8. Ueber die *Elektricitätsleitung in Flammen*; von *P. Lenard*.

1. Dass brennende Gase verhältnismässig gute Leiter der Elektrizität sind, besonders wenn sie gewisse Metallsalze enthalten, ist bekannt, und man pflegt den Vorgang dieser Elektrizitätsleitung gegenwärtig mit der Elektrolyse von Flüssigkeiten in Parallele zu stellen. Obgleich nun kaum zu bezweifeln sein wird, dass die Leitung auch in den Flammen in Wanderungen positiver und negativer Elektrizitätsträger bestehe, so erscheint es doch fraglich, welcher Natur diese wandernden Träger hier seien.

Es soll im Vorliegenden eine Erscheinung beschrieben werden, welche elektrische Wanderungen in Flammen unmittelbar sichtbar macht und die, obgleich sie leicht herstellbar ist, doch bisher nicht beachtet worden zu sein scheint.¹⁾

2. Eine Bunsenflamme befinde sich zwischen zwei verticalen, einander parallelen und entgegengesetzt elektrisirten Metallplatten, also in einem horizontal verlaufenden elektrischen Felde. Bringt man dann, wie zum Zwecke der Spectralanalyse, eine Salzperle in die Flamme, so bemerkt man, dass der von der Perle aus sich bildende, kometenförmige, farbig leuchtende Dampfstreifen nicht, wie sonst, senkrecht nach oben, sondern schräg verläuft, und zwar ist er immer nach der negativen Platte hin geneigt. Die Salze der Alkalien und Erdalkalien zeigen die Erscheinung ausgeprägt, doch ist sie auch bei anderen Stoffen zu beobachten (6). Die Neigung des Dampfstreifens kann sehr gross werden, z. B. 45° übersteigen; in

1) Die Literatur des Gegenstandes dürfte vollständig berücksichtigt sein in G. Wiedemann, *Lehre von der Elektrizität* 4. 1885; J. J. Thomson, *Recent Res. on Electricity and Magnetism* 1893; H. Kayser, *Handbuch der Spectroskopie* 2. 1902.

jedem Falle wird die Erscheinung bei abwechselndem Laden und Entladen der Elektrodenplatten sehr auffällig.

Steht die negative Platte in einiger Entfernung vom Flammensaum, so sieht man den farbig leuchtenden Dampf auch seitlich, aus der Flamme heraus, seinen Weg gegen diese Platte hin fortsetzen, wobei ihn ein Teil der Flamme selbst begleitet¹⁾, sodass diese einen seitlichen Fortsatz erhält, während sie im übrigen so ruhig und ungestört bleibt, wie ohne Einführung der Salzperle.

Eine Influenzmaschine genügt als Elektricitätsquelle, wenn die Platten nicht zu dicht an die Flamme gestellt sind, sodass sie nicht mehr als dunkelrot glühen; die Maschine muss dauernd im Gange gehalten werden und eine parallel zu den Platten geschaltete Funkenstrecke von etwa 1 mm Länge kann dazu dienen, übermässig hohe Ladungen, welche die Flamme unruhig machen würden, auszuschliessen. Besonders rein zeigt sich die Erscheinung bei Anwendung einer vielzelligen Accumulatorenbatte; es können dann die Platten, oder besser feine Netze aus Platin, auch in den Flammenmantel selbst gestellt werden. Eine Spannung von etwa 2000 Volt erweist sich im letzteren Falle als zweckmässig.

Eine Wasserstoffflamme, klein aus feiner Platinspitze oder auch gross aus einem Bunsenbrenner kommend, kann die Leuchtgasflamme mit gutem Erfolge ersetzen. Auch im Leuchtgas-Sauerstoffgebläse zeigt sich die Erscheinung, wenn auch hier, bei der grösseren Flammengeschwindigkeit, die Schiefe des Metalldampfstreifens viel geringer ausfällt, als in den anderen Flammen.

3. Die Erscheinung macht es leicht, die Wanderungen der leuchtenden, positiven Elektricitätsträger²⁾ in der Flamme zu verfolgen und alle Einflüsse auf die Geschwindigkeit dieser

1) Dies scheint anzudeuten, dass ausser dem leuchtenden Metaldampfe, zugleich mit demselben, auch noch andere positive Träger in der Flamme auftreten (vgl. 7, 8).

2) Ihrer Wanderung nach enthalten die leuchtenden Metallatome überschüssige positive Elektricität, was auch Mangel an negativer Elektricität sein kann; der von Hrn. Zeeman gefundenen Erscheinung nach enthalten sie auch schwingende negative Elektricität. Es ist jedoch nicht notwendig anzunehmen, und es soll auch nicht behauptet werden (vgl. 8, 9, 10), dass beides gleichzeitig stattfindet.

Wanderung schnell zu erkennen. Einige Beispiele mögen dies zeigen.

Führt man eine Kochsalzperle vorsichtig so weit an den Flammensaum heran, dass sie diesen eben zu färben beginnt, so leuchtet zwar der Natriumdampf, ohne jedoch in diesem Falle irgendwie merklich zu wandern; der Dampfstreifen steigt senkrecht auf. Erst wenn die Perle in das Innere des Flammensmantels geführt wird, kommen, oft ruckweise plötzlich, die oben beschriebenen Wanderungserscheinungen zu stande. Auch bei anderen Stoffen habe ich bemerkt, dass im äussersten Saum der Flamme die Wanderung fehlt, so bei Lithiumcarbonat, Kupferchlorid, Selen, Borsäure, welche alle, in den Mantel der Flamme eingeführt, Wanderung nach der negativen Seite hin ergeben. Stoffe, wie die Verbindungen der Erdalkalien, die überhaupt erst im Innern des Flammensmantels merklich verdampfen, zeigen jederzeit die Wanderung.

Aber auch in demselben Teil der Flamme zeigt nicht jeder Stoff unter allen Umständen die gleiche Wanderungsgeschwindigkeit; dieselbe kann vielmehr durch ganz geringe Mengen fremder Stoffe sehr verändert werden. Befindet sich eine Perle von Natriumsilicat im Mantel der Flamme, und beträgt die Schiefe des Dampfstreifens etwa 8° , so genügt das Heranführen eines kleinen Platinlöffelchens voll Salzsäure unterhalb der Perle an den Flammensaum, um sogleich jene Schiefe auf etwa 30° zu bringen. Man kann ebenso auch die Salzsäure einem der unteren Luftlöcher des Brenners nähern und sie abwechselnd von dort wieder entfernen, um grosse und geringe Wanderung in regelmässigem Wechsel zu erzeugen. Lässt man die Salzsäuremenge in der Flamme mehr und mehr zunehmen, so wird schliesslich der Natriumdampf entleuchtet; dabei bleibt die verstärkte Wanderung bis zum letzten Augenblicke der Sichtbarkeit des Dampfes fortbestehen. Kochsalz statt Natriumsilicat als Perle ergibt unmittelbar, ohne Zuhilfenahme der Salzsäure, die stärkere Wanderung.

Ganz die gleichen Erscheinungen der durch Salzsäuredämpfe verstärkten und bis zur Entleuchtung hin verstärkt bleibenden Wanderung habe ich auch bei Lithiumcarbonat und Lithiumsulfat gesehen, ebenso wie bei vorher schon länger geglühten, also chlorarmen Baryumchloridperlen. Frisches Chlor-

baryum giebt anfänglich viel stärkere Wanderung als nach einigem Glühen. Man kann also sagen, dass Chlorgehalt der Flamme durchweg verstärkte Wanderung der positiven Metallträger zur Folge hat.

Im Falle des Baryums ist die verstärkte Wanderung der Träger auch mit veränderter Lichtemission derselben verbunden; man weiss, dass Chlor zwei grüne Linien, Chloridlinien genannt, im Flammenspectrum des Baryums besonders hervortreten lässt.

4. Mit verstärkter Wanderung der positiven, metallhaltigen Träger ist auch verstärkte Leitfähigkeit der Flamme verbunden.¹⁾ Dies zeigt sich bei Messung der Spannungsdifferenz der beiden Flammenelektroden, wenn dieselben unter Einschaltung grosser Widerstände mit einer Accumulatorenatterie als Elektrizitätsquelle verbunden sind. Diese Spannungsdifferenz bleibt merklich ungeändert, wenn nur der Saum der Flamme durch Natriumsilicat gefärbt wird, sie ist sehr vermindert, wenn die Silicatperle im Mantel glüht und sie ist noch viel mehr vermindert, wenn Salzsäure hinzukommt. Ganz dieselben Eigentümlichkeiten zeigt auch die Spannungsdifferenz von Drahtsonden (vgl. 7), welche man in den benutzten Teil der Flamme einführen kann.

5. Die Wanderungserscheinung tritt auch in der freien Flamme auf; es ist nicht nötig, dass feste Körper in ihr glühen oder dass die Salzperle im elektrischen Felde sich befinde. — Man prüft dies am besten, wenn man die beiden Elektrodenplatten weit ausserhalb der Flamme anbringt und den der negativen Platte zugewandten Flammensaum beobachtet, an welchem dann der oben (2) beschriebene Fortsatz sich zeigt. Ich habe Chlornatrium benutzt; die Perle wurde an der beobachteten Seite in den Flammenmantel eingeführt einmal im elektrischen Felde selbst, das andere Mal tiefer unten, im Innern eines auf den Brenner gesetzten Metallschornsteines; die Erscheinung war in beiden Fällen die gleiche. Sie fehlte auch dann nicht, wenn die Natriumflamme ohne Benutzung einer Platinöse erzeugt wurde, nämlich durch An-

1) Dieser Zusammenhang wäre nach späterem (8, 9, 10) als indirect dahin aufzufassen, dass sowohl die Elektricitätsleitung in der Flamme als auch die Ladung und also die Wanderung der oben genannten Träger Folgen der stattfindenden inneren Erschütterung dieser Träger sind.

näherung eines mit dem geschmolzenen Salz gefüllten Löffelchens an eines der unteren Luftlöcher des Brenners.¹⁾

6. Nicht nur die Dämpfe der Alkali-, Thallium- und Indiumsalze, sowie die der Erdalkaliverbindungen wandern nach der negativen Seite hin, sondern auch die Dämpfe der Borsäure, des Selens, Tellurs, Kupferchlorids.²⁾ Hieran reiht sich ferner die alte Erfahrung, dass die leuchtenden, kohlehaltigen Teile einer ohne genügende Luftzufuhr brennenden Leuchtgasflamme das Gleiche thun, ebenso wie man auch die reine, mattbläulich leuchtende Bunsenflamme oder Wasserstoffgasflamme selber, in allerdings sehr geringem Maasse, gegen die negative Platte hin sich neigen sieht.

Es wandern also eine grosse Zahl der verschiedensten leuchtenden Stoffe in Flammen nach der negativen Seite hin; niemals aber habe ich eine Wanderung von etwas Materiellem nach der positiven Seite hin beobachten können, und auch durch besondere Reagentien gelang es nicht, ein negatives elektrolitisches Ion in der Flamme nachzuweisen. Wurde z. B. neben eine Kochsalzperle, gegen die positive Platte zu, dicht ausserhalb des wandernden gelben Dampfstreifens ein reiner Kupferdraht in den Saum oder auch in den Mantel der Flamme gebracht, so trat an dem Drahte doch keine Spur der grünen oder blauen Kupferfärbung auf, welche ein höchst empfindliches Mittel ist, Chlor in der Flamme am Orte des Drahtes nachzuweisen. Auch dann erschien die Färbung am Kupferdraht nicht, wenn dieser selbst zur positiven Elektrode gemacht wurde.

Nach allen diesem muss es sehr zweifelhaft erscheinen, ob die Elektrizitätsleitung in Flammen mit Recht und in

1) Das Obige (5, 4) widerspricht Hrn. H. A. Wilson's Resultat, wonach die salzbaltigen Flammen erst durch Einführung der glühenden Elektroden ihr besonderes Leitungsvermögen erhalten sollen (Phil. Trans. A. 192. p. 513. 1899).

2) Dass Kupferverbindungen in Hrn. Arrhenius' Versuchen (Bihang till K. Svenska A. Handlingar (I) 16. p. 1. 1891) die Flamme nicht merklich leitend machten, dürfte mit der obigen Erfahrung deshalb in keinem Widerspruch stehen, weil geringe Mengen von Kupferverbindungen, mit der Luft der Flamme zugeführt, nur den äussersten Saum der Flamme färben, wie ich finde, woselbst aber die Wanderung fehlt (3, 4).

wahrem Sinne mit der Elektrolyse von Flüssigkeiten in Parallele zu stellen sei.

7. Eine Messung der Wanderungsgeschwindigkeiten der sichtbaren, positiven Träger, welche sonst nur auf Umwegen möglich war, ist direct ausführbar, sobald man die Geschwindigkeit des Aufsteigens der Flammengase kennt. Diese zu ermitteln, wurde der benutzte Brenner mit seiner Flamme auf der Centrifugalmaschine im Kreise herumbewegt, sodass die Flamme an der Stelle der halben Höhe ihres inneren Kegels eine Neigung von 45° zur Verticalen annahm. Die hierzu nötige Geschwindigkeit, welche 110 cm/sec betrug, ist gleich der gesuchten aufsteigenden Geschwindigkeit an derjenigen Stelle der Flamme, auf welche es ankommt. Das Product dieser Geschwindigkeit in die Tangente des Winkels, welchen der Dampfstreifen im elektrischen Felde mit der Verticalen bildet, ist die Wanderungsgeschwindigkeit im benutzten Felde.

Bei den Dämpfen einer Lithiumcarbonatperle war beispielsweise jener Winkel 10° ; zugleich ergaben zwei feine, verticale, im horizontalen Abstand von 1,0 cm als Sonden im Flammenmantel glühende Platindrähte eine Spannungsdifferenz von 250 Volt. Hieraus folgt die Wanderungsgeschwindigkeit der rot leuchtenden Lithiumträger

$$110 \cdot \operatorname{tg} 10^\circ / 250 = 0,08 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \bigg/ \frac{\text{Volt}}{\text{cm}}.$$

Diese Geschwindigkeit ist fast 1000 mal kleiner als die auf anderem Wege von Hrn. Wilson für die positiven Träger einer Lithiumcarbonatflamme gefundene Geschwindigkeit, 63 cm/sec.¹⁾ Es ist indessen bei letzterem Resultate fraglich, ob es sich auf die leuchtenden Metallträger bezieht oder aber auf andere, mit den Metaldämpfen gleichzeitig in der Flamme auftretende, positive Träger, von deren Vorhandensein oben (2) Anzeichen erhalten wurden. Die zweifellose Verschiedenheit der beiden Geschwindigkeiten scheint ein weiteres Zeichen für die Bildung solcher positiven Träger zweiter Art zu sein.²⁾

1) H. A. Wilson, l. c. p. 516.

2) Die Bildung solcher Träger zweiter Art würde drittens angezeigt werden durch den Nachweis, dass Salzdämpfe den Elektrizitätstransport in einer Flamme mehr vergrößern können als der Valenzenzahl der ein-

Die übrigen von mir beobachteten Perlensubstanzen ordnen sich nach zunehmender Neigung ihrer Dampfstreifen im Flammenvogel (vgl. 3) etwa wie folgt:

1. Borsäure,	7. Chlorkalzium, frisch,
2. Lithiumcarbonat,	8. Kupferchlorid,
3. Natriumsilicat,	9. Thalliumchlorid,
4. Chlorstrontium, vorher geglüht,	10. Kaliumchlorid,
5. Chlorbaryum, desgl.,	11. Rubidiumchlorid.
6. Chlornatrium,	

8. Benutzt man die für die Wanderung elektrisch geladener Atome oder Moleküle geltende Beziehung¹⁾

$$\omega_b = \frac{3}{2\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{eF}{Ds^2W},$$

worin bedeutet ω_b die beobachtbare Wanderungsgeschwindigkeit, e die Ladung der Träger, F die Feldstärke, D die Dichte des Mediums, W dessen molekulare Geschwindigkeit²⁾, s die Radiensumme von Träger und Gasmolekül, so erhält man mit der oben (7) bei Lithiumcarbonat gefundenen Geschwindigkeit, $\omega_b = 0,08$ cm/sec, für die genannte Radiensumme den Wert

$$s = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ mm.}$$

Dies ist etwa 10 mal grösser als für Atome oder Moleküle als Träger zu erwarten gewesen wäre.³⁾ Treffen die in der Rechnung vorausgesetzten Bedingungen zu, so wäre danach zu schliessen, dass die rot leuchtenden Lithiumdämpfe aus Aggregaten sehr vieler Atome oder Moleküle bestünden. Dies scheint mit der Beschaffenheit des Spectrums dieser Dämpfe sowohl, wie mit der Höhe der Temperatur der Flamme kaum vereinbar zu sein. Die hier auftretende Schwierigkeit verschwindet,

geführten Salzmenge entspricht. Dieser Nachweis scheint mir aber in dem von Hrn. Arrhenius (l. c.) gegebenen reichen Beobachtungsmaterial schon enthalten zu sein.

1) P. Lenard, Ann. d. Phys. **3**, p. 313. 1900.

2) Als Medium ist hier Stickstoff von 2000° C. Temperatur angenommen. Nach der Zusammensetzung des Leuchtgases und der der atmosphärischen Luft ist jenes Gas der weitaus überwiegende Bestandteil der Bunsenflamme; doch würden andere mit Erfahrung vereinbare Annahmen über das Medium, soweit ich sehe, an den oben zu ziehenden Schlüssen nichts ändern.

3) Vgl. O. E. Meyer, Gastheorie, II. Teil. 1899.

indem wahrscheinlich wird (9, 10), dass die Metallatome der Dämpfe in der Flamme nicht, wie in der Rechnung vorausgesetzt, dauernd mit einem Elementarquantum positiver Elektrizität geladen sind, sondern dass sie fortdauernd negative Quanten austossen und dafür solche aus der Umgebung wieder aufnehmen, sodass im Mittel über die ganze Zeit ihrer Wanderung nur ein geringer Ueberschuss positiver Elektrizität in diesen Trägern vorhanden ist.¹⁾

9. Neben den positiven Trägern müssen in den ursprünglich unelektrischen, verbrennenden Gasen auch negative Träger entstehen; es ist schon oben (6) bemerkt worden, dass dieselben unsichtbar sind. Aus dem seit lange bekannten unipolaren Verhalten der Flammen war schon zu schliessen, dass diese Träger viel beweglicher seien als die positiven; ihre Wanderungsgeschwindigkeit beträgt nach kürzlich von Hrn. G. Moreau veröffentlichten Messungen, welche mit den von Hrn. Wilson früher gefundenen Näherungswerten in gutem Einklang sind, etwa

$$1200 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \bigg/ \frac{\text{Volt}}{\text{cm}}^{\frac{1}{2}},$$

und zwar wurde dieselbe Geschwindigkeit für eine Anzahl verschiedener Kalium- und Natriumsalze gefunden.²⁾

Diese sehr grosse Geschwindigkeit wäre mit der oben (8) benutzten Gleichung, welche für Atome oder Molecüle als Träger gilt, nur vereinbar durch die Annahme, dass jeder dieser Träger mit sehr vielen Elementarquanten negativer Elektrizität beladen sei.³⁾ Näher liegend nach heutiger Kenntnis und mit allem Vorhergehenden verträglich ist die andere Annahme, dass die unsichtbaren negativen Träger nicht materieller

1) Diejenigen anderen Atome oder Molecüle der Flamme, von welchen die Metallatome neue negative Quanten bezogen haben, wären als die positiven Träger zweiter Art anzusehen, deren Existenz in dreifacher Weise angezeigt erschien (2, 7).

2) G. Moreau, *Compt. rend.* **134**. p. 1575. 1902.

3) Durch Hrn. Arrhenius' Untersuchungen (l. c.) war es bereits sehr wahrscheinlich geworden, dass die negativen Träger aller salzhaltigen Flammen identisch seien.

4) Es ergibt sich mit $\omega_b = 1200 \text{ cm/sec}$ und $e = 1 \text{ El.-Qu.}$ die Radiensumme $s = 0,05 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$, was von kleinerer Grössenordnung ist, als die Durchmesser materieller Atome oder Molecüle.

Natur, sondern etwa identisch mit den Quanten der Kathodenstrahlen seien.

Als Emissionscentren dieser freien Quanten würden in salzhaltigen Flammen die Metallatome aufzufassen sein, denn von deren Zahl und Natur hängt nach den von Hrn. Arrhenius (l. c.) gefundenen Gesetzmässigkeiten allein das besondere Leitvermögen dieser Flammen ab.

10. Man würde danach die gegenwärtige Kenntnis über den behandelten Gegenstand durch die Vorstellung zusammenfassen können, dass die in Flammen in innerer Erschütterung befindlichen Atome des Kohlenstoffs (6), und noch viel mehr die eingeführter Metalle, Kathodenstrahlen emittieren, oder, in anderer Ausdrucksweise, radioactiv sind. Dass innere Erschütterung solche Emission in den genannten Stoffen wirklich auslösen kann, habe ich früher im Falle des ultravioletten Lichtes gezeigt.¹⁾

Kiel, Mitte August 1902.

1) P. Lenard, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien 108. p. 1649. 1899; Ann. d. Phys. 8. p. 149. 1902.

(Eingegangen 18. August 1902.)