

**8. Ueber den elektrischen Lichtbogen zwischen Metallelektroden in Stickstoff und Wasserstoff;
von Leo Arons.**

1. Metallelektroden haben für die theoretische Untersuchung der Verhältnisse im Lichtbogen vor Kohlenelektroden zwei Vorzüge: erstens ist ihr Material besser definirt, zweitens geben sie während des Brennens nicht die grossen Mengen von fremden Gasen aus, die bei Kohlenelektroden das Arbeiten in beliebig variirten Atmosphären fast ausschliessen. Ich habe mich deshalb seit vielen Jahren mit Beobachtungen des Lichtbogens zwischen Metallen beschäftigt; leider stellen sich aber auch hier so zahlreiche Schwierigkeiten ein, dass an Präcisionsmessungen gar nicht zu denken ist. Im Folgenden gebe ich eine Uebersicht über die Resultate, welche ich mit Metallelektroden in N und H erhalten habe. Als Elektrizitätsquelle benutzte ich die städtische Leitung (105—110 Volt Spannung); über Versuche mit höheren Spannungen werde ich später berichten.

Die Apparate.

2. Als Elektroden dienten cylindrische Metallstäbe von 5—8 mm Durchmesser, die rechtwinklig gebogen, sich mit den verticalen, 4 cm langen Schenkeln in Abständen von Bruchteilen eines Millimeters bis zu mehreren Millimetern parallel gegenüberstanden. Die horizontalen Schenkel waren zwischen dreieckig ausgefeilten Metallbacken verschraubt, die von Schiefersäulchen getragen werden. Die Schiefersäulchen waren in eine Messingfussplatte eingeschraubt und mit Mennige verkittet. Die Stromzuleitung geschah durch Klemmschrauben an den Metallbacken. Der kleine Apparat stand auf einer gut abgeschliffenen Glasplatte, die an zwei Stellen von 8 mm starken eingekitteten Metallstäben mit Klemmschrauben durchsetzt wurde. Die Platte ruhte auf zwei Glaskästen, die mit Wasser gefüllt waren; in das Wasser tauchten die eingekitteten Metallstäbe, um die Kittung kühl zu halten. Auf die Glasplatte wurde eine gut aufgeschliffene Glasglocke mit ein wenig Fett

aufgesetzt. Die Glasglocke hatte eine Höhe von 20 cm und einen Durchmesser von 10 cm. In zwei Tubulaturen, oben und seitlich unten, waren starke Messingröhren von 6 cm Länge eingekittet, die weiter die angelöteten Schlauchansatzstücke trugen. Die Messingröhren wurden zum Schutz der Kittung mit feuchten Lappen umwickelt. Zum Schutz der oberen Kittung gegen das directe Aufströmen der heissen Bogendämpfe war über dem Bogen ein conisches Glimmerdach (sog. Blaaker) befestigt. Von den Schlauchansatzstücken führten Druckschlauchleitungen zum Gasometer, zur Quecksilberluftpumpe und zu einem offenen Manometer. Der Stromkreis, der von der städtischen Centrale (105—109 Volt Spannung) gespeist wurde, enthielt ausser dem Ampèremeter variirbare Widerstände, von denen die grössten durch Glühlampen gebildet wurden, die bis zur Zahl von 16 nebeneinander geschaltet werden konnten. Neben dem Bogen lag zur Spannungsmessung ein Voltmeter — Volt- und Ampèremeter waren aperiodisch. Zur Entflammung des Bogens dienten die Funken einer Leydenerflasche, die von einem Inductorium erregt wurden. Damit der Hauptstrom nicht durch die secundäre Rolle des Inductoriums verzweigt wurde, was namentlich bei Verlöschen des Bogens bedenklich werden konnte, war nur die eine Belegung der Flasche unmittelbar mit der einen Elektrode des Inductoriums verbunden, während sich zwischen der zweiten Elektrode und der anderen Flaschenbelegung eine kleine Funkenstrecke befand. Solange das Inductorium in Betrieb war, musste das Amperemeter kurz geschlossen, das Voltmeter abgetrennt sein, um ein sonst ziemlich sicheres Durchschlagen ihrer Windungen zu vermeiden. Der Stickstoff wurde durch vorsichtiges Erwärmen einer concentrirten Lösung von $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ und 2NaNO_2 gewonnen und im Gasometer über Wasser aufgefangen; der Wasserstoff wurde aus einer Elkan'schen Bombe nach Durchstreichen dreier Waschflaschen mit Pyrogallollösung in das Gasometer geleitet. Zwischen Gasometer und Versuchsgefäss wurden die Gase scharf getrocknet.

Die Versuche.

3. Mit Recht ist von Frau Ayrton, der gründlichen Untersucherin des Kohlenlichtbogens, betont worden, dass man,

um zu genauen Resultaten zu gelangen, bei jeder Messung völlig constante Verhältnisse abwarten müsse. Bei meinen Versuchen war das leider unerreichbar. Es wurde ein bestimmter, am Manometer abgelesener Druck im Versuchsgefäß hergestellt; aber vom Beginn des Stromes an bewegt sich das Manometer — es sind deshalb die Druckangaben nur als ungefähre zu betrachten. Vor allen Dingen aber verändern sich die Elektroden schnell, sie werden zum grössten Teil weich und würden zusammenschmelzen, wenn man nicht vorher den Versuch abbricht. Es dürfen deshalb auch die Angaben über die elektrischen Grössen nur als ungefähre Werte betrachtet werden. Es wurden mit allen Metallen Versuchsreihen bei aufsteigendem und abnehmendem Gasdruck angestellt, mit den meisten nur bei einem Abstand der Elektroden von ca. 1,4 mm; einige kamen nicht nur bei verschiedenen Abständen, sondern auch mit verschiedenem Durchmesser der Elektroden zur Untersuchung; stets wurde auf zuverlässige Dichtung des Apparates geachtet und diese nach Abschluss der Reihen controlirt; häufig wurden auch bei auffälligeren Vorgängen innerhalb der Versuchsreihen durch Zurückgehen Controlversuche ausgeführt. Trotz aller Vorsicht und Mühe bin ich aber nicht zu Messungsergebnissen gelangt, die ausführlich mitgeteilt zu werden verdienen.

Ergebnisse.

A. Metalllichtbogen in Stickstoff.

I. Qualitative Ergebnisse.

4. Es konnten Messungen an folgenden Metallen angestellt werden: Al, Cd, Cu, Fe, Mg, Messing, Pb, Pt und Zn. Zinn schmolz sofort. Höchst auffällig war das Verhalten des Silbers. Während Silber in Luft einen prächtigen Lichtbogen giebt — nach den Messungen v. Lang's¹⁾ erfordert Silber sogar von allen untersuchten Metallen die geringste elektromotorische Kraft zur Erzeugung des Bogens —, gelang es mir zwischen Ag-Elektroden in N überhaupt nicht einen dauernden Bogen zu erhalten. Bei niedrigen Drucken flammt ein Bogen nicht einmal während des Funkenspiels des Inductoriums

1) V. v. Lang, Wied. Ann. 31. p. 389. 1887.

auf; ein solches Aufflackern des Bogens fand ich bei einem Abstand der Elektroden von 1,4 mm erst oberhalb 30 cm Druck. Bei geringerem Abstand der Elektroden (0,5 mm) entstand bei Atmosphärendruck ein Bogen (Stromstärke ca. 13 Amp., Spannung 25—30 Volt); aber auch dieser war nicht dauernd; häufig fanden kurz dauernde Ueberbrückungen durch Silbertröpfchen statt (Spannung 0 Volt); häufig verlöschte der Bogen; ja bisweilen sprang das Voltmeter von 0 auf 108 Volt — dem Sprengen des Kurzschlusses folgte keine Bogenentladung. Bei diesem Versuch betrug der äussere Widerstand ca. 6 Ohm; jede Vermehrung des äusseren Widerstandes machte selbst diesen Bogen unmöglich; unter 6 Ohm konnte ich bei meinen Apparaten nicht hinuntergehen.

Zur Erklärung dieses eigenartigen Verhaltens des Silbers kann man annehmen: 1. bei der Entstehung des Lichtbogens spielen chemische Vorgänge zwischen dem Elektrodenmaterial und dem umgebenden Gas eine Rolle¹⁾; 2. zwischen Silber und Stickstoff besteht nur eine sehr schwache chemische Verwandtschaft. Zu einem ähnlichen Schluss führen Beobachtungen von Kreusler²⁾ über photoelektrische „Ermüdungserscheinungen“, die bei sämtlichen von ihm untersuchten Metallen einschliesslich des Platins auftraten, während sie beim Silber ausblieben³⁾; gleichzeitig konnte bei allen Metallen, mit Ausnahme des Silbers, eine Oberflächenveränderung an den vom Licht getroffenen Stellen durch Anhauchen auch sichtbar gemacht werden. Eine Oxydation unter dem Einfluss der Lichtstrahlen ist ausgeschlossen, da diese beim Silber sicher stärker hätte sein müssen, als beim Platin.

5. Dass sich Metallnitride wirklich bilden, zeigt deutlich das Verhalten des Aluminium.⁴⁾ Die Aluminiumelektroden zeigten sich nach längerem Brennen des Bogens in der N-

1) J. J. Thomson (Beibl. 20. p. 303 ff. 1896) schliesst aus gewissen Erscheinungen bei Gasentladungen, „dass dem Uebergang der Elektrizität von dem Gase zur (Metall-)Elektrode die Bildung einer chemischen Verbindung vorhergeht“.

2) H. Kreussler, Verhandl. d. physikal. Gesellsch. zu Berlin 17. p. 88. 1898.

3) L. Arons, Naturw. Rundsch. 14. p. 454. 1899.

4) l. c.

Atmosphäre mit einer ziemlich starken grauschwarzen Kruste bedeckt, die beim Eintragen in heisse Kalilauge leicht als Nitrid erkannt wird; die grauschwarze Färbung rührt vermutlich von der ausserordentlich feinen Verteilung her — von Mallet ist 1876 ein Aluminiumnitrid (Al_2N_2) beschrieben worden, das teils amorph von blassgelber Farbe, teils krystallisiert und honiggelb durchscheinend erhalten wurde —, doch ist es auch nicht ausgeschlossen, dass hier ein Nitrid von anderer Zusammensetzung vorliegt, — so sind vom Fe und Ti je zwei, vom Vd gar drei Nitride bekannt. Bemerkenswert ist es, dass nach dem Brennen des Aluminiumlichtbogens der Glimmerschirm und die Glasglocke mit äusserst fein verteiltem Aluminium bedeckt ist — dieser Beschlag bildet sich, indem graue oder bräunliche Rauchwolken vom Bogen ausgehen, namentlich bei höheren Drucken und Stromstärken. Seine ausserordentliche feine Verteilung und das ganz unmetallische Aussehen wie eine gleichmässige dichte graue, in zusammenhängenden Flocken abnehmbare Decke lassen vermuten, dass das Metall erst aus einer chemischen Verbindung (Nitrid) wieder abgeschieden ist. Man hätte anzunehmen, dass sich das Nitrid bei einer gewissen, ziemlich hoch liegenden Temperatur bildet und bei einer noch höheren zerfällt, — dass die Temperatur im Lichtbogen selbst bedeutend höher ist, als an den Elektroden, ist bei Metallelektroden eine bekannte Erscheinung.¹⁾ Auch hätte der chemische Vorgang nichts Auffälliges; so giebt Moissan²⁾ an, dass sich bei der Reduction von Titansäure durch Kohle im elektrischen Ofen bei einem Strom von 350 Amp. und 50 Volt Titannitrid bildete, das erst bei 1000 Amp. und 70 Volt wieder zersetzt wurde; beide sehr hohe Temperaturen lassen sich nach Moissan's Angaben nicht in Graden angeben.

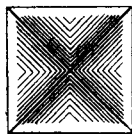
6. Ausser an Aluminiumelektroden liess sich Nitrid nach dem Uebergang des Bogens in der Stickstoffatmosphäre auf chemischem Wege nur noch bei Magnesium nachweisen; die ebenfalls grauschwarze Masse gab schon mit Wasser erhitzt

1) L. Arons, Wied. Ann. 58. p. 84. 1896.

2) H. Moissan, Der elektrische Ofen. Deutsch von Zettel, 1898. p. 25.

NH_3 aus. Bei den übrigen Metallen deuteten nur Färbungen, den Anlassfarben ähnlich, auf Nitridbildungen hin; aber bei allen findet sich auf dem Glimmerschirm, wie auf der Glasglocke, meist auch auf der Grundplatte eine Metallstaubdecke ähnlich der beim Aluminium beschriebenen. Namentlich bei geringeren Drucken zeigt sich zunächst fein zerstäubtes Metall als schwarzer Anflug auf der Kathode, wohl auch auf der Anode; ob diese schwarzen Pulver ausser beim Platin bekannt sind, weiss ich nicht¹⁾; Nernst²⁾ macht gelegentlich die Bemerkung, dass alle metallisch leitenden Stoffe fein gepulvert schwarz sein müssen. Ich habe die Schwärzung ausser beim Pt beim Cu, Al, Fe, Pb, Cd, Zn und Mg beobachtet.³⁾

7. Bevor ich zu den eigentlichen Messungsergebnissen übergehe, führe ich aus den zahlreichen Einzelbeobachtungen hier nur noch an, dass die Messingelektroden sich beim Brennen des Bogens kupfrig färben — der Bogen wird hauptsächlich vom Zn gespeist, sodass sich auch im Staub Cu nur spurenweise findet. Der Bogen zwischen Pt-Elektroden kommt erst bei N-Drucken über 50 cm zu Stande — und auch hier nur bei grossen Stromstärken (> 7 Amp.); er erlischt, sobald auch die Kathode zu glühen beginnt.



Die Kuppe der Anode⁴⁾ ist dabei flüssig; nach dem Erstarren zeigt sie unter dem Mikroskop zahlreiche, sehr niedrige quadratische Pyramiden mit feiner Zeichnung (vgl. Figur), die in grosser Anzahl bei einander lagen, teilweise einander deckend. Das Cd zerstäubt wie die übrigen Metalle, doch kommt es offenbar auch zur Verdampfung; nur so erklärt es sich, dass nach den Versuchen mit Cd-Elektroden sich die Messingteilchen des kleinen Apparates zum Teil mit silberweisser Färbung legirt zeigten.

1) Die Bildung eines „schwarzen Niederschlages“ bei den Lichtbogen zwischen einer Zinkspitze und einer Platinplatte im „Vacuum der Luftpumpe“ erwähnt de la Rive in Pogg. Ann. 76. p. 278. 1849.

2) W. Nernst, Zeitschr. f. Elektrochemie 6. p. 41. 1899.

3) Bei Sn und Ag in Wasserstoff vgl. unten.

4) Als Elektroden dienten hier Pt-Stäbchen, die auf Messingstäbe aufgeschraubt waren und sich mit ihren Enden horizontal gegenüberstanden.

II. Quantitative Ergebnisse.

8. V. v. Lang hatte auf Grund seiner sorgfältigen Messung an Metalllichtbogen in atmosphärischer Luft (1887) mit aller Vorsicht die Vermutung ausgesprochen, dass die Spannung am Bogen mit der Schmelztemperatur des Metalles zunähme; die einzige Ausnahme bildete damals das Silber; inzwischen hat v. Lang (1897) eine weitere Ausnahme im Aluminium gefunden. Ich stelle die Resultate v. Lang's in atmosphärischer Luft mit den von mir in N bei Atmosphärendruck erhaltenen zusammen; indem ich die Gesamtspannung zu Grunde lege, die ich bei 1,4 mm Elektrodenabstand und 4 Amp. gemessen habe und die sich bei den v. Lang'schen Versuchen aus den Formeln berechnen lässt. Meine Versuche sind nicht genau genug, um Formeln aufzustellen, die den Einfluss des Elektrodenabstandes und der Stromintensität wiedergeben — übrigens ist auch v. Lang in späteren Arbeiten mit Recht von der Formel zurückgekommen, die er 1887 seinen Berechnungen zu Grunde gelegt hat (vgl. unten § 9).

Tabelle 1.

Für den Elektrodenabstand 1,4 mm und die Stromstärke 4 Amp.

Metall	Spannung in Volt		Bemerkungen
	In Luft (v. Lang)	In N (Arons)	
Ag	21	?	Bei schwächerem Strom gemessen
Zn	23	21—22	
Cd	25	21—22	
Cu	27	29—32	
Fe	29	19—22	
Pt	36	29—31	Bei stärkerem Strom gemessen
Al	39	26—29	
Pb	—	18	Bei schwächerem Strom gemessen
Mg	—	21—23	

Die Tabelle zeigt deutlich den Einfluss des umgebenden Gases. Abgesehen von dem besonders charakteristischen Verhalten des Ag, das schon im vorigen Abschnitt besprochen, sehen wir auffällige Unterschiede beim Cu und Fe; während bei allen übrigen Metallen die Spannungen im N kleiner sind,

als in der Luft, ist es beim Cu umgekehrt, und das Fe, das in der Luft zu den Metallen mit höherer Spannung zählt, zeigt in N fast die niedrigste. Wir sind auf Grund dieser Zahlen zu der Annahme berechtigt, dass ganz allgemein bei dem Lichtbogen zwischen Metallen in Stickstoff die chemischen Beziehungen zwischen dem Metall und N eine erhebliche Rolle spielen. Dass beim Metalllichtbogen in Luft die Oxydationsvorgänge in erster Linie ins Auge zu fassen sind, hat zuerst de la Rive beobachtet, der bemerkte, dass sich in diesem Fall selbst beim Platin Oxydspuren nachweisen liessen. Eine weitere Einsicht in die Natur der Vorgänge wird man erst erhalten können, wenn die Verhältnisse der Bildung und Zersetzung der Oxyde und Nitride bei sehr hohen Temperaturen untersucht sein werden.

9. Wie schon oben bemerkt, nimmt bei gegebenem Abstand der Elektroden die Spannung an den Elektroden ab, wenn die Stromstärke steigt. Auch v. Lang ist von seiner für den Metalllichtbogen in der Atmosphäre gegebenen Formel von der Form $v = a + bi$ zurückgekommen (v Spannung, i Stromintensitäten, a und b Constanten — in b steckt der Abstand der Elektroden); wenigstens stellt er in einer späteren Arbeit¹⁾ über die Aluminiumlichtbogen seine Rechnung mit Formeln an von der Form $v = a + b/i$. Bei meinen Versuchen zeigte sich diese Abnahme der Spannung mit steigender Stromstärke bei allen Drucken. So fand ich z. B. für Zn in N (Elektrodenabstand 1,4 mm)

Stromstärke	0,7	1	1,7	2,3 Amp.
120 mm Druck	23—24	20—21	18—19	16—17 Volt
720 „ „	27—29	25—26	22—23	21—22

und für Mg bei 400 mm Druck

0,6	1,1	2	3	4,8 Amp.
32	25	22	18	17 Volt

1) V. v. Lang, Wied. Ann. 63. p. 192. 1897.

10. Eine zweite Beziehung gilt ebenfalls für alle untersuchten Metalle; überall wächst die Spannung bei gleicher Stromstärke und Abstand mit dem Druck. Als Beispiel führe ich an:

a) Cd, Abstand 1,4 mm, Stromintensität 1,6 Amp.

Druck in mm	10	60	100	220	380	600	750
Spannung in Volt	(12)	16	17	21	22	23	23

b) Pb, Abstand 1,4 mm, Stromstärke 1,8 Amp.

Druck in mm	8	30	90	190	250	370	490	620	730
Spannung in Volt	(18)	(10—20)	(13—18)	15	16	17	17	18	18

c) Zn, Abstand 1,4 mm, Stromintensität 2,4 Amp.

Druck in mm	< 1 mm	11	20	40	60	90	210	330	470	600	710
Spannung in Volt	11	12	13	14	15	16	18	19	20	21	22

d) Mg, Abstand 1,5 mm, Stromstärke 4,5 Amp.

Druck in mm	< 1 mm	90	220	360	490	660
Spannung in Volt	(14)	17	17	20	20	22

Bei niedrigen Drucken (< 40 mm) finde ich einige eingeklammerte Zahlen in den Tabellen — auf diese komme ich zurück (vgl. unten § 13).

11. Ein sehr verschiedenes Verhalten zeigen die Metalle, wenn man die geringste Stromstärke betrachtet, mit der man den Bogen zwischen ihnen in N betreiben kann.

Bereits oben war erwähnt, dass der Bogen zwischen Ag-Elektroden erst bei Atmosphärendruck mit einer Stromstärke von ca. 13 Amp. zu erhalten war [auch bei nur sehr kleinem Abstand (0,5 mm) der Elektroden und unter grossen Schwierigkeiten (vgl. oben p. 702)]; auch bei Pt war (vgl. oben p. 705) ziemlich hoher Gasdruck und grosse Stromintensität nötig, wenn der Bogen brennen sollte.

Schwächste Ströme, die unter den gegebenen Verhältnissen bei Atmosphärendruck in N erhalten werden konnten (Abstand 1,4 mm).

Metall	Stromint. (Amp.)	Spannung (Volt)	Metall	Stromint. (Amp.)	Spannung (Volt)
Pb	0,6	24	Fe	1,1	31
Zn	0,6	28	Cu	3	33
Mg	0,6	31	Al	4	29
Cd	0,9	28	Pt	7	30

Würden wir einen anderen als Atmosphärendruck wählen, so könnte die Reihenfolge eine ganz andere werden. Für einzelne Metalle giebt es nämlich Druckgebiete, innerhalb deren sich schwächere Ströme herstellen liessen, als bei Atmosphärendruck. In diesem Sinne haben folgende Metalle ein ausgesprochenes Optimum.

Metall	Druckgebiet des schwächsten Stromes	Stromintensität (Amp.)	Spannung (Volt)
Zn	300—400 mm	0,3	32
Cd	100—250	0,3	ca. 25
Al	100—500	2,4	29

12. Bei sehr geringen Drucken (< 1 mm) konnte im allgemeinen nicht beobachtet werden, da die einleitende Entladung des Inductoriums und der Leydener Flasche nicht zwischen den nahestehenden Elektroden übergang, sondern einen Weg zwischen entfernteren Metallteilen suchte. Während des Brennens des Bogens zu diesen niedrigen Drucken zu gelangen, war wegen der erheblichen Zeitdauer nicht möglich. Nur bei Zn und Mg konnte auch bei den geringsten Drucken gemessen werden, da der Bogen im allgemeinen eine sehr feine Brücke von hohem Widerstand zurückliess, die aber das Angeben des Bogens ohne einleitende Entladung höherer Spannung ermöglichte. Diese Brücke hatte beim Zn stets das Aussehen eines feinen kohlschwarzen Fadens, beim Mg war sie nicht so fein und von grauschwarzer Färbung.

Beim Zn beobachtete man bei einem Druck < 1 mm z. B. (Abstand 1,4 mm) 11 Volt Spannung bei einer Stromstärke von 2,4 Amp. Der Bogen bestand aus einer grossen, kugeligen, beweglichen Flamme; sie hatte eine pfirsichblütenartige Farbe, im Innern einen kleinen blauen Kern; bei höheren Drucken

blieb bloss dieser blaue Kern bestehen. Auch sonst zeigten sich bei den niedrigsten Drucken besondere Erscheinungen — so überzieht sich die Anode bisweilen auf ihrer ganzen Länge mit einer mattgelben Glimmlichthaut, bisweilen setzt die Entladung an der Anode mit einem blutroten Fleck an. Von grösserer Bedeutung sind die quantitativen Aenderungen, die bei dem *Magnesium*-lichtbogen mit der Aenderung des Aussehens verbunden sind.

So zeigte sich bei einem Druck < 1 mm und einem Elektrodenabstand von 3 mm neben einer ziemlich gleichmässig grünen Entladung (charakteristische Färbung des Mg-Bogens) ein blassblauer Bogen, der an der Anode in rosa überging; für den engen grünen Bogen las man bei einer Stromstärke von 4,8 Amp. die Spannung 14 Volt ab, dem grösseren blassblauen entsprach bei 4,3 Amp. die Spannung von 28 Volt — der äussere Widerstand im Stromkreis war nicht geändert —, die Entladungen wechselten ziemlich schnell miteinander ab, die Ablesungen sind infolge dessen nicht sehr genau.

13. Dieser Wechsel zwischen zwei Entladungsformen beim Magnesium zeigt sich auch noch in höheren Drucken bei geringeren Stromintensitäten. So waren bei 8 mm Druck die grünen Bogenströme oberhalb 4 Amp. stabil, dagegen erhielt man bei etwas grösserem Widerstand den grünen Bogen (3,1 Amp. 18—20 Volt) abwechselnd mit dem blassblauen (3,0 Amp. 24—26 Volt); ja selbst bei 200 mm zeigt der Bogen mit möglichst geringer Stromstärke (ca. 1 Amp.) beide Entladungsformen, das Voltmeter schwankt zwischen 28 und 40 Volt. Auch bei den meisten anderen Metallen zeigten sich ähnliche Erscheinungen. Beim Cu ist der Bogen bei niedrigen Drucken (wenige Millimeter) bisweilen gelblich-rosa, statt grün; beim Aluminium halb blau, halb hellrosa; beim Eisen zeigt sich statt des charakteristischen tiefblauen Bogens bisweilen ein halb rosa, halb hellblauer, und zwar bei Drucken bis zu 100 mm, wenn die Stromstärke genügend klein (der Vorschaltwiderstand genügend gross) ist etc. Auf diesem Wechsel der Entladungsart beruht die Unsicherheit der eingeklammerten Zahlen der Tab. a), b) und d) des § 10.

14. Es scheint, als ob man bei Anwendung grösserer elektromotorischer Betriebskräfte zu noch ausgesprochenen Erscheinungen gleicher Art gelangen kann. Ich habe vor

einigen Jahren eine grosse Reihe diesbezüglicher Versuche ausgeführt, von denen ich einige charakteristische hier erwähnen möchte. Als Stromquelle diente ein Gleichstromtransformator (elektromotorische Kraft 680 Volt); die Anode war ein Eisenstab von etwa 6 mm Durchmesser, als Kathode diente eine Quecksilberkuppe von ca. 20 mm Durchmesser; das Gas war atmosphärische Luft, deren Druck mittels Luftpumpe beliebig variiert werden konnte; der Bogen kam nämlich in einem Glasrohr zu Stande, in dessen oberes geschlossenes Ende der Eisenstab eingekittet war, während die Quecksilberkuppe durch Heben und Senken eines grösseren, mit dem unteren Rohrende durch Schlauch verbundenen Gefässes voll Quecksilber eingestellt werden konnte. Der abgeschlossene Raum stand durch ein Ansatzrohr mit der Luftpumpe in Verbindung. Bei niedrigen Drucken und gewissen äusseren Widerständen, die im Verhältnis 1 : 2 : 4 gesteigert werden konnten, ergaben sich zwei verschiedene Entladungsarten, von denen die mit grösserer Stromstärke dem Lichtbogen glichen, die mit schwächerer der Glimmentladung ähnelten, der Elektrodenabstand betrug 2,5 cm.

Druck	Widerstand (in willkürl. Maass)	Stromstärke (Amp.)	Spannung (Volt)	Durchschnittliche Dauer des Vorgangs	Bemerkungen
0 mm	1	0,47	88	20 sec	20 sec Mittel aus $\begin{cases} 27 & 10 \\ 10 & 20 \\ 35 & 20 \end{cases}$
		0,18	440	6,5	6,5 sec Mittel aus $\begin{cases} 13 & 5 \\ 10 & 5 \\ 1 & 5 \end{cases}$
	2	0,23	105	7	7 sec Mittel aus 1, 15, 7, 3, 14, 2
		0,10	410	23	23 sec Mittel aus 4, 33, 35, 20, 26
	4	—	—	—	
		0,047	400	dauernd	
0 mm	1	0,32	250	—	Welche Entladungsart eintritt, hängt davon ab, ob zur Einleitung das Hg mit dem Fe zur Berührung gebracht, oder ihm nur genähert wird. Der Bogen schlägt leicht in die andere Entladung über.
		0,12	510	—	
	2	0,12	330	—	
		0,058	530	—	

Von besonderem Interesse erscheinen mir die Zahlen bei 10 mm Druck. Zwei verschiedene, ziemlich stabile Zustände springen in verhältnismässig regelmässigem Rhythmus in einander über; je nach der Grösse des äusseren Widerstandes dauert jedesmal der eine oder der andere länger an.¹⁾

B. Metalllichtbogen in Wasserstoffatmosphären.

15. In Wasserstoff waren die Messungen noch schwieriger auszuführen als in Stickstoff. Diese Erfahrung ist nicht neu, so schreibt Graham²⁾, der die Glimmentladung auch in H-Röhren mittels einer grossen constanten Batterie untersuchte, dass mit derselben Batterie zwar Ströme bis zu erheblich höheren Drucken durch H geleitet werden konnten, als durch N — aber „mit H konnten wegen der Unstetigkeit des Stromes nur sehr dürftige Messungen gemacht werden“. Das bezieht sich auf Graham's Versuche unter Benutzung von Pt-Elektroden, mit Al-Elektroden war der Strom noch viel schwankender. Frühere Versuche, Metalllichtbogen in H-Atmosphären zu erhalten, sind fehlgeschlagen; so führt Herwig³⁾ aus: „Bei der von mir verwandten Batterie von 50 Grove'schen Elementen der gewöhnlichen Grösse werden überhaupt nur sehr unvollkommene Lichtbogen in Wasserstoff erzielt und kam ich dabei zu keinen scharfen Resultaten.“ Auch Grove vermochte keine Metalllichtbogen in H zu erzielen. Die von Herwig benutzte Spannung (50 Grove = 95 Volt) war nicht erheblich geringer, als die von mir angewendete (ca. 106 Volt). So ergab sich denn auch bei meinen Versuchen, dass bei manchen Metallen überhaupt kein Lichtbogen in H erzielt werden konnte, bei anderen nur unter ganz bestimmten Umständen, bei keinem in H-Atmosphären von mehr als 400 mm Druck. Die wichtigsten Ergebnisse führe ich bei den einzelnen Metallen an. Allgemein ist zu bemerken, dass bei allen Metallen, die überhaupt den Bogen zeigten, die zerstäubte

1) Ueber das Umschlagen zweier Entladungsformen ineinander vgl. O. Lehmann, Wied. Ann. 55. p. 370. 1895; ferner L. Arons, Wied. Ann. 58 p. 89. 1896. Ueber die Möglichkeit zweier stabiler Zustände einer Gasentladung bei gleichen äusseren Bedingungen vgl. W. Kaufmann, Göttinger Nachr. 1899. p. 246 f.

2) P. Graham, Wied. Ann. 64. p. 59. 1898.

3) H. Herwig, Wied. Ann. 29. p. 523. 1873.

Menge sich zum grossen Teil als feinsten schwarzen Staub völlig analog dem Platinschwarz zeigte; namentlich fand sich dieses Metallschwarz stets auf der Kathode abgesetzt.

16. *Kupfer in H.* Selbst bei einem Abstand von nur 0,1 mm und einem äusseren Widerstand von nur 6 Ohm kommt kein dauernder Bogen zu stande. Der während des Spielens des Inductoriums aufflackernde Bogen zeigte meist eine rosa-violette Färbung; das für Kupfer charakteristische Grün tritt nur selten hervor.

17. *Eisen in H.* Nur sehr starke Ströme können den Bogen erzeugen. Von niedrigen Drucken ausgehend erhielt ich erst bei 65 mm einen Strom von ca. 12—13 Amp., der mit 28—30 Volt einsetzte; bei starkem Funksprühen geriet auch die Kathode ins Glühen, die Spannung stieg auf 38 Volt, dann schmolzen die Elektroden zusammen, die Anode war flüssig geworden.

18. *Silber in H.* Erst Ströme von 12—13 Amp. liefern gelegentlich einen Bogen; so erhielt ich z. B.

bei 15 mm	23—29 Volt
„ 65	35—39
„ 350	29—30

häufig verlöscht der Bogen; anderenfalls muss er bald unterbrochen werden, da die Anode sehr rasch zu schmelzen beginnt; sicher ist das Eintreten des Bogens nicht. Oberhalb 400 mm trat er nie ein.

19. *Platin in H.* Die Druckgrenzen, innerhalb deren ein Bogen zu stande kommen konnte, waren 15 und 140 mm; die geringste Stromstärke war 9,5 Amp. Beide Elektroden glühen; häufig verlöscht der Bogen von selbst; anderenfalls muss der Strom unterbrochen werden, weil die Anode weich wird. Die Zerstäubung ist sehr beträchtlich und besteht ausschliesslich in Platinschwarz. Bei 1,4 mm Abstand der Elektroden und einer Stromintensität von etwa 11 Amp. ergab sich

bei einem Druck von	19	25	30	50	70	90	130 mm
eine Elektrodenspannung von	29	28	28	32	36	40	42 Volt

und ähnlich für ca. 9,6 Amp.

bei einem Druck von	25	30	50
eine Elektrodenspannung von	31	29	38

20. *Zinn in H* ergab nie einen Bogen, ausser während des Laufes des Inductoriums. Schon dabei trat Schmelzung ein. Es zerstäubte grauschwarz; an der Kathode fand sich ein höchst feines „Zinnschwarz“.

21. *Blei in H*. Bei 4 mm Druck gelang es bei den Stromstärken von ca. 1,6 bez. 1,8 Amp. Spannungen von 27—22 und 30—20 Volt zu messen. Der Bogen war blau, an der Anode rosa-gelblich. Bei höheren Drucken trat der Bogen nur ein, während das Inductorium spielte. Die Anode schmolz bei 100 mm.

22. *Aluminium in H*. Bei 1,4 mm Entfernung konnte selbst bei niedrigstem äusseren Widerstand (6 Ohm) kein Bogen erhalten werden. Bei 0,1 mm Abstand und 100 mm Druck konnte einmal ein Bogen von ca. 28 Volt Spannung bei 3 Amp. gemessen werden. Bei diesem schwächsten, überhaupt möglichen Strom schmolzen die Elektroden sofort zusammen, sodass weitere Versuche aussichtslos erschienen. Bemerkenswert scheint es, dass der Aluminiumbogen hier, wie bei den Versuchen in N, stets das Bandenspectrum des Aluminiums zeigte, auf dem mehr oder weniger deutlich einige Aluminiumlinien erschienen. Sauerstoffanwesenheit halte ich für ausgeschlossen; es zeigte sich nirgends eine Spur von Aluminiumoxyd und in dem Staub waren mikroskopisch kleine, silberblanke Aluminiumkugeln zerstreut; an der Kathode war ein Absatz von „Aluminiumschwarz“ sichtbar.

Kayser¹⁾ meint (1883), dass Lockyer das Bandenspectrum des Aluminiums wohl mit Recht für das Spectrum des Oxydes hält, obgleich er die Versuche von Ciamician in Wasserstoffatmosphären anführt. Noch in letzter Zeit bemerkt Hemsalech²⁾: „J'ai seulement observé que la présence de l'oxygène est favorable, sinon essentielle, pour l'obtention

1) H. Kayser, Spectralanalyse, 1883. p. 232.

2) G. A. Hemsalech, Journ. d. Phys. (III) 8. p. 655. 1899.

de ce spectre de bandes.“ Ich glaube, dass man das Bandenspectrum unbedingt dem Aluminium selbst zuschreiben muss. Auch bei den Versuchen mit Cadmium erhielt ich häufig, sowohl in N wie in H, neben den hauptsächlichsten Cd-Linien ein Bandenspectrum im Violett.

23. *Cadmium in H.* Auch mit Cadmium war ein Bogen oberhalb 150 mm nicht zu erhalten, wobei allerdings zu bemerken ist, dass Ströme über 4 Amp. — bei höheren Drucken (grössere Spannung!) über 3,2 Amp. nicht angewendet werden konnten. Ströme unter 1 Amp. konnten nur bei Drucken zwischen 14 und 50 mm erhalten werden. So erhielt ich bei 14 mm Druck (Elektrodenabstand 1,4 mm) 0,9 Amp. und 30 Volt; bei 36 mm Druck

Amp.	0,3	0,5	0,8	1,3
Volt	45—50	35—45	35—40	30

Bei 36 mm entsprachen den Stromstärken unterhalb 1 Amp. wieder zwei Entladungsformen; während der Cd-Bogen im allgemeinen tiefblau ist, war die Entladung bei höherer Spannung an der Anode rosa, sonst blassblau. Bisweilen bemerkte man an der Anode eine mattrosa Glimmhaut und einen höchst fein geschichteten, rosafarbenen positiven Teil der Entladung, während die Entladung an der Kathode blau blieb.

Bei stärkeren Strömen wuchs die Spannung mit dem Druck erheblich; so erhielt ich bei

10 mm Druck	{	2,8 Amp.	20 Volt
		3,9 „	17 „
140 mm Druck	{	2,3 „	38 „
		3,2 „	35 „

dagegen bei

Bei 140 mm Druck verlöschte der Bogen mit 2,3 Amp. sehr bald.

24. *Zink in H.* Oberhalb 300 mm Druck ist der Bogen nicht zu erhalten; vermutlich liegt die Grenze noch erheblich tiefer. Bei einem Abstand von 1,4 mm und einer Stromstärke von 2,3 bis 2,7 Amp. erhielt ich

Druck	Amp.	Volt
30 mm	2,4	28
60	2,7	31
90	2,5	37
135	2,3	43

Doch sind die Zahlen hier besonders unsicher; es scheint als ob gelegentlich der entwickelte Zn-Dampf den H ganz aus der Bogennähe verdrängen kann, sodass der Bogen in einer Zn-Dampfatosphäre brennt. Die Spannung sinkt dann erheblich. So machte ich bei einem länger fortgesetzten Versuch (Abstand der Elektroden 1,4 mm, Druck 135 mm) folgende Ablesungen:

Amp.	2	1,9	2	2,2
Volt	43—45	47—43	50—41	27

25. *Magnesium in H.* Bei 350 mm Druck war der schwächste Strom, der den Bogen gab, ca. 5 Amp. bei etwa 40 Volt; doch trat hierbei sofort Zusammenschmelzen der Elektroden ein. Oberhalb dieses Druckes war ein Bogen nicht zu erhalten. Bei sehr niedrigen Drucken aber (2—30 mm) wurden wieder zwei Entladungsarten beobachtet. So bestand die Erscheinung bei 2,5 mm Druck (Elektrodenabstand 1,4 mm) gelegentlich aus zwei getrennten Lichtkugeln an der Spitze der Anode und der Kathode; die Farbe war an der Anode rosa, an der Kathode grün. Der eigentliche Bogen ist ganz grün. Bei 1,1 Amp. betrug die Spannung hier 50—60 Volt. Bei 30 mm gelang es, Ströme unter 1 Amp. wenigstens für kurze Zeit zu erhalten. So entstand ein Bogen mit 0,7 Amp. und 50—60 Volt; der Strom stieg auf 0,9 Amp., die Spannung sank auf 30—40 Volt — dann verlöschte aber der Bogen von selbst. Bei höherem Druck steigt die Spannung, wie gewöhnlich, mit diesem. So erhielt ich bei ca. 2 Amp.

Druck	75	150	260 mm
Volt	36	41	47

26. *Messing in H.* Die Versuche mit Messing wurden angestellt, weil hier durch das Zn ein Bogen zu Stande kommt, während die Elektroden dauerhafter sind als reine Zn-Elektroden. So konnte man hier den Bogen brennen lassen, während durch Zuströmen von H der Druck wuchs, und so die Grenze bestimmen, oberhalb deren der Bogen sich nicht mehr hält. Es ergab sich bei einem Abstand von 1,4 mm

a)			b)		
Druck	Amp.	Volt	Druck	Amp.	Volt
103 mm	1,7	56	105 mm	2,6	49
—	—	58	140	—	47
140	—	60	170	—	55—42
—	—	62	200	2	63 (verlöscht)
155	1,4	65 (verlöscht)			

In der Tab. b) macht sich die bei den Versuchen mit Zn-Elektroden erwähnte Spannungsabnahme durch längeres Brennen bemerkbar (Verdrängung des H durch Zn-Dampf § 24).

Nach den Versuchen zeigte sich die Messinganode innen völlig kupferrot; unter dem Mikroskop sah man viele Schmelzkügelchen aus Cu. Die Kathode hatte, wie bei den meisten Metallen, eine gerauhte Oberfläche bekommen; ausserhalb des Streifens, der der Anode unmittelbar gegenübergestanden, hatte sie alle möglichen Färbungen von rot bis blau angenommen; an einzelnen Stellen fanden sich kleine schwarze Ablagerungen, offenbar von Zn aus der Anode.

27. In grossen Zügen lassen sich die Metalle bezüglich des Lichtbogens in H folgendermaassen ordnen:

Kupfer und Aluminium, die in N sehr schöne Bogen lieferten, versagen in H so gut wie vollständig. Platin und Silber erfordern sehr hohe Stromstärken, die sofort die Elektroden gefährden, sodass namentlich das Silber für Messungen fast ungeeignet ist. Dasselbe gilt für das Eisen und namentlich wegen des niedrigen Schmelzpunktes für Blei — das Zinn ist überhaupt ungeeignet. Am günstigsten verhalten sich Cadmium, Zink und Magnesium. Inwieweit dieses Verhalten der Metalle in H-Atmosphären mit den chemischen Beziehungen zwischen ihnen und dem Gas zusammenhängt, dürfte bei der geringen Kenntnis von den Hydrüren, die zum Teil überhaupt

noch nicht dargestellt, und soweit sie dargestellt, zum Teil noch bestritten sind, noch nicht zu entscheiden sein.

Zum Schluss betone ich noch einmal, dass, abgesehen von der durch die Natur der Versuche bedingten Unsicherheiten, die vorgelegten Resultate nur Geltung haben für das Bereich von Stromstärken und Spannungen, das mir zur Verfügung stand. Dass man die Stromstärken noch erheblich steigern kann, erscheint mir zweifelhaft; immerhin ist es nicht ganz ausgeschlossen, wenn man massivere Elektrodenformen wählt. Dagegen glaube ich, dass man mit höheren Spannungen noch zu interessanten Ergebnissen gelangen kann — die Versuche werden sogar einfacher auszuführen sein, da man voraussichtlich mit geringeren Stromstärken wird arbeiten können. Versuche in dieser Richtung (vgl. § 14) habe ich vorbereitet — hoffentlich findet sich bald die Gelegenheit zu ihrer Ausführung!

Berlin, März 1900.

(Eingegangen 21. März 1900.)
