

## 6. Ueber die Leitung der Electricität durch heisse Gase<sup>1)</sup>; von E. Pringsheim.

---

Wenn schon die experimentellen Resultate der verschiedenen Untersuchungen über die Electricitätsleitung heisser Gase einander nicht nur in quantitativer, sondern zum Theil auch in qualitativer Beziehung widersprechen, so herrscht noch viel weniger Uebereinstimmung in den theoretischen Ansichten über das Wesen dieser Leitung und über das Wesen der Electricitätsbewegung in Gasen überhaupt.

Zur experimentellen Untersuchung dieses Gegenstandes scheint es mir vor allem erforderlich zu sein, dass man die heissen Gase unter möglichst einfachen und bekannten äusseren Bedingungen beobachtet. Dieser Anforderung genügte der von mir früher<sup>2)</sup> beschriebene Ofen. Ein Porzellanrohr von 60 cm Länge und 3,6 cm lichter Weite wurde in seinem mittleren Theile in einer Länge von 22 cm von den Flammen umspült und in gleichmässige Gluth versetzt. Die Enden des Rohres waren durch aufgekittete Messingfassungen luftdicht verschlossen und wurden durch Wasserspülung gekühlt. Ein Ansatzrohr in der einen Messingfassung führte zu einem Dreiweghahn, durch welchen man das Porzellanrohr abwechselnd nach Belieben mit einer Luftpumpe, einem Kohlensäure- oder einem Wasserstoffapparat in Verbindung setzen konnte. Vor dem Eintritt in das Porzellanrohr hatten die zu untersuchenden Gase eine U-Röhre mit Chlorcalcium zu passiren; der Wasserstoff wurde durch zwei Woulff'sche Flaschen mit übermangansaurem Kali und mit concentrirter Schwefelsäure geleitet. In das Porzellanrohr waren zwei Electroden so eingeführt, dass sie im Innern das Rohr nirgends berührten und nur in den gekühlten Messingfassungen, voneinander vollkommen isolirt, befestigt waren. Als Electroden dienten zunächst kreisförmige

---

1) Der wesentliche Inhalt dieser Arbeit ist schon in den Berliner Ber. 18. p. 331—334. 1895 veröffentlicht.

2) E. Pringsheim, Wied. Ann. 45. p. 428. 1892.

Platinbleche von 1 cm Durchmesser und 1 mm Dicke, welche sich in der festen Entfernung von etwa 3 mm in der Mitte des Rohres vertical einander gegenüber befanden. Sie wurden von langen Platindrähten gehalten, welche ihrer ganzen Länge nach in Capillarröhren von Porzellan eingeschlossen waren und von diesen getragen wurden. Diese Electroden konnten in einen Stromkreis eingeschaltet werden, in welchem sich ein Galvanometer von du Bois und Rubens befand; der Widerstand des Galvanometers betrug 8000 Ohm, einem Millimeter Ausschlag entsprach eine Stromstärke von etwa  $2,10^{-10}$  Amp. Als Stromquelle konnten nach Belieben 1, 2, 5 oder 10 Trockenelemente von je etwa 1,6 Volt benutzt werden.

Die Versuche ergaben zunächst, dass Luft,  $\text{CO}_2$  und H bei den angewendeten electromotorischen Kräften bei eben beginnender Rothgluth den electricen Strom merklich zu leiten anfangen, und dass die Leitungsfähigkeit mit steigender Temperatur stark zunimmt. Dabei wächst die beobachtete Stromintensität schnell mit abnehmendem Drucke, sie ist unter sonst gleichen Umständen am grössten für H, kleiner für Luft, noch kleiner für  $\text{CO}_2$ . Die Leitung ist, obwohl die beiden Electroden einander möglichst genau gleich gemacht waren, deutlich von der Stromrichtung abhängig. Diese Beobachtungen bestätigen vollkommen die alten Angaben von E. Becquerel<sup>1)</sup>; dass neuere Beobachter negative Resultate erhalten haben, ist wohl durch ungünstige Versuchsanordnungen verschuldet.

Die Leitung der heissen Gase zeigt starke Abweichungen vom Ohm'schen Gesetz; die Stromintensität steigt viel schneller als die electromotorische Kraft. Daher kann man nicht ohne weiteres von einem bestimmten Widerstand der Gase sprechen. Die Versuche führten zu einem empirischen Gesetz, durch welches bei constanter Temperatur (mässige Rothgluth) innerhalb der Beobachtungsfehler alle Beobachtungen mit vollkommener Genauigkeit dargestellt werden. Es lautet:

$$(1) \quad i = \frac{e + a e^2}{w}.$$

Hier bedeutet  $i$  die Stromintensität,  $e$  die electromotorische

1) E. Becquerel, Ann. de chim. et de phys. (3) 39. p. 355. 1853.

Kraft,  $a$  eine von der Natur der Electroden und von der Stromrichtung abhängige Constante;  $w$  ist bei constantem Druck ebenfalls constant und dem Drucke innerhalb des beobachteten Intervalles von 6—64 cm Quecksilberdruck nahezu proportional.

Wenn man die Abweichung vom Ohm'schen Gesetz als eine nur scheinbare auffasst, veranlasst durch Veränderungen, welche der Widerstand des Gases durch die Stromleitung selbst erfährt (eine Auffassung, welche im Folgenden ihre Stütze findet), so kann man auch schreiben:

$$(2) \quad i = \frac{e}{w'},$$

wo  $w'$  den von der Stromleitung abhängigen variablen Widerstand bedeutet.

Dann folgt aus Gleichung (1)

$$w = w' (1 + a e).$$

Nimmt man also an, dass die Gleichung (1) bis zu dem Grenzwert  $e = 0$  gilt, so ist  $w = w'$  für  $e = 0$ .

Man kann also  $w$  unter dieser Voraussetzung als den wirklichen Widerstand des unveränderten Gases auffassen.

Um die Gesetze der Gasleitung genauer untersuchen zu können, änderte ich die Versuchsanordnung so, dass ich die Entfernung der Electroden während der Versuche in messbarer Weise variiren konnte. Es zeigte sich eine starke Abnahme der Intensität mit zunehmendem Abstände der Electroden. Eine genaue Messung dieser Abhängigkeit wurde jedoch zunächst dadurch vereitelt, dass bei geringem Electrodenabstand, 0,5—1,5 mm, wobei die Stromintensität und die Stromdichtigkeit verhältnissmässig gross waren, das Galvanometer nicht in regelmässiger Weise um eine Ruhelage pendelte, sondern zunächst bei Stromschluss einen sehr grossen Ausschlag gab, oft mehrere tausend Scalentheile, darauf aber erst sehr schnell, dann allmählich immer mehr zurückging, um erst nach sehr langer Zeit, bis 10 Minuten und darüber, eine constante Lage anzunehmen — vorausgesetzt, dass es gelang, die äusseren Bedingungen, Temperatur, Druck etc., so lange Zeit vollkommen constant zu erhalten. Da diese Erscheinung auf den ersten Blick den Eindruck der Polarisation machte, so schaltete

ich, nachdem der Strom eine Zeit lang in bestimmter Richtung durch das Gas hindurchgegangen war, die Elemente aus und verband die beiden Electroden ohne äussere electromotorische Kraft direct mit dem Galvanometer. Es zeigte sich ein deutlicher Polarisationsstrom von entgegengesetzter Richtung wie der Ladungsstrom, welcher bei dauerndem Stromschluss erst schnell, dann allmählich zurückging. Dieser Polarisationsstrom ist im allgemeinen erheblich schwächer als der Ladungsstrom, seine Intensität hängt von der Dauer des Ladungsstromes ab. Vermindert man, während der Polarisationsstrom geschlossen ist, den Widerstand des Gases dadurch, dass man die Electroden einander nähert oder dass man den Gasdruck verringert, so nimmt die Intensität des Polarisationsstromes zu. Man kann dabei leicht Ausschläge von mehreren hundert Scalentheilen erhalten. In dem Augenblicke, in dem man die beiden Electroden so weit nähert, dass sie sich direct berühren, hört die Polarisation auf. Entfernt man die Electroden nach kurzer Zeit wieder voneinander, so zeigt das Galvanometer keinen Polarisationsstrom mehr an.

Der Polarisationszustand der Electroden kann sehr lange unverändert erhalten werden und nimmt nur sehr allmählich von selbst ab. Wenn man die geladenen Electroden ruhig stehen lässt, so kann man den Polarisationsstrom noch eine halbe Stunde nach der Ladung nachweisen. In einem Versuche löschte ich die Flammen des Ofens nach der Ladung aus und liess das Gas sich abkühlen, bis keine Gluth und keine Leitung mehr vorhanden war. Darauf wurde der Ofen wieder angeheizt, und als die Gluth sich wieder hergestellt hatte, etwa 15 Minuten nach der Ladung, stellte sich der Polarisationsstrom ohne neue Ladung wieder ein. Dagegen scheint ein starker Luftstrom die Polarisation zu zerstören; das ist wohl auch der Grund, weshalb es mir bisher nicht gelungen ist, die Erscheinung in einer frei brennenden Flamme zu beobachten.

Um die electromotorische Kraft der Polarisation zu messen, wurde eine Anzahl von Versuchen mit einem Thomson'schen Quadrantelectrometer vorgenommen. Es ergab sich, dass die maximale electromotorische Kraft der Polarisation unabhängig

ist von der electromotorischen Kraft des Ladungsstromes, dem Druck und der Stromintensität. Nur die Zeitdauer, welche der Ladungsstrom braucht, um die maximale Polarisation herbeizuführen, ist sehr verschieden und nimmt mit wachsender Stromdichtigkeit schnell ab. Ausserdem ist die electromotorische Kraft der Polarisation stark von der Temperatur abhängig und steht zweifellos in nahem Zusammenhange mit der Adsorption, für H und  $\text{CO}_2$  scheint sie nur wenig von dem Werthe für Luft abzuweichen. Die höchste bisher beobachtete electromotorische Kraft der Polarisation an Platinelectroden beträgt für Luft etwa 0,5 Volt.

Auch bei Goldelectroden von gleichen Dimensionen wie die früher benutzten Platinelectroden gelang es, die electriche Leitung durch Luft,  $\text{CO}_2$  und H und die Polarisation nachzuweisen. Dabei ergaben sich zum Theil sehr beträchtliche quantitative Unterschiede gegen die Versuche mit Platin. Ueberall ist die electromotorische Kraft der Polarisation bei Gold erheblich geringer als bei Platin; auch die Abweichungen vom Ohm'schen Gesetze scheinen viel geringer zu sein.

Das Vorhandensein der galvanischen Polarisation bei einem electriche Leitungsvorgange gilt wohl allgemein als sicherer Beweis dafür, dass es sich um einen electrolytischen Vorgang handelt. Die einfachste Erklärung der oben beschriebenen Erscheinungen besteht daher in der Annahme, dass die heissen Gase — und wohl ebenso die Gase überhaupt, soweit sie die Electricität leiten — gleich den meisten Flüssigkeiten als electrolytische Leiter zu betrachten sind. Diese Annahme erklärt alle beobachteten Erscheinungen ungezwungen. Sie wird gestützt durch die auffallende Aehnlichkeit, welche die beschriebenen Vorgänge mit denjenigen Erscheinungen <sup>1)</sup> besitzen, welche bei der Electricitätsleitung durch schwach leitende verdünnte Lösungen beobachtet worden sind. Das Auftreten der Polarisation auch bei elementaren Gasen, Luft und H, drängt zu der Annahme, dass durch den electriche Strom z. B. ein H-Molecül in ein positiv und ein negativ geladenes H-Ion zerfällt, bez. dass diese Ionen schon im gasförmigen H

---

1) Kohlrausch und Heydweiller, Wied. Ann. 54. p. 385. 1895; Warburg, Wied. Ann. 54. p. 396. 1895.

bei den Bedingungen, unter denen er leitet, vorhanden sind. Diese Annahme ist in Uebereinstimmung mit einer von H. v. Helmholtz <sup>1)</sup> ausgesprochenen Hypothese.

Der Verdacht, dass die hier beobachtete Electricitätsleitung nicht von H bez. Luft, sondern von fremden gasförmigen Beimengungen herrührt, ist zwar nicht vollkommen ausgeschlossen, aber ausserordentlich unwahrscheinlich. Ich hoffe ihn durch eine genaue quantitative Untersuchung im Laufe des nächsten Winters eliminiren zu können.

Berlin, Physikalisches Institut.

---

1) H. von Helmholtz, Vorträge und Reden 2. p. 297. 1884.