

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Neueste Anschauungen über Elektrizität

Lodge, Oliver

Leipzig, 1896

Theil II. Leitung

[urn:nbn:at:at-ubi:2-5683](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:at:at-ubi:2-5683)

THEIL II

LEITUNG

KAPITEL IV

LEITUNG IN METALLEN UND ELEKTROLYTEN

26. Wir haben im Vorhergehenden festgestellt, dass sämtliche Erscheinungen der Elektrostatik verständlich und theilweise erklärlich werden durch die Annahme, die Elektrizität sei ein vollständig inkompressibles Fluidum, oder eine Flüssigkeit, die Alles erfüllt und durchdringt; ferner durch die Annahme, dass diese Flüssigkeit sich in Leitern frei zu bewegen vermag, dass sie aber in Isolatoren und im Raum gleichsam in einem elastischen Mittel oder einer Gallerte festgehalten wird, auf deren Spannung die elektrostatischen Wirkungen zurückzuführen sind. Nach unserer Annahme kann zwar dieses Medium durch gewaltsame Entladung gesprengt werden, ein freier Strom aber kann nur durch Kanäle oder Hohlräume in dem Medium fließen. Diese entsprechen daher Leitern. Auch war es klar, dass die Flüssigkeit sich nur in einem geschlossenen Kreise bewegen kann.

Ich beabsichtige nun auf die Art und Weise, wie dieses Strömen stattfindet, näher einzugehen. Wir kommen damit zu der zweiten Abtheilung (siehe die Eintheilung, Seite 4) nämlich zur *Elektricität in Fortbewegung*.

Ich brauche den Ausdruck „Fortbewegung“ ausdrücklich, um Rotation und Schwingung auszuschliessen. Wir haben uns hier nur mit *Uebertragung* zu beschäftigen.

Man vergegenwärtige sich, auf welche Art man *Wasser* von einer Stelle zur andern fortbewegen kann. Dies ist nur auf zweierlei Weise möglich: entweder man pumpt es durch Röhren, oder man trägt es in Gefässen umher. Mit anderen Worten, es wird *durch* Stoff oder *mit* Stoff befördert. Ebenso verhält es sich mit der *Wärme*. Auch diese kann nur auf zweierlei Art befördert werden: entweder sie fliesst *durch* Stoff: diese Art der Beförderung nennt man „Leitung“; oder sie bewegt sich *mit* Stoff: diese Beförderungsart nennt man „Uebertragung“. Auf andere Art lässt Wärme sich nicht übertragen. Zuweilen hört man noch von „Strahlung“ als von einer dritten Art der Fortbewegung sprechen; diese aber befördert nicht eigentlich die *Wärme* selbst. Wärme erzeugt Strahlung an einem Ort und diese reproducirt Wärme an einem anderen Ort; das aber, was sich bewegt, ist Strahlung und nicht Wärme. Wärme fliesst unter normalen Verhältnissen aus heissen Körpern in kalte Körper, ebenso wie Wasser unter normalen Verhältnissen bergab fliesst; Strahlung dagegen verbreitet sich beliebig nach allen Richtungen.

Ferner kann Wärme an jedem gegebenen Punkte nur in einer Richtung fließen, während Strahlung sich gleichzeitig nach allen Richtungen bewegt. Wenn auf einem Planeten das Wasser sich in seine Bestandtheile zersetzte und diese Gase auf einem anderen Planeten wieder vereinigt würden, so hätte nicht das Wasser die Reise vom einen Planeten zum anderen gemacht, noch hätte der Stoff die Gesetze der Wärmebewegung befolgt, sondern das Wasser wäre an einem Ort zerstört und an einem anderen wieder dargestellt worden. Derselbe Unterschied besteht zwischen Strahlung und Wärme.

Die Wärme sowohl wie das Wasser können also nur auf zweierlei Art direkt von Ort zu Ort befördert werden. Dasselbe gilt von der *Elektricität*. Auch sie kann mit Stoff oder durch Stoff, durch Uebertragung oder durch Leitung befördert werden, aber sie kann sich auf keine andere uns bekannte Art fortbewegen.

Leitung in Metallen

27. Betrachten wir zunächst die Leitung. Man verbinde die Pole einer galvanischen Batterie mit den beiden Enden eines Kupferdrahts und vergegenwärtige sich das, was wir „Strom“ nennen. Dieser Strom besteht aus einem wirklichen Fließen von Elektricität zwischen den Molekeln des Drahts. Wäre die Elek-

tricität eine Flüssigkeit, so würde der Strom eine Uebertragung dieser Flüssigkeit sein. Ist die Elektrizität kein Stoff, so ist der Strom auch nicht eine stoffliche Uebertragung; er ist aber jedenfalls eine Uebertragung von Elektrizität, was diese auch sei. Nehmen wir wieder das Bild einer Flüssigkeit zu Hülfe, so können wir uns vorstellen, dass sie durch die Molekeln des Metalls oder zwischen ihnen dahinfließt. Wir wissen aber nicht, ob sie durch die Molekeln fließt oder zwischen ihnen, oder ob eine Molekel sie der anderen weitergiebt; die letztere Annahme gilt im Allgemeinen für die wahrscheinlichste. Man könnte sich also den Strom vorstellen als den beständigen Versuch Atome zu spannen wie ein Dielektricum, und als ein ebenso beständiges Nachlassen dieser Spannung. Die Atome könnte man sich als kleine Leiter denken, die schwingen und dabei aneinanderstossen, sodass sie sich eine elektrische Ladung, falls sie eine solche besitzen, mit Leichtigkeit mittheilen können. In einem so beschaffenen Mittel könnte die Elektrizität in ganz ähnlicher Weise fortgeleitet werden, wie dies thatsächlich in Metallen geschieht. Jedes Atom würde eine Ladung von den hinter ihm befindlichen Atomen erhalten und sie den vorderen weitergeben; auf diese Art würde die Elektrizität in dem Draht fortgeleitet. Man hüte sich aber davor, dieses Bild für etwas anderes zu halten, als für eine *mögliche* Methode, die Leitung auf eine Art Elektrostatik, dass heisst auf den Austausch

elektrischer Ladungen durch eine Kette von Leitern zurückzuführen. Wenn eine solche Kette von schwingenden und kollidirenden Theilchen existirte, so könnte allerdings eine Ladung, die an irgend einem Punkt mitgetheilt würde, sich rasch ausbreiten und das Potential würde binnen Kurzem überall gleich werden; daraus folgt aber keineswegs, dass der wirkliche Vorgang der Leitung sich in dieser Weise abspielt. Einfacher und bequemer ist es jedenfalls, sich vorzustellen, der Draht lasse die Elektrizität hindurchgehen, wie eine mit Sand oder Kieselsteinen gefüllte Röhre Wasser durchlässt. Dieser rohe Vergleich kann für die meisten, wenn auch nicht für alle Zwecke genügen.

Lassen wir zunächst die eigentliche Fortbewegungsart als unbekannt bei Seite und fassen wir das zusammen, was wir mit Bestimmtheit von dem Vorgang wissen, den wir Leitung in homogenen Metallen nennen. Folgende Thatsachen sind als sicher bekannt:

(1) Der Draht erhitzt sich beim Durchgang des Stroms.

(2) Das Bestreben, ein Zurückfliessen oder eine Spannung in umgekehrter Richtung zu erzeugen, besteht in keiner Weise.

(3) Die Elektrizität hat einen gewissen Widerstand oder ein reibungsartiges Hinderniss zu überwinden.

(4) Die Kraft dieses Widerstandes ist genau proportional der Geschwindigkeit, mit der die Elektrizität das Metall durchströmt — d. h. proportional der Intensität des Stroms bezogen auf die Querschnittseinheit.

28. Diesem letzten Satz ist noch Einiges hinzuzufügen: Die Menge von Elektrizität, die in einer Sekunde durch eine Querschnittseinheit befördert wird, nennt man Stromintensität.¹⁾ Der Versuch hat Ohm's aus der Analogie der Wärmeleitung aufgestellte Vermuthung bestätigt, dass diese Intensität genau proportional ist dem Potentialgefälle, das den Strom verursacht; d. h. da Wirkung und Gegenwirkung einander gleich und entgegengesetzt sind, hat der Strom in einem Leiter eine elektromotorische Gegenkraft zu überwinden, die ihm genau proportional ist. Kurz gesagt, ein Strom, der durch einen gegebenen Leiter fließt, ist proportional der elektromotorischen Kraft, die ihn vorwärts treibt. Das besondere Verhältniss zwischen dem Potentialgefälle und der entsprechenden Stromintensität hängt von der besonderen Beschaffenheit des Stoffs ab, aus dem der Leiter besteht, und ist eine Konstante dieses Stoffs, die durch direkte Messung bestimmt werden kann. Man nennt sie sein „spezifisches Leitungsvermögen“, oder seinen „spezifischen Widerstand“, je nach dem Gesichtspunkt, von dem aus man sie betrachtet.

Unter allen wissenschaftlichen Lehrsätzen ist dieses sogenannte Ohm'sche Gesetz eines der am genauesten bekannten. Aber es ist ein rein empirischer Satz,

¹⁾ Für diese Grösse ist sonst der Ausdruck „Stromdichte“ gebräuchlich. Intensität ist aber die naturgemässe und richtige Bezeichnung.

denn man weiss keinen Grund dafür; man muss es als eine durch das Experiment nachgewiesene Wahrheit einfach annehmen. Es ist aber unzweifelhaft von ungeheurer, weittragendster Bedeutung, weil es eine einfache und bestimmte Beziehung zwischen Elektrizität und gewöhnlicher Materie aufstellt. In der Sprache der Hydraulik ausgedrückt, stellt es fest, dass, wenn Elektrizität durch Materie strömt, die Reibung zwischen beiden sich genau verhält wie die erste Potenz der Geschwindigkeit und zwar für alle Geschwindigkeiten.

29. Wenn man sich nun diese elektromotorische Gegenkraft als der Reibung analog denkt, so liegt die Vermuthung nahe, dass durch den elektrischen Strom Wärme erzeugt wird, und dass der Grad dieser Wärmeerzeugung direkt proportional sein wird der Stärke des Stroms und seiner Gegenkraft. Joule hat dies durch den Versuch erwiesen.

Wer durch diese unbestimmte Analogie nicht befriedigt ist und das Bedürfniss fühlen sollte, tiefer in das eigentliche Wesen der Wärme und in die Art, wie sie erzeugt wird, einzudringen, der kehre zurück zur Vorstellung von zahllosen, schwingenden, an einander stossenden Theilchen, die sich mit einer gewissen durchschnittlichen Energie bewegen und dadurch die sogenannte „Temperatur“ der Körper bestimmen. Erhält eines oder mehrere dieser Theilchen einen Stoss, so vertheilt sich die Energie dieses Stosses rasch unter die übrigen, und Alle fangen an sich heftiger zu

bewegen: die Temperatur des Körpers, den sie bilden, wird „steigen“. So erklärt sich die Wärmeezeugung durch einen Stoss und andere mechanische Mittel. Nun aber ertheile man einem der Theilchen statt des *Stosses* eine elektrische Ladung, oder, besser noch, man bringe in den Bereich seiner Schwingungen eine konstante Elektrizitätsquelle, von der es bei jeder Berührung eine Ladung erhält. Zugleich bringe man in den Bereich anderer Theilchen desselben Körpers einen Behälter von unendlicher Kapazität, der im Stande ist alle Elektrizität abzuleiten, die jene Theilchen erhalten. Zum wirklichen Gebrauch sind unendliche Behälter nicht nöthig; es genügt, zwei endliche Behälter oder „Elektroden“, wie wir sie jetzt bezeichnen wollen, mit einer Vorrichtung zu verbinden, die einen konstanten elektrischen Strom aus dem einen in den anderen hinüberleitet, z. B. etwa mit den Polen einer galvanischen Batterie oder einer Holtz'schen Maschine.

Was geschieht nun, wenn eine Reihe elektrischer Ladungen auf solche Weise durch eine Ansammlung von Theilchen hindurchgeht? Offenbar wird das Empfangen und Weitergeben der Ladung die ursprüngliche Bewegung jedes Theilchens beschleunigen und die Temperatur des Körpers wird steigen. Man erhält damit eine Vorstellung, wie der elektrische Strom Wärme zeugt.

Dieser Vergleich giebt jedoch kein treues und vollständiges Bild des wirklichen Vorganges; vielmehr ist

es der *Schall*, der auf die oben beschriebene Weise fortgeleitet wird. Bekanntlich pflanzt sich der *Schall* mit bestimmter Geschwindigkeit, als eine mechanische Störung, von Theilchen zu Theilchen fort. Aber auch die *Wärme*, als eine Art der Bewegung, muss auf ähnliche Weise fortgeleitet werden, sodass sie sich, wenn sie auf einen Punkt eines Körpers einwirkt, durch die ganze Masse desselben verbreitet. Es ist kaum anzunehmen, dass die Fortleitung der Wärme anders erfolgen könnte, als durch von Theilchen zu Theilchen mitgetheilte molekulare Schwingungen; und doch gehorcht sie ganz anderen Gesetzen als jene gröbere Störung, die wir *Schall* nennen. Nun haben wir zwar keine genaue Kenntniss von dem Wesen der Wärmeleitung, doch unterliegt es kaum einem Zweifel, dass die Fortleitung der Elektricität in Metallen auf ganz ähnliche Weise stattfindet; beide Erscheinungen unterliegen denselben Gesetzen: beide breiten sich diffundirend aus, beide sind dem Ohm'schen Gesetz unterworfen und ein guter Wärmeleiter ist stets auch ein guter Elektricitätsleiter.

Leitung in Flüssigkeiten

30. Wir wollen jetzt das dunkle Gebiet der Leitung in Metallen verlassen und uns mit der Frage beschäftigen, wie Elektricität in Flüssigkeiten fortgeleitet wird. Unter *Flüssigkeiten* verstehen wir in diesem Zu-

sammenhänge bestimmte chemische Verbindungen, Säuren, Alkalien, Salzwasser und Salzlösungen überhaupt. Einige Flüssigkeiten, wie Alkohol, Terpentin, Schwefelkohlenstoff und Wasser leiten die Elektrizität in ganz reinem Zustande überhaupt nicht oder nur sehr schlecht. Sie können wie Luft und Gase, als mehr oder weniger vollkommene Dielektrica gelten. Andere Flüssigkeiten, wie Quecksilber und geschmolzene Metalle überhaupt leiten auf dieselbe Art, als ob sie in festem Zustande wären, und gehören daher zu den metallischen Leitern.

Die meisten chemischen Verbindungen leiten jedoch auf eine besondere, ihnen eigenthümliche Art, wenn sie durch Wärme oder durch Lösung flüssig geworden sind. Diese Flüssigkeiten werden „Elektrolyte“ genannt.

31. Der gegenwärtige Stand unserer Kenntnisse gestattet uns folgende Behauptungen mit ziemlicher Sicherheit aufstellen:

(1) Elektrolytische Leitung ist stets begleitet von chemischer Zersetzung und findet thatsächlich nur durch diese statt.

(2) Die Elektrizität strömt nicht *durch* die Atome des Stoffes, sondern *mit* ihnen; diese bewegen sich fort und befördern ihre Ladungen ähnlich wie Markkügelchen zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Scheiben.

(3) Die zu jedem Stofftheilchen gehörige elektrische Ladung ist ein einfaches Multiplum von einer bestimm-

ten Elektrizitätsmenge; diese Menge ist eine absolute Konstante und ganz unabhängig von der Beschaffenheit der besonderen Substanz, zu der die Stofftheilchen gehören.

(4) Die Leitung der positiven Elektrizität durch eine Flüssigkeit entspricht ungefähr der Wanderung der elektro-positiven Atome einer Verbindung in der „*Stromrichtung*“; gleichzeitig wird die negative Elektrizität durch eine ähnliche Wanderung der elektro-negativen Atome in umgekehrter Richtung geleitet.

(5) Sobald ein Atom eine Elektrode erreicht, kann es sich seiner elektrischen Ladung entledigen und unter Vereinigung mit anderen Atomen derselben Art frei werden; in diesem Fall erfolgt eine sichtbare Zersetzung. Oder es findet andere Stoffe, etwa in der Elektrode oder der Lösung, mit denen es sich verbindet; in diesem Fall findet zwar auch eine Zersetzung statt, aber sie ist verdeckt und daher unsichtbar.

(6) Andererseits kann aber ein Atom seine elektrische Ladung so hartnäckig festhalten, dass es den Strom aufhält; der Widerstand, den solche Atome auf den Strom ausüben, nennt man Polarisation.

(7) Dieser Widerstand oder diese Gegenspannung findet nicht im Innern einer Flüssigkeitsmenge sondern nur an den Elektroden statt.

32. Die drei ersten Sätze enthalten kurz zusammen-

gefasst Faraday's Gesetze von der Elektrolyse. Diese Gesetze sind von weittragender Bedeutung und scheinen der Wahrheit vollkommen zu entsprechen. Das erste heisst das „voltametrische Gesetz“ und stellt fest, dass die in einer gegebenen Substanz durch Elektrolyse erzeugte chemische Wirkung genau proportional ist der Elektrizitätsmenge, die hindurchgeschickt wurde. Die unbestimmte Bezeichnung „chemische Wirkung“ ist hier absichtlich gewählt, um Zersetzung, Neubildung, Freiwerden, Niederschlag und Auflösung, kurz, sämtliche Wirkungen, die durch einen elektrischen Strom in Elementen oder chemischen Verbindungen hervorgebracht werden können, auszudrücken. Das Gewicht der Producte der Elektrolyse giebt ein Maass für die Menge der aufgewandten Elektrizität. Eine Zersetzungs-Zelle kann somit als Voltameter dienen, und darum heisst dieses Gesetz das voltametrische Gesetz. Seine Richtigkeit ermöglicht die Aufstellung des ersten der oben angeführten Sätze. Zahlreiche qualitative, die Einzelheiten der Elektrolyse betreffende Thatsachen führen uns zum Satze Nr. 2.

Das zweite Faraday'sche Gesetz ist das Gesetz von der elektro-chemischen Aequivalenz. Es stellt fest, dass, wenn derselbe Strom während eines gleichen Zeitraums durch eine Reihe von Voltametern geleitet wird, die Summe der in jeder Substanz stattfindenden chemischen Wirkung genau proportional ist dem gewöhnlichen chemischen Aequivalent der Substanz; nicht ihrem blossen

Atomgewicht, sondern ihrem Atomgewicht dividirt durch ihre sogenannte Valenz, Atomigkeit oder Quantivalenz; denn diese ist ihre eigentliche chemische Aequivalenz. So wiegt z. B. ein Atom Sauerstoff sechzehn mal so viel wie ein Atom Wasserstoff und ist an Bindekraft zwei solchen Atomen aequivalent; nach dem Faradayschen Gesetz werden also 8 Gramm Sauerstoff auf ein Gramm Wasserstoff frei. Ferner: Ein Atom Silber wiegt 108 mal soviel wie ein Atom Wasserstoff und besitzt gleiche Bindekraft. Folglich werden 108 Gramm Silber in einem Silbervoltameter niedergeschlagen, während durch denselben Strom in einem Gasvoltameter nur 1 Gramm Wasserstoff frei wird. Ferner: 1 Atom Gold wiegt ebensoviel wie 197 Atome Wasserstoff und ersetzt in Verbindungen 3 derselben; folglich werden 65,7 Gramm Gold durch denselben Strom in derselben Zeit niedergeschlagen u. s. w.

Das Gesetz ergibt also klar, dass durch eine gegebene Menge Elektrizität eine gleiche Menge einwerthiger Atome, halb soviel zweiwerthige und ein Drittel soviel dreiwerthige Atome frei werden, einerlei welcher Substanz sie angehören. Wenn nun, wie wir angenommen haben, die Elektrizität durch reine Uebertragung fortgeleitet wird, d. h. wenn jedes Atom eine elektrische Ladung befördert (siehe Satz 2), so muss jedes einwerthige Atom die gleiche Menge befördern, gleichviel ob es ein Silber- oder ein Chlor-Atom ist, oder ob es einem zusammengesetzten Radikal wie NO_3

angehört; jedes zweiwerthige Atom muss zweimal soviel befördern, gleichviel ob es aus Sauerstoff, Zink, Kupfer oder einem zusammengesetzten zweiwerthigen Radikal wie SO_4 besteht; jedes dreiwerthige Atom muss dreimal soviel befördern u. s. w. Diese Thatsache ist in dem dritten der oben angeführten Sätze ausgedrückt.

Es wäre allerdings denkbar, dass jedes Atom eine spezifische Ladung besässe, von der es sich nie trennt. Da wir hierüber aber nichts wissen, so können wir nur Versuche anstellen mit derjenigen Ladung, deren es sich an der Elektrode entledigt. Zweifellos ist diese Ladung für alle Substanzen genau dieselbe und kann proportional der Werthigkeit einfach multiplicirt werden. Die Ladung eines einwerthigen Atoms ist die kleinste Elektrizitätsmenge, die wir kennen, und bildet eine wirkliche, natürliche Einheit. Augenscheinlich ist dies eine Thatsache von grosser Bedeutung. Diese natürliche Einheit, über die hinaus wir nichts kennen, ist sogar als „Elektricitätsatom“ bezeichnet worden und vielleicht ist der Ausdruck nicht ganz ohne Sinn. Früher schon erlaubte ich mir auf einige Wirkungen hinzuweisen, die aus der Annahme folgen würden, diese Einheit sei wirklich ein absolutes Minimum und sei ebenso untheilbar, wie ein Stoffatom.¹⁾

Bei der Kleinheit der Ladung ist das Potential jedes einzelnen Atoms nicht hoch. Die Spannungsdifferenz

¹⁾ Siehe den Aufsatz über „Electrolyse“ (Berichte der British Assoc. v. J. 1885; p. 763).

zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Atomen dürfte etwa 1 bis 3 Volt betragen. Die Atome sind einander jedoch so nahe, dass selbst diese geringe Spannungsdifferenz eine starke elektrostatische Anziehung oder „chemische Verwandtschaft“ zwischen entgegengesetzt geladenen Atomen zur Folge hat.

Die zwischen zwei Atomen bestehende elektrische Kraft ist auf jede Entfernung zehntausend Millionen Billionen Billionen mal grösser als die von ihrer Schwerkraft herrührende Anziehung auf dieselbe Entfernung. Die Intensität dieser Kraft per Masseneinheit ist beinahe eine Trillion mal grösser und wird daher eine ebenso viel mal grössere Beschleunigung hervorbringen, als diejenige der Schwerkraft der Erde in der Nähe der Erdoberfläche beträgt.

Diese Kräfte haben die Chemiker unter dem Namen „chemische Verwandtschaft“ schon seit lange studirt.

33. Wenn aber, lässt sich einwenden, die Atome jeder Molekel vermöge ihrer elektrostatischen Anziehungskraft so fest zusammenhalten, und wenn sich zwischen zwei Elektroden eine ungeheure Anzahl solcher Atome befindet, wie kommt es, dass eine schwache elektromotorische Kraft sie trennen und eine Zersetzung verursachen kann? wie kommt es ferner, dass die zur Zersetzung nöthige elektromotorische Kraft nicht proportional ist der Dicke der Flüssigkeitsschicht zwischen den Elektroden? Und doch hängt sie überhaupt nicht davon ab und es ist ganz unwesentlich, wieviel Flüssigkeit sich zwischen

den Elektroden befindet. Dieser Umstand beweist, dass in der Hauptmasse der Flüssigkeit die Atome überhaupt nicht auseinandergerissen werden. Wahrscheinlich bleiben aber die einzelnen Atom-Paare nicht dauernd verbunden, sondern trennen sich zuweilen, um sich mit anderen Individuen zu vereinigen. Während dieses Austausches müssen Augenblicke eintreten, wo die Atome halbfrei sind und dem schwächsten Impulse in irgend einer gegebenen Richtung folgen; solche Augenblicke benutzt höchst wahrscheinlich die einwirkende elektromotorische Kraft.

Die Ueberzeugung vom wirklichen Vorhandensein eines solchen fortwährenden Austausches hat sich den Chemikern durch die Erscheinungen der doppelten Umsetzung aufgedrängt; z. B. durch die Thatsache, dass beständige Salze, wenn ihre Lösungen vermischt werden, ihre Atome so austauschen, dass viel schwächere Verbindungen entstehen. Besonders augenfällig ist die Bildung solcher Verbindungen, wenn sie zufällig unlöslich sind. Die Thatsache, dass ein Niederschlag sich immer bildet, sobald eine genügend unlösliche Verbindung möglich ist, beweist, dass auch stets eine kleine Menge der entsprechenden anderen Verbindung gebildet wird, ob sie nun unlöslich ist oder nicht.

Dieser Zustand fortwährenden Austausches erzeugt eine Empfindlichkeit gegen die Einwirkung ausserordentlich schwacher motorischer Kräfte, die es selbst der schwächsten Spur einer elektromotorischen Kraft er-

möglichst, die Atome zu beeinflussen; und zwar befördert sie im Durchschnitt die positiven Atome *mit* dem Potentialgefälle und die negativen Atome *gegen* dasselbe. Der Umstand, dass schon die minimalste Kraft ihren Antheil an der Zersetzung hat, ist durch die Versuche von Helmholtz klar und erschöpfend nachgewiesen worden.

Man braucht zuweilen den Ausdruck „Dissociation“ für diese Fähigkeit der Atome, sich frei zu bewegen. Die von Clausius herrührende Anschauung setzt auch in der That eine wirkliche Dissociation voraus. Er nahm an, dass ein gewisser Procentsatz Atome in ungebundenem Zustande in der Flüssigkeit existire und auf der Suche nach Gefährten umherwandere; auf diese freien Atome wirke die elektromotorische Kraft ein und durch sie werde der Strom befördert. Heute erkennen wir, dass die Vorstellung von der doppelten Umsetzung oder vom Austausch der Atome, im Verein mit der ursprünglichen Hypothese von Grotthus eine ausreichende Erklärung der Thatsachen liefert. Statt einer dauernden, thatsächlichen Dissociation tritt nur eine virtuelle oder potentielle Dissociation oder ein augenblicklicher Zustand der Unentschiedenheit ein.

Eine gewisse durchschnittliche Zahl von Atomen ist sozusagen halb frei und bereit jeder motorischen Kraft nachzugeben, ohne deshalb nothwendiger Weise länger als eine kurze, wenn auch endliche Spanne Zeit frei zu bleiben. Je mehr derartige halbfreie Atome vorhanden

sind, um so besser wird die Flüssigkeit leiten. Der Vorgang des Leitens besteht wahrscheinlich, ähnlich wie Grotthus ihn sich dachte, in dem Weitergeben einer Ladung durch eine Kette von sich zersetzenden und wieder neubildenden Molekeln; aber die molekulare Zersetzung ist selbstthätig, d. h. der elektrische Strom erzeugt sie nicht, sondern er giebt ihr nur die Richtung. Das *Resultat* ist dasselbe, als ob eine zweifache Wanderung freier geladener Atome zwischen den Elektroden durch die Flüssigkeit stattfände, und in vielen Fällen ist es am Einfachsten sich den Vorgang auf diese Art vorzustellen.

34. Ich möchte nun auf unsere mechanischen Analogien und Modelle zurückkommen und damit die elektrolytische Leitung noch klarer veranschaulichen.

Auf den beiden Figuren 5 und 6 hatten wir Bilder von metallischer Leitung und von dielektrischer Influenz. Bei beiden wird durch eine einwirkende elektromotorische Kraft die Elektrizität fortbewegt. Im ersteren Fall besteht aber diese Bewegung in einem fortdauernden, stetigen, fast unbehinderten Fliessen durch die Stofftheilchen oder zwischen ihnen, während sie im letzteren Fall nur aus einer augenblicklichen Verschiebung oder Verückung besteht, welche die Stofftheilchen mitreisst und daher einem lebhaften Widerstand begegnet. Dieser Widerstand ist keine blossе Reibung, die nur hemmt, ohne aufzuhalten, sondern er ist eine starke federnde

Kraft. Diese unterbricht den Strom sofort, verursacht das, was wir Isolirung nennen, und ruft schliesslich, wenn die treibende Kraft entfernt wird, eine rasche Bewegung in umgekehrter Richtung oder eine Entladung hervor. Aber das Modell ist offenbar unvollständig; denn woran sind die Atome befestigt? Was vertritt die Stelle der *Leiste*, die wir an dem rohen Mechanismus wahrnehmen? Offenbar eine andere Reihe von Atomen, die durch eine gleichzeitig in umgekehrter Richtung einwirkende, negative elektrische Kraft entweder festgehalten oder in dieser Richtung verschoben werden. (Siehe Fig. 7a S. 51). Man muss sich also zwei oder mehr Reihen von Kügelchen denken; jede Reihe ist für sich auf einem Seil aufgezogen; die Seile stellen abwechselnd positive und negative Elektrizität dar und werden durch eine gegebene elektromotorische Kraft gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung verschoben. Die Kügelchen eines Seils sind je mit den Kügelchen eines anderen zwar parallel aber in entgegengesetzter Richtung laufenden Seils durch Gummibänder verbunden, sodass die Seile sich nicht beliebig weit an einander vorbei bewegen, sondern sich nur mässig gegen einander verschieben können, um alsdann in der oben geschilderten Weise zurückzuschellen und zu oscilliren.

Nun aber denke man sich sämtliche Gummibänder gelöst und auf jedes Seil wieder eine Kraft einwirkend, durch welche die eine Hälfte in der einen, die andere in der anderen Richtung bewegt wird; als-

dann hat man das Modell eines Elektrolyts und das einfachste Bild von elektrolytischer Leitung. Die Atome sind nicht mehr an einander, wohl aber an dem Seil befestigt. Durch den ersten Umstand wird der Elektrolyt von einem Dielektricum, durch den zweiten von einem Metall unterschieden.

Wir überzeugten uns ferner, dass elektrolytische Leitung kaum als eigentliche Leitung betrachtet werden kann; die Elektrizität bewegt sich dabei nicht durch oder zwischen den Molekeln, sondern sie bewegt sich mit ihnen. Die Bestandtheile einer jeden Molekel sind unabhängig von einander, und während ein System von Atomen positive Elektrizität befördert, befördert ein anderes System negative Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung, sodass der Strom durch eine Wanderung freier Atome fortgepflanzt wird. Der Vorgang zeigt den Charakter der Uebertragung: die Atome dienen als Träger. Die freie Fortbewegung geladener Atome ist eine wesentliche Bedingung der Elektrolyse.

Um nun den Vergleich mit Fig. 5 und 6 zu erleichtern und die unterscheidenden Merkmale hervorzuheben, wurde Fig. 13 entworfen. Die Kügelchen, welche eine Reihe von Atomen darstellen sollen, haften so fest an dem Seil, dass keine Spur einer Verrückung zwischen Kügelchen und Seil möglich ist; sonst aber sind sie frei und werden deshalb dargestellt als nur von Ringen gehalten, die lose auf Glasstäben laufen. Der

einzigsten Widerstand gegen eine Bewegung rührt, mit Ausnahme der geringen Reibung, von der Elektrode her und ist durch eine federnde Messerklinge wiedergegeben. Diese Messerklinge soll im Stande sein,

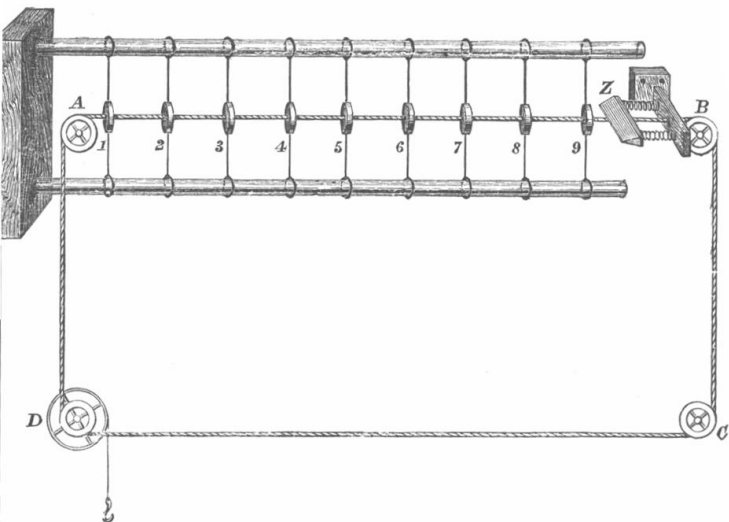


Fig. 13. — Rohe mechanische Analogie zur Erläuterung einiger Eigenschaften eines zum Theil *elektrolytischen* Stromkreises.

die Kügelchen von dem Seil los zu trennen, wenn sie mit hinreichender Gewalt dagegen gedrückt werden. Der Zusammenhang zwischen den Kügelchen und dem Seil (d. h. zwischen jedem Atom und seiner Ladung) ist aber stark genug, um die Feder merklich zusammen-

zupressen und dadurch einen Rückschlag zu erzeugen, der uns die Polarisation veranschaulichen kann.

Das Stück Seil, das jedes Kügelchen auf seinem Wege begleitet (d. h. der Abstand zwischen je zwei Kügelchen), stellt die Atomladung dar und ist eine konstante Grösse; nur ist diese Grösse bei sogenannten zweiwerthigen Atomen doppelt zu nehmen; bei drei- und vierwerthigen Atomen drei- und vierfach u. s. w.; sonst aber ist sie keinen Schwankungen unterworfen.

Das Seil möge nun positive Elektrizität darstellen, und die daran aufgereihten Kügelchen seien Atome von Wasserstoff oder von einem anderen einwerthigen *Kation*, die stromabwärts nach der Kathode ziehen. Daneben sei ein zweites Seil gedacht, das negative Elektrizität darstellt, dessen Kügelchen aber zweimal so weit von einander entfernt sein sollen, die also Atome eines zweiwerthigen *Anions* z. B. des Sauerstoffs darstellen. Sind nun beide Seile mechanisch derart verbunden, dass sie sich mit gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzten Richtungen bewegen müssen, so erhalten wir ein Modell, das mehrere wichtige Thatsachen erläutert. Offenbar werden in einer gegebenen Zeit nur halb so viel Sauerstoffatome frei werden wie Wasserstoffatome, und die Sauerstoffatome werden daher in gasförmigem Zustande nur das halbe Volumen einnehmen. Ferner wird bei allen Elementen die Zahl der in einer gegebenen Zeit freiwerdenden Atome gleich sein der Zahl von Wasserstoffatomen, die in derselben Zeit frei

wird, dividirt durch die Valenz des betreffenden Elementes im Verhältniss zum Wasserstoff. Es ist dies ein von Faraday entdecktes Gesetz, das der Wahrheit genau zu entsprechen scheint. Da nun das relative Gewicht eines jeden Elements ziemlich genau bekannt ist, so lässt sich leicht berechnen, wieviel Gewichtstheile der Substanz ein gegebener Strom in einer Stunde niederschlagen oder freimachen wird, nachdem dieser Werth für eine Substanz einmal durch den Versuch festgestellt ist.

Ergebnisse

Kurz zusammengefasst sind wir also zu folgenden Resultaten gelangt:

Lässt man eine elektromotorische Kraft auf Metalle einwirken, so findet ein dauernder Strom statt und man erhält Wärme.

Lässt man dieselbe Kraft auf Dielektrica einwirken, so findet ein vorübergehender Strom oder eine Verückung statt und man erhält die potentielle Energie, die wir „Ladung“ nennen.

Lässt man dieselbe Kraft auf Elektrolyte einwirken, so findet wieder ein dauernder Strom statt und man erhält chemische Zersetzung.

36. Die elektrolytische Leitung weist noch zahlreiche andere wichtige Punkte auf, welche eine nähere

Betrachtung verdienen; ich möchte aber hier nur Einen ganz besonders hervorheben, nämlich dass diese Leitung durch eine Wanderung positiv geladener Atome in einer Richtung und einer ebensolchen Wanderung negativ geladener Atome in der entgegengesetzten Richtung bewirkt wird.

Man mag unter positiver und negativer Ladung verstehen, was man will, soviel ist gewiss, dass z. B. bei einer Wassermolekel die Wasserstoffatome positiv, die Sauerstoffatome negativ geladen sind, und es ist wohl als sicher anzunehmen, dass sie vermöge der Anziehungskraft zwischen ihren entgegengesetzten Ladungen zusammenhängen. Sicher ist ferner, dass, wenn eine elektromotorische Kraft, d. h. eine Kraft, die im Stande ist, Elektrizität zu bewegen, auf die Flüssigkeit einwirkt, die Wasserstoffatome im Allgemeinen in der einen Richtung, nämlich bergab, die Sauerstoffatome in der anderen Richtung, nämlich bergauf, wandern, sofern wir dieses Gleichniss aus der Hydrostatik auf das Potentialgefälle anwenden dürfen. Die Atome werden gleichsam wie geladene Markkugeln durch ihre elektrische Ladung fortbewegt und dienen auf diese Weise als Träger der Elektrizität, die sonst ausser Stande sein würde, durch die Flüssigkeit hindurch zu gelangen.

Diese beiden Wanderungen ziehen in entgegengesetzten Richtungen ununterbrochen dahin, bis sie auf irgend ein Hinderniss, sei es auf eine Veränderung in der Flüssigkeit, sei es auf einen festen Leiter stossen.

Im ersteren Fall übernimmt einfach ein anderes System von Atomen die Uebertragung, ohne dass man davon etwas wahrzunehmen braucht. Ein fester Leiter aber hält die Wanderung auf, weil seine Atome sich nicht frei bewegen können. Ein derartiges Hinderniss kann entweder die Wanderung und mit ihr den Strom vollständig unterbrechen; oder die elektromotorische Kraft kann so stark sein, dass sie den Atomen ihre Ladung entreisst, diese den Elektroden zur Weiterbeförderung durch gewöhnliche Leitung mittheilt und die Atome so zusammendrängt, dass diese sich miteinander verbinden und frei werden.

Nun beachte man den Umstand, dass die Atome in zwei entgegengesetzten Richtungen wandern. Unmöglich können die Ionen der einen Gattung an einer Elektrode frei werden, ohne dass genau die entsprechende Zahl von Ionen der anderen Gattung an der anderen Elektrode sich niederschlägt oder sonst irgendwie zum Vorschein kommt. Mit anderen Worten, es kann unmöglich eine Wanderung von positiven Atomen durch eine Flüssigkeit stattfinden, ohne eine gleichzeitige entsprechende Wanderung von negativen Atomen. Oder noch anders ausgedrückt, der elektrische Strom in einer Flüssigkeit besteht aus einem Fliessen der positiven Elektrizität in einer Richtung und einem gleichzeitigen Fliessen der negativen Elektrizität in der anderen Richtung. Erweist sich diese Behauptung als zutreffend für Flüssigkeiten, warum sollte sie nicht überall Anwendung

finden? Jedenfalls muss man diese Möglichkeit im Auge behalten.

Wir kennen noch einen anderen Fall, bei dem der elektrische Strom sicher aus zwei einander entgegengesetzten elektrischen Strömungen besteht; nämlich den der Holtz'schen Maschine. Dreht man die Maschine, während ihre Pole auf irgend eine Art verbunden sind, so dient die Glasscheibe als Träger und befördert mit jeder halben Umdrehung eine elektrische Ladung von einer Sammelspitze zur anderen. Mit der einen halben Umdrehung befördert sie positive Elektrizität, mit der anderen negative Elektrizität. Ihre obere Hälfte ist immer positiv geladen und bewegt sich vorwärts, die untere Hälfte ist negativ geladen und bewegt sich rückwärts.

Bei der Holtz'schen Maschine sind die Geschwindigkeiten immer gleich gross, nicht aber die Ladungen. Bei der Elektrolyse dagegen sind die Ladungen gleich, nicht aber die Geschwindigkeiten. Vielmehr wandert nach einem von Kohlrausch entdeckten Gesetz jedes Atom in einer gegebenen Flüssigkeit mit der ihm eigenen Geschwindigkeit, die unabhängig ist von der Substanz, mit der es vorher verbunden war. Wasserstoff wandert z. B. schneller als irgend ein anderes Atom und die Summe der Wanderungs-Geschwindigkeiten der zwei entgegengesetzten Atome einer Verbindung bestimmt das Leitungsvermögen dieser Flüssigkeit. Säuren leiten im Allgemeinen besser als ihre Salze.

37. Die folgende Tabelle enthält die Geschwindigkeiten, mit denen Atome verschiedener Elemente unter der Einwirkung eines Potentialgefälles von 1 Volt auf den Centimeter durch annähernd reines Wasser wandern ¹⁾:

H	.	.	.	.	.	.	1.08	cm	per	Stunde
K	.	.	.	.	.	.	0.205	„	„	„
Na	.	.	.	.	.	.	0.126	„	„	„
Li	.	.	.	.	.	.	0.094	„	„	„
Ag	.	.	.	.	.	.	0.166	„	„	„
Cl	.	.	.	.	.	.	0.213	„	„	„
I	.	.	.	.	.	.	0.216	„	„	„
No ₃	.	.	.	.	.	.	0.174	„	„	„

¹⁾ Bericht der Brit. Ass. 1886, p. 393.

KAPITEL V

STROMERSCHEINUNGEN

Elektrisches Beharrungsvermögen

38. Betrachten wir nun den Vorgang der Leitung im Allgemeinen, abgesehen von einer besonderen Art derselben, so gelangen wir zu folgendem Schluss. Wäre der elektrische Strom ein materieller Vorgang, so müsste er bis zu einem gewissen Grade Beharrungsvermögen besitzen; es müsste eine gewisse Zeit dauern, ehe er durch eine endliche Kraft in Bewegung gesetzt würde, und auch die Unterbrechung eines solchen Stromes könnte nur allmählich oder gewaltsam stattfinden. Wasser, das in einer Röhre steht, kann bekanntlich nicht ganz plötzlich in Bewegung gesetzt werden; ist es aber einmal in Bewegung, so braucht man, um es plötzlich aufzuhalten, eine so bedeutende Kraft, dass dadurch unter Umständen das Rohr zersprengt wird. Diese lebendige Kraft des Wassers wird unter Anderem beim hydraulischen

Widder verwerthet. Es liegt nun nahe, bei der Elektrizität Aehnliches zu vermuthen und in der That werden sehr auffallende Erscheinungen dieser Art beobachtet. Der elektrische Strom setzt sich nicht sofort in Bewegung, sondern bedarf, um seine volle Kraft zu erlangen, einer gewissen, wenn auch gewöhnlich nur kurzen Zeit. Ist er einmal im Gange, so lässt er sich auch nicht plötzlich aufhalten, sondern durchbricht die etwa eingeführte, isolirende Scheidewand mit Gewalt und unter Erzeugung von Wärme. Diese Energie oder lebendige Kraft des elektrischen Stroms verursacht den Funken, der bei Unterbrechung des Stromkreises auftritt; je plötzlicher die Unterbrechung, je stärker der Funken.

Beide Wirkungen, die Verzögerung beim Schliessen und die lebendige Kraft beim Unterbrechen des Stromkreises, wurden früher Erscheinungen des „Extrastromes“ genannt. Jetzt werden sie gewöhnlich als Wirkungen der „Selbstinduktion“ bezeichnet.

Wir werden bald Näheres darüber erfahren; inzwischen erscheinen sie wie unmittelbare Folgen des Beharrungsvermögens der Elektrizität. Jedenfalls könnte sich die Elektrizität, wenn sie Beharrungsvermögen besässe, in den Augen eines oberflächlichen Beobachters nicht anders verhalten.

39. Besässe aber wirklich der elektrische Strom Beharrungsvermögen, wie der Wasserstrom, so würde sich dieses nicht bloß in der oben besprochenen Weise zeigen,

sondern es müsste sich auch auf mechanische Art äussern. Eine beweglich aufgehängte Drahtspule würde z. B. jedesmal, wenn ein Strom in ihr geschlossen oder unterbrochen würde, einen drehenden Impuls erhalten. Eine Spule, durch die man einen konstanten Strom leitet, würde sich verhalten wie ein Kreisel oder ein Gyrostat und jeder Kraft Widerstand leisten, welche sie aus ihrer Ebene abzulenken suchte.

Clerk Maxwell hat sich bemüht diese letztere Wirkung nachzuweisen, aber ohne Erfolg. Er liess einen cardanisch aufgehängten Elektromagneten rasch um eine Achse rotiren, die sich zur magnetischen Achse senkrecht verhielt. Wäre die geringste gyrostatische Wirkung vorhanden gewesen, so hätte der Magnet um die dritte senkrechte Achse rotiren müssen; dies geschah jedoch nicht. Man kann sagen, dass eine der lebendigen Kraft ähnliche Wirkung bei dem elektrischen Strom durch *mechanische* Versuche noch nicht nachgewiesen worden ist. Vielmehr herrscht in dem Verhalten eines Kreisstroms oder elektrischen Wirbels und eines Kreisels nicht die geringste Uebereinstimmung. (§ 185.)

Ich habe noch eine andere von Maxwell vorgeschlagene Methode versucht. Ich schloss und unterbrach abwechselnd einen elektrischen Strom in einer frei aufgehängten Drahtspule, sowie in einer aufgehängten elektrolytischen Zelle ¹⁾ und in einem kleinen Glimmer-

¹⁾ Ueber die Möglichkeit einer elektrolytischen lebendigen Kraft in Folge der verschiedenen Masse der entgegengesetzten Ionen, siehe Lodge, Phil. Mag. Nov. 1876.

kondensator, und bemühte mich in den Augenblicken, wo die Stromstärke wechselte, Rückschläge zu entdecken. Der Erdmagnetismus und die Anziehung und Abstossung zwischen den festen und beweglichen Theilen des Stromkreises verursachten anfangs täuschende Wirkungen; als diese jedoch vermittelt eines hinreichend dicken Schutzrings aus weichem Eisen und anderer zweckmässiger Vorrichtungen nahezu beseitigt waren, blieben keine wahrnehmbaren Wirkungen zurück. Diese Versuche waren keineswegs erschöpfend; aber sie beweisen doch, dass derartige Wirkungen, wenn sie überhaupt vorhanden sind, nur durch die feinsten Mittel nachgewiesen werden könnten.

Angenommen aber, dass auch die subtilsten Versuche ein negatives Ergebniss lieferten, so wäre damit durchaus noch nicht erwiesen, dass der elektrische Strom lebendige Kraft nicht besitzt. Man könnte beispielsweise annehmen, dass er eigentlich aus zwei gleichen, in entgegengesetzten Richtungen fliessenden Strömen bestehe, deren mechanische Wirkungen sich gegenseitig aufheben, während ihre elektrischen Wirkungen, d. h. die Erscheinungen der Selbstinduktion oder des Extrastroms, sich summiren würden. (§ 89.) Oder man könnte schliessen, dass seine Trägheit nur zu gering sei, um überhaupt beobachtet zu werden. Oder die ganze Erscheinung — das scheinbare Vorhandensein von Beharrungsvermögen bei einigen Versuchen und das Fehlen desselben bei anderen — müsste auf eine minder ein-

fache Art erklärt werden, auf die ich im Folgenden hinzuweisen gedenke.

Zustand des Mittels in der Umgebung eines Stroms

40. Bisher haben wir den elektrischen Strom als eine Erscheinung betrachtet, die sich nur im Innern der Leiter abspielt, ebenso wie das Strömen von Wasser, das durch eine Röhre fließt, nur im Innern der Röhre vor sich geht. Es giebt jedoch eine Reihe von bemerkenswerthen Thatsachen, welche dieser Ansicht vollständig widersprechen. Wenn ein Strom sich fortbewegt, so strömt zwar ein Theil jedenfalls durch den Leiter; aber die Störung *beschränkt* sich nicht auf ihn, sondern sie verbreitet sich mehr oder weniger durch den umgebenden Raum.

Die dies beweisenden Thatsachen lassen sich nicht durch hydraulische Bilder wiedergeben, sondern müssen für sich behandelt werden. Sie lauten wie folgt:

(1) Eine Magnetnadel, die sich in der Nähe eines elektrischen Stroms befindet, wird dauernd abgelenkt, solange der Strom anhält.

(2) Zwei elektrische Ströme ziehen einander an oder stoßen einander ab, je nachdem sie sich in denselben oder in entgegengesetzten Richtungen bewegen.

(3) Eine Drahtschleife, in der ein elektrischer Strom

kreist, strebt danach sich auszudehnen und einen möglichst grossen Raum einzuschliessen.

(4) Wenn eine solche Drahtschleife sich in einem magnetischen Feld befindet, strebt sie danach sich zusammenzuziehen, oder sich auszudehnen, oder sich aus ihrer Ebene zu verdrehen, je nach der Lage, die sie zu dem Magnetfeld einnimmt.

(5) Leiter, die sich in der Nähe eines Stromkreises befinden, unterliegen vorübergehenden elektrischen Störungen, sobald der Strom geschlossen, unterbrochen oder in seiner Stärke verändert wird.

(6) Dasselbe geschieht durch einen konstanten Strom, wenn man ihn dem Leiter nähert oder von ihm entfernt.

(7) Die scheinbar auf Beharrungsvermögen beruhenden Wirkungen der Selbstinduktion oder des Extrastroms lassen sich in einem besponnenen Draht nahezu aufheben, wenn man ihn doppelt nimmt oder besser, wenn man die direkte und die Rückleitung aufeinanderlegt; sie nehmen zu, wenn die Drahtschleife einen grösseren Raum umschliesst; sie nehmen noch mehr zu, wenn man den Draht zu einer festen Spule zusammenwickelt, und noch mehr, wenn man ein Stück Eisen in die Spule einführt.

Alle diese Erscheinungen kommen beim Wasserstrom nicht vor; sie beweisen, dass die Wirkungen des elektrischen Stroms sich keineswegs auf den Draht beschränken, sondern sich durch den Raum ver-

breiten und andere Körper auf bedeutende Entfernungen beeinflussen.

41. Fast alle diese Erscheinungen wurden von Ampère und Faraday entdeckt und von Letzterem als „Induktion“ bezeichnet. Nach Faraday's Ansicht befindet sich das dielektrische Mittel, das eine Drahtschleife umgiebt, in demselben Zwangszustand, wie wenn es einen geladenen Körper umgiebt. Erstere Wirkung nennt man elektrostatische Spannung, letztere elektromagnetische oder elektrokinetische Spannung.

Während nun die elektrostatischen Erscheinungen ausschliesslich in dem Mittel selbst stattfinden und die Leiter nur Unterbrechungen darin bilden, deren Oberflächen zwar Ladungserscheinungen aufweisen, deren Masse aber vor jeder Störung geschützt ist, verhalten sich die elektrokinetischen Erscheinungen wesentlich anders. Diese beschränken sich ebensowenig auf das isolirende Mittel wie auf den leitenden Draht; sie finden in beiden statt, und zwar nicht blos, wie die elektrostatischen Erscheinungen, an der Oberfläche des Drahts, sondern in seiner ganzen Masse. Dies letztere wird bewiesen erstens dadurch, dass das Leitungsvermögen in demselben Verhältniss zunimmt wie der Querschnitt; zweitens dadurch, dass ein Leiter in allen seinen Theilen erwärmt wird; und drittens, bei Flüssigkeiten, durch ihre Zersetzung.

Zugleich aber erkennen wir an den nicht minder auf-

fallenden Erscheinungen der Stromanziehung und Induktion, dass der Strom auch auf das ganze umgebende Mittel einwirkt und dass seine Intensität von der Beschaffenheit dieses Mittels abhängt; wir können daher ganz unmöglich die Wirkungen der Selbstinduktion oder des Extrastroms zurückführen auf einfaches Beharrungsvermögen der Elektrizität im Draht, wie wir es am Wasser in einer Röhre beobachten.

Hingegen drängt sich uns eine andere Vorstellung auf, durch welche diese Wirkungen erklärt werden könnten. Da nämlich die Molekeln eines Dielektricum unzertrennlich mit Elektrizität verbunden sind und sich mit ihr bewegen, so wäre es denkbar, dass die Elektrizität selbst gar kein Beharrungsvermögen besäße, sondern dass sie diesen Anschein dem Beharrungsvermögen der Atome des verschobenen Dielektricum verdanke. Manchmal ist dies wirklich der Fall, wie z. B. bei der oscillatorischen Entladung der Leydener Flasche. Es ist nämlich ein charakteristisches Merkmal von Beharrungsvermögen, dass ein verschobener Körper über seine ursprüngliche Lage hinaus zurückschnellt und so lange oscillirt, bis seine Energie verbraucht ist. Auf diese Weise liessen sich vielleicht auch die Wirkungen der Selbstinduktion erklären. (§ 98.)

Es wird sich indessen empfehlen die nähere Betrachtung dieses schwierigen Gegenstandes erst im III. Theil wieder aufzunehmen. (§§ 48 und 88.)

Energie des elektrischen Stroms

42. Wir haben gesehen, dass die ganze Umgebung eines Stromkreises ein Kraftfeld ist, in dem sich viele der wichtigsten Eigenschaften des Stroms (die magnetischen vor Allem) bethätigen. Sobald wir aber den ganzen Raum in diesem Sinne betrachten, statt uns auf Drähte und Batterien zu beschränken, so entsteht sofort eine eigenthümliche Frage. Sollen wir uns vorstellen, dass der Strom in einem Leiter durch einen vom Ende aus wirkenden Druck fortbewegt wird, wie Wasser oder Luft in einer Röhre durch einen Kolben oder einen Ventilator; oder sollen wir uns denken, der Strom werde durch seitlich angreifende Kräfte fortbewegt, wie Wasser in einem Trog durch einen Luftstrom oder durch die Flügel eines Schaufelrades? War es richtig, an unseren Seilmodellen auf Fig. 5, 6 und 13 die treibende Kraft der Batterie so einwirken zu lassen, wie das Diagramm es veranschaulicht, oder hätten wir eine Methode ersinnen sollen, bei der die Kraft der Batterie etwa durch Treibriemen oder durch andere mechanische Einrichtungen dem Stromkreis von vielen Stellen aus zugeführt würde? Wirkt die treibende Kraft nur an einem Punkt auf die Elektrizität ein, oder wird sie durch das Dielectricum jedem Theil der Drahtschleife mitgetheilt?

Prof. Poynting hat nachgewiesen, dass nach Maxwell's Principien letztere Annahme, obgleich sie complicirter erscheint, dennoch die richtige ist; und er hat für gewisse Fälle die Bahnen berechnet, in denen die Energie von der Batterie aus den verschiedenen Punkten eines Stromkreises mitgetheilt wird.

Wir müssen also unterscheiden lernen zwischen dem Strömen von *Elektricität* und dem Strömen von elektrischer *Energie*; sie bewegen sich in verschiedenen Bahnen. Hier lässt uns die hydraulische Analogie, wenigstens in ihrer einfacheren Form, im Stich. Wenn eine Wasser- oder Dampfkraft durch eine Röhre befördert wird, so bewegt sich das Fluidum zusammen mit seiner Energie. Die Arbeit, welche geleistet wird, wenn man an einem Ende der Röhre Wasser einpresst, pflanzt sich längs der Röhre fort und erscheint am anderen Ende wieder als Arbeitsleistung des Kolbens. Anders verhält es sich bei der Elektricität. Elektrische Energie wird nicht an einem Ende des leitenden Drahts hineingepumpt, um am anderen Ende in gleicher Menge wieder auszuströmen. Auf diesem Wege wird *Elektricität* befördert — wie immer die Art ihrer Fortbewegung später erklärt werden sollte — nicht aber elektrische *Energie*. Die Batterie ertheilt ihre Energie nicht unmittelbar dem Draht, sondern dem umgebenden Mittel; dieses wird gestört, gespannt und pflanzt die Spannung fort, bis diese den Draht erreicht, durch den sie abgeleitet wird. Dies ist nämlich nach Prof. Poynting, der Zweck des Drahts:

er soll die Energie ableiten, die ihm das Medium zuführt, weil dieses sonst in einen statischen Zustand von Spannung gerathen und keine Energie mehr übertragen würde. Nur dadurch, dass die dem Medium ertheilte Energie beständig abgeführt und dabei in Wärme umgesetzt wird, ist eine dauernde Fortpflanzung von Elektrizität möglich. (§ 107.)

Die Energie einer Dynamomaschine z. B. erreicht den entfernten Motor nicht durch die Drähte, sondern durch die Luft. Die Energie einer atlantischen Kabelbatterie erreicht Amerika nicht durch den Draht, sondern durch die isolirende Umhüllung. Diese Auffassung klingt seltsam und paradox, aber sie ist gut begründet.

Man denke sich eine Strassenbahn, die durch ein unterirdisches Seil bewegt wird, wie zum Beispiel in Chicago oder Highgate Hill. Eine aus dem Boden des Wagens herausragende eiserne Klaue erfasst das laufende Seil, das auf diese Weise den Wagen mitnimmt. Wie gelangt die Energie aus der feststehenden, entfernten Dynamo-Maschine in den Strassenwagen? Zweifellos durch das Seil und durch die Klaue. Beide müssen stark sein und werden durch den Zug, den sie übermitteln, abgenützt.

Nun denke man sich eine elektrische Strassenbahn, die den Strom aus einem unterirdischen Leiter empfängt, wie dies bei mehreren elektrischen Bahnen der Fall ist. Ein aus dem Boden des Wagens herausragender Draht

lässt einen kleinen Schlitten oder ein anderes gleitendes Kontaktstück auf dem Leiter schleifen, der auf diese Weise seine Elektrizität dem mit den Rädern gekuppelten elektromagnetischen Motor mittheilt. Wie gelangt in diesem Fall die Energie aus der entfernten Dynamomaschine in den Strassenwagen? Weder durch den verbindenden Draht, noch durch den unterirdischen Leiter. Keiner von Beiden wird abgenutzt. Sie strömt von der entfernten Dynamomaschine aus durch das zwischen dem Kabel und der Erde befindliche isolirende Medium; ein kleiner Theil geht in den Leiter und wird abgeführt; der grössere Theil aber strömt weiter, sammelt sich in dem Motor des Strassenwagens und setzt diesen in Bewegung. Die Energie im Leiter wird in Wärme umgesetzt und geht verloren; was wirklich übertragen und benutzt wird, ist die Energie des isolirenden Mediums.

Wenn man zuviel Energie durch ein Drahtseil befördern will, so zerreisst es; ein Beweis, dass das Drahtseil selbst die Energie überträgt. Wenn man dagegen zuviel Energie durch ein elektrisches Kabel befördern will, so zerreisst nicht der Kupferdraht, sondern das isolirende Mittel. Die Hülle aus Guttapercha ist es, welche die Energie überträgt, und sie ist es auch, die bei übergrosser Spannung abgenutzt wird. Es kann allerdings vorkommen, dass der Draht schmilzt, wenn er ein Uebermaass von Energie abzuführen hat, wie die Halter eines rasch gleitenden Seiles glühend

werden, wenn sie nicht genügend eingefettet sind; aber auf diese Weise in Wärme umgesetzte Energie wird nicht übertragen; sie geht einfach unterwegs verloren.

Es ist interessant, die Bahnen zu verfolgen, in denen sich die Energie bei gewöhnlichen Maschinen bewegt. Bei Treibriemen wandert sie mit der Materie zusammen auf dem straffen Theil des Riemens; bei Wellen bewegt sie sich nicht in der Richtung der Materie, sondern längs der Rotationsachse; bei Zahnrädern bewegt sie sich weder mit noch senkrecht zu der Achse, sondern annähernd radial; ihre genauen Bahnen sind eingehend in Schriften über Kinematik (z. B. von Reuleaux) behandelt worden.

Auf die Art, wie elektrische Energie übertragen wird, werden wir im III. Theil wieder zurückkommen. (§ 105 ff.)

*Erscheinungen, die dem Schliessen, Unterbrechen und
Verändern eines Stroms eigenthümlich sind*

43. Prof. Hughes hat uns vor Kurzem durch sinnreiche Versuche mit einer bemerkenswerthen Erscheinung bekannt gemacht, die bei Strömen von wechselnder Stärke auftritt. Ein Strom entsteht und vergeht nämlich nicht gleichmässig in dem ganzen Querschnitt eines Leiters, sondern er beginnt zuerst an der Ober-

fläche. Diese Erscheinung, die natürlich an dicken Drähten besser wahrnehmbar ist, als an dünnen, zeigt sich besonders auffallend bei Eisendrähten, aus Gründen, welche im III. Theil erklärt werden sollen; doch lässt sich die allgemeine Ursache, warum sie auch bei gewöhnlichem Kupferdraht auftritt, im Sinne der Ansichten von Prof. Poynting leicht erklären.

Wie erinnerlich, wird der Strom in einem Draht nicht fortbewegt durch eine Kraft, die an seinem Ende angreift. Er überwindet die Hindernisse also nicht vermittelst seines eigenen Beharrungsvermögens nebst einer treibenden Kraft. Vielmehr wird er an jedem Punkte seiner Bahn fortbewegt durch eine Kraft, die gerade ausreicht, um an diesem einen Punkt den Widerstand zu überwinden. Diese Kraft greift seitlich an durch das dielektrische Mittel, in dem sich der Draht befindet. Es ist daher begreiflich, dass sie auf die äusseren Schichten des Drahts zuerst einwirkt, da sie nur durch diese in das Innere gelangt. (§ 102.)

44. Um diesen Vorgang anschaulich zu machen, bringe man ein Glas Wasser in andauernde rotirende Bewegung und beobachte die Flüssigkeit, die man leicht bestäuben möge, um ihre Bewegung sichtbarer zu machen. Zuerst wird die äusserste Schicht in Bewegung gerathen, dann die zweite, die dritte und so weiter, bis die ganze Flüssigkeit sich in Umdrehung befindet. Man halte das Glas an und allmählich wird auch die Bewegung des Wassers auf-

hören; in umgekehrter Reihenfolge werden die Schichten wieder zur Ruhe kommen, die äussersten zuerst, die inneren Theile zuletzt.

Ist die Flüssigkeit zähe, wie Syrup, so verbreitet sich die Bewegung rasch; sie entspricht alsdann einem schlechten Leiter. Ist die Flüssigkeit sehr leicht beweglich, so pflanzt sich die Bewegung nur langsam nach innen fort, sie entspricht alsdann einem sehr guten Leiter. Wäre die innere Reibung der Flüssigkeit gleich Null, so würde diese einem vollkommenen Leiter entsprechen, und keine Bewegung würde tiefer eindringen als bis zur äussersten Schicht.

Man denke sich nun eine endlose mit Wasser gefüllte Röhre, etwa einen hohlen Radkranz oder den Rand eines Kreisels, und lasse sie rotiren. Die Flüssigkeit geräth bald in Bewegung, namentlich wenn die Röhre eng, oder die Flüssigkeit zähe ist; aber sie wird in Bewegung gesetzt durch eine seitliche Kraft, nicht durch einen am Ende wirkenden Druck, und ihre äusseren Schichten rotiren zuerst.

Ganz ebenso verhält es sich mit dem Strom in einem Draht.

Ist der Draht dünn oder leitet die Substanz schlecht, so entsteht der Strom überall fast gleichzeitig; ist der Draht aber ziemlich dick und aus einer gut leitenden Substanz, so entsteht der Strom in den äusseren Schichten merklich früher als in den inneren. Wäre der Draht unendlich leitend, so würde der Strom über-

haupt nur in der alleräussersten Schicht entstehen. (Siehe Kap. X und § 103.)

In Wirklichkeit ist die Zeit, in der sich die gesamte Elektrizität in einem gewöhnlichen Draht in Bewegung setzt, ausserordentlich kurz — etwas weniger als $\frac{1}{1000}$ Sekunde. Will man daher die Erscheinung beobachten, so muss man den Strom oftmals umkehren.

45. Wenn man den oben gedachten hohlen Radkranz sich rasch hin und her drehen liesse, so würden begreiflicherweise nur die äusseren Schichten des darin enthaltenen Wassers hin und her bewegt werden, der innere Kern würde stillstehen; es würde demnach den Anschein haben, als ob die Röhre weniger Wasser enthielte, als sie in Wirklichkeit enthält. Tatsächlich würde die wirksame Weite der Röhre für viele Zwecke verringert sein. Dasselbe gilt für die Elektrizität. Für einen Wechselstrom mit hoher Periodenzahl erscheint der Querschnitt eines Drahts thatsächlich verringert, wenn man ihn aus seinem Leitungsvermögen bestimmen will. Der scheinbare Widerstand eines Drahtes ist demnach grösser für Wechselstrom als für Gleichstrom. Die Wirkung ist jedoch zu gering, um im praktischen Gebrauch zur Geltung zu kommen, ausgenommen bei dicken Drähten und Wechselströmen von sehr hoher Periodenzahl.

Wie man sich erinnern wird, findet die Einwirkung der treibenden Kraft auf die Elektrizität an der Grenze zwischen dem Dielektricum und dem Leiter statt;

je grösser man also diese Berührungsfläche macht, desto schneller und leichter geräth die Elektricität in Bewegung. Auch sollte der Leiter keinen unwirksamen inneren Kern haben, der zu weit von dem treibenden Dielektricum entfernt ist. Wenn man also den Leiter in ein Bündel isolirter Drähte auflöst und auf diese Weise dem Dielektricum Zutritt zu einer grösseren Oberfläche gewährt, so wird die Kraft viel ausgiebiger verwerthet, und die oben erwähnte drosselnde Wirkung wird erheblich vermindert. Denselben Zweck erreicht man, wenn man den runden Draht in ein flaches dünnes Band auswalzt. Macht man dagegen den Leiter hohl, so erreicht man nichts weiter, als dass man auf ein gegebenes Gewicht mehr Oberfläche erhält; denn die Energie wandert niemals in dem Hohlraum, sondern theilt sich stets von aussen mit, ausser wenn der Rückstrom längs der Achse des Hohlraums geleitet wird, wie beim Telegraphenkabel. Bei solcher Anordnung wandert die gesammte Energie zwischen beiden Leitern durch das Dielektricum und nicht auf der Aussenseite. Ich bitte zu bemerken, dass der Ausdruck „*aussen*“, ähnlich wie bei der statischen Elektricität, nur mit Vorsicht angewendet werden darf; er bedeutet eigentlich die Seite eines Leiters, die einem anderen Leiter gegenüberliegt, der durch eine dielektrische Schicht von ihm getrennt ist.

46. Aus diesem Allem geht hervor, dass, während bei Gleichströmen der Querschnitt und die Substanz des

Leiters allein in Betracht kommen, die Dinge anders liegen bei schnellen Wechselströmen, wie sie bei dem Telephon, bei Entladungen der Leydener Flasche (siehe I. Th. p. 52) oder bei Blitzen vorkommen.

Bei diesen muss der Leiter dem treibenden Dielektricum eine möglichst grosse Oberfläche darbieten, wenn nicht ein grosser Theil davon unbenutzt bleiben soll.

Ein Blitzableiter müsste somit, soweit es sich um elektrische Erscheinungen handelt, nicht aus einem runden Stab, sondern aus einem flachen Metallstreifen oder einem Bündel von möglichst weit von einander entfernten Drähten bestehen. Daneben würden freilich die Fragen der Dauerhaftigkeit und der chemischen Abnutzung bei der praktischen Ausführung auch in Betracht zu kommen haben.

47. Es sei noch hinzugefügt, dass Eisen für Wechselströme ein ungemein viel schlechterer Leiter ist als Kupfer. Dieses gilt auch für Wechselströme von mässiger Geschwindigkeit, die nur einige hundert oder tausend Mal in der Sekunde wechseln, wie die Ströme einer Dynamomaschine oder eines Telephons. Ueberhaupt ist bei Eisen das Leitungsvermögen geringer und die drosselnde Wirkung ausgeprägter als bei Kupfer. Wenn aber die Geschwindigkeit der Oscillationen unermesslich gross ist, wie bei Blitzen und Entladungen der Leydener Flasche, dann leitet Eisen seltsamerweise ebensogut wie Kupfer. In diesem Fall beschränkt sich nämlich bei beiden Metallen der Strom auf die leitende Oberflächenschicht;

und obgleich diese bei Eisen entschieden dünner ist, als bei Kupfer, so sind doch die gesammten, auf andere Gründe zurückzuführenden Hindernisse so ungeheuer, dass die schwache, drosselnde Wirkung unwesentlich ist, und es nicht in Betracht kommt, woraus der Leiter besteht.

Abermals das elektrische Beharrungsvermögen

48. Wir sind jetzt in den Stand gesetzt zu der wichtigen Frage zurückzukehren: Besitzt der elektrische Strom Beharrungsvermögen wie eine materielle Flüssigkeit, oder nicht? Wir haben in Theil I § 7 bereits angedeutet, dass die Gesetze, nach denen der Strom in Leitern fließt, oder besser, dass die Form seiner Strömungslinien, zu der Annahme berechtigen, er besitze entweder kein Beharrungsvermögen, oder keine Reibung. Dass er *Reibung* besitzt, beweist jedoch das Ohm'sche Gesetz. Es möchte demnach scheinen, dass ihm *Beharrungsvermögen* fehlen müsste.

Die Strömungslinien haben folgenden Bezug auf die Frage: Wenn man ein Hinderniss in fließendes Wasser bringt, so sind die Bewegungen, die das Wasser vor und hinter dem Hinderniss ausführt, unsymmetrisch. Die Strömungslinien breiten sich aus, wenn sie an ein Hinderniss kommen, biegen um die Ecken und lassen dahinter einen mit Wirbeln erfüllten Raum zurück. (Fig. 14.)

Bringt man hingegen ein Hinderniss in einen elektrischen Strom, etwa indem man den leitenden Staniolstreifen durchlocht, so sind die Strömungslinien auf beiden Seiten vollständig symmetrisch, wie auf Fig. 15.

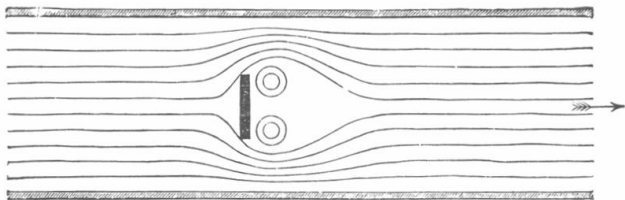


Fig. 14. — Strömungslinien des Wassers beim Hindurchfließen durch eine Röhre, in der sich ein Hinderniss befindet.

Dasselbe würde auch vom Wasser gelten, wenn ihm entweder Reibung oder Beharrungsvermögen oder Beides fehlte.

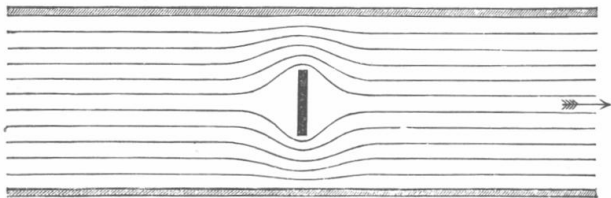


Fig. 15. — Elektrische Strömungslinien, an einem Hinderniss vorbeifliessend.

49. Ist dieser Umstand nicht entscheidend? Beweist er nicht, dass die Elektrizität kein Beharrungsvermögen besitzt?

Die Antwort lautet: Nein. Er würde entscheidend sein, wenn man diese Art des Strömens auf keine andere Weise erklären könnte. Das ist aber möglich.

Wenn das Wasser nicht durch eine Kraft fortbewegt würde, die räumlich von dem Hinderniss entfernt ist — wenn es ihm nicht überlassen bliebe, seinem eigenen Schwung gehorchend, um die Ecken zu biegen oder vorüberzuschossen — sondern wenn es an jedem Punkt seiner Bahn fortbewegt würde durch eine Kraft, die eben hinreichte, um an diesem einen Punkt die Reibung zu überwinden, dann würde der Wasserstrom dieselben Strömungslinien aufweisen, wie der elektrische Strom auf Fig. 15.

Ein solcher Fall lässt sich durch das Experiment sehr einfach herstellen. Man nehme ein flaches Stück Kupferdraht oder Blech, erwärme es ein wenig und bringe es in ruhige, raucherfüllte Luft. Man sehe bei heller Beleuchtung durch ein starkes Vergrößerungsglas daran entlang und man wird beobachten können, dass die erwärmte Luft, den Strömungslinien auf Fig. 15 genau entsprechend, an dem Metall vorbei in die Höhe steigt. Dies geschieht, weil die treibende Kraft von der Oberfläche des Metalls, nicht aber von einer weiter unten befindlichen Stelle ausgeht.¹⁾ Es lässt sich zwar nicht behaupten, dass die Kraft hier an jedem Punkt der Bahn angreift, aber sie greift doch

¹⁾ Siehe Lord Rayleigh, *Nature*, vol. 28, p. 139.

an den kritischen Punkten an, wo eine besondere Reibung stattfindet, und das Resultat ist nahezu dasselbe.

Die Strömungslinien auf Fig. 15 beweisen also nicht eine von zwei, sondern eine von drei Thatsachen: (1) das Fluidum besitzt entweder keine Reibung; oder (2) es besitzt kein Beharrungsvermögen; oder (3) es wird an jedem Punkt seiner Bahn fortbewegt.

Trifft eine dieser drei Thatsachen für die Elektrizität zu, so ist keine der beiden anderen nöthig, um die Art, wie sie strömt, zu erklären. Aus § 42 haben wir gesehen, dass, nach Poynting's Auslegung von Maxwell's Theorie, der dritte der oben angeführten Sätze richtig ist: Die Elektrizität wird an jedem Punkte ihrer Bahn fortbewegt. Demnach bleibt (siehe Th. I § 7) die Frage, ob sie eignes Beharrungsvermögen besitzt, bis auf Weiteres vollständig offen. (§§ 88, 89, 98.)

KAPITEL VI

CHEMISCHE UND THERMISCHE METHODEN, EINEN STROM ZU ERZEUGEN. LEITUNG IN GASEN

Galvanische Batterie

50. Wir behalten uns vor auf die soeben besprochenen Anschauungen im zehnten Kapitel von Theil III wieder zurückzukommen, und wenden uns nun zu der Frage: wie ist eine gewöhnliche Batterie oder Thermosäule im Stande, einen elektrischen Strom zu erzeugen? (Vgl. Kap. IV.)

Die Vorgänge in einem gewöhnlichen galvanischen Element sind leicht zu erklären, sobald man annimmt, dass zwischen den Atomen verschiedener Substanzen eine unerklärte chemische Anziehung bestehe. Zunächst haben wir eine Flüssigkeit. Diese enthält z. B. Wasserstoff- und Sauerstoffatome in freiem oder potentiell freiem Zustande; das heisst, die Atome sind entweder wirklich dissociirt, oder sie werden so beständig von Molekel zu Molekel ausgetauscht, dass sie bereit sind, dem schwäch-

sten Impulse in irgend einer Richtung zu folgen. (§ 33.) Jedes dieser freien Atome ist elektrisch geladen, und zwar der Wasserstoff mit einer bestimmten Menge positiver Elektrizität, der Sauerstoff mit der doppelten Menge negativer Elektrizität. In diese Flüssigkeit tauche man nun ein Plattenpaar aus zwei Metallen, welche auf die Atome eine verschieden starke Anziehung ausüben, zum Beispiel Zink und Kupfer. Beide ziehen den Sauerstoff an, Zink aber stärker als Kupfer. Statt des Kupfers nimmt man besser Platin, welches auf den Sauerstoff fast gar keine Anziehung ausübt. Noch besser wählt man Zink und Bleisuperoxyd, von denen das eine den Sauerstoff, das andere den Wasserstoff anzieht.

Sofort beginnen die freien Sauerstoffatome an dem Zink, die freien Wasserstoffatome an der anderen Platte emporzusteigen.

51. Wenn ich sage, die Metallplatten ziehen die Atome an, so verstehe ich darunter nicht eine Kraft, die auf sämtliche in der Flüssigkeit enthaltene Atome einwirkt, sondern man hat sich eine Kraft zu denken, welche nur auf Atome einwirkt, die sich innerhalb der molekularen Wirkungssphäre der Metalloberfläche befinden — einer ausserordentlich kleinen, auf den zehnmillionsten Theil eines Millimeters geschätzten Entfernung. Hat sich die Zinkplatte mit allen Sauerstoffatomen in diesem Umkreis verbunden, so werden sie durch Diffusion aus der nächsten Schicht ersetzt, diese wieder

durch andere u. s. w. Auf diese Weise findet allmählich eine Wanderung sämtlicher Sauerstoffatome nach dem Zink hin statt; die Geschwindigkeit dieser Wanderung hängt von der einwirkenden Kraft und von der Geschwindigkeit ab, mit der sich die Diffusion in der zur Verwendung gekommenen Flüssigkeit vollzieht.

Nun ist aber anzunehmen, dass diejenigen Atome, die sich mit dem Zink verbinden, diesem ihre negative Ladung mittheilen. Das Zink würde dadurch bald so stark negativ elektrisirt, dass seine Anziehungskraft für die gleichfalls negativ geladenen Sauerstoffatome aufhören und der ganze Vorgang ins Stocken gerathen müsste. Um dies zu vermeiden, wird die Elektrizität durch einen Draht abgeleitet und zu einer in dieselbe Flüssigkeit eingetauchten Kupferplatte geführt. Auf diese Weise wird der Kreis geschlossen, die Elektrizität strömt durch den Draht zurück, und die Wanderung nimmt ungestört ihren Fortgang. Zugleich hebt die negative Elektrizität, die dem Kupfer oder Platin zugeführt wird, jede Anziehung auf, welche jene Metalle etwa auf die negativ geladenen Sauerstoffatome ausgeübt haben könnten, und trägt sogar dazu bei, die entgegengesetzte Wanderung der Wasserstoffatome zu befördern; diese theilen bei der Ankunft ihre Ladung dem Kupfer mit, verbinden sich mit einander und entweichen als Gas.

Diese Anschauungsweise von den Vorgängen in einem galvanischen Element bringt zwar nicht alle Einzel-

heiten zum Ausdruck, lenkt jedoch die Aufmerksamkeit auf das Wesentlichste der Erscheinungen.

52. Taucht man, statt verschiedener Metalle, zwei Platten aus *demselben* Metall in die Flüssigkeit ein, so wird man diese erst auf irgend eine Art entgegengesetzt elektrisiren müssen, um damit entgegengesetzte Wanderungen erzeugen und einen dauernden Strom in der Flüssigkeit erhalten zu können. Dies würde alsdann einem Voltameter gleichkommen. Bei dem Voltameter nehmen wir an, dass das Potentialgefälle zwischen beiden Platten, nicht bloß auf die Ionen innerhalb der molekularen Wirkungssphäre der Elektrode einwirke, sondern auf *sämmtliche* in der Flüssigkeit enthaltene Ionen. In dieser Hinsicht unterscheidet sich das Voltameter offenbar von einem galvanischen Element, bei dem die treibende Kraft hauptsächlich in der chemischen Anziehung beruht, welche eine der beiden Platten auf einen der Bestandtheile der Flüssigkeit ausübt.

53. Von der bekannten Thatsache ausgehend, dass die Atome geladen sind, umgeht Helmholtz die Annahme einer chemischen (nicht-elektrischen) Anziehungskraft zwischen Zink und Sauerstoff, indem er sich vorstellt, dass alle Stoffe eine spezifische Anziehung für die Elektrizität selbst besitzen und dass Zink in dieser Hinsicht Kupfer und alle anderen Metalle übertrifft.

Das Zink zieht also nach seiner Ansicht nicht den Sauerstoff, sondern dessen elektrische Ladung an; hier-

durch wird die Aehnlichkeit zwischen einem Element und einem Voltameter noch grösser. Die Polarisation oder Gegenspannung an der Wasserstoff entwickelnden Elektrode erklärt er damit, dass der Wasserstoff positive Elektrizität anziehe und seine Atome sich daher nur ungern von ihrer Ladung trennten.

Volta's sogenannte Kontaktkraft

54. Im Anschluss an diese Erklärung der Vorgänge in Batterien erscheint es zweckmässig auseinander zu setzen, auf welche Art elektrische Ladungen in Zink- und Kupferplatten durch vorübergehende gegenseitige Berührung hervorgerufen werden. Obwohl schon viel darüber geschrieben worden, ist die Sache doch höchst einfach.

Zink und Kupfer sind in der Luft genau denselben Bedingungen unterworfen, wie im Wasser. Der einzige Unterschied besteht darin, dass Wasser leitet, Luft hingegen isolirt. Solange Zink und Kupfer (oder ein anderes Metallpaar) einander nicht berühren, erfolgt in beiden Fällen nichts, weil das Bestreben zur chemischen Vereinigung auf beiden Platten nach allen Seiten gleich ist. Das Zink übt zwar eine ziemlich starke Anziehung auf den Sauerstoff aus, die geladenen Atome können sich aber unmöglich gleichmässig von allen Seiten nach dem Zink hinbewegen; denn sie würden dadurch einen

Leiter mit einer Elektrizitätsart laden, ohne dass zugleich ein anderer Leiter die entsprechende, entgegengesetzte Ladung erhielte. (Siehe §§ 5, 3, 4, 14 A.) Ein Stück Zink, das gleichmässig auf allen Seiten mit geladenen Atomen umgeben ist, befindet sich in demselben Zustand, wie das Innere eines geladenen Leiters; von diesem wissen wir aber, dass keine Spur einer Ladung unter die oberste Schicht eindringen kann. Wenn die Atome sich nach dem Zink hinbewegten, so würden sie Elektrizität in dasselbe hineinpressen, was unmöglich ist. So stark also auch die Anziehung ist, es wird dadurch nur der Druck der negativen Elektrizität im Zink erhöht, oder ihre Spannung vermindert (um im Sinne der Seilmodelle Fig. 5, 6 etc. zu sprechen); mit anderen Worten das Potential des Zinks wird unter das Potential der benachbarten Luft herabgedrückt. Ganz dasselbe gilt in geringerem Grade von der isolirten Kupferplatte. Weder das eine noch das andere Metall wird geladen, solange die Bedingungen nach allen Seiten hin gleich sind.

Sobald sich aber die beiden Platten gegenseitig berühren, werden alle Sauerstoffatome zwischen ihnen hinweggedrängt und es wird der Elektrizität eine freie Bahn vom Zink in das Kupfer erschlossen. Dies ist das Wesentliche bei der Berührung zwischen zwei Metallen: sie entfernt die spannenden Atome an einem Punkt und unterbricht dadurch die Gleichmässigkeit der äusseren Bedingungen. Wenn daher an der Be-

rührungsstelle zwischen beiden Metallen nicht etwa eine spezifische elektromotorische Kraft entsteht — eine Annahme, die wir, soweit es sich um messbare Wirkungen handelt, aus triftigen Gründen *nicht* zulassen können — so wird sofort ein Erguss negativer Elektrizität aus dem Zink in das Kupfer und ein Erguss positiver Elektrizität in der umgekehrten Richtung stattfinden. Das Kupfer wird negativ, das Zink positiv geladen, und die Ladung entsteht dadurch, dass sämtliche Sauerstoffatome sich dem Zink etwas nähern und sich vom Kupfer etwas entfernen. Der Vorgang bleibt bis dahin derselbe, gleichviel ob sich die Platten in angesäuertem Wasser oder in der Luft befinden.

Was zunächst geschieht, ist von dem verschiedenen Leitungsvermögen des Wassers und der Luft abhängig. Angesäuertes Wasser vermag Elektrizität zu leiten, Luft nicht. Bei Platten, die sich in Wasser befinden, wird daher die negative Ladung durch die Flüssigkeit beständig von dem Kupfer nach dem Zink zurückbefördert; bei Platten, die sich in der Luft befinden, geschieht nichts. Es wird nur eine geringe elektrostatische Spannung der Luft durch die Menge von Elektrizität bewirkt, die sich, als positive auf dem Zink, als negative auf dem Kupfer, ansammelt ohne abfliessen zu können.

Diese Ladungen sind ausserordentlich klein, wenn man nicht die Kapazität der freien Metalloberflächen durch grosse Ausdehnung der Flächen oder durch sehr nahe Berührung erhöht. Die elektromotorische

Kraft, die sie erzeugt, beträgt durchschnittlich weniger als 1 Volt; dementsprechend ist auch die Spannung der Luft in der Nähe von zwei einander berührenden Zink- und Kupferstäben ausserordentlich gering. Nichtsdestoweniger ist es Sir William Thomson gelungen, diese Spannung nachzuweisen, indem er eine stark geladene Aluminiumnadel in der Nähe einer solchen Berührungsstelle aufhängte; war die Nadel positiv geladen, so schlug sie merklich in der Richtung des Kupfers aus. Gebräuchlicher ist die von Volta zuerst angewandte Methode, die Erscheinung vorzuführen. Die Kapazität des Apparats wird dadurch erhöht, dass man zwei sorgfältig geschliffene Platten in sehr nahe Berührung bringt. Die elektromotorische Kraft ist zwar sehr gering (nicht grösser als bei einem einzelnen Berührungspunkt), aber die Kapazität ist nunmehr so gross, dass sich eine ganz ansehnliche Menge Elektrizität in den beiden Metallplatten ansammelt, die, durch eine mikroskopische Luftschicht getrennt, einander gegenüber stehen und sich nur an wenigen Punkten berühren. Werden die Platten vorsichtig getrennt, so findet sich darauf eine Ladung, die genügt, um eine merkliche Wirkung auf ein gewöhnliches Goldblatt-Elektroskop auszuüben.

55. Ein früher und auch jetzt noch häufig bei diesem Versuch begangener Irrthum besteht darin, diese Ladung als Beweis für eine am Berührungspunkte vorhandene elektromotorische Kraft anzusehen, welche eine

Spannung zwischen beiden Metallen verursache. Durch diese wollte man dann die Vorgänge in einem galvanischen Element erklären.

Richtiger ist es, das Element erst der Betrachtung zu unterwerfen und seine Wirkungsweise chemisch so weit zu erklären, als dies gegenwärtig angeht; und sich dann klar zu machen, dass in der Luft (oder eigentlich in einer Luftbatterie) ähnliche Vorgänge stattfinden dürften; mit dem Unterschiede, dass, da die Luft kein Elektrolyt sondern ein Dielektricum ist, auch kein fortdauernder Strom, sondern nur eine geringe elektrische Verrückung, nämlich der Volta-Effekt, eintreten wird.

56. Die Ursache des ganzen Phänomens besteht in beiden Fällen darin, dass der Sauerstoff grössere Affinität zu Zink hat als zu Kupfer. Diese Affinität an sich würde einen Druck der negativen Elektrizität in der Richtung des Zinks — ein Nachlassen der negativen Seile im Zink, um mich im Sinne der Seilmodelle auszudrücken — und mithin eine Erhöhung des negativen Potentials bewirken. Das Potential einer isolirten Zinkplatte ist daher ungefähr 1.8 Volt unter dem Potential der Luft; der Potentialunterschied zwischen Metall und Sauerstoff lässt sich direkt aus der experimentell ermittelten Verbindungswärme von Zink und Sauerstoff berechnen.¹⁾ Dasselbe gilt vom Kupfer;

¹⁾ Siehe Lodge „On the seat of E. M. F. in the Voltaic Cell“, Brit. Assoc. Report 1884; sowie Journ. Soc. Tel. Eng. 1885 und Phil. Mag., vol. 19, 1885 u. 1886.

nur ist hier die Spannung geringer, wie sich aus der geringeren Verbindungswärme von CuO im Vergleich zu ZnO ergibt. Das Potential einer isolirten Kupferplatte ist daher nur ungefähr 0.8 Volt unter dem Potential der Luft.

Sobald sich die beiden Platten berühren, gleicht sich nothwendigerweise ihr Potential aus; denn alle Theile eines Leiters haben gleiches Potential, sofern nicht störende innere Kräfte vorhanden sind. Der Ausgleich vollzieht sich durch einen Erguss von Elektrizität aus dem einen Metall in das andere, bei dem das Zink positiv, das Kupfer negativ geladen wird, bis das Potential dasselbe ist. In der Luft vollzieht sich dieser Ausgleich in einem Augenblick; im Wasser dauert er ewig: das ist der ganze Unterschied.

Die von Volta beobachtete Erscheinung ist kein *Potential*unterschied zwischen Zink und Kupfer, sondern ein Unterschied in der *Ladung*; beide Metalle sind in der Weise geladen, dass ihr Potential gleich ist, trotzdem sie verschiedene chemische Affinität zum Sauerstoff haben.

Auch bei der Versuchsanordnung von Sir William Thomson (§ 54) beobachtet man nicht einen Potentialunterschied zwischen Zink und Kupfer, sondern ein Potentialgefälle in der sie umgebenden Luft, in der Richtung vom Zink zum Kupfer. Beide Metalle haben nämlich, wenn sie sich berühren, dasselbe Potential, 1.3 Volt unter dem der Luft, das Mittel ihrer ursprünglichen Potentiale;

aber der ursprüngliche Potentialunterschied zwischen dem einzelnen Metall und der es berührenden Luft bleibt bestehen. Mithin entsteht ein Potentialgefälle von 1 Volt zwischen der Luftschicht, die mit dem Kupfer in Berührung ist, und der Luftschicht, die mit dem Zink in Berüh-

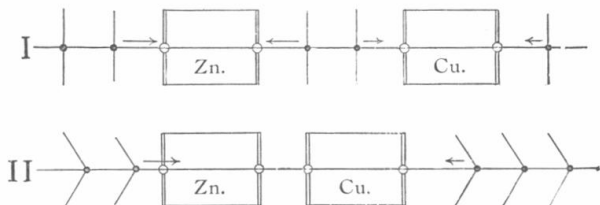


Fig. 15 A. — Diagramm des Volta-Effektes nach Analogie der Seilmodelle. (Fig. 5, 6, 7 etc.)

- I. Zink und Kupfer vor der Berührung. Ein Seil, das durch beide hindurchgeht und negative Elektricität darstellt, nebst Kügelchen, die Sauerstoffatome darstellen. Die Pfeile zeigen an, dass der Sauerstoff vom Zink auf allen Seiten angezogen wird, und dass ihn auch das Kupfer, wiewohl schwächer, anzieht. Es besteht ein Potentialunterschied zwischen den Metallen untereinander und der Luft, die sie umgibt, aber dieser Umstand bringt keine wahrnehmbaren Wirkungen hervor, solange die Metalle sich nicht berühren.
- II. Sämmtliche Sauerstoffatome zwischen beiden Metallen sind nach erfolgter Berührung hinweggedrängt, sodass die grosse Ueberlegenheit des Zinks über das Kupfer im Anziehen von Atomen zur Geltung kommen kann, bis die durch eine elektrische Verrückung hervorgerufene elektrostatische Spannung sie wieder ausgleicht. Die Oberfläche des Zinks hat jetzt ein kürzeres Stück Seil als ihm zukommt, es ist positiv geladen; das Kupfer ist negativ geladen. Beide Metalle haben jetzt gleiches Potential, obwohl sie entgegengesetzt geladen sind; es besteht aber ein Potentialgefälle zwischen ihnen und der benachbarten Luft. Dieses ist die von Volta beobachtete Erscheinung.

ung ist. Dieser Potentialunterschied ist es, auf den das Elektrometer reagirt. Das Diagramm 15 A trägt vielleicht dazu bei, das Gesagte deutlicher zu machen.

Der Gegenstand ist dem Verständniss durchaus zugänglich und verdient, dass man einige Zeit und Mühe darauf verwendet.

Wirkliche Kontaktkraft

57. Bisher gingen wir davon aus, dass an der Berührungsstelle zwischen Zink und Kupfer eine elektromotorische Kraft *nicht* vorhanden sei. In der That ist auch eine beträchtliche Kraft dieser Art nicht vorhanden, aber sie ist auch nicht völlig gleich Null. Zwischen einigen Metallen, z. B. zwischen Wismuth und Antimon, ist sie sogar wesentlich grösser. Immerhin beträgt sie höchstens etliche Hundertstel eines Volt. Der Umstand, dass eine solche Kontaktkraft zwischen zwei Metallen vorhanden sein kann, ist wichtig, berührt aber in keiner Weise den auf chemischem Wege hervorgerufenen Volta-Effekt. Dieser ist, soweit er überhaupt als Kontaktkraft bezeichnet werden kann, eine Kontaktkraft zwischen dem Metall und der Luft; die wirkliche Kontaktkraft bewirkt nur eine unbedeutende Störung der einfachen, von Volta beobachteten Erscheinung und diejenige Wirkung, die wir bei dem Versuch mit dem Elektroskop wahrnehmen, ist eigentlich die Summe beider Kräfte.

58. Dass eine solche wirkliche, wenn auch schwache Kontaktkraft zwischen zwei Metallen vorhanden ist, beweisen die umkehrbaren Wärmeerscheinungen, die an der Berührungsstelle entstehen, wenn man einen Strom hindurchleitet. Der Strom erzeugt in der einen Richtung mehr Wärme als in der anderen. Bei einem ein-

fachen, homogenen Metall ist die durch einen Strom erzeugte Wärme ganz unabhängig von seiner Richtung; sie ist, wie Joule nachgewiesen hat, proportional dem Quadrat der Stromstärke. Aber an der Berührungsstelle zwischen verschiedenen Substanzen oder auch nur zwischen gleichen Substanzen, die verschiedenen Bedingungen, z. B. verschiedenen Temperaturen, unterworfen sind, entsteht neben der durch blossen Widerstand erzeugten eigentlichen Stromwärme eine Wärmeentwicklung, die mit der Richtung des Stroms ihr Vorzeichen wechselt, sodass der Strom in der einen Richtung danach strebt die Berührungsstelle zu erwärmen und in der anderen sie abzukühlen. Mit Vorsicht kann man diese abkühlende Wirkung benutzen, um die Stromwärme vollständig aufzuheben; ja, man kann Wasser am Berührungspunkt thatsächlich zum Gefrieren bringen, wenn man einen mässig starken Strom anhaltend in der richtigen Richtung hindurchleitet. Diese merkwürdige Thatsache wurde von Peltier entdeckt.

Sie kann als grundlegend für die Thermoelektricität betrachtet werden. Sie beweist, dass eine Kraft an der Berührungsstelle zwischen zwei Metallen vorhanden ist, die zur Fortbewegung der Elektrizität beiträgt, mithin eine Arbeit leistet und dabei die eigene Wärme aufzehrt. Die Schwingungsbewegung der Molekeln wird verbraucht, um die Elektrizität fortzubewegen. Die Kontaktkraft wirkt in der Richtung des Stroms und die Berührungsstelle wird dadurch abgekühlt.

Kehrt man den Strom um, so bewegt er sich der von den Molekeln ausgeübten Kraft entgegen, und es entsteht noch eine besondere Wärmemenge ausser der nicht umkehrbaren oder durch Reibung erzeugten Stromwärme.

59. Dieser thermische Beweis für das Vorhandensein einer Kontaktkraft ist zwar der direkteste, aber nicht der zuerst entdeckte. Das erste, was man über Thermoelektricität wusste, war, dass man in einem geschlossenen Kreis, der aus verschiedenen Metallen besteht, einen Strom erzeugen kann, wenn man den einzelnen Theilen verschiedene Temperatur ertheilt; offenbar weil die so eben besprochenen Kontaktkräfte von der Temperatur abhängig sind und theils schwächer, theils stärker werden, wenn die Temperatur steigt. In einem Kreis von durchweg gleicher Temperatur heben sie sich gegenseitig auf; sobald aber die Temperatur an einer Stelle sich ändert, haben sie eine Resultante; und diese resultirende elektromotorische Kraft erzeugt den von Seebeck zuerst beobachteten Thermostrom.

Thermosäule

60. Der Versuch, das Wesen dieser Vorgänge zu erklären, ist vorläufig noch nicht frei von mancherlei Unklarheiten, doch kann man sich von einer Thermosäule ungefähr folgendes Bild machen.

Wie wir gesehen haben, hat der elektrische Strom

bei seiner Wanderung mit oder zwischen den Molekeln eines Metalls einen gewissen Widerstand oder eine Gegenkraft zu überwinden, die seiner Geschwindigkeit genau proportional ist (§ 28). Mit anderen Worten, es besteht zwischen Stoff und Elektrizität eine Beziehung, die in vielen Hinsichten der Reibung in Flüssigkeiten vergleichbar, die aber der ersten Potenz der relativen Geschwindigkeit proportional ist. Wenn daher ein Atom um einen festen Punkt schwingt, wird es danach streben, die Elektrizität mit hin und her zu bewegen.

Da sich aber zahllose andere Atome desselben Körpers gleichzeitig in anderen Schwingungsphasen befinden, so können sie zusammen keinen bestimmten Impuls in irgend einer Richtung ausüben. In diesem Zustande befindet sich ein gewöhnlicher, warmer, fester Körper.

Wenn aber aus irgend einem Grunde ein System von Atomen sich schneller vorwärts bewegt als rückwärts, alsdann wird dieses unsymmetrisch schwingende System doch eine fortbewegende Kraft ausüben und die Elektrizität vorwärtstreiben, aus dem einfachen Grunde, weil die ausgeübte Kraft proportional der Geschwindigkeit ist und daher auf dem Hinwege stärker wirkt als auf dem Rückwege. Um auf unser Seilmodell Fig. 5 zurückzukommen, so lehrt das Ohm'sche Gesetz, dass die Reibung zwischen dem Seil und den Kügelchen der Geschwindigkeit genau proportional ist; wenn daher

ein Kügelchen anfängt unsymmetrisch zu oscilliren, d. h. rasch vorwärts und langsam zurück zu schwingen, so bewegt es das Seil in derjenigen Richtung fort, in der es am schnellsten schwingt, ähnlich wie ein Kind sein Stühlchen vorwärtsschiebt, indem es damit auf einem rauhen Fussboden schaukelt.

Ich habe diese Erklärung so stehen lassen, wie sie in der ersten Auflage erschien, um auf einen Irrthum hinzuweisen, auf den mich Prof. Fitzgerald aufmerksam gemacht hat.

Wenn sich nämlich ein Kügelchen auf dem Hin- und Rückwege mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegt und wenn es sich an einem Seil oder in einer Flüssigkeit befindet, deren Reibung sich genau verhält wie die erste Potenz der Geschwindigkeit, so wird es allerdings während der raschen Vorwärtsbewegung mehr Kraft auf das Seil ausüben als während der langsamen Rückwärtsbewegung, wie oben gesagt wurde. Betrachten wir aber die von den hin- und herschwingenden Kräften ausgehenden Impulse genauer, so stellt sich heraus, dass sie in beiden Richtungen gleich sind; denn was der langsameren Schwingung an Kraft abgeht, das ersetzt die längere Dauer; und ein „Impuls“ ist das Product von Kraft und Zeit. Es scheint also, dass einfache Asymmetrie der Bewegung nicht hinreicht, um jene Wirkung von Widerhaken oder Ventilen hervorzubringen, auf die wir oben die thermo-elektrischen Kräfte zurück-

zuführen versuchten.¹⁾ Eine Asymmetrie der Bewegung muss vorhanden sein und ist wahrscheinlich auch die Ursache der thermo-elektrischen Kräfte; aber in welcher Weise sie wirkt, das bedarf vorläufig noch der Erklärung.

Es wäre höchstens zu bemerken, dass wenn die Kraft der Reibung schneller variirte als die erste Potenz der Geschwindigkeit, ein Antrieb in der einen Richtung und, wenn sie langsamer variirte, ein Antrieb in der entgegengesetzten Richtung erfolgen würde.

Ueberall, wo Wärme in einer Substanz fortgeleitet wird, ist die Bewegung der Atome asymmetrisch. Sie werden rascher vorwärts bewegt als rückwärts, weil die Atome am warmen Ende hinter ihnen rascher schwingen als die Atome vor ihnen am kalten Ende. Und ein solches Temperaturgefälle übt, was auch die Ursache sein möge, eine fortbewegende Wirkung aus; also muss in einer ungleichmässig erwärmten Substanz eine elektromotorische Kraft entstehen.

Diese Thatsache wurde theoretisch entdeckt und durch den Versuch bestätigt von Sir William Thomson.

61. Eine solche Kraft entsteht jedoch nicht allein an der Berührungsstelle zwischen den kalten und den warmen Theilen einer Substanz; sie entsteht auch an der Berührungsstelle zwischen zwei verschiedenen Substanzen, selbst wenn deren Temperatur gleich ist. Obwohl

¹⁾ Siehe auch Lodge, Philosophical Magazine, December 1876.

es nicht ganz ersichtlich ist, weshalb bei dieser Art der Berührung die Atome sich rascher in einer Richtung bewegen sollten als in der anderen; so ist doch die Sache nicht unwahrscheinlich, wenn man die Zwangszustände in Betracht zieht, die nothwendigerweise an der Grenzoberfläche zwischen zwei verschiedenen Mitteln bestehen müssen. Wie dem aber auch sei, es entsteht an einer solchen Berührungsstelle eine elektromotorische Kraft.

Wir finden also in einem einfachen Kreis aus zwei Metallen, deren Löthstellen verschiedene Temperaturen haben, im Ganzen vier elektromotorische Kräfte: eine in jedem Metall, in der Richtung vom heissen zum kalten Ende oder umgekehrt, und eine an jeder Löthstelle. Der Strom, der in einem solchen Kreise fliesst, wird fortbewegt durch die Resultante dieser vier Kräfte.

Diese vier Kräfte, zwei Thomson'sche in den Metallen und zwei Peltier'sche an deren Berührungsstellen, können den Strom theils fördern, theils hemmen. Da, wo sie ihn fördern, wird die Stelle entsprechend abgekühlt, da, wo sie ihn hemmen, wird sie erwärmt.

Reibungselektricität

62. Die Kontaktkraft beschränkt sich indessen keineswegs auf Metalle. Sie entsteht auch zwischen Isolatoren und ist die Ursache der auffallenden Wirkungen sämt-

licher Reibungs-Elektrisirmaschinen. Das Wesentliche bei der Erzeugung von „Reibungselektricität“ ist nämlich die gegenseitige Berührung zwischen verschiedenartigen Substanzen. Die dadurch hervorgerufene Kontaktkraft überträgt die Elektricität von einem Körper auf den anderen, sodass der eine positiv, der andere negativ geladen wird. Weil aber die Substanzen schlecht leiten, so bedarf es, um der Uebertragung nachzuhelfen, gewöhnlich einer raschen Folge von Berührungen, wie man sie leicht durch Gegeneinanderreiben der Oberflächen erzielen kann.

Wenn also die als Widerstand bekannte und durch Ohm's Gesetz (§ 28) präcisirte Beziehung zwischen Elektricität und Materie im Stande ist, Kontaktkräfte hervorzurufen, so erklärt es sich auch, weshalb diese Kräfte in guten Leitern so schwach, in Isolatoren so stark sind. Die Elektricität schlüpft den Metallen gleichsam durch die Finger und kann nur eine sehr geringe treibende Kraft ausüben; Isolatoren dagegen halten sie fest und drängen sie mit Gewalt vorwärts. Aus obiger Anschauungsweise folgt, dass in vollkommenen Leitern sowohl thermo-elektrische als alle anderen Kontaktkräfte gleich Null sein müssten.

*Specifische Beziehung zwischen Materie und Elektrizität,
manchmal „specifische Wärme der Elektrizität“
genannt*

63. Die verschiedenen Metalle unterscheiden sich in ihrer Fähigkeit, Elektrizität festzuhalten. Im Ganzen genommen sind die besten Leiter die schlechtesten thermo-elektrischen Körper. Umgekehrt bildet ein schlechter Leiter, wie Antimon oder besser noch Bleiglanz, Selen oder Tellur ein viel wirksameres thermo-elektrisches Element als ein gut leitendes Metall. Allein es handelt sich dabei nicht bloß um den specifischen Widerstand; daneben besteht noch eine besondere Beziehung der einzelnen Metalle zu beiden Elektrizitätsarten. So ist z. B. Eisen ein Metall, dessen Atome positive Elektrizität fester halten als negative, daher bewegt sich im Eisen ein positiver Strom von dem heissen zum kalten Ende. Kupfer dagegen hat die umgekehrte Eigenschaft, daher fließt im Kupfer vom heissen zum kalten Ende ein negativer Strom. Alle anderen Metalle lassen sich in diese beiden Kategorien einreihen, mit Ausnahme vielleicht von Blei, das beide Elektrizitätsarten gleich fest zu halten scheint und daher keine verschiedenen Wirkungen auf sie ausübt.

In wiefern diese Beziehung als „specifische Wärme“ aufgefasst werden kann, wird man begreifen, wenn man den letzten Abschnitt des § 61 aufmerksam durchliest

und die Elektrizität als materielles Fluidum betrachtet (siehe auch § 182). Doch hat diese Anschauungsweise sehr wenig für sich.

Pyro-Elektricität

Gewisse Krystalle, die an den beiden Enden ihrer Achse, A und B , verschieden gestaltet sind, werden in der Mineralogie als hemiëdrisch bezeichnet. Sie zeigen in der Richtung AB andere Eigenschaften, als in der Richtung BA , lassen sich z. B. in der einen Richtung leichter ritzen als in der anderen. Diese Krystalle, für welche die Klasse der Turmaline als typisch gelten kann, haben noch andere merkwürdige Eigenschaften. Die durchsichtigen unter ihnen sind undurchlässig für Licht, das in gewissen Ebenen polarisirt ist. Es werden nämlich die Schwingungen ausgelöscht, die senkrecht zur Achse auffallen, sodass ein senkrecht zur Achse geschnittenes Stück ganz undurchsichtig erscheint; während Schwingungen längs der Achse nur einer mässigen Absorption unterliegen. Diese Undurchsichtigkeit scheint etwas ganz anderes zu sein als die Undurchsichtigkeit der Metalle gegen elektrische Schwingungen, von der später die Rede sein wird; denn erstens wird das aufgehaltene Licht nicht reflektirt, sondern absorbirt, und zweitens ist ein Turmalinkrystall kein Leiter, sondern ein recht guter Isolator.

Dennoch ist das geringe Leitungsvermögen, das er besitzt, von sehr bemerkenswerthen Eigenthümlichkeiten begleitet, die *vielleicht* in naher Beziehung zu jener partiellen Undurchsichtigkeit stehen, welche ein parallel zur Achse geschnittenes Krystallstück zu einem optisch brauchbaren „Polarisator“ macht. Eine dieser Eigenthümlichkeiten entdeckte Herr S. P. Thompson gemeinschaftlich mit dem Verfasser. Während nämlich, wie bei allen einachsigen Krystallen, das thermische Leitungsvermögen in axialer und tangentialer Richtung verschieden ist (beim Turmalin ist es in axialer Richtung schwächer), leitet ausserdem noch ein sich erwärmender Krystall die Wärme besser in der Richtung BA als in der Richtung AB ; ein sich abkühlender Krystall verhält sich umgekehrt. Bei steigender Temperatur wird die Wärme leichter in der Richtung A als in der Richtung B befördert.¹⁾

Dasselbe gilt von der Elektrizität entweder in Folge der eintretenden Temperaturverschiedenheiten, oder aus irgend einem direkten Grunde. Wenn daher ein Krystall erwärmt wird, sammelt sich die positive Elektrizität am Ende A und die negative am Ende B . Solange die Temperatur konstant bleibt, ereignet sich weiter nichts, ausser dass, hauptsächlich wohl an der Oberfläche, Verluste eintreten, die mit der Zeit die ganze Erscheinung entstellen können. Wird der Krystall abgekühlt, so tritt eine umgekehrte Elektrisirung

¹⁾ Phil. Mag. Juli 1879.

ein; oder wenn kein Verlust stattgefunden hat, stellt die Abkühlung einfach das Gleichgewicht wieder her.

Bei gleichmässiger Temperatur des Krystalls konnte der Verfasser eine Verschiedenheit des elektrischen Leitungsvermögens in den Richtungen AB und BA nicht wahrnehmen. Auch das thermische Leitungsvermögen ist in beiden Richtungen gleich, solange die Temperatur unverändert bleibt. Beide Erscheinungen hängen ab vom Temperaturwechsel. Aber die elektrische Erscheinung ist mehr als das unilaterale Leitungsvermögen, sie ist eine echte, axiale, elektromotorische Kraft.

Fortpflanzung der Elektrizität in Gasen

64. Schliesslich haben wir uns noch mit der Frage zu beschäftigen, auf welche Art die Elektrizität durch Gase befördert wird.

Zunächst ist zu bemerken, dass die Gase und Dämpfe, welche Elektrizität leiten, unterschieden werden müssen von denen, die sie nicht leiten. Die leitenden Gase verhalten sich wie Elektrolyte, d. h. es findet wie bei den Flüssigkeiten, eine Wanderung geladener Atome oder *Ionen* statt; und man hat Grund anzunehmen, dass Gase, welche im Stande sind, Elektrizität zu leiten, sich in einem Zustande der Dissociation befinden. Eine hohe Temperatur oder eine kürzlich erfolgte

Entladung, beides wohlbekannte Mittel zur Herbeiführung der Dissociation, verleihen sogar einigen Gasen und Dämpfen ein Leistungsvermögen, denen es in normalem Zustande fehlt.

Nichtdissociirte Gase scheinen dagegen überhaupt nicht zu leiten; mit anderen Worten: ein Stoff in diesem Zustande verhält sich wie ein vollkommener Isolator — vielleicht der einzig vollkommene, den es überhaupt giebt. Wasserdampf, sogar Quecksilberdampf leitet nicht im Allergeringsten. Das blosse Bombardement der Molekeln, das bekanntlich in Gasen stattfindet, reicht also nicht hin, um eine elektrische Ladung fortzunehmen oder zu übertragen. Schuster und J. J. Thomson haben indessen nachgewiesen, dass wirklich einige Gase elektrolytisch leiten, und Schuster schildert mehrere merkwürdige Thatsachen, die mit dem Leistungsvermögen von Gasen während und unmittelbar nach einer elektrischen Entladung zusammenhängen. Ueber leitende Gase siehe § 65 d.

Die gewöhnliche Art, wie Elektrizität in nichtleitenden Gasen befördert wird, besteht, abgesehen von der rein mechanischen Uebertragung durch feste Körper, in einer von Durchschlagen begleiteten Entladung. Diesen Vorgang wollen wir uns bemühen etwas näher kennen zu lernen.

Da die Molekeln eines Gases sich ebenso frei bewegen können wie die Molekeln irgend eines anderen Fluidums, so drängt sich zu allererst die Frage auf:

weshalb leiten Gase nicht elektrolytisch wie Flüssigkeiten? Nun schienen zur Elektrolyse in einer Flüssigkeit zwei Bedingungen zu gehören: erstens mussten die Atome oder Radicale einer Molekel entgegengesetzt geladen sein; und zweitens mussten sie sich (durch Dissociation oder sonstwie) in einem Zustande befinden, in dem ein Austausch der Atome von Molekel zu Molekel oder sonst eine Art von Atomwanderung in einer gegebenen Richtung durch eine unendlich schwache Kraft bewirkt werden konnte.

Da die meisten Gase *nicht* elektrolytisch leiten, so entsprechen sie offenbar einer oder beiden dieser Bedingungen nicht. Entweder die Atome einer Gas-molekel sind nicht geladen, was bei einfachen Gasen wahrscheinlich ist, oder die Atome einer Gasmolekel gehören individuell zu der Molekel und lassen sich nicht beliebig austauschen. Die Molekeln sind dann unabhängig von einander und unterliegen nicht der doppelten Umsetzung.

Wenn wir sagen, dass ein Gas sich nicht verhält wie ein gewöhnlicher Elektrolyt, so stützen wir diese Behauptung auf die Erfahrung, dass eine endliche, elektrostatische Spannung im Innern eines Gases möglich ist; diese Spannung kann sogar einen sehr hohen Grad erreichen; überschreitet sie die Grenze und zwingt das Mittel zum Nachgeben, so tritt keine stetige, gleitende Verrückung oder Wanderung der Atome ein, sondern es findet ein gewaltsamer Durchbruch statt, der

von der ungenügenden Widerstandskraft des Mittels herrührt. Man kann sich also die Molekeln eines Gases zwischen zwei Elektroden oder Polen unter hoher Spannung so angeordnet denken, als wären sie durch eine Reihe von parallelen Ketten mit einander verbunden und so stark gespannt, dass sie nahe daran wären auseinandergerissen zu werden. Die einzelne Molekel braucht dabei nicht als feststehend gedacht zu werden; es kann ein starker Luftzug zwischen den Elektroden wehen; aber alle Molekeln sind der Spannung unterworfen, sobald sie in das Kraftfeld eintreten, und werden nicht eher davon befreit, als bis sie es verlassen. Siehe § 65 b.

65. Wenn das Potentialgefälle eine gewisse Grenze überschreitet, die für gewöhnliche Luft durch den Versuch zu ungefähr 33 000 Volt pro cm bestimmt worden ist, so geben die Molekeln nach; die Atome stürzen sich mit ihren Ladungen auf die Elektroden und die Entladung hat stattgefunden. Hierbei wird eine so grosse Zahl von Atomen losgerissen und in Stand gesetzt, eine Ladung zu befördern, dass es niemals die geringste Schwierigkeit macht, beliebige Elektrizitätsmengen auf diesem Wege zu übertragen. Mit anderen Worten, das Gas wird *während* der Entladung zum Leiter und kann, da es durch Atomwanderung leitet, als Elektrolyt bezeichnet werden.

Schuster hat entdeckt, dass dieses so erlangte Leitungsvermögen der Gase oder diese Fähigkeit, selbst

sehr schwache Spannungen auszugleichen, eine Zeit lang anhält und sich auch über die nähere Umgebung einer Entladungsstelle verbreitet; als ob eine Anzahl von Ionen oder geladenen Atomen losgerissen oder versprengt worden wäre und sich erst allmählich wieder vereinigte und gegenseitig neutralisirte.

Ob aber die elektrische Ladung jedem dieser Atome bereits von Anfang an innewohnte, oder ob sie den Bestandtheilen der Molekeln erst während der Spannung und Entladung mitgetheilt wurde, ist eine noch nicht entschiedene Frage.

Was man als die „dielektrische Festigkeit“ eines Gases bezeichnen könnte, d. h. der Grad der Spannung, den es ertragen kann ohne nachzugeben und vorübergehend zum Leiter zu werden, hängt theils von der Beschaffenheit des Gases, hauptsächlich aber von seinem Druck ab. Im Ganzen genommen kann man sagen, dass Gase unter hohem Druck sehr fest sind, Gase unter geringem Druck sehr schwach. Ein gewöhnlicher Elektrolyt wäre demnach ein Dielektricum, dessen Festigkeit gleich Null ist.

Ein Grund, weshalb die dielektrische Widerstandsfähigkeit der Gase vom Druck abhängt, liegt auf der Hand. Er ist zwar wohl nicht der einzige, aber doch wenigstens zum Theil sicherlich der wahre Grund. Es ist die Thatsache, dass bei verdünnten Gasen die Spannung sich auf eine geringe Zahl von Molekeln vertheilt.

Wenn wir z. B. 40000 Volt pro cm als nöthig annehmen, um gewöhnliche Luft zu durchschlagen, so werden 40 Volt pro cm genügen, um eine Entladung durch Luft, die unter einem Druck von ungefähr $\frac{3}{4}$ mm Quecksilber steht, herbeizuführen; dagegen würden bei einem Druck von 50 Atmosphären 2000000 Volt pro cm erforderlich sein.¹⁾

65 a. Leitung durch zuvor nicht dissociirte Gase ist wahrscheinlich in allen Fällen auf einen ähnlichen Vorgang zurückzuführen, wie den am Schluss des § 64 angedeuteten, nämlich auf die Bildung molekularer Ketten, wie Grotthus sie zur Erklärung der gewöhnlichen Elektrolyse annahm, und auf die Zersprengung dieser Ketten, wenn die Spannung einen bestimmten Grad erreicht hat. Dabei sind drei Hauptklassen zu unterscheiden:

(1) Die Ketten erstrecken sich bereits vorher längs der ganzen Bahn, welche die Entladung nachher einschlagen wird, wie bei einem zwischen ebenen Platten überspringenden Funken.

(2) Die Ketten bestehen nur in der Nähe der Elektrode, von der die Entladung ausgeht; es bilden sich aber fortwährend neue Ketten, da die entladene Elektrizität im Fortschreiten selbst zur Elektrode wird, an

¹⁾ Allerdings ist die Spannung der Flächeneinheit und die Energie der Raumeinheit proportional dem *Quadrat* des Potentialgefälles; ich lege auch auf das oben eingeführte einfache Verhältniss kein Gewicht. Es lässt sich über diesen Gegenstand noch sehr viel sagen; siehe Lodge, Brit. Assoc. Report 1885 pp. 760—2.

die sich neue Systeme von Ketten ansetzen. — Beispiel: Geschichtete Entladung zwischen kleinen, weit von einander entfernten Elektroden.

(3) Die Ketten sind nur in unmittelbarster Nähe der sich entladenden Elektrode vorhanden und die Elektrizität wird auf dem übrigen Wege von denjenigen Atomen übertragen, die beim Zerreißen der Ketten am äusseren Ende derselben frei werden. Auf diese Art vollzieht sich, meiner Ansicht nach, die Entladung von scharfen Spitzen auf entfernte Platten.

Diese Theorie der molekularen Kettenbildung bei Entladung in Gasen findet ihre beste Stütze in dem Umstand, dass sie von allen bisher vorgebrachten Theorien die einzige ist, die viele der auffallendsten Eigenschaften einer solchen Entladung in einfacher und zusammenhängender Weise erklärt.

So nimmt z. B. bei Funkenerscheinungen zwischen ebenen Platten die zur Funkenerzeugung erforderliche Feldstärke zu, wenn die Entfernung zwischen den Platten abnimmt, und zwar ganz ausserordentlich schnell, sobald die Entfernung weniger als 1 mm beträgt. Dies scheint fast unerklärlich, solange man sich die Gasmolekeln als durchweg frei und unabhängig von einander vorstellt. Nimmt man dagegen an, dass sie Ketten bilden, so ist die Erklärung leicht. Denn eine Kette ist das Resultat eines Gleichgewichts zwischen zwei entgegengesetzten Bestrebungen: dem Bestreben, unter der Einwirkung des Feldes zusammenzuhalten, und dem Bestreben, unter

dem molekularen Bombardement der umgebenden Gas-molekeln zu zerfallen. Dieses zersetzende Bombardement wird in einiger Entfernung von der Platte stärker sein, als in ihrer Nähe, weil die Platte, deren eigene Molekeln relativ ohne Bewegung sind, als eine Art Schirm wirkt und den Ketten eine feste Grundlage gewährt, auf der sie sich verankern können. Mithin werden die Ketten sämtlich von den Platten ausgehen, und da sie von sehr verschiedener Länge sind, werden sie in der Nähe der Platte zahlreicher sein als in einiger Entfernung; die allerwenigsten werden ganz hinüberreichen. Diese wenigen Ketten werden in der Mitte des Kraftfeldes die gesammte Spannung zu tragen haben; sie werden also in einem Feld von gegebener Stärke eine grössere Anzahl von Kraftlinien aufnehmen, mithin dem Zerreißen näher sein, wenn die Platten weit von einander entfernt als wenn sie nahe zusammen sind, da in letzterem Falle die Kraftlinien sich auf eine grössere Anzahl von Bahnen vertheilen werden.

Ferner hat Herr J. J. Thomson bei Entladungen zwischen weit von einander entfernten Elektroden unter Bildung von Schichtungen (Fall 2) nachgewiesen¹⁾, dass die Geschwindigkeit der Entladung der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar ist, obwohl wir unmöglich annehmen können, dass Atombewegungen auch nur annähernd diese Geschwindigkeit besitzen. Diese scheinbare Schwierigkeit überwindet er durch die

¹⁾ J. J. Thomson, Phil. Mag. Aug. 1890.

Annahme, dass die Ketten vor der im Fortschreiten begriffenen Entladung beständig neu entstehen und wieder zerreißen. Jede Zerreißung findet nämlich fast gleichzeitig an allen Stellen der Kette statt, wenn sie bricht, und befördert daher die Entladung mit fast unendlicher Geschwindigkeit eine endliche Strecke vorwärts — Zeit ist nur erforderlich zur Bildung der Ketten. Wenn die Entladung sich also Ketten von geeigneter Länge aussucht und dadurch die Zerreißungen zeitlich zweckmässig eintheilt, so kann sie sich mit derselben ungeheuern Geschwindigkeit fortbewegen, wie das Licht, ohne dass man gezwungen wäre, ein ungewöhnlich schnelles Wandern der einzelnen mit Elektrizität beladenen Atome anzunehmen. Die Elektrizität bewegt sich nach dieser Hypothese in Sprüngen und Sätzen, und die verschiedenen Ausgangspunkte dieser Sprünge — die Stellen wo eine Kette aufhört und die andere anfängt — werden durch die Schichtungen bezeichnet.

Bei der Entladung von einer Spitze auf eine Platte endlich (Fall 3) ist das Feld überall ausserordentlich schwach, ausgenommen dicht bei der Spitze, sodass weder Funken noch geschichtete Entladung möglich ist. Nichtsdestoweniger bilden sich doch höchst wahrscheinlich in dem starken Feld in der Umgebung der Spitze Ketten und führen durch Zerreißen die Entladung herbei. Denn die Beobachtung hat gelehrt¹⁾,

¹⁾ A. P. Chattock, Phil. Mag. September 1891.

dass in der Nähe einer Spitze die Feldstärke im Augenblick der Entladung rasch steigt, wenn die Abrundung der Spitze zunimmt. Dass ferner ¹⁾ die Feldstärke mit der Abnahme des Gasdrucks bis zu einem Minimum fällt und dann wieder steigt, wenn der Gasdruck weiter vermindert wird, erklärt sich leicht aus Veränderungen der Kettenlängen, die infolge der veränderten Bedingungen eintreten müssen.

Sind dann die End-Atome solcher von Spitzen ausgehenden Ketten in das Gas hineingeschleudert worden, so werden sie verhältnissmässig langsam darin weiter befördert. Wenigstens ist dies nach einem kürzlich von Lehmann ²⁾ ausgeführten Versuch sehr wahrscheinlich. Er lässt die Entladung von einer Spitze auf eine mit Seide umhüllte Metallplatte übergehen. Die Seide wird an der Stelle, wo die Entladung sie trifft, schwach leuchtend. Jetzt richtet er einen starken Luftstrom im rechten Winkel gegen die Bahn der Entladung — und zeigt, dass die leuchtende Stelle sich in der Richtung des Luftstroms verschiebt. Auf die Bahn eines gewöhnlichen Funkens dagegen würde der Luftstrom keine Wirkung ausüben.

65 b. Aber obgleich die Ketten viele Eigenschaften leitender Gase erklären, genügen sie an sich nicht, um über die sehr ausgeprägten Unterschiede zwischen dem Ueberströmen positiver und negativer Elektri-

¹⁾ Röntgen, Wiedemann's Elektrizität, vol. 4 § 582.

²⁾ Lehmann, Wiedemann's Annalen, 44. 645 1891.

cität von einer Elektrode zur anderen Aufschluss zu geben.

Wenn z. B. Funken von einer Spitze auf eine Platte überspringen (was man veranlassen kann, indem man das Potential genügend schnell erhöht), so sind sie für eine gegebene Spannung länger, wenn die Spitze die Anode als wenn sie die Kathode ist. Wenn ferner die Platte positiv ist, neigt der Funken dazu, von der Spitze auf den Rand der Platte überzuspringen, statt den kürzesten Weg nach der Mitte einzuschlagen, den er wählt, wenn die Platte negativ ist. Es scheint demnach, dass die Entladung, wenn die Platte positiv ist, von ihrer Oberfläche anfängt und sich dazu die schwächste Stelle aussucht, während sie, wenn die Platte negativ ist, von der Spitze ausgeht. Diese Ansicht wird bestätigt durch einen Versuch von Lehmann¹⁾, bei dem ein starker auf die Anode gerichteter Luftstrom den Funken unterbricht, während er an anderen Stellen seiner Bahn keine Wirkung auf ihn ausübt. Es ist sogar auf Grund noch unveröffentlichter Versuche zweifelhaft, ob eine plötzliche Funkenentladung jemals von der Kathode ausgeht. Hieraus scheint also zu folgen, dass wenn Funken überhaupt der Kettenbildung in Gasen bedürfen, die Ketten sich schneller von der Anode aus bilden, als an der Kathode. Dies würde der Fall sein, wenn die Kettenbildung aus irgend einem Grunde an der Oberfläche des Metalls

¹⁾ Wiedemann's Annalen, 44. 645. 1891.

in einer der positiven Elektrisierung entsprechenden Richtung schon angefangen hätte. In der That hat Herr J. J. Thomson nachgewiesen, dass in einer sehr langen, luftleeren Röhre die positive Entladung fast die ganze Strecke zurücklegt und der negativen Entladung bis ganz in die Nähe ihrer Elektrode entgegenkommt.

Nun ist es sehr wohl möglich, dass die von Volta beobachtete Erscheinung auf dem Vorhandensein solcher rudimentärer Ketten beruht, die an der Oberfläche des Metalls haften, vermöge seiner chemischen Anziehung für das Gas oder Mittel, in dem es sich befindet.¹⁾ Mithin wären *vielleicht* die Potentialdifferenz bei Volta's Versuch und die Asymmetrie zwischen positiven und negativen Entladungen verschiedene Wirkungen derselben Ursache. Diese Anschauungsweise stimmt jedenfalls überein mit der Thatsache, dass die Entladung durch Gase von einer Spitze aus leichter vor sich geht wenn die Spitze negativ ist. Dieselbe Ursache, die bei der Anode die Bildung molekularer Ketten befördert, hindert sie bei der Kathode, weil die Molekeln der dünnen Luftschicht bei Volta's Versuch in verkehrter Richtung zum Felde angeordnet sind und sich erst durch eine Drehung von 180° neu ordnen müssen, ehe die Ketten sich mit der Metalloberfläche verbinden können.

¹⁾ Nature vol. 43, p. 367.

Nun sind die Atome der Luftschicht enger mit einander verbunden als mit der Elektrode; es ist daher anzunehmen, dass unter der Einwirkung eines gleichmässigen Kraftfeldes die Neuordnung bei der Kathode anfangen wird, ehe die Ketten bei der Anode zerreißen. Diese Neuordnung wird die Molekeln der Luftschicht erschüttern und aller Wahrscheinlichkeit nach eine reichliche Menge von Atomen dissociiren oder loslösen, die dann ihre übertragende Wanderung antreten und die negative Entladung bilden werden.

Diese Atome werden, da sie unmittelbar von der Oberfläche der Kathode ausgehen, zunächst eine senkrechte Richtung zu derselben einschlagen, weil sie der Richtung der dort befindlichen Kraftlinien folgen müssen. Wenn das Gas unter hohem Druck steht, so werden sie bald durch wiederholte Zusammenstöße einen grossen Theil ihrer Anfangsgeschwindigkeit einbüßen und demnach empfindlich werden für die Einwirkung des viel schwächeren Feldes in einiger Entfernung von der Elektrode, sodass sie sich seiner Richtung mehr oder weniger vollständig anschliessen werden.

Ist dagegen der Druck sehr gering, so werden weniger Zusammenstöße erfolgen, die Atome werden daher voraussichtlich einen grossen Theil ihrer Anfangsgeschwindigkeit bewahren und ihre ursprüngliche Bahn beibehalten, unbekümmert um die Einwirkung des schwachen Feldes. Vielleicht lässt sich mit diesem Vorgang Crookes' bekannte „strahlende Materie“ er-

klären, die bei ausserordentlich schwachem Druck sichtbar wird.

Im Ganzen ist jedoch die Entladung in Gasen ein Gegenstand, über den die Ansichten noch sehr schwanken und Vermuthungen wie die obige können nur versuchsweise vorgebracht werden.

65 c. Es ist möglich, sich von der Grösse der von jedem einzelnen Gasatom beförderten elektrischen Ladung eine annähernde Vorstellung zu bilden. Herrn Schuster ist dies gelungen.¹⁾ Er lässt einen Magneten auf die geladenen Theilchen einwirken, während sie die Kathode in einem mässig hohen Vacuum verlassen, und beobachtet die durch diesen hervorgerufene Ablenkung ihrer Bahn vermöge ihrer Leuchtkraft. Von gewissen Annahmen ausgehend berechnet er das Verhältniss der beförderten Elektrizitätsmenge zu der Masse ihrer Träger, ausgedrückt durch den Krümmungsradius der leuchtenden Bahn, die Stärke des Magneten und das Potentialgefälle an der Kathode. Die resultierende Zahl ist von derselben Grössenordnung wie das durch elektrolytische Messungen gewonnene elektrochemische Aequivalent des Gases. Eine andere Methode besteht darin, die Stärke des Feldes an einer Stelle zu messen, wo die Ketten nur aus einer einzigen Molekel bestehen. Dies würde der Fall sein bei Platten, die durch eine molekulare Schicht getrennt sind, oder bei Spitzen von molekularen Dimensionen. Wenn man von wirk-

¹⁾ Bakerian Lecture, Proc. Roy. Soc. 47, p. 546.

lichen Beobachtungen ¹⁾ ausgehend auf die Stärke des Kraftfeldes unter diesen unerreichbaren Bedingungen einen Schluss zieht, so ergibt sich, dass die entsprechende Atomladung jedesmal von derselben Größenordnung ist, wie die Ladungen, welche die Atome bei der Elektrolyse befördern. Möglicherweise wird sich daher später herausstellen, dass sie identisch sind; jedenfalls trägt dieser Umstand nicht wenig dazu bei, die oben entwickelte Ansicht zu unterstützen, dass die Ursache der Asymmetrie zwischen positiven und negativen Entladungen elektrolytischer Art ist. Chemische Veränderungen in den Dämpfen von Elektrolyten, die einer hinreichend starken elektrostatischen Spannung ²⁾ unterworfen werden (wie z. B. die Zersetzung von Wasserdampf in Sauerstoff und Wasserstoff) deuten in derselben Richtung.

65 d. Eine wichtige Folge des Zerreißens der molekularen Ketten, die zugleich eine nothwendige Bedingung der Leitung in Gasen zu sein scheint, ist der Umstand, dass an jedem Ende der Kette ein Atom dissociirt wird. Ja, man kann sagen, dass die Ketten hauptsächlich dazu dienen, dem Potentialgefälle die Herbeiführung der Dissociation zu ermöglichen. Die Molekeln in der Umgebung einer Elektrode brauchen nur zersprengt zu werden, damit Leitung erfolgt. So gerathen z. B. nach Herrn Schuster Gase in einen „empfindlichen Zu-

¹⁾ A. P. C., Phil. Mag. September 1891.

²⁾ Lehmann, Molekular-Physik, vol. 2 p. 328.

stand“, sobald eine Entladung innerhalb ihrer Grenzen stattfindet; in diesem Zustand vermag jede, auch die geringste elektromotorische Kraft Elektrizität durch die Gase zu befördern. Das Gas verliert für den Augenblick vollständig die Fähigkeit der Isolation für schwache elektrostatische Spannungen. Offenbar sind es die in einem Theil des Gases durch die Entladung dissociirten Atome, welche die Leitung auch in den übrigen Theilen erleichtern.

Da Wärme zur Dissociation von Gasen beiträgt, so tritt dieser empfindliche Zustand auch ein, wenn man die Temperatur eines Gases hinreichend erhöht.

Aus diesem Grunde sind wahrscheinlich Flammen so ausgezeichnete Leiter. Einige Versuche von Herrn Worthington über die Entladung von Elektrizität durch Flammen¹⁾ sind in diesem Zusammenhange lehrreich. Sie deuten darauf hin, dass eine anscheinend neutrale Flamme eine Anzahl entgegengesetzt geladener Atome enthält, die durch elektrostatische Spannung von einander getrennt werden können. Auch Herr J.J. Thomson hat die Leitung heisser Gase und Dämpfe erforscht und ist zu dem bedeutsamen Schluss gelangt, dass nicht die Dissociation überhaupt, sondern vielmehr eine besondere Art der Dissociation den Gasen Leitungsvermögen verleiht. Nach seiner Ansicht müssen die Molekeln in *Ionen* zersprengt werden. Bei Wasser-

¹⁾ Brit. Ass. Electrolysis Committee's Report, 1889; Newcastle volume, p. 225.

dampf z. B., der in Wasserstoff- und Sauerstoffmolekeln zersetzt wird, bringt die Dissociation keine Steigerung des Leitungsvermögens hervor.²⁾ Auch hierin sehen wir also einen Beweis, dass sich die Leitung in Gasen auf elektrolytischem Wege vollzieht.

Der Strom als fortbewegte Ladung

66. Halten wir nun Umschau auf dem Gebiet, das wir uns zu eigen gemacht haben. Wir suchten uns zunächst eine Vorstellung zu bilden von dem Wesen einer elektrostatischen Ladung und den Funktionen eines dielektrischen Mittels in der Elektrostatik. Alsdann suchten wir, so weit es anging, die Erscheinungen der strömenden Elektrizität auf Elektrostatik zurückzuführen. Denn, da ein Strom nur Elektrizität in Bewegung ist, so braucht er nichts weiter zu sein als ein geladener Körper, der rasch fortbewegt wird.

Man lade eine Kugel mit positiver oder negativer Elektrizität und schleudere sie in irgend einer beliebigen Richtung, so bildet sie einen positiven oder negativen Strom in dieser Richtung. Einer weiteren Erklärung des Stromes bedarf es nicht. Ein dauernder Strom zwischen zwei Körpern kann erhalten werden, indem man eine Anzahl Markkügelchen oder Staubtheilchen von einem zum anderen schwingen lässt. Diese würden

²⁾ J. J. Thomson, Phil. Mag. April 1890.

die positive Elektricität in der einen Richtung, die negative Elektricität in der anderen Richtung befördern. Allerdings würden solche Träger, die mit ihren entgegengesetzten Ladungen an einander vorbei wandern, sehr geneigt sein, an einander hängen zu bleiben und sich zu verbinden. Sie müssten dann auf elektrischem Wege wieder zersprengt oder durch den Anprall anderer Theilchen auseinandergerissen werden; geschähe dies nicht, so würde der Strom bald in's Stocken gerathen und man würde nichts haben als ein polarisirtes Mittel.

Man denke sich statt der Markkügeln geladene Atome und man erhält ein rohes Bild von dem, was einerseits in einem Elektrolyten, andererseits in einem Dielektricum vorgeht. Unklarer ist das Verhalten von Metallen und festen Leitern. Bei diesen kann von einer Beförderung durch Träger nicht die Rede sein; da aber keine andere Erscheinung hinzutritt, liegt es nahe, sich den Vorgang als nicht ganz unähnlich vorzustellen; hierzu wurde § 27 ein Versuch gemacht, jedoch mit geringem Erfolg.

67. Der elektrische Strom braucht, wie gesagt, nichts Complicirteres zu sein, als eine geladene Kugel in rascher Bewegung; und durch eine genaue Betrachtung dieses Vorganges haben wir viele Eigenschaften des Stromes kennen gelernt. Indessen auch so ist das Problem keineswegs einfach. Es sind in Betracht zu ziehen nicht bloß die bekannte in Bewegung begriffene Ladung, sondern auch die entgegengesetzte inducirte Ladung,

die durch Kraftlinien (oder Inductionsrohren, wie man auch sagt) mit jener verbunden ist. Dieses ganze verwickelte System bewegt sich und erzeugt dadurch in dem Mittel eine ganz neue Erscheinung, eine drehende Bewegung, die man nicht ohne Weiteres vorausgesetzt haben würde. Sie bewirkt, dass zwei gleichnamig geladene, in rascher Bewegung befindliche Kugeln sich weniger stark abstossen als im Ruhezustand und sogar bei hinreichend rascher Bewegung dahin gelangen können, sich anzuziehen; dass ferner eine Beziehung zwischen Elektrizität und Magnetismus entsteht und der in Bewegung begriffene geladene Körper eine Magnetnadel ablenkt (§§ 113 und 184). Siehe das Weitere im III. Theil.