

3. *Akustische Erscheinungen am electrischen Flammenbogen* ¹⁾; von *Hermann Th. Simon*.

1. *Legt man den Stromzuführungsdrähten einer electrischen Gleichstrombogenlampe parallel eine zweite, von schwachen intermittirenden Strömen durchflossene Leitung, so tönt der Lichtbogen mit einem intensiven knatternden Geräusch.*

Zur Erzeugung der intermittirenden Ströme im Nebenstromkreise kann man einen von einem Element betriebenen Stimmgabelunterbrecher, den Neef'schen Hammer eines kleinen Inductoriums und ähnliche Vorrichtungen benutzen.

2. Dieses Knattern beobachtete ich, als ich mit einer Bogenlampe arbeitete, während in einem benachbarten Zimmer ein Inductorium in Gang war: Die Bogenlampe sowohl, wie das Inductorium wurden aus derselben Accumulatorenatterie gespeist, deren Zellen durch einen Zellenschalter am Schaltbrett in die entsprechenden Leitungsnetze vertheilt werden. ²⁾ Da das Schaltbrett von der Batterie ca. 15 m entfernt ist, so laufen die Verbindungsdrähte der Zellen mit dem Zellenschalter auf dieser Strecke nebeneinander her. Die durch die Unterbrechungen am Inductorium in seinen Zuführungsdrähten erzeugten intermittirenden Ströme induciren in den Zuführungsdrähten der Bogenlampe schwache secundäre Ströme, welche sich über den Lampengleichstrom lagern und die beobachtete akustische Wirkung im Lichtbogen hervorrufen. — Dass diese Erklärung richtig ist, und dass es sich nicht etwa um eine Resonanzwirkung der von dem Inductoriumfunken ausgehenden electrischen Wellen handelt, wurde durch eingehende Versuche nachgewiesen.

3. Die Erscheinung bleibt unverändert, wenn an Stelle einer Bogenlampe mit Differentialregulirung ein Lichtbogen

1) Im Auszug mitgetheilt in der Sitzung der Erlanger physikalisch-medizinischen Societät vom 8. November 1897.

2) Vgl. E. Wiedemann, Das neue physikalische Institut der Universität Erlangen.

zwischen feststehenden Kohlenspitzen in den Stromkreis eingeschaltet wird. Sie spielt sich daher im Lichtbogen selbst ab, und die Kohlenspitzen, sowie der Regulirmechanismus sind nicht ihre Ursache.

4. Versuche, den wechselnden Schwingungszustand des Flammenbogens, der den Ton bedingt, durch Beobachtung im rotirenden Spiegel oder durch photographische Aufnahmen auf einer mit Bromsilberpapier überzogenen rotirenden Trommel auseinander zu legen, waren erfolglos. Die durch die überlagerten Inductionsstöße etwa veranlassten Zuckungen des Lichtbogens oder Schwankungen seiner Lichtstärke sind im Verhältniss zur Gesammthelligkeit zu klein, um mit den beschriebenen Mitteln beobachtet zu werden.

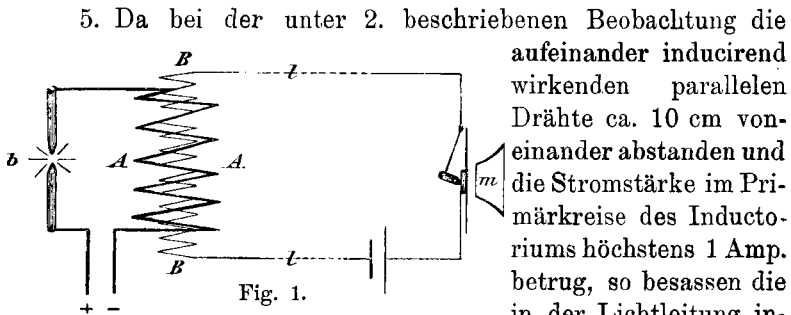


Fig. 1.

aufeinander inducirend wirkenden parallelen Drähte ca. 10 cm voneinander abstanden und die Stromstärke im Primärkreis des Inducto-riums höchstens 1 Amp. betrug, so besaßen die in der Lichtleitung inducirten Stromschwankungen eine relativ geringe Intensität. Daher war die starke akustische Wirkung zunächst überraschend.

6. Zur weiteren Untersuchung der Erscheinung wurde folgende Anordnung (vgl. Fig. 1) getroffen ¹⁾: In den Stromkreis des Lichtbogens *b* wurde eine Drahtspule *A* eingeschaltet. In dieselbe wurde eine Spule *B* (meist zur Verstärkung der gegenseitigen Induction mit einem Eisendrahtbündel versehen) eingeschoben, diese war durch eine längere Leitung *l* mit einem Mikrophon, das in einem entfernten Raume aufgestellt war und einem Accumulator zu einem Stromkreis verbunden. *Wurde das Mikrophon mit dem Stiel einer tönenden Stimmgabel berührt, so hörte man am Flammenbogen deutlich den Stimmgabelton. Ebenso*

1) Bei der Ausführung der folgenden Versuche hat mich Hr. A. Wehnelt in sehr dankenswerther Weise unterstützt.

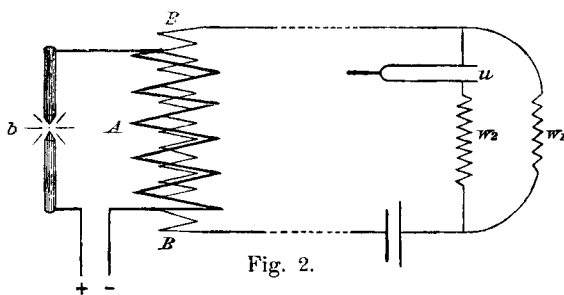
wurde Pfeifen, Klopfen, Singen, das Spiel einer Spieldose etc. aufs deutlichste übertragen und selbst in das Mikrophon hineingesprochene Worte wurden vom Flammenbogen verständlich wiedergegeben, mit jeder feinsten Schattirung der Klangfarbe. Bei lauterem Tönen von gewisser Tonhöhe singt der Flammenbogen laut zischend mit, wahrscheinlich, weil dann die Eigentöne des Mikrophons die Mikrophonschwankungen verstärken; doch gehen dann die feinen Klangunterschiede in dem Zischen des Bogens verloren. — Man hält zum Hören der Töne neben den Flammenbogen zweckmässig einen Glastrichter und leitet von ihm aus die Schallwellen durch einen oder zwei Gummischläuche ins Ohr.

In dem Flammenbogen treten demnach bei den kleinsten Schwankungen seiner Stromstärke Veränderungen auf, die entsprechende Dichteschwankungen der umgebenden Luft zur Folge haben und gegebenen Falles als Klänge wahrgenommen werden.

7. Diese Veränderungen bestehen in periodischen Schwankungen der Temperatur des Flammenbogens, die den Stromschwankungen parallel gehen und entsprechende Dichteschwankungen der umgebenden Luft bewirken.

Um über die Ordnung der hier in Betracht kommenden Grössen ein Urtheil zu gewinnen, wurde die folgende Messung und Berechnung angestellt.

Die Electricitätsmenge, die bei jeder einzelnen Schallwelle durch den Flammenbogen geht, ergab sich auf folgende Weise: Der Secundärstromkreis *B* (vgl. Fig. 2) wurde im Zweig w_1 dauernd geschlossen und ein Rheostat w_2 mit einem Stimmgabelunterbrecher *u* als Nebenschluss parallel zu w_1 geschaltet. Der Gesamtwiderstand der beiden Zweige, wenn der Unterbrecher in w_2 geschlossen ist, beträgt $W_g = w_1 w_2 / (w_1 + w_2)$, wenn er geöffnet ist $W_0 = w_1$. Infolge der Unterbrechungen bei *u* schwankt er zwischen diesen beiden Werthen so oft in der Secunde hin



und her, als die Stimmgabel Schwingungen macht. In dem Stromkreise B entstehen ebenso viele Stromschwankungen, die im Stromkreise A je einen Oeffnungs- und einen Schliessungsstoss erregen. Je grösser w_2 ist, desto mehr nähert sich $w_2/(w_1 + w_2)$ der Einheit, desto schwächer werden die Inductionsstösse in A . w_2 wurde so gewählt, dass man beim Arbeiten des Unterbrechers u eben noch das Knattern des Flammenbogens im Stromkreis A hörte. Dann wurde an Stelle des Flammenbogens ein empfindliches ballistisches Galvanometer ¹⁾ eingeschaltet. Die Widerstände der die Bogenlampe bez. das Galvanometer enthaltenden Zweige wurden durch zugeschalteten Ballastwiderstand gleich gemacht und statt des Stimmgabelunterbrechers ein gewöhnlicher Stromschlüssel eingeschaltet. Die bei jedem Oeffnen und Schliessen desselben durch das Galvanometer gehende Electricitätsmenge war so nahe gleich der, die bei den ersten Versuchen je eine Schallwelle erregte. Sie ergab sich, in bekannter Weise nach der Gauss'schen Zurückwerfungsmethode bestimmt, zu

$$e = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Coulomb.}$$

Nach den neueren Forschungen über die Natur des Uebergangswiderstandes des Flammenbogens ²⁾ setzt sich derselbe aus zwei Bestandtheilen zusammen, einem durch die Verdampfung der Kohlen bedingten und einem als Leitungswiderstand in dem Bogen selbst aufzufassenden Antheil. Entsprechend dem ersten Antheil ändert sich das Potential beim Uebergang von den Kohlen in den Flammenbogen um $m = \text{ca. } 40$ Volt, während die Aenderung desselben für jeden Millimeter der Flammenbogenlänge nur $n = 1,9$ Volt beträgt. ³⁾ Die Stromarbeit, die einem Stromstosse von der hier betrachteten Art entspricht, wird also auch nur mit einem Bruchtheile zur Erwärmung des Lichtbogens, zum weitaus grösseren Theile vielmehr als Verdampfungswärme aufgewendet.

Die beim Uebergang der Electricitätsmenge e vom Potential E_1 bis E_2 geleistete Arbeit ist

$$w = 0,24 e \varepsilon \text{ Cal.,}$$

1) Das von H. E. J. G. du Bois u. H. Rubens, Wied. Ann. 48. p. 236. 1893 beschriebene mit schwerem Magnetsystem.

2) Vgl. E. Voit, Der electrische Lichtbogen, p. 41—43. Stuttgart 1896.

3) Vgl. E. Voit, l. c. p. 27.

wo $\varepsilon = E_1 - E_2$. Da die Länge meines Flammenbogens 0,5 cm war, so ist für den vorliegenden Fall

$$\varepsilon = n \cdot 0,5 = 1,9 \cdot 0,5 = 0,95 \text{ Volt}$$

zu setzen.

Die entsprechende Stromarbeit ist

$$w_0 = 0,24 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95.$$

Der Durchmesser meines Flammenbogens war 0,6 cm, seine Länge 0,5, sein Volumen also 0,14 cm³. Wenn wir seine Dichte gleich derjenigen der Luft, seine Temperatur gleich 3000° setzen, eine Zahl, die nach Versuchen von J. Violle¹⁾ eher zu klein als zu gross ist, so ergibt sich seine Masse zu

$$m = \frac{0,14 \cdot 0,0013}{\left(1 + \frac{3000}{273}\right)}.$$

Für die spezifische Wärme der Gase des Flammenbogens setzen wir die der Luft 0,24 und erhalten die zur Erwärmung um x° nöthige Wärmemenge

$$Q = 0,24 \frac{0,0013 \cdot 0,14}{\left(1 + \frac{3000}{273}\right)} x \text{ Cal.}$$

Unter der Annahme, dass alle Stromarbeit w_0 zur Temperaturerhöhung verwendet wird, ist $Q = w_0$ zu setzen, und es ergibt sich

$$x = 0,3^\circ \text{ C.},$$

d. h. die Temperatur des Flammenbogens würde sich bei dem Durchgange jedes durch eine Schallwelle hervorgerufenen Stromstosses um 0,3° erhöhen.

Die Druckänderung, die die Gase des Flammenbogens durch diese Temperaturerhöhung erfahren, ergibt sich zu

$$\Delta p = \frac{0,3}{273 + 3000} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Atmosphären.}$$

Wenn Lord Rayleigh²⁾ für die kleinsten noch als Ton zur Wahrnehmung gelangenden Druckschwankungen der Luft den Werth $\Delta p = 6 \cdot 10^{-9}$ Atmosphären findet, so dürfte das dem oben gefundenen Resultate nicht widersprechen, wenn man

1) J. Violle, Compt. rend. **119**. p. 940. 1894; Beibl. **19**. p. 258. 1895.

2) Lord Rayleigh, Phil. Mag. (5) **38**. p. 365—370. 1894; Beibl. **19**. p. 407. 1895.

berücksichtigt, dass die oben gewonnene Zahl an sich nur eine obere Grenze darstellt. Denn das beobachtete Knattern ist kein einfacher Ton, sondern enthält Obertöne, die sämtlich vom Ohre wahrgenommen werden, also auch durch entsprechende Bruchtheile der ermittelten Gesamtdruckschwankung im Flammenbogen erzeugt werden.

8. Vergrössert man die Länge des Lichtbogens, so werden die durch dieselben Stromstösse erzeugten Töne wesentlich lauter und deutlicher. Diese Thatsache steht mit den Ausführungen unter 7. durchaus im Einklange und bestätigt insbesondere die dort erwähnten Anschauungen über den Uebergangswiderstand des Flammenbogens. Denn da mit wachsender Länge des Flammenbogens der Leitungswiderstand des Bogens grösser, so entfällt jetzt ein grösserer Bruchtheil der Stromerbeit auf die Erwärmung des Flammenbogens, es wird ein grösseres Gasvolumen erwärmt, und die Töne werden lauter.

9. Versucht man dieselben Stromstösse, die am Flammenbogen die beschriebene Wirkung äussern, zwischen Spitzen übergehen zu lassen, die sich in der etwa durch Kalium oder Natrium leitend gemachten Flamme des Bunsenbrenners gegenüberstehen, so bleibt jede akustische Wirkung aus. Dieselbe scheint also auf die gutleitenden Gase des Flammenbogens beschränkt zu sein.

10. Nach diesen Versuchen reagirt der Flammenbogen auf Stromschwankungen durch Druck- bez. Volumänderungen. *Umgekehrt können Druckschwankungen, wie sie in Schallwellen enthalten sind, Stromschwankungen hervorrufen. Der Flammenbogen kann nicht nur Stromschwankungen in Töne, sondern auch Töne in Stromschwankungen umwandeln, die inducirend auf einen zweiten durch ein Telephon geschlossenen Stromkreis einwirken und dort wieder als Töne wahrgenommen werden.*

Die Anordnung des Versuches war folgende: Im Hauptstromkreis des Flammenbogens befindet sich wieder die oben erwähnte Spule *A*, in derselben Spule *B*, an die jetzt statt des Mikrophons ein Telephon angeschlossen ist. Durch einen Trichter werden die Schallwellen auf den Flammenbogen concentrirt. Spricht, singt, pfeift man in denselben, so giebt das Telephon alles deutlich und der Klangfarbe entsprechend wieder.

11. Die Erklärung ist folgende: Bekanntlich ist die Grösse des Uebergangswiderstandes des Flammenbogens durch die Dichte der umgebenden Luft wesentlich mitbestimmt. Geht eine Schallwelle durch die Gase des Flammenbogens, so entstehen periodische Schwankungen des Uebergangswiderstandes und so der Stromstärke, welche den Dichteschwankungen in dem Flammenbogen folgen. Diese Stromschwankungen werden durch Induction in bekannter Weise in den Telephonstromkreis übertragen und im Telephon in Schallwellen umgewandelt.

Ergebnisse.

a) *Der Flammenbogen verwandelt periodische Stromschwankungen, die sich über seinen Hauptstrom lagern, bis in alle Einzelheiten der Klangfarbe in Töne. Er konnte somit als Empfänger bei mikrophonischer Uebertragung jeder Art von Klang und Geräusch dienen.*

b) *Der Flammenbogen reagirt auf die kleinsten Dichteschwankungen der umgebenden Luft durch entsprechende Schwankungen seiner Stromstärke und konnte somit als Geber bei telephonischer Uebertragung jeder Art von Klang und Geräusch dienen.*

Erlangen, Physik. Inst. d. Univ., October 1897.

(Eingegangen 23. December 1897.)
