hat sehr gut funktioniert. Wenn der Lichtbogen beim Schließen des Primärstromes sich mitunter nicht sofort anzündet, wirft sich die ganze sekundäre Spannung des Transformators auf das Elektrometer, wodurch das Gehänge gewaltsam zur Seite getrieben wird. Trotz dieser un-

sanften Behandlung haben sich der Nullpunkt oder die Eichkurve nicht geändert.

Die zu messende Spannung umfaßt das Intervall 500 bis 2500 Volt. Die Empfindlichkeit des Instruments ist dem fast quadratischen Ausschlag zufolge nicht konstant; die Genauigkeit beträgt im Mittel etwa 0,2 Proz. Diese Genauigkeit kann aber bei den fraglichen Messungen bei weitem nicht ausgenutzt werden, da der Lichtbogen gewöhnlich so unstet brennt, daß der Spiegel niemals zur Ruhe kommt. Man muß gewöhnlich einen Mittelwert schätzen, und außerdem schließlich Mittelwerte von mehreren Ablesungsreihen nehmen.

Für einen Gleichstromlichtbogen gilt bekanntlich die Ayrtonsche Beziehung $V = a + \frac{b}{J}$.

Die Funkenkonstanten a und b hängen von der Entfernung, vom Material und vom Zustande der Elektrode und vom Medium ab.

Heubach ¹⁾ hat die statischen Charakteristiken von Wechselstromlichtbögen bei niedriger Frequenz aufgenommen. Die erwähnte Gleichung dürfte hier nicht gelten. Die Untersuchung bezieht sich auf Kohlenlichtbögen, da man ja bei niedriger Frequenz und mäßiger Spannung einen Wechselstromlichtbogen zwischen Metallelektroden nicht unterhalten kann.

Für Wechselstromlichtbögen mit hochgespanntem Strom liegen Messungen von Guye und Monasch ²⁾ vor. Der Charakter der Stromspannungskurven ist derselbe wie beim Gleichstrom, aber die Ayrtonsche Formel gilt nicht. Nach Untersuchungen von Roschansky ³⁾ ist in einem aus Kapazität ($C = 1$ bis $2 \cdot 10^{-3} \mu F$), Selbstinduktivität ($L = 714$ bis $1480 \cdot 10^3$ CGS) und Funkenstrecke bestehenden Schwingungskreise die Elektrodenspannung $V_f = a_0 + a_1 f$, d. h. die Amplitude ändert sich nur wenig während des Verlaufes einer Schwingung. Die Funken spielen im Schwingungskreis die Rolle einer nahezu periodischen EMK.

Die Aufnahme der Stromspannungskurven in einer Flüssigkeit (hier Äthyläther) sind nur mit den allerschwerst zerstäubbaren Metallen möglich gewesen. Von anderen wird nämlich schon während der kurzen Zeit, die zur Ablesung der Instrumente nötig ist, so viel Metall zerstäubt, daß sich die Bogenlänge und damit die Spannung

¹⁾ Elektrotechn. ZS. 13, 460, 1892.

²⁾ Eclair. électr. 34, 305, 1903; 35, 18, 1903. Vgl. Hagenbach, Lichtbogen, S. 309. (Marx, Handbuch d. Radiologie IV.) Zenneck, Lehrb. d. drahtlosen Telegraphie, 4. Aufl., S. 18, 470.

³⁾ Ann. d. Phys. 36, 281, 1911.

beträchtlich vergrößert hat. Auch für die „härteren“ Metalle ist diese Zerstäubung überaus lästig. Um einigermaßen reproduzierbare Versuche zu bekommen, muß nach jeder Ablesung der Elektrodenabstand von neuem genau justiert werden, was sehr sorgfältig ausgeführt werden muß, weil die Elektrodenspannung für kleine Änderungen in der Entfernung sehr empfindlich ist.

Die untersuchten Metalle sind Cu, Ag, Mg und Al. Die Versuche gelingen am besten mit den erstgenannten, weil bei ihrem hohen spezifischen Gewicht eine geringe Zerstäubung im Volumen weniger ausmacht als beim Al und Mg.

Endlich ist ein sehr wichtiger Faktor für die gute Durchführung der Versuche die Konstanzhaltung der Temperatur. Kleine Schwankungen in der Temperatur rufen nämlich starke Veränderungen in dem Potential hervor. Um deshalb die Temperatur so konstant wie möglich zu halten, wurde als Zerstäubungsgefäß ein sehr dünnwandiges Becherglas benutzt, das tief in einen großen mit Wasser von 17,0° gefüllten Thermostaten eingesenkt war. Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen sind die Versuche nur zu einem gewissen Grade reproduzierbar. Die charakteristische Gestalt der Kurven kehrt zwar immer zurück, der absolute Betrag der Spannung und Stromstärke kann aber von einem Versuch zum anderen ziemlich stark schwanken.

Die hier mitgeteilten Kurven sind aus Mittelwerten einer sehr großen Zahl von Einzelbeobachtungen zusammengestellt. Der Größe dieser Tabellen wegen verzichten wir, um Raum zu sparen, auf ihre Wiedergabe.

Die ausgeführten Messungen beziehen sich sämtlich auf den oben erwähnten Schwingungskreis. Die Stromstärke wurde an einem Präzisionshitzdrahtamperemeter (Hartmann & Braun) abgelesen. Die Kapazität bestand aus einem Ölkondensator, der kein Sprühen zeigte und dessen Frequenzfaktor durch Messung in der Wheatstoneschen Brücke und durch Resonanzversuche mit hochfrequenten Schwingungen gleich 1 gefunden war.

Fig. 4 stellt die Charakteristik des Kupferlichtbogens dar, für einige Bogenlängen zwischen 0,10 und 0,35 mm. Wir sehen, daß die Kurven anfangs fast horizontal verlaufen, die Spannung ist in diesem Gebiet von der Stromstärke unabhängig (die ersten Teile der Kurven sind am schwierigsten zu reproduzieren). Dann tritt für die kleineren Bogenlängen ein Diskontinuitätssprung ein; die Spannung fällt plötzlich um 100 bis 200 Volt und die Kurve verläuft dann wieder horizontal. Bei größeren Stromstärken ist die Zerstäubung zu stark, um Spannungsmessungen zu gestatten. Bei Verlängerung der Funken-

strecke geht der Diskontinuitätssprung in einen Knick über, der immer unschärfer wird. Diese Diskontinuitäts- oder Knickpunkte entsprechen der oben erwähnten Diskontinuität in der Zerstäubungskurve und der Veränderung in dem Charakter des Lichtbogens. Sie

Fig. 4.

Fig. 5.

verschieben sich mit wachsender Bogenlänge zu immer größeren Stromstärken.

Beim Silber sind (Fig. 5) die Knickpunkte weniger ausgeprägt, eine sprunghafte Veränderung der Spannung ist nur bei 0,1 mm zu sehen. Die schwache Krümmung der Kurven dürfte jedoch reell und nicht durch Beobachtungsfehler vorgetäuscht sein, weil sie bei allen Kurven wiederkehrt.

Fig. 6 stellt die entsprechenden Kurven für Aluminium dar. Hier ist der Knickpunkt sehr stark ausgeprägt und bildet zugleich einen Endpunkt der Kurven (Ausnahme 0,1 mm). Bei einer gewissen,

stark markierten Stromstärke fällt die Spannung sehr plötzlich, der Lichtbogen geht in sein unruhiges Gebiet über, und die Stromstärke im Schwingungskreis bleibt konstant (Amperemeter sehr unruhig) oder sinkt trotz gesteigerter Energiezufuhr.

Die Beobachtungen mit Magnesiumlichtbogen sind in Fig. 7 zusammengestellt. Hier haben wir bei 0,1 mm einen wahren Diskontinuitätspunkt, der für größere Bogenlängen in einen scharf markierten Knickpunkt übergeht. Doch kann man hier im Gegensatz zum Aluminium den Verlauf der Kurven ein Stückchen auch im unruhigen Gebiet verfolgen. Bei zu großen Stromstärken brennt der Bogen jedoch nicht mehr regelmäßig (wie bei Aluminium).

Aus den Figuren geht hervor, daß bei den Kurven, die einen Diskontinuitätspunkt besitzen, in der Nähe von diesem einer Strom-

Fig. 6.

Fig. 7.

stärke zwei verschiedene Spannungen entsprechen, d. h. der Lichtbogen kann bei einer und derselben Stromstärke entweder im ruhigen oder unruhigen Gebiet brennen.

Wenn man mit einer schwachen Stromstärke anfängt, die langsam und regelmäßig gesteigert wird, kann man mitunter ziemlich weit an der oberen Kurve entlanggehen, dann fallen aber plötzlich, ohne daß die Primärenergie verändert worden ist, Spannung und Stromstärke, und der Lichtbogen wird unruhig; wir befinden uns jetzt auf dem unteren Kurvenast.

Diese erwähnten zwei Zustände des Lichtbogens (stabil und labil) treten besonders deutlich bei sehr kurzen Kupferlichtbögen hervor, sind aber auch bei Magnesium und Aluminium beobachtet worden.

Es geht aus den Diagrammen weiter hervor, daß bei kleinen Bogenlängen die Spannung im untersuchten Gebiet praktisch konstant ist (vor dem Diskontinuitätspunkt), aber je länger der Bogen wird, desto mehr sinkt die Spannung mit steigender Stromstärke. Diese Abhängigkeit tritt bei Cu und Al und ganz besonders bei Mg hervor.

Der Energieverbrauch im elektrischen Lichtbogen wird, wie auch Svedberg¹⁾ hervorhebt, durch das Produkt aus Spannung und Stromstärke dargestellt, und nicht durch I^2 , wie in den Zerstäubungskurven nach Svedbergs Beispiel angenommen worden ist. Die Untersuchung über die Abhängigkeit der Zerstäubung von dem Produkt $E_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$ haben wir in einem größeren Umfang nicht durchführen können, da, wie gesagt, die Spannungsmessungen für die

Fig. 8.

„weichen“ Metalle sehr ungenau ausfallen. Doch sind mit Kupfer einige Messungen unter denselben Bedingungen wie in Fig. 1 vorgenommen.

Fig. 8 gibt die Beobachtungen für zwei Bogenlängen wieder. Auch hier tritt der Diskontinuitätspunkt sehr stark hervor. Bei denselben Versuchen, die in Fig. 1 und 8 wiedergegeben sind, wurde die Stromstärke (i) und Klemmenspannung (v) im Primärkreis des Transformators gemessen.

Wenn man in einem Diagramm (Fig. 9) die Zerstäubung des Kupfers als Funktion von $i \cdot v$ aufträgt, so bekommt man wieder dasselbe Bild: erst einen rasch aufsteigenden Kurvenast, dann einen Diskontinuitätspunkt und zuletzt ein abfallendes Kurvenstück. Der Diskontinuitäts- oder Knickpunkt tritt immer auf einer

¹⁾ l. c., S. 28.

und derselben Stelle hervor, nämlich dann, wenn der Lichtbogen seinen ruhigen Zustand verläßt.

Das Material ist noch nicht groß genug, um einige theoretische Auseinandersetzungen zu begründen. Wir möchten jedoch auf einige Eigenschaften der mitgeteilten Lichtbogencharakteristiken aufmerksam machen. Vergleicht man für die vier Metalle (bei 0,1 mm Bogenlänge) die Lage der Diskontinuitätspunkte, so findet man, daß diese in der Reihenfolge Mg, Al, Cu, Ag sich nach immer größeren Stromstärken verschiebt. Die Zahlenwerte sind Mg 1,0, Al 1,4, Cu 1,6, Ag 1,8 Amp. Dieselbe Reihenfolge bekommen wir, wenn wir die Neigung der Stromspannungskurven gegen die Abszisse vergleichen.

Fig. 9.

Diese ist am größten für Magnesium, kleiner für Aluminium und Kupfer und sehr klein für Silber.

Es liegt auf der Hand, die erwähnten Tatsachen mit dem Wärmeleitvermögen der Metalle zu vergleichen, eine Eigenschaft, die ja für den Wechselstromlichtbogen von großer Bedeutung ist¹⁾. Die Reihenfolge der fraglichen Metalle ist für die Wärmeleitvermögen dieselbe wie sie durch obige Zahlwerte gebildet wird²⁾: Mg 0,38; Al 0,50; Cu 0,89; Ag 1,01. Wir halten es für durchaus plausibel, daß die Wärmeleitung der Elektroden der wichtigste Faktor ist, der das Verhalten der verschiedenen Elektrodenmaterialien bestimmt.

Geht man von der Ansicht aus, daß die Zerstäubung bei der elektrischen Kolloidsynthese fast ausschließlich ein rein thermisches Phänomen ist, indem das in dem Lichtbogen verdampfte Metall, in der Flüssigkeit herausgeschleudert, sich zu dem Kolloid kondensiert,

¹⁾ Vgl. z. B. Granquist, Nova Acta Reg. Soc. Sc. Ups. 3, 45, 1903.

²⁾ Landolt-Börnstein, Phys.-chem. Tabellen, 4. Aufl., S. 737.

so folgt ohne weiteres daraus, daß mit zunehmendem Wärmeleitvermögen der Elektrode die Kolloidbildung abnehmen muß. Das ist ja auch im großen und ganzen der Fall. Die Verdampfungswärme muß natürlich auch von großer Bedeutung sein, diese Konstante kennt man aber für die meisten Metalle noch nicht mit genügender Sicherheit.

Zuletzt ist auch zu bemerken, daß die erwähnte Reihenfolge der Metalle mit der sogenannten Wienschen Reihe übereinzustimmen scheint¹⁾. Dieselbe Reihe kehrt ja nach Roschansky²⁾ in der Form der von ihm ermittelten Spannungskurven im großen und ganzen wieder.

Drontheim, Phys.-chem. Laboratorium d. Techn. Hochschule.

¹⁾ M. Wien, Phys. ZS. 11, 282, 1910.

²⁾ Ann. d. Phys. 36, 281, 1911.