

Ueber die Charakteristiken des elektrischen Lichtbogens und des Glimmlichtes zwischen Kupferelektroden im partiellen Vakuum.

Von

Aug. Hagenbach und H. Veillon.

Vor einiger Zeit hat der eine von uns — Hagenbach (1) — die spektroskopischen Verhältnisse des Kupferbogens bei vermindertem Druck untersucht. Bei den Experimenten war immer ein Voltmeter so eingeschaltet, dass die Elektrodenspannung des Bogens abgelesen werden konnte. Dabei wurde die Beobachtung gemacht, dass das Voltmeter ohne Aenderung des äusseren Widerstandes häufig zwischen gewissen Werten sprungweise spielte. Diese plötzlichen Aenderungen und das Verhalten des Bogens dabei veranlasste uns, auch die elektrischen Verhältnisse des Kupferbogens im partiellen Vakuum genauer zu studieren.

Der Kupferbogen ist zwar schon häufig Gegenstand eingehender Untersuchung gewesen, aber es schien uns doch noch manches unaufgeklärt. Unsere Untersuchung bestand in der Aufnahme der Charakteristiken d. h. der Volt-Ampèrekurven (V, i -Kurven) und, da die dabei gefundenen Resultate uns zum Teil neu und interessant erschienen, so wollen wir in folgendem kurz darüber berichten.

Es dürfte am Platze sein, zuerst einige Angaben zu machen über Bemerkungen, die wir in der Literatur über den Gegenstand gefunden haben, soweit sie unsere Resultate berühren.

Charakteristiken des Kupferbogens.

Der Uebergang des Bogens zur Glimmentladung ist Gegenstand einer Untersuchung *O. Lehmanns* (2) gewesen. Dabei liess er zwischen Kupferelektroden im partiellen Vakuum den Bogen übergehen. Er sagt in seiner Publikation an einer Stelle: „nicht immer endigt der Lichtbogen auf beiden Seiten in hellen Punkten und Metaldampfbüscheln, vielmehr kann er bei genügend ausgedehnten kalten Elektrodenoberflächen nur auf der einen (positiven oder negativen Seite) einen Metaldampfbüschel haben, auf der andern dagegen aus-

gedehntes Glimmlicht, welches nur das Gasspektrum zeigt.“ Ferner schreibt er: „Reicht die Wärmeentwicklung nicht mehr aus, um die zur Aufrechterhaltung des Metaldampfbüschels nötige Dampfmenge zu liefern, so muss die Bogenentladung unter Ansteigen der Spannung in Gasentladung übergehen“. Hier gibt also *Lehmann* schon an, dass eine Entladungsform möglich ist zwischen dem reinen Bogen und dem eigentlichen Glimmlicht.

Weitere für uns wichtige Bemerkungen finden sich bei *Arons* (3), der den Metallbogen mit einer ganzen Reihe von Metallen brannte und dabei die (V,i) Kurven festzustellen suchte. Der Bogen wurde eingeschlossen in einer Atmosphäre von Stickstoff, Luft oder Wasserstoff, der Druck variiert zwischen 760 und 1 mm. *Arons* gibt an, dass es ihm nicht möglich gewesen sei, die Volt-Ampèrekurven aufzunehmen infolge der Inkonstanz. Er steht auf dem Standpunkte, dass chemische Beziehungen der Atmosphäre (besonders des Stickstoffs) eine grosse Rolle spielen bei dem Zustandekommen des Bogens. Ueber das Aussehen des Bogens sagt er z. B. folgendes: „Bei Zink bestand der Bogen bei Drucken kleiner wie ein Millimeter aus grosser kugelig beweglicher Flamme, pfirsichblutfarbig und im Innern aus einem blauen Kern.“ An einer andern Stelle heisst es: „Es überzieht sich die Anode bisweilen mit einer mattgelben Glimmlichthaut, bisweilen setzt die Entladung mit einem blutroten Fleck an.“ Von Magnesium schreibt er „der blassblaue Bogen geht an der Anode in rosa über“. Hier gibt er an, dass mit dieser Aenderung auch eine solche der Elektroden-spannung Hand in Hand gehe. Ohne dass in den äusseren Bedingungen etwas verändert werde, findet er 14 Volt Klemmenspannung und 4,8 Ampère oder 28 Volt und 4,3 Ampère. Er gibt an, dass fast alle Metalle ähnliches zeigen zwischen 1 und 200 mm. Von Kupfer sagt er, dass bei niederem Druck der Bogen manchmal gelblichrosa statt grün sei, und dass dieser scheinbar willkürliche Wechsel Unsicherheit in die Beobachtung bringe. Die meisten Beobachtungen hat *Arons* mit 110 Volt Netzspannung ausgeführt, einige aber auch mit 680 Volt und erhielt damit auch die reine Glimmentladung. Ohne äusseren Grund lösten sich Glimmentladung (440 Volt) und Bogen (88 Volt) ab.

Wir sehen aus diesen Bemerkungen, dass *Arons* ausser dem Glimmlicht mehr wie eine Entladungsform des Bogens gesehen hat, dass er aber nicht systematische zahlenmässige Angaben darüber machen konnte.

In mancher Beziehung aufklärend sind die theoretischen Betrachtungen von *W. Kaufmann* (4) und *H. Th. Simon* (5) gewesen, und es ist darnach verständlich geworden, dass bei ein und dem-

selben äusseren Widerstande und einer gegebenen Netzspannung sowohl Bogen, wie auch reiner Glimmstrom möglich sind.

Im Anschluss an die genannten theoretischen Untersuchungen ist eine Arbeit von *H. W. Malcolm* (6) zu nennen, der auf Veranlassung von *Simon* eine Reihe von Metallen und Kohle in Luft, Stickstoff, Wasserstoff und Wasserdampf als Elektroden bei sehr hoher Netzspannung (bis 5000 Volt) verwandte. Dabei gelang es, in Luft den Glimmstrom zwischen Metallen bei Atmosphärendruck herzustellen.

Für Kohle in Wasserstoff wurde eine Entladungsform gefunden, welche als Zwischenform zwischen Bogen und Glimmlicht bezeichnet wird, indem der an der Kathode gebildete Elektroden- dampf noch nicht ausreicht, um den ganzen Lichtbogen auszufüllen, sodass an der Anode noch Glimmstrom besteht. Dieselbe Erscheinung wurde auch bei Metallen in Wasserstoff beobachtet. Es wird hier also die schon von *Lehmann* angegebene Zwischenform, der Glimmbogen, wieder konstatiert. Die Haltbarkeit der Behauptung *Lehmann's*, dass der Glimmansatz sowohl an der positiven wie an der negativen Elektrode einsetzen könne, dürfte nach den jetzigen Kenntnissen als sehr zweifelhaft erscheinen.

Die Theorie des Bogens ist gleichzeitig von *W. Mitkiewicz* (7), *J. Stark* (8) und *J. J. Thomson* (9) vom Elektronenstandpunkte gegeben worden, und darnach lässt sich verstehen, dass ein Mittel- ding zwischen Bogen und Glimmentladung bestehen kann, wobei an der Anode ein Glimmstrom ansetzt. *Stark* und *Cassuto* (10) haben deutlich gezeigt, dass der Bogen gegen eine kalte Anode z. B. gegen einen Elektrolyten brennen kann, nicht aber gegen eine kalte Kathode.

Genauer verfolgt wurde der Glimmbogen zum erstenmal von *W. G. Cady* und *H. D. Arnold* (11). Während die Untersuchung von *Malcolm* nur mit ganz geringen Stromstärken durchgeführt wurde, so benützen die genannten Forscher auch grössere Stromstärken und nehmen die Charakteristiken für den Glimm- bogen und den Bogen zwischen Metallelektroden auf. Sie bezeichnen den Glimmbogen als erstes und den gewöhnlichen Bogen als zweites Stadium und den Punkt, bei dem das erste in das zweite übergeht als kritischen Punkt. Unter Atmosphärendruck kommt das erste Stadium nur bei ganz geringer Stromintensität (kleiner als ein Ampère) vor. Sie sprechen sich über den Glimm- bogen zwischen Eisenelektroden folgendermassen aus: „Der eigent- liche Bogen hat dann am negativen Ende eine bläulich-weiße Farbe, welche, je mehr man sich der Anode nähert, in ein dunkel- blau übergeht. An der Anode ist eine Schicht, die fast voll-

kommen dunkel zu sein scheint. Der Bogen ist von einem gelblich-grünen Mantel umgeben, welcher anscheinend von der Oxydation des Eisens im Bogen selbst herrührt.“ Bei partiellem Vakuum in Stickstoff konnte der kritische Punkt leichter beobachtet werden. Im ersten Stadium wurde ein mattes diffuses Glimmlicht auf der Anode konstatiert, im zweiten war der ganze Bogen leuchtend.

Die Charakteristik des Glimmbogens und des Bogens laufen ein Stück weit parallel, so dass also in diesem Gebiet bei einem gegebenen äusseren Widerstande beide Formen mit einander abwechseln können.

Auch *Ch. Fabry* und *H. Buisson* (12) bemerken, dass der Eisenbogen unter Umständen nur an der Kathode mit einem hellen Punkt ansetze, in welchem Falle die positive Flamme verschwinde und das Voltmeter eine Vergrösserung der Elektrodenspannung anzeige.¹⁾

M. Toepler (13) stellt im Anschluss an eine Abhandlung von *A. Grau* und *F. Russ* (14) fest, „dass lange Bogen sich aus zwei Entladungsformen zusammensetzen: aus den dampferfüllten Gebieten an den Elektroden mit Bogenlichtcharakter und aus dem im wesentlichen dampffreien Gebiete fern von den Elektroden mit dem Charakter eines Büschellichtbogens.“

Aus allen diesen zitierten Stellen geht hervor, dass bis jetzt zwischen zwei Metallelektroden ausser dem eigentlichen Glimmlicht zwei Arten der Bogenentladung, der gewöhnliche und der Glimmbogen, konstatiert worden sind, von denen jeder eine besondere Charakteristik besitzt.

Ausserdem ist für uns noch einiges interessant, was über den *zischenden* Lichtbogen bekannt ist.

Es scheint im allgemeinen die Ansicht zu herrschen, dass das Zischen des Kohlebogens mit einem Oxydationsvorgang der Kohle Hand in Hand gehe. Besonders *Frau H. Ayrton* (15) und *Lehmann* (2) haben diesen Standpunkt vertreten. Bei Metallelektroden ist der Zischzustand offenbar weniger ausgeprägt und wir haben wenig Angaben darüber gefunden. *Cady* und *Arnold* glaubten zuerst das Zischstadium mit dem Glimmbogen identifizieren zu müssen, haben es aber nachher widerrufen. *W. Upson* (16) macht die bestimmte Bemerkung, dass im Eisenbogen während des Zischens die Elektrodenspannung sinke. Ueber das Zischstadium

¹⁾ Irrtümlicherweise ist in der Abhandlung von *A. Hagenbach* (l. c.) behauptet worden, dass *Buisson* und *Fabry* am positiven Pol die Lichtstärke grösser gefunden hätten; die Angabe von *Buisson* und *Fabry* stimmt im Gegenteil mit dem von *Hagenbach* gefundenen Resultat genau überein.

der Metallbogen scheint überhaupt wenig bestimmtes Beobachtungsmaterial vorzuliegen.

Methode der Untersuchung.

Die Untersuchung wurde ausschliesslich mit Kupferelektroden durchgeführt. Da sich nämlich die Verhältnisse komplizierter gestalteten, als man bis jetzt annahm, so schien es uns zweckmässiger, zuerst die Erscheinungen bei einem Metall festzustellen und aufzuklären. Als Elektroden dienten runde Stäbe aus gewöhnlichem Kupfer von 10 mm Durchmesser. Die Elektroden zeigten nur geringe spektroskopische Verunreinigungen von Silber und Blei. Die Lampe befand sich in einem Kessel eingeschlossen (1), während ihre Reguliervorrichtung durch Stopfbüchsen hindurch nach aussen hervorragte. Vorn am Kessel²⁾ war ein Ansatz mit einem Quarzplattenverschluss. Die Elektroden standen vertikal, die negative stets oben, weil es sich als günstiger erwies, die Erwärmung der Anode nicht zu begünstigen.

Die Grösse des Bogens wurde mittels des projizierten Bildes bestimmt; dazu entwarfen wir mit einem photographischen Objektiv ein Bild des Bogens auf einen entsprechend vergrösserten Masstab, auf einem weissen Schirm aufgezeichnet, sodass die Länge jederzeit direkt in Millimetern abgelesen werden konnte.

Im Kessel befand sich zuerst gewöhnliche Luft, die mit einer maschinell betriebenen Pumpe auf den gewünschten Druck gebracht werden konnte. Die Luft wurde später durch Kohlensäure oder Stickstoff aus Bomben ersetzt. Als Elektrizitätsquelle diente das städtische Gleichstromnetz mit 220 oder 440 Volt. Mit Vorschaltwiderständen wurde die Stromstärke reguliert. Gemessen wurde die Stromstärke mit einem Siemens'schen Präzisionsampèremeter, die Spannung mit einem Voltmeter der Land- und Seekabelwerke. Je nach der Elektrodenspannung kam ein solches mit einem Bereich von 0—75 oder 0—500 zur Verwendung. Bei letzterem war zwar die Ablesungsgenauigkeit geringer, aber bei raschen Aenderungen die Pendelung der Nadel geringer und dadurch die Einstellung rascher, was sich als sehr vorteilhaft erwies. Das Voltmeter war direkt an den Stromeinführungsstellen im Kessel angeschlossen.

Wie wir später sehen werden, blieb der Bogen meistens nicht dauernd in einem Zustand, sondern die Entladungsformen wechselten oft rasch nach einander ab, so dass für eine zu beobach-

²⁾ Eine genaue Beschreibung davon findet sich in der zitierten Abhandlung von A. Hagenbach. (1.)

tende Form nur ganz kurze Zeit zur Verfügung stand. Dadurch waren wir gezwungen die Ausführung der Beobachtung zu organisieren. Im gleichen Moment mussten Elektrodenspannung, Bogenlänge, Entladungsart und Stromstärke ermittelt werden. Dies wurde auf drei Beobachter so verteilt, dass einer das Ampèremeter, ein zweiter das Voltmeter auf ein vom dritten Beobachter gegebenes Zeichen ablasen. Der dritte regulierte nämlich den Bogen und betrachtete das auf den Massstab projizierte Bild. War die gewünschte Bogenentladung vorhanden, so gab er das Zeichen zur Ablesung. Der Druck blieb konstant und konnte unmittelbar nachher am Manometer vom Beobachter drei abgelesen werden.

Um die Charakteristiken zu erhalten, wurde meistens bei konstantem Druck der Vorschaltwiderstand so verändert, dass die Stromstärke in Intervallen von ungefähr einem Ampère variierte. Die Versuchsreihen wurden zuerst mit zunehmenden, sodann mit abnehmenden Stromstärken gemacht. Man durfte die Stromstärke nie über 10 Ampère steigern, weil sonst die Kathode schmolz und die Gestalt der Oberfläche sich änderte. Während einer Beobachtungsreihe kam es nur selten vor, dass der Bogen einmal erlosch. Das Entzünden des Bogens geschah durch Kontakt der Elektroden. Die meisten Charakteristiken sind bei 1 cm Bogenlänge aufgenommen.

Während die Mehrzahl der Beobachtungsreihen bei konstantem Druck und variabler Stromstärke durchgeführt wurden, so haben wir eine Reihe bei Konstanthalten der Stromstärke und Verändern des Druckes gemacht. Der Druck im Kessel betrug bei den Messungen: Atmosphärendruck, 600, 500, 400, 300, 200, 100, 80, 40 und 20 mm. Die Druckmessungen geschahen an einem Barometer, welches mit seiner unteren Oeffnung mit dem Kessel in Verbindung stand.

Unsere Messungen und Beobachtungen liessen erkennen, dass es bei jedem Druck nicht nur eine, sondern mehrere Charakteristiken gibt, und unsere Aufgabe bestand nun gerade darin, den Verlauf derselben festzustellen. Wir haben viele Beobachtungsreihen angestellt, die Resultate graphisch aufgetragen und zum Schluss die Kurven gezogen. Die Genauigkeit der einzelnen Beobachtung ist nicht gross genug, um aus einer einfachen Reihe die Kurven sicher zeichnen zu können, wir haben deshalb zahlreiche Messungen ausgeführt. Man darf nicht vergessen, dass besonders bei grösseren Stromstärken beträchtliche Dampfmenngen in den Bogen geschleudert werden, und dass da auch die zufällige Richtung dieses Dampfstrahles die Stromlinien und den inneren Widerstand des Bogens beeinflussen, so dass Elektrodenspannung und Stromstärke eben auch

diesen zufälligen Aenderungen unterworfen sind. Wir haben natürlich bei denjenigen Druckverhältnissen, bei denen die Resultate am reichhaltigsten und interessantesten waren, am meisten Messungen angestellt. Um uns zu orientieren über die Genauigkeit unserer Kurven, haben wir unsere Resultate, die wir bei 100 mm Druck in zwei grossen Beobachtungsreihen erhalten haben, auf zwei Blätter getrennt aufgezeichnet und die Kurven gezogen. Nachher legten wir die beiden Kurvenscharen übereinander und wir konnten konstatieren, dass sie sich fast vollkommen deckten. Es scheint uns nun unnötig, das ganze Zahlenmaterial hier wiederzugeben, wir begnügen uns damit, nur die erhaltenen Kurven zu reproduzieren und wir glauben dies um so eher tun zu dürfen, weil die absoluten Werte doch noch anderen Einflüssen, wie z. B. Temperatur, unterworfen sind und es doch in erster Linie auf die Existenz dieser Kurven und auf deren gegenseitige Lage ankommt. Die Temperatur der Elektroden ändert nämlich die Elektrodenspannung, indem mit steigender Temperatur diese auch zunimmt, wie vor allem die Messungen von *Malcolm* und *Simon* (6), sowie von *Stark* und *Cassuto* (10) deutlich gezeigt haben. Unsere Charakteristiken würden also, auf konstante Temperatur der Elektroden bezogen, steiler abfallen, weil bei grösserer Stromstärke die Erwärmung stärker ist. Bei den verschiedenen Entladungsformen muss der Einfluss ein verschieden grosser sein, weil Anoden- und Kathodenfall jedesmal anders ist und damit auch die in Wärme umgewandelte Energie.

Nach den Angaben von *Guye* (17) und Andern ist die Konstanz der Elektrodenspannung auch besser bei gekühlten Elektroden, kleiner Stromstärke und kurzem Elektrodenabstande. Wir mussten aber den Abstand ziemlich gross wählen, einerseits wegen der Messung des Elektrodenabstandes in der Projektion, und andererseits, weil die verschiedenen Formen des Bogens sich nur bei nicht zu kleinem Abstände gut ausbilden und richtig beurteilt werden können.

Ferner ist noch auf einen Punkt aufmerksam zu machen. Wenn der Bogen in Luft im abgeschlossenen Raum brennt, so wird die Atmosphäre nach und nach sauerstoffärmer. Diesen Einfluss kann man eliminieren, indem man entweder die Luft beständig durchströmen lässt, was bei passender Hahnstellung bei jedem Druck möglich ist, oder indem man vor jeder Beobachtung Luft zuströmen lässt und mit der Pumpe den gewünschten Druck wieder herstellt. Wir haben beide Methoden mit Erfolg angewandt. Wurde das nicht berücksichtigt, so zeigte sich der Einfluss darin, dass im zweiten Teil jeder Versuchsreihe, d. h. bei abnehmender Stromstärke, nie-

drigere Werte der Elektrodenspannung gefunden wurden als bei zunehmender. Nicht beeinflusst wurde die eine Bogenform, die wir nachher mit 1 bezeichnen (Glimmbogen). Es liess uns das vermuten, dass neben der Verminderung des Partialdruckes des Sauerstoffs auch noch ein anderer Einfluss sich geltend mache, nämlich die Ionisation. Beim Glimmbogen leitet vornehmlich der Stickstoff. Wenn nun die Ionisation des Stickstoffs nur kurze Zeit bestehen bleibt, während die Metallionen sich länger schwebend erhalten, so wäre dadurch eine solche selektive Beeinflussung erklärt. Wir haben aber diesen Punkt nicht weiter verfolgt.

Kupferbogen in Luft.

Resultate. Wir haben durch unsere Untersuchung nachgewiesen, dass der Kupferbogen in Luft unter vermindertem Druck mit Sicherheit in sechs verschiedenen Formen vorkommt. Von fünf Formen ist es uns gelungen, die Charakteristiken aufzunehmen. Die sechste haben wir bestimmt beobachtet. Von einer siebenten Form haben wir Andeutungen gefunden. Neben diesen Formen existiert natürlich noch das reine Glimmlicht. Wir bezeichnen die verschiedenen Bogenarten mit 1, 1a, 2, 2a, 3 und 3a. Die höchste Elektrodenspannung gehört zu 1, die geringste zu 3a. Unsere Resultate sind in den Kurven Figur 1 enthalten und für die nachfolgenden Erläuterungen verweisen wir auf dieselben.

Bei dem Druck einer Atmosphäre sind die Charakteristiken schlecht aufzunehmen, indem der Bogen stark hin und herflackert und dadurch beständig gewissen Schwankungen unterworfen ist. Die Messungen lassen aber doch deutlich erkennen, dass es zwei getrennte Charakteristiken gibt, die ungefähr einander parallel laufen. Die obere der Kurven bezeichnen wir mit 3, die untere mit 3a. Die beiden Kurven sind folgendermassen erhalten. Bei einem gegebenen äusseren Widerstande sprangen Volt- und Ampèremeter zwischen einem Werte der obern und einem der untern Kurve hin und her. Im allgemeinen herrschte die Entladungsform 3; 3a wurde nur immer kurze Zeit beobachtet.

Vermindert man den Druck auf 600 mm, so findet man ungefähr dasselbe. Es treten auch zwei Entladungsformen auf, aber der Bogen brennt schon etwas ruhiger und die Messungen sind sicherer.

Bei 500, 400, 300 und 200 mm Druck finden wir immer die beiden Kurven 3 und 3a. Bei grösseren Stromstärken ist 3a häufiger wie bei den kleineren. Der Abstand der beiden Kurven ist ungefähr konstant; er beträgt rund 4 Volt. Beide Kurven rücken

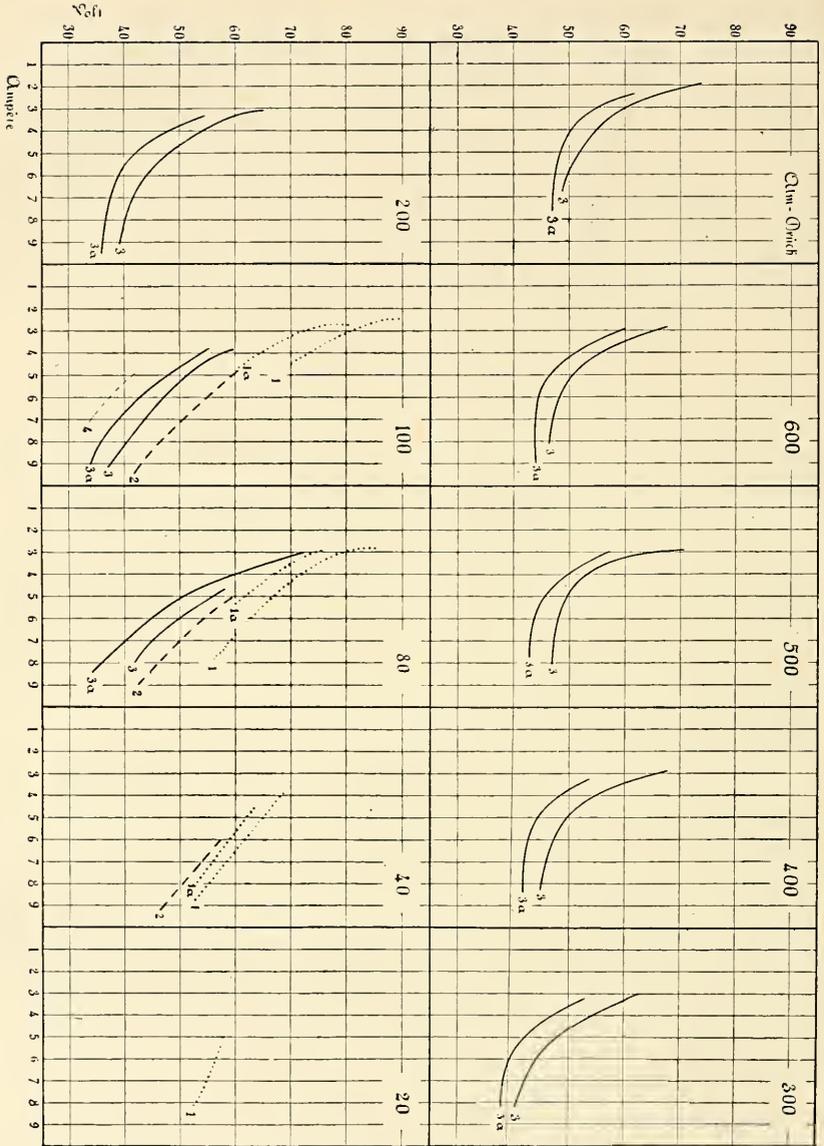


Fig. 1. Volt-Ampèrekurven für Cu-Bogen in Luft für Drücke von 1 Atm. abwärts bis 20 mm. Bogenlänge 1 cm.

mit abnehmendem Druck nach unten. Die kleinste Stromstärke, die bei 440 Volt zu erreichen ist, beträgt ca. 3 Ampère bei einer Bogenlänge von 1 cm. Die Gestalt der Kurven ist ungefähr hyper-

bolisch. Bei Stromstärken von etwa 6 Ampère sind die Kurven der Ampèreachse fast parallel.

Bei 100 mm finden wir die beiden Kurven 3 und 3a wieder, aber sie beginnen erst bei 4 Ampère und sind auch bei 9 Ampère noch stark geneigt. Unter 80 mm wird die Krümmung noch geringer; die Minimalstromstärke ist etwa 5 Ampère, die Kurvenstücke sind nahezu Gerade. Bei 40 mm Luftdruck konnten nur noch bei 8 Ampère wenige Punkte gefunden werden. Oberhalb 100 mm war immer eine der beiden Entladungsformen vorhanden, von 100 mm abwärts traten neue Formen hinzu und diese wurden immer seltener, je geringer der Druck. Verminderte man den Druck bis 20 mm, so konnte selbst bis zu 9 Ampère diese Bogenart nicht mehr erhalten werden.

In der Form 3 befindet sich der Bogen im gewöhnlichen Stadium. An der Anode und der Kathode setzt er punktförmig an. An den Elektroden ist die Helligkeit am grössten, das Ansatzbüschel ist weisser wie der übrige Bogen. Die spektroskopische Untersuchung hatte ja ergeben, dass in denselben ausser den Bogen auch die Funkenlinien enthalten sind. Der übrige Teil des Bogens ist schön grün, bei niederem Druck wird er breiter.

Das Stadium 3a ist vor allem durch die veränderte Farbe des Bogens zu erkennen. Der Bogen wird intensiv rot-gelb gefärbt und zeigt eine starke Aureole, die an der Kathode gebildet wird und von dort, je nach der Stromstärke, weiter oder weniger weit in den Bogen hineingeschleudert wird. Von 200 mm an aufwärts finden wir nur diese beiden Stadien 3 und 3a, aber unterhalb treten nun noch andere charakteristische Formen auf. Bei 100 mm sehen wir eine Kurve mit 2 bezeichnet. Sie liegt etwas höher wie die vorher genannten. Dieses Stadium findet sich in dem Druckintervall von 200 mm bis etwa 40 mm bei 1 cm Bogenlänge und 440 Volt Netzspannung. Das Aussehen an der Kathode war in dem Stadium 2 identisch mit dem entsprechenden bei 3, aber an der Anode setzte der Bogen mit einem rosa-violetten Büschel an, das kugelförmige Gestalt hatte. Das Spektrum dieses Büschels ist das Stickstoffbandenspektrum. Dieses Büschel setzte an der Anode punktförmig oder kugelförmig, aber nicht in einer breiten Fläche an.

Neben dieser Form 2 existiert noch eine Art 2a. Sie ist ziemlich selten und besteht immer nur kurze Zeit, so dass wir die Charakteristik nicht aufnehmen konnten; ausserdem haben wir sie erst gegen Schluss unserer Untersuchung richtig erkannt. Wir konnten uns nur qualitativ davon überzeugen, dass ihre (V,i) Kurve unterhalb der von 2 liegt. Bei 2a macht man dieselbe

Beobachtung an der Kathode wie bei 3a, dass sich nämlich von dort aus rotgefärbter Dampf loslöst. Die Kurven von 2 sind wenig gekrümmt. Bei 100 mm konnten sie von 4,5 bis 9 Ampère ermittelt werden, bei 80 mm von 5, bei 40 mm erst von 6 Ampère an.

Zwei weitere Bogenformen sind durch die Kurven 1 und 1a charakterisiert. Sie erscheinen erst von einem Druck von 100 mm abwärts: 1 solange man überhaupt einen Bogen unterhalten kann; 1a wird bei Erniedrigen des Druckes unter 40 mm selten, bei 20 mm haben wir nur noch 1 gefunden. Diese Stadien sind besonders gut ausgeprägt bei geringen Stromstärken und stellen dabei die stabilere Form dar. So finden wir zwischen 2,5 und 3,5 Ampère bei einem Druck von 100 mm nur 1 und 1a, nicht aber die andern, während bei 6 bis 9 Ampère nur 3 und 3a existieren können. Die Formen 2 und 2a bilden sich am häufigsten bei unsern mittleren Stromstärken.

Ob man 220 oder 440 Volt Netzspannung benützt, hat nur den Effekt, dass man bei der höheren Spannung die Kurven nach den kleineren Stromstärken hin etwas weiter verfolgen kann. Bei 1 und 1a haben wir nur noch an der Kathode den typischen punktförmigen Bogenansatz wie bei den übrigen 4 Formen, an der Anode herrscht Glimmentladung. Je nach Stromstärke und Druck wird die Anodenoberfläche mehr oder weniger von einer Glimmlichtschiebt überzogen, bei niederem Druck wird die ganze Anode in einen pelzähnlichen violetten Ueberzug eingehüllt. Sie zeigt, wie früher durch Spektrogramme festgestellt wurde, das Stickstoffbandenspektrum. Bei schwachen Strömen und niederem Druck ist nur noch unmittelbar an der Kathode das Kupferspektrum, der ganze übrige Teil des Bogens leuchtet in der „Stickstofffarbe“. Mit zunehmender Stromintensität oder zunehmendem Druck dehnt sich die grüne „Kupferfärbung“ aus.

Von der Ansatzstelle an der Kathode bei der Form 1 ist zu erwähnen, dass sie, besonders wenn der Bogen zwischen kalten Elektroden mit geringer Ampèrezahl angebrannt wird, in sehr raschem Tempo zwischen zwei oder mehreren Punkten der Metallfläche hin- und herspringt. Die Wechsel erfolgen so rasch, dass man den Eindruck eines vielfachen Bogens gewinnt. Plötzlich, ohne erkennlichen äussern Grund, kann der Bogen ruhig werden und unter Umständen minutenlang bewegungslos brennen. Zwischen dem ruhigen und dem flackernden Bogen aber besteht in Bezug auf die Charakteristik kein Unterschied.

Springt der Bogen in Form 1a, so wird er breit, steht ganz ruhig und hat die rote Farbe der Aureole. Diese Färbung geht bis zur Anode, hat aber offenbar ihren Ursprung wie bei 2a und 3a

an der Kathode. An der Anode bleibt der Glimmansatz bestehen. Die rote Färbung der drei a-Formen besteht hauptsächlich aus intensiven im rot gelegenen Banden. Es sind vier Banden mit je zwei Kanten, die nach dem roten Ende hin abfallen. Ausserdem sind es eine Reihe schwächerer Banden im grün.

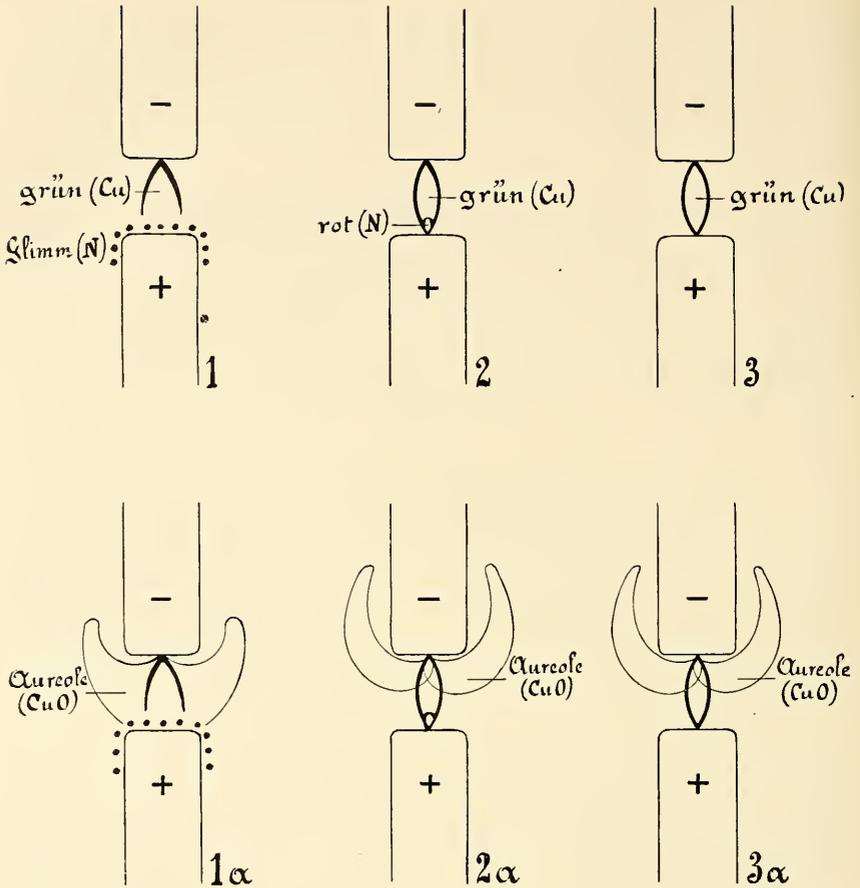
Aussehen der verschiedenen Entladungsformen.

Es war unser Wunsch, hier naturgetreue Abbildungen des Cu-Bogens in seinen sechs verschiedenen Formen zu geben. Wir versuchten es deshalb, mittels Autochromplatten *Photographien in natürlichen Farben* zu erhalten, allein das Resultat war noch zu unvollkommen als dass wir es an dieser Stelle wiedergeben könnten. Die Formen 1, 1 a und 3 lieferten zwar ziemlich annehmbare Bilder; in allen diesen trat das durch Cu hervorgebrachte grüne Licht schön hervor, in 1 und 1 a erkannte man deutlich das violette von N herrührende Glimmlicht und in 1 a sogar die von Cu O stammende Aureole. Die Form 2 entzog sich infolge ihrer flackernen Unruhe der autochromatischen Aufnahme, welche immer einige Sekunden Expositionszeit erheischt. Bei den übrigen Formen sind die Intensitätsunterschiede der verschiedenen Teile des Bogens so sehr verschieden, dass dieselben niemals gleichmässig berücksichtigt erscheinen.

Von Herrn Privatdozent Dr. H. Zickendraht wurden von den sechs Entladungsformen *Bilder in Aquarell* hergestellt. Hiefür, sowie auch für die Bereitwilligkeit, mit welcher er uns öfters in diesen Untersuchungen unterstützte, sprechen wir ihm unsern besten Dank aus.

Von den Formen 1, 1 a, 2, 3 a gelang es auch *gewöhnliche, farblose Photographien* zu erhalten, bei den beiden ersten war eine Gelbscheibe erforderlich, weil sonst das relativ schwach leuchtende Glimmlicht an der Anode nicht zum Ausdruck gekommen wäre. Auch hier wirkte der grosse Intensitätsunterschied der verschiedenen Teile des Bogens störend für die Aufnahmen.

Wegen der Unvollkommenheit aller dieser Darstellungen scheint es uns für das Verständnis zweckdienlicher zu sein, wenn wir uns auf eine *rein schematische Darstellung* des Aussehens der Entladungsformen beschränken. Die Figur 8 enthält eine solche. Die Cu-Elektroden sowie die Bogenlänge sind darin in natürlicher Grösse abgebildet. Der positive Pol war stets unten, der negative oben. Im übrigen gibt die Figur das Wesentliche der Erscheinungen, wenn sie auch nicht imstande ist, eine Vorstellung ihrer Schönheit hervorzurufen.



Figur 2.

Diskussion der Resultate.

Aus dem eben Mitgeteilten ersehen wir, dass der Bogen zwischen Kupferelektroden in Luft bei vermindertem Druck in 6 verschiedenen Formen vorkommen kann. Nicht bei jedem Druck unterhalb einer Atmosphäre sind bei einer Klemmenspannung von 440 Volt alle Formen gefunden worden, doch sind vermutlich alle bei genügend hoher Netzspannung und grossem Vorschaltwiderstande bei jedem Druck erhältlich. Bei 220 oder 440 Volt kommen zwischen etwa 100 und 60 mm Druck sämtliche Stadien vor. Bei 100 mm ist das Bild etwa folgendes: Beträgt die Stromstärke zwischen 3 und 4 Ampère, so spielt die Entladung zwischen 1 und 1 α , zwischen 6 und

9 Ampère finden wir ein Wechseln zwischen 2, 3 und 3a. Bei 5 Ampère existieren alle 5 (resp. 6) Formen.

Der Uebergang einer Entladungsform in eine andere erfolgt stets sprungweise. Volt- und Ampèremeter zeigen dabei eine momentane Aenderung. Oft finden in einer Sekunde mehrere Wechsel statt, bald bleibt eine Form minutenlang unverändert. Warum ein Wechsel stattfindet, bleibt aber vollkommen unaufgeklärt. Sämtliche Theorien des Bogens geben darüber keinen Aufschluss, denn mit einer Bemerkung, dass unter gegebenen äusseren Bedingungen mehrere Gleichgewichtsformen möglich seien, umschreibt man nur das, was man eben beobachtet, aber man erklärt es nicht.

Wir haben bei der Beobachtung stets die gewünschte Form abgewartet und dann gleichzeitig die verschiedenen Ablesungen ausgeführt. Es ist ein merkwürdiges und farbenprächtiges Spiel, wie man es auf dem Projektionsschirm beobachtet, ein beständiges sprungweises Aendern der Bogengestalt und Farbe. Die verschiedenen Stadien sehen so verschieden aus, dass eigentlich niemals zweifelhaft war, mit welcher Form man es zu tun hatte, nachdem wir einmal die typischen Erscheinungen im Laufe der Untersuchung kennen gelernt hatten. Wenn etwa eine Unsicherheit in der Beurteilung bestand, so wurde diese stets gehoben, wenn man durch kontinuierliche Aenderung der Stromstärke zu den Verhältnissen kam, bei welchem die zweifelhafte Form „typischer“ wurde, d. h. sich von den andern stark unterschied. So finden wir, wie schon erwähnt, 1 und 1a am schönsten ausgeprägt bei 2—3 Ampère, 2 aber bei etwa 5. 2a ist ziemlich selten und bleibt immer nur kurze Zeit, es dient häufiger als Zwischenstadium, wenn 2 in 3a umschlägt. Es kommen alle Umwandlungen vor, es kann also jede Form in jede andre umschlagen, doch treten gewisse Umwandlungen häufiger auf wie andere.

Beim Umspringen ändern sich stets Volt und Ampère, prozentual jedoch die Spannung mehr. In folgender Tabelle sei aus einer Versuchsreihe bei 100 mm Druck bei durchströmender Luft und 440 Volt Netzspannung ein Beispiel gegeben, was bei Konstanthalten des äusseren Widerstandes Volt- und Ampèremeter anzeigten. Die Zahlen sind Mittelwerte aus mehreren hintereinander gemachten Ablesungen.

Bogenform	Ampère	Volt	Voltampère
1	4,86	69,7	339
1a	4,95	60,8	303
2	4,99	61,0	304
3	5,02	54,7	275
3a	5,15	46,0	237

In der letzten Kolonne ist die Energie gerechnet, welche durch den Bogen geht. Sie nimmt in der angegebenen Reihenfolge ab. 1a und 2 sind in diesem Beispiel gleich gross, denn die Genauigkeit ist jedenfalls kleiner wie $\frac{1}{3}$ Prozent. Die grösste Gesamthelligkeit für das Auge ist aber in 3a und die kleinste in 1. Nach *Cady* und *Arnold* (11) ist auch bei Eisen die Energie im ersten Stadium — entspricht unserem 1 — grösser als im zweiten Stadium — entspricht unserem 3.

Die Auffassung, welche wir von diesen scheinbar komplizierten Verhältnissen gewonnen haben, ist kurz folgende. Die gemessene Elektrodenspannung ist stets die Summe von Anodenfall plus Kathodenfall plus Gefälle im eigentlichen Bogen. Es existieren nun für Kupfer im Bogen drei mögliche von einander verschiedene Anodengefälle und zwei Kathodengefälle.

An der Kathode ist das eine der normale Kathodenfall, während das zweite der Kathodenfall am Kupferoxyd ist. Der erstere beträgt nach *Child* (18) 14 Volt. Wenn der zweite Kathodenfall vorhanden ist, der niedriger ist wie der erste, so befindet sich der Bogen im Stadium des Zischens. Wir konnten das Zischen beim Bogen im Kessel nicht hören, hingegen haben wir uns wenigstens bei Atmosphärendruck überzeugt, dass in der Form 3a ein Zischen vorhanden ist. Die Erscheinung ist aber weniger ausgeprägt wie beim Kohlebogen. Das Zischen und damit Hand in Hand gehend die Erniedrigung der Elektrodenspannung beruhte also beim Kupfer auf der Oxydation der Kathode, und die drei Formen 1a, 2a und 3a wären die Zischformen von 1, 2 und 3.

Ayrton hat den zischenden Kohlebogen untersucht und erklärt das Zischen durch die Oxydation, eine Ansicht, welche schon von *Lehmann* vertreten wird. Nach *Luggin* (19) und *Ayrton* tritt die Oxydation und die damit verbundene Erniedrigung der Elektrodenspannung an der Anode auf. Man muss aber bedenken, dass beim Kohlebogen der Anodenfall grösser ist und dadurch dessen Temperatur höher. Deshalb muss also beim Kohlebogen die Oxydation zuerst an der Anode, beim Kupferbogen zuerst an der Kathode eintreten.

Die Charakteristiken des zischenden Kohlebogens sind von *Ayrton* als Gerade gefunden worden, welche sich nicht bis in das Gebiet des normalen Bogens verfolgen lassen. Beim Kupferbogen lassen sie sich auch in dem Gebiet der kleinen Stromstärken studieren. sie zeigen die ähnliche Krümmung wie die des gewöhnlichen Kupferbogens.

Die spektroskopische Beobachtung der 3 Zischformen ergab stets das Auftreten der intensiven Banden im rot und einiger

schwächerer im grün. Diese Banden sind schon früher von *A. Hagenbach* und *H. Konen* (20) dem Kupferoxyd zugeschrieben worden. Wir erwähnen noch, dass diese Banden in der eigentlichen Aureole, also in der Flamme, welche vom Bogen aufsteigt, immer enthalten sind, und dort ist wohl sicher anzunehmen, dass vor allem Oxydationsprozesse vor sich gehen. *Cady* und *Arnold* schreiben auch bei Eisenbogen den grünlich-gelben Mantel der Oxydation des Eisens zu. Aufnahmen, welche einer von uns mit dem Spektrographen von dieser Aureole gemacht hat, zeigen ebenfalls eine Gruppe von unscharfen Banden im rot und gelb.

Der Kathodenfall ist also demnach kleiner gegen Kupferoxyd wie gegen Kupfer, demnach liegen die drei a-Formen tiefer wie die dazu gehörenden andern. Die Bemerkung von *Upson* (16), dass im Eisenbogen während des Zischens die Elektrodenspannung sinke, stimmt also mit unserer Auffassung vollkommen überein. Entscheiden können wir natürlich vorläufig nicht, ob der Oxydationsprozess oder das oxydierte Kupfer die Schuld der Aenderung des Kathodenfalls trägt. Für das Zischen muss man den Oxydationsvorgang verantwortlich machen.

Wenn durch den Oxydationsprozess nur der Kathodenfall geändert würde, so müssten die (V, i) Kurven der Zischformen den andern genau parallel verlaufen. Dies ist nun nicht ganz der Fall und ist auch nicht zu erwarten, denn das verdampfte Kupferoxyd wird eine andere Leitfähigkeit besitzen wie das Kupfer, und das kann den Potentialgradienten im Bogen ändern und, wenn das Kupferoxyd bis an die Anode geschleudert wird, sogar auch noch den Anodenfall etwas beeinflussen. Zieht man die Elektroden bis auf mehrere Zentimeter auseinander, so kann man sehr gut erkennen, dass die roten Wolken bei 2a und 3a nur von der Kathode ausgehen und von den aufsteigenden Gasen nach oben getrieben werden. Je grösser die Stromstärke, um so weiter schiessen die Dämpfe in den Bogen hinein. Bei der 1a-Form scheint immer der ganze Bogen rotgelb gefärbt. Es ist aber erklärlich, wenn man in Betracht zieht, dass diese Form nur bei kleinen Stromstärken und niederen Drucken eintritt, wo die aufströmende Gasmasse kleiner ist und zudem weniger erwärmt. Hier tritt offenbar die vorhin erwähnte Beeinflussung des Bogens durch das Kupferoxyd ein, denn 1 und 1a sind nicht mehr parallel, die beiden Kurven kommen sogar zum Schnitt, wie wir häufig konstatiert haben (vergl. Fig. 4).

Die Temperatur der Kathode muss immer so hoch sein, dass an der Ansatzstelle des Bogens Kupfer resp. Kupferoxyd verdampft.

Der Uebergang von 1 nach 2 und 3 entspricht aber einer Aenderung des Anodenfalls. Befindet sich die Elektrode auf so hoher Temperatur, dass sie verdampft, so besteht der normale Anodenfall, der nach Messungen von *Child* (18) 11 Volt beträgt. Dies ist der Fall in dem Stadium 3. Besteht also normaler Anoden- und Kathodenfall, so haben wir die Entladungsform 3, findet aber Oxydation an der Kathode statt, so haben wir die Zischform 3a.

Bei der Form 2 ist an der Anode ein grösserer Potentialsprung vorhanden. Die Temperatur der Anode ist geringer, wie bei 3 und es verdampft offenbar kein Kupfer mehr, oder sehr wenig. Der Bogen setzt punktförmig an mit einem leuchtenden Büschel von Stickstoff. Dieser Bogenansatz ist, soweit wir die Literatur kennen, bis jetzt noch nie beobachtet worden. Vielleicht hat *Arons* die Erscheinung einmal gesehen, doch lässt es sich aus seinen Angaben nicht ermitteln, da alle systematischen und quantitativen Angaben fehlen.

Unsere Beobachtungen in Stickstoff, die nachher noch beschrieben werden, haben uns gezeigt, dass diese Bogenform bei relativ hohen Drucken (500 mm und mehr) sehr stabil auftritt. Das Büschel setzt ganz spitz an der Anode an und ragt weit in den Bogen hinein. Zieht man den Bogen in Stickstoff lang aus, so leuchtet die Hälfte des Bogens in der Farbe des Stickstoffs, die andere Hälfte in der des Kupfers. In Luft ist der Ansatz weniger spitz wie in Stickstoff, er ist mehr kugelförmig. Von 2 nach 1 gibt es keinen kontinuierlichen Uebergang.

Bei der Form 1 tritt an der Anode Glimmlicht ein. Diese Form, die man als Glimmbogen bezeichnet hat, ist von Mehreren beobachtet worden. Wie schon in der Einleitung erwähnt, liegen Messungen von *Cady* und *Arnold* vor. Wir nehmen wenigstens an, dass das sogenannte erste Stadium von *Cady* und *Arnold* unsere Form 1 ist, während ihr zweites Stadium unserm dritten identisch sein muss. Nach ihnen ist bei Eisen das erste Stadium besser ausgeprägt wie bei Kupfer. Wir teilen aber nicht die Ansicht der beiden Forscher, wenn sie sagen: „Der Uebergang von einem Stadium zum andern ist dem Zischpunkt des Kohlebogens ähnlich.“ Wir glauben aber, dass der Zischpunkt der Kohle ebensogut wie des Kupfers auf der Oxydation im ersten Fall der Anode, im zweiten der Kathode beruht, dass aber der Glimmbogen beim Kupfer auf einem andern Anodenfall basiert, und dass also das erste Stadium von *Cady* und *Arnold* gar nichts zu tun hat mit dem Zischen.

Es gibt nun auch zum Glimmbogen 1, oder was dasselbe sagt zum ersten Stadium von *Cady* und *Arnold*, noch eine Zischform.

hervorgerufen durch die Oxydation der negativen Elektrode. Von dieser Form 1a haben wir nirgends etwas erwähnt gefunden. *Cady* und *Arnold* bezeichnen die Uebergangsstelle in den Charakteristiken vom ersten ins zweite Stadium als kritischen Punkt. Diese Bezeichnung verliert nun ganz ihre Bedeutung nach unsern Untersuchungen, da die beiden Kurven 1 und 3 weit über einander verfolgt werden können und man also nicht von einem Punkt sprechen kann.

Einen Beweis, dass wir in dieser Entladungsform wirklich Glimmansatz an der Anode haben, glauben wir in folgendem zu sehen. Der normale Anodenfall im Kupferbogen (Form 3) beträgt 11 Volt. Wenn 3 in 1 umschlägt, so vergrößert sich im Durchschnitt die Elektrodenspannung um 12 Volt.³⁾ Der Anodenfall betrüge demnach im Glimmbogen 23 Volt. Von *Skinner* (21) wurde in reinem Stickstoff der Anodenfall im Glimmlicht für Kupferelektroden bestimmt und zu 20 bis 30 Volt je nach Druck von 1 bis 3 mm ermittelt. Das steht also in guter Uebereinstimmung mit unserm im Glimmbogen gefundenen Wert. Eine ganz genaue Uebereinstimmung ist übrigens gar nicht zu erwarten, da der Anodenfall ja etwas verschieden sein kann im Glimmbogen gegenüber der reinen Glimmentladung, weil er durch die hohe Temperatur, durch das ultraviolette Licht und die Zusammensetzung des Gases an der Anode beeinflusst sein kann.

Nach unserer Auffassung existieren also drei Anodengefälle und zwei Kathodengefälle (Kupfer und Kupferoxyd) und demnach 6 verschiedene Bogenformen. Ein strenger Beweis für unsere Ansicht kann unseres Erachtens nur durch gesonderte Messungen von Anoden- und Kathodenfall bei dem Umschlagen von einer Form in eine andere erbracht werden, und es sind deshalb im hiesigen Institut derartige Messungen in Angriff genommen worden.

Dass die a-Formen nur eintreten, wenn eine Oxydation möglich ist, haben wir durch die Untersuchung des Kupferbogens in Stickstoff bewiesen.

Kupferbogen in Stickstoff.

Um den Bogen in Stickstoff zu brennen, verbanden wir den Kessel mit einer Stickstoffbombe von der Firma *Kahlbaum* (Berlin). Ein eingeschaltetes Quecksilberventil sorgte dafür, dass in den Zuleitungen kein Ueberdruck entstehen konnte und eine Flasche mit Phosphorsäureanhydrid hielt die etwa vorhandene Feuchtigkeit zurück. Der Kessel wurde vor der Füllung ausge-

³⁾ In Stickstoff ist die Zahl gleich.

pumpt und dann mit durchströmendem Stickstoff die Resten von Luft noch entfernt.

Die Messungen in Stickstoff wurden in erster Linie ausgeführt um festzustellen, ob die Zischformen wegbleiben, wenn der Sauerstoff fehlt. Nach öfterem Ausspülen und längerem Brennen erschienen tatsächlich nur die Formen 1, 2 und 3. Nur bei Atmosphärendruck zu Beginn der Untersuchung hat einige male 3a eingesetzt. Spuren von Kupferoxyd konnten aber mit Leichtigkeit an den Elektroden sein. Unter vermindertem Druck ist nachher kein einziges Mal mehr eine der a-Formen zustande gekommen.

Das Gesamtbild in Stickstoff ist insofern anders, als alles nach höheren Volt verschoben ist. Mit der Netzspannung von 440 Volt konnten wir die Kurven weiter nach Kleinen verfolgen. Selbst unter Atmosphärendruck erhielten wir bei kleinen Stromstärken die Form 1. Die Form 2 tritt sehr stabil auf bei einem Druck 400 bis 500 mm. Sie ist geradezu die am besten ausgeprägte von allen und zum Studium dieser neuen Form dürften sich diese Verhältnisse besonders gut eignen. Unterhalb 200 mm werden die Messungen in Stickstoff sehr ungenau, der Bogen schwankt ungeheuer hin und

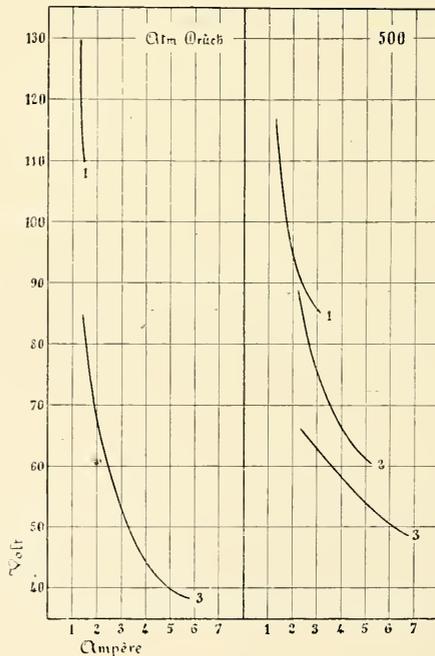


Fig. 3. Volt-Ampèrekurven für Cu-Bogen in Stickstoff.
Druck 1 Atm. und 500 mm. Bogenlänge 1 cm.

her. Wir wollen deshalb nur von 2 Drucken, nämlich 760 und 500 die Charakteristiken wiedergeben in Fig. 3. Die Kurve der Form 1 rückt auch hier mit abnehmendem Druck nach unten wie bei Luft. Unter 70 mm gelingt es nicht mehr, den Bogen zu erhalten, ausser vielleicht bei grossen Stromstärken; es tritt immer reines Glimmlicht ein, worüber nachher noch berichtet wird.

Das wesentliche für den Stickstoff ist also die Tatsache, dass auch hier die drei Charakteristiken 1, 2 und 3 existieren, und dass bei Konstanthalten von Druck und äusserem Widerstand der Bogen zwischen diesen 3 Stadien abwechselt ohne äussere Veranlassung. Die drei anderen Formen aber treten nicht ein. In Luft kommen sie eben nur zustande durch die Gegenwart des Sauerstoffs, der die Kathode oxydiert.

Kupferbogen in Kohlensäure.

Das Verhalten des Bogens in Kohlensäure ist ähnlich wie in Luft. Die Charakteristiken liegen aber alle höher. Anoden- und Kathodenfall sind offenbar grösser, denn die Erhitzung der Elektroden ist stärker. Es genügt z. B. schon bei 50 mm ein Strom von 4 Ampère, um beide Elektroden rotglühend zu machen; die Elektrodenspannung beträgt dabei 100 Volt, die Entladungsform ist Glimmbogen. Die Form 1 kommt aber entsprechend der stärkeren Erhitzung weniger leicht, denn sobald die Anode verdampft, tritt 3 auf. Die Zischformen 1a und 3a kommen in Kohlensäure auch zustande und das Spektroskop zeigt dabei dieselben Banden im rot. Kohlensäure wird offenbar teilweise zersetzt und Sauerstoff zur Oxydation der erhitzten Kathode verwendet. Wir haben uns mit der qualitativen Untersuchung begnügt.

Ergänzungen.

Eine weitere Frage ist, ob nicht an der Anode auch durch Oxydation der Anodenfall verkleinert werden kann. Wir können sie mit einiger Wahrscheinlichkeit bejahen. Bei hohen Stromstärken in Luft haben wir bemerkt, dass eine Anzahl Punkte, die wir mit 3a bezeichnet hatten, wesentlich zu tief lagen gegenüber den andern Punkten der Kurve. Es wäre nun leicht möglich, dass diese Punkte dem Bogen Kupferoxyd-Kupferoxyd angehörten. In der Fig. 1 haben wir einige dieser Punkte durch Kurve 4 bei 100 mm verbunden. Die Beurteilung bei grossen Stromintensitäten ist schwierig, weil beim Zischen meistens der Bogen stark deformiert wird, und grosse Dampfmengen in den Bogen geschleudert werden, so dass die von der Kathode herrührende Flamme bis zur

Anode reicht und nun nicht zu sehen ist, ob sich auch an der Anode die Farbe des Bogens ändert. Diese Form mitgerechnet, kann also der Bogen bei einem Druck in 7 verschiedenen Stadien existieren.

Veränderung der Bogenlänge.

Wir haben unsere Untersuchung nicht nur auf 1 cm Bogenlänge beschränkt, sondern wir haben auch bei grösseren und kleineren Abständen Charakteristiken aufgenommen. Es würde aber nicht viel Interessantes zeigen, würden wir alle derartigen Kurven hier

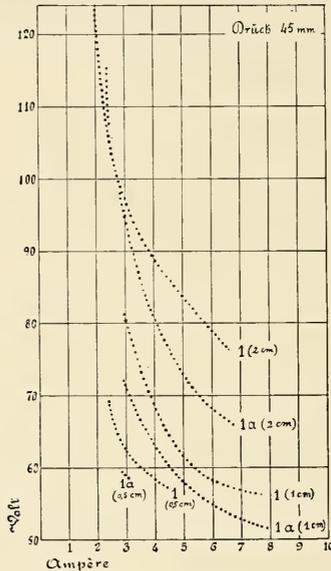


Fig. 4. Volt-Ampèrekurven für die Formen 1 und 1a des Cu-Bogen in Luft bei konstantem Druck von 45 mm und für die Bogenlängen $\frac{1}{2}$, 1, 2 cm.

wiedergeben. Wir begnügen uns, die Charakteristiken für 1 und 1a bei einem Druck von 45 mm in Fig. 4 zu reproduzieren, die Bogenlängen betragen dabei 2, 1 und 0,5 cm. Auch sieht man hier, worauf wir früher schon aufmerksam gemacht haben, dass 1 und 1a zum Schnitt kommen.

Bei grossem Elektrodenabstand setzt der Glimmbogen leichter ein wie der normale, bei kleinem Abstände umgekehrt. Es ist das leicht verständlich, denn die Elektronen, welche von der Kathode ausgehen, erreichen bei grossem Elektrodenabstande in geringerer Zahl die Anode, weil ein grösserer Prozentsatz zur Ionisierung der Dampf- und Luftmoleküle im Bogen verwendet wird; das Bom-

bardement der Anode ist geringer, ihre Temperatur sinkt leichter unter die Verdampfungstemperatur, wobei der Glimmbogen einsetzt.

Mathematische Formeln für die Charakteristiken.

Von den verschiedenen Formeln, welche für die Charakteristiken aufgestellt worden sind, hat die von *H. Ayrton* am meisten Anwendung gefunden. Sie gibt die Abhängigkeit der Elektrodenspannung von Bogenlänge und Stromstärke. Sie lautet

$$V = a + b l + \frac{c + d l}{i}$$

a , b , c und d sind Konstanten, l Bogenlänge und i Stromstärke. Diese Gleichung ist für den Kohlebogen aufgestellt worden, hat sich aber auch nach den Angaben von *Guye* und *Zebrikoff* (17) für mehrere Metalle bestätigt. Die *Ayrton*'sche Formel kann aber nur gelten, wenn die Energiekurven (Watt-Ampèrekurven) und die Watt-Bogenlängekurven Gerade sind. *Malcolm* hat die Energiekurven für verschiedene Metalle, worunter auch für Kupfer, aufgestellt, findet aber keine Gerade, sondern Kurven, welche schwach gegen die Ampèreachse konkav sind. *Upson* hingegen, der den Bogen zwischen gleichartigen und ungleichartigen Elektroden (Kohle und Metalle) in Luft, Wasserstoff und Leuchtgas einer Untersuchung unterzieht, findet die Energie- und Volt-Bogenlängekurven überall als Gerade.

In Fig. 5 und 6 sind einige aus unsern Beobachtungen entnommene Watt-Ampèrekurven gegeben. Die 3 und 3a Form unter 300 mm zeigen ungefähr eine Gerade, unter 80 mm und ebenso bei 100 mm (hier nicht gezeichnet) sind sie aber nach der Ampèreachse konkav. Die Energiekurven der 1 und 1a Form weichen weder bei 80 mm noch bei 45 mm, selbst für die verschiedenen Bogenlängen 2, 1 und 0,5 cm kaum von der Geraden ab. Je nach der vorhandenen Entladungsform und je nach den Bedingungen wie Druck etc. scheinen die Energiekurven mehr oder weniger von der Geraden abzuweichen und das Gesetz hat offenbar keine allgemeine Bedeutung. Auch ist die Genauigkeit der meisten Beobachtungen nicht genügend. So finden wir z. B., dass *Grau* und *Russ* im Kupferbogen in Luft bis zu Bogenlängen von 5 cm die Energiekurven als Gerade angeben und die *Ayrton*'sche Formel bestätigen, während *M. Töpler* mit denselben Zahlen nachweist, dass mit der gleichen Genauigkeit wie die *Ayrton*'sche Formel auch seine für den Büschellichtbogen aufgestellte von der Form

$$V = a + \frac{b}{\sqrt{i}} l$$

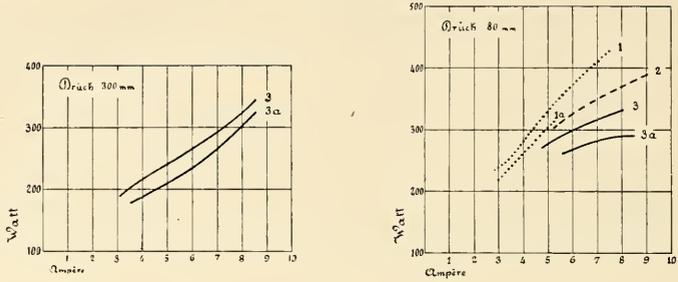


Fig. 5. Watt-Ampèrekurven für Cu-Bogen in Luft für 300 mm und 80 mm Druck. Bogenlänge 1 cm.

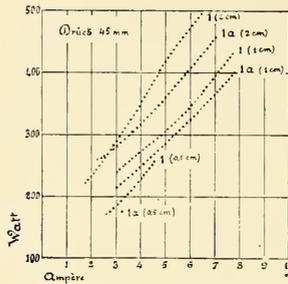


Fig. 6. Watt-Ampèrekurven für die Formen 1 und 1a des Cu-Bogens in Luft. Bogenlängen $\frac{1}{2}$, 1, 2 cm.

erfüllt wird, wobei a und b Konstanten, i die Intensität und l die Bogenlänge bedeuten.

Als zweite Bedingung für die *Ayrton*'sche Formel ist die zuerst von *Fröhlich* (22) angegebene geradlinige Abhängigkeit von Elektrodenspannung und Bogenlänge, oder, was dasselbe sagt, der Watt und Bogenlänge bei konstanter Stromintensität. *Guye* und *Zebri-*

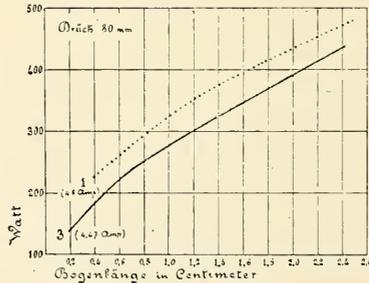


Fig. 7. Watt-Bogenlängekurven. Cu-Bogen in Luft. Entladungsformen 1 und 3.

koff haben für Kupfer bis zu 4 mm Bogenlänge Gerade gefunden. Unsere Resultate sind in Fig. 5 aufgezeichnet. Die obere punktierte Kurve enthält die Resultate des Glimmbogens (1) bei einer konstanten Stromstärke von 4,5 Ampère, einem Druck von 80 mm und für Bogenlängen von 4 bis 25 mm. Die untere Kurve gilt für die Form 3 für eine konstante Stromstärke von 4,47 Ampère, demselben Druck und für Bogen von 2 bis 24 mm. Die beiden Kurven sind angenähert parallel, aber gegen die Bogenlängennachse konkav.

Also auch die von *Fröhlich* aufgestellte Gesetzmässigkeit ist offenbar nur ein Annäherungsgesetz.

Dass übrigens die *Ayrton'sche* Formel für Kupfer nicht allgemein gelten kann, ersieht man sofort aus den Charakteristiken der Fig. 1. Für konstante Bogenlänge geht die *Ayrton'sche* Formel über in $V_i = \text{konst.}$, d. h. die Charakteristiken müssen alle Hyperbeln sein. Dass dies vom Druck 100 mm an abwärts nicht mehr der Fall ist, ersieht man sofort.

Die Volt-Druckkurven.

Duncan, *Rowland* und *Todd* (23) haben für den Kohlebogen von 0 bis zu 10 Atmosphären Druck in Luft einige Volt-Druckkurven gegeben. Sie zeichnen wenigstens bei den grösseren Bogenlängen ein Minimum in der Nähe von einer Atmosphäre. Da sie über den Grad der Evakuation keine Angaben machen, so kann diesen untern Enden der Kurven keine grosse Bedeutung zugeschrieben werden.

Wir haben nun für die verschiedenen Formen aus unsern Charakteristiken der Fig. 1 die Volt-Druckkurven abgeleitet. Sie sind in Fig. 8 wiedergegeben.

Die Kurven der Entladungsformen 1 und 1a steigen mit steigendem Druck anfangs und werden nachher konstant oder überschreiten ein Maximum (wenigstens bei den 1a-Werten). Je kleiner die Stromstärke, um so niedriger liegt die Kurve. Bei den Formen 2, 3 und 3a ist das Verhalten gerade umgekehrt, sie laufen durch ein Minimum. Bei 3 und 3a wandert das Minimum mit wachsender Stromstärke nach kleineren Drucken. Wir beschränken uns auch hier wie überall darauf, die Resultate in Form von Kurven wiederzugeben.

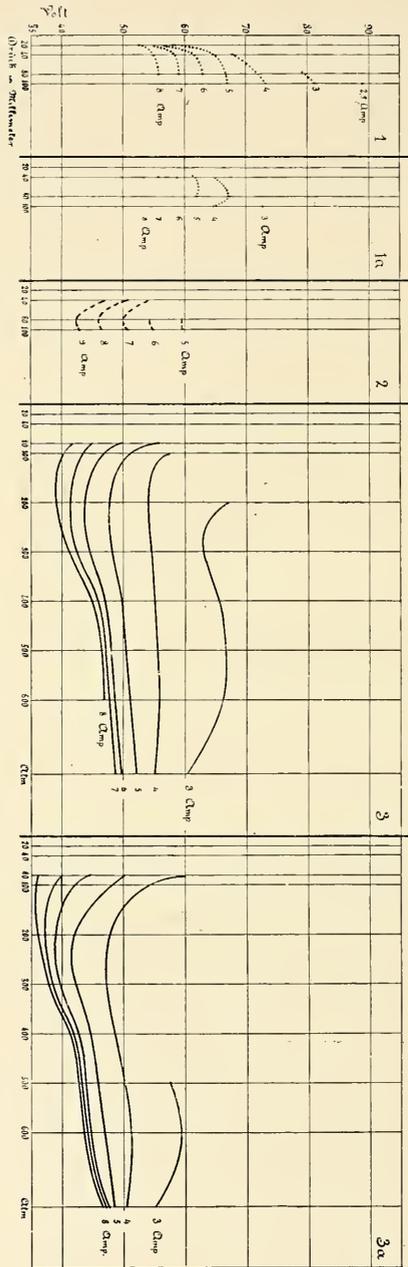


Fig. 8. Volt-Druckkurven. Cu-Bogen in Luft für die Entladungsformen 1, 1a, 2, 3, 3a, bei Stromstärken von 2,5 bis 9 Amp.

Glimmentladung.

Vermindert man die Stromstärke durch Zuschalten von Widerstand, so erlischt der Bogen bei einer ganz bestimmten Stromstärke oder aber er schlägt in Glimmentladung über. Nach der heutigen Auffassung des Bogenmechanismus nimmt man ja an, dass dies eintritt so bald die durch positive Ionen zugeführte Energie nicht mehr genügt, um die Kathode an der Oberfläche bis zum Verdampfen zu erhitzen. Bei einer Netzspannung von 220 Volt ist dieses Umschlagen nie erfolgt, wohl aber bei 440, besonders wenn der Elektrodenabstand klein war. Wir haben die Glimmentladung in Luft, Kohlensäure und Stickstoff beobachtet.

In *Luft* erhält die Kathode einen blauvioletten Ueberzug, das negative Glimmlicht, das je nach Stromstärke einen grösseren oder kleineren Teil der Elektrode überzieht. Es hat fleckiges Aussehen, wenn die Oberfläche der Elektrode wegen verschiedener Stromdichte teilweise oxydiert ist, es ist aber bei frisch geputzter Elektrode gleichmässig. An der Anode erschien ein rötlicher Wulst, der sich bei geeigneter Verdünnung als Schicht ablöste. Spektrophotogramme, welche von den einzelnen Partien getrennt aufgenommen wurden, zeigten an der Anode nur die positiven Stickstoffbanden, an der Kathode die positiven und die negativen gemischt.

Mit 440 Volt konnte der Elektrodenabstand bei 100 mm nur bis 0,2 cm erweitert werden, bei 20 mm aber bis 0,5 cm ohne dass der Bogen erlosch.

Glimmlicht- und Bogencharakteristiken lassen sich über ein ganzes Stück parallel verfolgen, wie schon *Cady* und *Arnold* hervorheben. Wenn man die Verhältnisse passend wählt, so spielt es auch zwischen den beiden Entladungen hin und her, d. h. es schlägt sowohl Glimmlicht in Bögen um als auch umgekehrt. Die Charakteristik des Glimmlichtes ist bei höherem Druck fallend, bei niederem steigend, was durch folgende Angaben erläutert sei.

Druck 80 mm, durchströmende Luft

Druck 45 mm

Elektrodenabstand 0,5 cm

Elektrodenabstand 1 cm

Volt	Ampère	Volt	Ampère
405	0,16	398	0,37
402	0,20	398	0,41
400	0,29	398	0,47
400	0,38	392	0,49
390	0,48	390	0,56

Druck 1 mm	
Elektrodenabstand 1 cm	
Volt	Ampère
399	0,033
401	0,036
404	0,045
410	0,051
415	0,070
417	0,075
417	0,083

Simon und *Malcolm* machen die Bemerkung, dass bei Kupfer in Wasserstoff bisweilen die Kathodenschicht der Glimmentladung die Form einer gezähnten Kreisscheibe besass. Wir haben einmal bei Kupfer in Luft dieselbe Erscheinung beobachtet und zudem rotierte sie. Wurde der Strom verstärkt, so hörte die Rotation auf, bei noch stärkerem Strom rotierte sie in umgekehrter Richtung. Wir haben das höchst auffällige Phänomen nicht weiter verfolgt.

Die Glimmentladung in *Kohlensäure* erfordert ein bedeutend höheres Potential als in Luft (zirka 430 Volt) und ist deshalb nur bei ganz niederem Druck mit 440 Volt möglich. Das negative Glimmlicht ist rotviolett gefärbt, an der Anode ist eine grünliche Lichterscheinung. Die Beobachtung mit dem Spektroskop zeigt die Swanbanden. Wir haben keine Messungen gemacht.

In *Stickstoff* ist die Elektrodenspannung geringer wie in Luft. Es stimmt das mit den Messungen von *A. Herz* (24) überein, wonach das Potentialgefälle im Glimmlicht durch Sauerstoff erhöht wird. Wir konnten bis 300 mm Druck das Glimmlicht verfolgen. Hier einige Daten:

Druck 300 mm	Abstand 0,2 cm
Volt	Ampère
390	0,22
Druck 200 mm	Abstand 0,2 cm
Volt	Ampère
388	0,31
372	0,51
Druck 70 mm	Abstand 0,5 cm
Volt	Ampère
379	0,20
394	0,31
382	0,67

Wir haben also überall schwach fallende Charakteristik. Wir änderten ferner bei konstantem äusseren Widerstand die Elektrodenabstand und erhielten folgende Reihe:

Volt	Ampère	Elektrodenabstand
350	0,38	0,1 cm
360	0,34	0,2 „
373	0,30	0,3 „
383	0,25	0,4 „
398	0,20	0,5 „
410	0,13	0,6 „

Bei etwa 70 mm Druck lassen sich die verschiedenen Teile im Glimmlicht schön unterscheiden. Man sieht bei passendem Elektrodenabstand z. B. den Crookes'schen Dunkelraum in Gestalt einer feinen schwarzen Linie die Kathode umhüllen. Evakuiert man weiter, so kommt man leicht über das Optimum hinaus und das Glimmlicht ist schlechter entwickelt.

Zusammenfassung und Schluss.

Durch unsere Untersuchung ist festgestellt, dass zwischen Kupferelektroden in Luft (und Kohlensäure) 6 charakteristische Kurven für die Bogenentladung existieren. Drei davon, welche wir als Entladungsformen 1, 2 und 3 bezeichnet haben, sind durch die drei möglichen Anodengefälle charakterisiert. Der Anodenfall von 1 ist der des Glimmstromes, der von 3 ist derjenige des normalen Bogens, und der von 2 ist dazwischenliegend, und bis jetzt ist davon noch nicht festgestellt, ob er sonst auch vorkommt. Die Ansatzstelle an der Anode leuchtet demnach bei 1 im positiven Glimmlicht (Stickstoffbandenspektrum), bei 3 als Bogen (Kupferlinienspektrum), bei 2 besteht sie in einem kugeligen Büschel, der aber punktförmig und nicht in einer Fläche die Anode berührt. Die Farbe dieses Büschels ist durch das Stickstoffbandenspektrum bedingt. Diese 3 Formen kommen auch in einer Stickstoffatmosphäre zustande. Zu jeder dieser Formen gibt es eine Zischform, welche durch Oxydation der Kathode entsteht. Kupferoxyd hat einen geringeren Kathodenfall, deshalb liegen diese Kurven unter den entsprechenden andern. In Stickstoff treten diese Entladungsformen nicht auf. Als wahrscheinlich wurde noch angegeben der Bogen zwischen oxydierter Anode und Kathode (Kurve 4 in Fig. 1).

Alle diese Formen haben wir bei einem Druck von 100 mm in Luft mit einer Netzspannung von 440 Volt bei einer Strom-

stärke von 5 Ampère konstatiert. Ohne bekannte äussere Veranlassung wechselt der Bogen zwischen diesen genannten Formen sprungweise. Ein allmählicher Uebergang der einen Form in eine andere kommt nicht vor. Mit derselben Spannung kann man in Stickstoff schon bei viel höherem Druck — 500 mm — alle 3 Formen, 1, 2 und 3 erhalten. Hat man eine sehr hohe Netzspannung zur Verfügung, so wird man jedenfalls auch bei Atmosphärendruck in Luft alle Stadien finden können.

Die früher schon erwähnte Theorie des Bogens lässt diese Beobachtungen teilweise leicht erklären.

Wenn die Energie der in den gegen Anode und Kathode beweglichen Ionen gross genug ist, damit die beim Aufprallen produzierte Wärme die Elektroden zum Verdampfen bringt, so entsteht der normale Bogen, die Form 3. Genügt an der Anode die Energie nicht mehr, so entsteht der Glimmbogen, unsere Form 1. Dass also bei geringerer Stromstärke leichter 1 als 3 auftritt, ist klar. Nicht ohne weiteres zu erklären scheint uns aber die Tatsache, dass bei Druckverminderung für eine gegebene Stromstärke der Glimmbogen leichter erscheint. Die Ionisation nimmt doch offenbar mit abnehmendem Druck zu, die freie Weglänge nimmt auch zu, so dass man daraus nicht leicht schliessen kann, dass die Energie kleiner werden soll. Man muss offenbar weitere unbewiesene Annahmen machen. Man könnte vermuten, dass die Ansatzstelle an der Anode verbreitert wird, wodurch die Wärmeproduktion auf eine grössere Fläche verteilt wird und dann die Temperatur weniger leicht bis zum Siedepunkt steigt. Ferner lässt sich annehmen, dass beim geringeren Druck die Diffusion der Luftmoleküle in den Bogen stärker erfolgt, und dass die Ionisation der Luft einen grösseren Teil der Energie aufbraucht wie die Ionisation des Kupferdampfes. Dadurch würde die Anodenoberfläche weniger Energie erhalten.

Die von uns als 2 bezeichnete Form lässt sich durch die Bogentheorie nicht erklären. Wir wollen uns vorläufig aller Vermutungen enthalten. Es wird notwendig sein, neues Beobachtungsmaterial zu schaffen, bevor man die theoretischen Spekulationen erweitert.

Literaturangaben.

1. *A. Hagenbach*; Phys. Zschr. 10, p. 649, 1909.
2. *O. Lehmann*; Wied. Ann. 55, p. 361, 1895.
3. *L. Arons*; Ann. d. Phys. 1, p. 700, 1904.
4. *W. Kaufmann*; Ann. d. Phys. 2, p. 158, 1900.
5. *H. Th. Simon*; Phys. Zschr. 6, p. 297, 1905.
6. *H. W. Malcolm* und *H. Th. Simon*; Phys. Zschr. 8, p. 471, 1907.
7. *W. Mitkiewicz*; Journ. Russ. Phys. Chem. p. 506 u. 675, 1903.
8. *J. Stark*; Ann. d. Phys. 12, p. 673, 1903.
9. *J. J. Thomson*; Conduction of electricity through gases p. 418.
10. *J. Stark* und *L. Cassuto*; Phys. Zschr. 5, p. 264, 1904. Vergl. auch Rasch, Phys. Zschr. 6, p. 438, 1905.
11. *W. G. Cady* und *H. D. Arnold*; Phys. Zschr. 8, p. 890, 1907.
12. *Ch. Fabry* und *H. Buisson*; C. R. 146, p. 751, 1908.
13. *M. Toepler*; Phys. Zschr. 9, p. 372, 1908.
14. *A. Grau* und *F. Russ*; Phys. Zschr. 9, p. 107, 1908.
15. *Mrs. H. Ayrton*; The electric arc, London, p. 287ff.
16. *W. Upson*; Phil. mag. 14 (6), p. 126, 1907.
17. *G. E. Guye* und *L. Zebrikoff*; Arch. de Genève, 1907. Hier findet sich auch eine Literaturzusammenstellung über den Bogen bis 1906.
18. *Child*; Phys. Rev. 10, p. 151, 1900 und 12, p. 149, 1901.
19. *Luggin*; Wien. Sitzungsber. 98, p. 1192, 1889.
20. *A. Hagenbach* und *H. Konen*; Atlas der Emissionsspektren. p. 24, Nr. 231.
21. *Skinner*; Wied. Ann. 68, p. 752, 1899.
22. *Fröhlich*; Elektrotechn. Zschr. 4, p. 150, 1883.
23. *L. Duncan*, *A. J. Rowland* und *R. J. Todd*; Elektrotechn. Zschr. 14, p. 603, 1893.
24. *A. Herz*; Wied. Ann. 54, p. 244, 1895.

Eingegangen 10. Mai 1910.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Basel](#)

Jahr/Year: 1910

Band/Volume: [21_1910](#)

Autor(en)/Author(s): Hagenbach August (Aug.), Veillon H.

Artikel/Article: [Ueber die Charakteristiken des elektrischen Lichtbogens und des Glimmlichtes zwischen Kupferelektroden im partiellen Vakuum 64-93](#)