

Abschnitt VI.

Elektrizität.

A. Elektrizität in Ruhe. Elektrostatik.

§ 238. Wenn wir ein Stück Bernstein an einem wollenen Lappen reiben und bringen es dann in die Nähe von leichten Körperchen, Papierschnitzeln, Holundermarkkugeln u. s. w., so werden dieselben angezogen, fliegen an das Bernsteinstück heran, bleiben einen Augenblick haften, werden dann kräftig abgeschleudert. Dieser Versuch war schon den Griechen bekannt, und da Bernstein griechisch *ἤλεκτρον* heisst, nennt man das der Erscheinung zu Grunde Liegende Elektrizität. Wie Bernstein verhalten sich sehr viele Körper: Schwefel, Harze, Siegellack, Ebonit, Glas u. s. w. Metalle zeigen die Anziehung nicht, wenn wir Stäbe davon direkt in die Hand nehmen und reiben, wohl aber, wenn sie sich an einem gläsernen Griff befinden. Wir werden später (§ 241) sehen, dass die Metalle gute Leiter der Elektrizität sind, d. h. dieselbe fliesst durch Metalle sofort ab, während Glas ein Isolator ist, d. h. die Elektrizität nicht leitet; daher wird scheinbar ein Metallstab nicht elektrisch, wenn wir ihn in der Hand halten, da dann die Elektrizität sofort zur Erde abfliesst. Wir können so geradezu sagen: Alle Körper werden durch Reibung elektrisch, wenn auch in sehr verschiedenem Grade, und wenn wir es auch nicht immer in der angegebenen Art nachweisen können, aus später zu besprechenden Gründen.

Wir wollen nun ein leichtes Holundermarkkugeln an einem Kokonfaden aufhängen, eine Glasstange an Seide reiben und sie dem Kugeln nähern. Wie schon angegeben, wird es erst angezogen, dann aber abgestossen, nachdem es den Glasstab berührt hat. Jeder andere geriebene Glasstab stösst jetzt das Kugeln

ebenso ab. Reiben wir aber eine Harzstange, z. B. Siegellack, und nähern sie der Kugel, so wird diese vom Harze noch viel lebhafter angezogen, als wenn sie vom elektrischen Glase nicht berührt war. — Berühren wir dagegen die Kugel zuerst mit einer elektrischen Harzstange, so wird sie von allen geriebenen Harzstangen abgestossen, von einer geriebenen Glasstange dagegen viel lebhafter angezogen.

Diese Versuche zeigen uns, dass Harz und Glas durch Reiben elektrisch werden, aber in verschiedener Weise. Man nimmt daher an, dass es zwei Arten von Elektrizität gibt, Glaselektrizität und Harzelektrizität. Man ist übereingekommen, erstere positive, letztere negative Elektrizität zu nennen. Die geriebene Glasstange enthält positive Elektrizität, bei der Berührung mit dem Kügelchen wird diesem etwas davon mitgeteilt, und nun stossen sich beide ab, während die mit negativer Elektrizität geladene Harzstange das positive Kügelchen anzieht. Wir können also aus den beschriebenen Versuchen den Schluss ziehen: Gleichnamige Elektrizitäten stossen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Indem wir die Körper an einander reiben, teilen wir ihnen von aussen nichts mit; die Elektrizität, mit welcher sie geladen erscheinen, kann also nur durch eine Trennung oder andere Verteilung schon vorhandenen Stoffes entstehen. Wir müssen daher annehmen, ähnlich wie beim Magnetismus, dass jeder Körper von vornherein gleichgrosse Mengen positiver und negativer Elektrizität enthalte, die nach aussen unwirksam sind, weil sie überall in gleicher Menge gemischt vorhanden sind. Beim Reiben werden sie getrennt, und da der eine Körper, z. B. die Glasstange, danach mehr positive Elektrizität enthält, muss der zweite Körper, in diesem Fall das seidene Tuch, die gleiche Menge negativer Elektrizität enthalten. Das bestätigt in der That der Versuch: Der reibende Körper ist immer entgegengesetzt elektrisiert wie der geriebene.

Während wir beim Magnetismus in jedem Körper immer beide Arten von Magnetismus haben, sie nicht etwa durch Zerschneiden des Magnetstabes trennen konnten, sind wir bei der Elektrizität im stande, einem Körper nur die eine oder andere Art der Elektrizität zu erteilen.

Man hat angenommen, die verschiedenen Körper hätten eine verschiedene Verwandtschaft zu positiver oder negativer Elektrizität. Sobald wir zwei Körper zur Berührung bringen, wird derjenige von

beiden, welcher stärkere Verwandtschaft zur positiven Elektrizität hat, etwas davon zu sich herüberziehen, der andere Körper, der vorher gleiche Mengen + und — Elektrizität hatte, wird jetzt weniger positive haben, daher — elektrisch sein. Das Reiben befördert nach dieser Anschauung nur die Berührung, lässt sie an viel mehr Punkten der Oberfläche stattfinden.

Es folgt weiter, dass Zuführung positiver oder Entziehung der gleichen Menge negativer Elektrizität genau gleich wirken, der Körper wird positiv elektrisch; ebenso wie Entziehung positiver oder Zuführung negativer Elektrizität den Körper negativ macht. Auch ergibt sich, dass wir einen z. B. positiv elektrischen Körper unelektrisch machen können, indem wir ihm den Ueberschuss positiver Elektrizität entziehen, oder indem wir ihm die gleiche Menge negativer Elektrizität zuführen, wodurch die positive neutralisiert wird.

§ 239. Die Hypothese, dass es zwei Arten von Elektrizität gebe, die man sich als imponderable Fluida zu denken hat, rührt von Symmer (1759) her. Danach hat also jeder Körper von vornherein unerschöpflich grosse, aber gleiche Mengen positiver und negativer Elektrizität, und da die eine gerade ebensoviel abstösst, wie die andere anzieht, erscheint der Körper nach aussen unelektrisch. Sobald aber das eine Fluidum überwiegt, ist er entsprechend elektrisch.

Von Franklin (1755) ist die sog. unitarische Hypothese im Gegensatz zu jener dualistischen aufgestellt. Danach gibt es nur ein elektrisches Fluidum; hat der Körper eine normale Menge davon, so erscheint er unelektrisch, hat er mehr, so ist er positiv, hat er weniger, so ist er negativ. Diese Theorie, welche zunächst einfacher erscheint, ist in ihren Anwendungen viel komplizierter; sie zwingt nämlich zur Annahme, dass ponderable Massen sich abstossen, Elektrizitätsmengen ebenfalls, dagegen Elektrizität und Materie sich anziehen.

Endlich ist von Faraday (1837) eine ganz neue Auffassung ausgegangen, welche namentlich durch Maxwell genauer ausgearbeitet und in präzise Form gebracht wurde. Wir können auf diese Theorie erst später eingehen.

Wie wir uns aber auch das Wesen der Elektrizität denken mögen, wir können die Vorgänge am bequemsten beschreiben nach der dualistischen Hypothese. Das wollen wir denn auch thun,

gerade wie wir die Wärmevorgänge beschrieben haben, als ob die Wärme ein Stoff wäre, obgleich wir dort sicher wussten, dass sie es nicht ist, und was sie ist.

§ 240. Zur Erzeugung grösserer Mengen von Elektrizität dient die Elektrisiermaschine, welche zuerst von O. v. Guericke (1663) hergestellt wurde. Das Prinzip derselben erläutert Fig. 171: Eine kreisrunde Glasscheibe A ist mittelst Kurbel B um eine horizontale Axe drehbar. Sie reibt sich dabei in dem sog. Reibzeug C, welches aus zwei innen mit Lederkissen überzogenen Brettchen besteht; dieselben sind überstrichen

mit Amalgam, einer Mischung von Quecksilber mit Zinn oder Zink und ein wenig Fett, also einem metallischen Leiter; das Amalgam reicht bis an den Rand der Brettchen und wird durch einen hier befindlichen Metallstreifen und durch eine daran angeknüpfte Kette oder Draht D mit

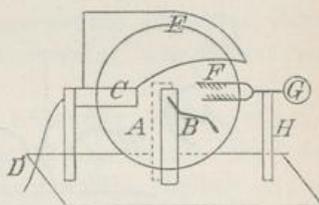


Fig. 171.

der Erde (Wasser- oder Gasleitung) verbunden. Am Reibzeug sind zwei Seidenlappen E befestigt, welche die Scheibe bei der Drehung auf ihrem weiteren Wege umgeben. Wo die Scheibe E verlässt, tritt sie in einen innen mit Metallspitzen versehenen Metallbügel F, welcher die Scheibe umgibt, sie aber nicht berührt. Er ist in metallischer Verbindung mit einer grösseren Metallkugel G, dem Konduktor, welcher auf dem gläsernen Fuss H isoliert aufgestellt ist.

Die Zwecke der einzelnen Teile können wir erst allmählich kennen lernen (§ 253); hier genüge folgendes: Beim Drehen der Scheibe reibt sie sich am Metall des Reibzeuges, wird dadurch positiv, während das Reibzeug negativ wird. Von letzterem als einem Leiter kann die Elektrizität zur Erde abfliessen, während die isolierende Scheibe ihre Elektrizität mit fortführt, bis sie zwischen die Spitzenkämme F tritt. Hier gibt sie scheinbar ihre Elektrizität an F ab, welche sich in G sammelt während die Scheibe wieder unelektrisch zwischen C gelangt, wo neue Elektrizität erzeugt wird.

§ 241. Mit einer solchen Maschine kann man bedeutende Elektrizitätsmengen im Konduktor ansammeln, und dann die Versuche über Anziehung und Abstossung, über Leitungsfähigkeit u. s. w.

deutlicher ausführen. Einige der üblichen Versuche sind folgende: Mit dem Konduktor A (Fig. 172) wird durch einen Draht eine isoliert (auf Glasfuss) aufgestellte Metallglocke B verbunden, die sich daher lädt. Neben ihr steht eine zweite nicht isolierte Glocke C, und zwischen beiden hängt an einem (isolierenden) Seidenfaden ein Metallkugeln D. Dasselbe wird von B angezogen, lädt sich auch mit + Elektrizität, wird daher gleich darauf abgestossen, fliegt nach C und gibt hier seine Elektrizität ab, die zur Erde fließt.

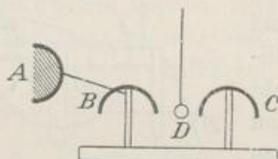


Fig. 172.



Fig. 173.

Das unelektrische D wird jetzt wieder angezogen und transportiert wieder ein Quantum Elektrizität von B über C zur Erde. Auf diese Weise wird der Konduktor langsam entladen.

Stellt man auf den Konduktor A (Fig. 173) einen Draht, an dessen oberem Ende eine Zahl dünner Streifen von Seidenpapier befestigt sind, so laden sich diese alle positiv, stoßen sich daher ab und sträuben sich nach allen Seiten, während sie unelektrisch schlaff herunterhängen. Berühren wir nun den Konduktor mit verschiedenen Substanzen, so fallen die Papierchen zusammen, sobald die Substanz ein Leiter ist, der Konduktor also durch Berührung entladen wird, anderenfalls bleiben sie gesträubt. So können wir uns überzeugen, dass die Metalle die besten Leiter sind, dass auch die meisten Flüssigkeiten und feuchten Körper, daher auch der menschliche Körper, sehr gute Leiter sind; dagegen sind Harze, Ebonit, Seide, Glas, Luft vorzügliche Isolatoren. Auch feuchte Luft isoliert an und für sich, nur überzieht sie die Oberflächen der Isolatoren, z. B. der Glasstäbe, mit Flüssigkeit, welche dann leitet, so dass feuchte Luft der gefährlichste Feind der isolierenden Fähigkeit aller Apparate ist.

§ 242. Das Gesetz, nach welchem Elektrizitätsmengen auf einander einwirken, ist von Coulomb mit Hilfe der Drehwage

(§ 230) in derselben Weise festgestellt worden, wie für magnetische Massen. Kleine leitende Kugeln, welche sich am Ende von Schellackstäben befanden, wurden elektrisiert an Stelle der Magnetnadeln in die Wage gebracht. Durch Berührung mit einer gleichgrossen, unelektrischen Kugel konnte die Ladung auf $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ u. s. w. gebracht werden. Coulomb fand auch hier das Gesetz, dass die Kraft proportional beiden Elektrizitätsmassen, umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung sei, also $K = k \frac{Mm}{r^2}$. Je nachdem beide Elektrizitätsmengen das gleiche oder verschiedene Vorzeichen haben, ist die Kraft eine Abstossung oder Anziehung; das positive Vorzeichen bedeutet daher Abstossung.

Mit Hülfe der Coulombschen Gleichung können wir eine Einheit der Elektrizitätsmenge nach absolutem Maß definieren. Der Faktor k hängt von der gewählten Einheit ab; wir nehmen diese so, dass $k = 1$ wird. Dann ist diejenige Menge die Einheit, welche auf eine gleich grosse Menge im Abstand 1 *cm* die Kraft 1 (1 Dyne) ausübt.

Daraus folgt die Dimension:

$$\text{Elektrizitätsmenge} = [K^{1/2}L^{3/2}T^{-1}].$$

Man sagt, die nach dieser Einheit gemessene Elektrizität sei nach elektrostatischem Maß gemessen.

§ 243. Wir haben bei der Schwere (§ 60) und bei der Wirkung magnetischer Massen (§ 230) den Begriff des Potentials besprochen; derselbe gilt hier in unveränderter Weise, da das Gesetz für die Wirkung der Kraft das gleiche ist. Haben wir daher irgendwo die Menge m der Elektrizität, welche rings herum im Raume eine Kraft ausübt, so verstehen wir unter dem Potential einer Stelle dieses Raumes die Arbeit, welche nötig ist, um die Einheit der positiven Elektrizität bis zu dieser Stelle aus der Unendlichkeit heranzubringen. Das Potential der Erde nennt man 0: man kann daher auch sagen statt: aus der Unendlichkeit: von der Erde her.

Dass wir das Potential der Erde $= 0$ setzen können, rührt daher, dass wir überhaupt nur Unterschiede der Potentiale beobachten und messen können, das Potential also nur bis auf eine Konstante bestimmen können, deren Wert für uns ohne Einfluss ist.

Wir legen nun allen Messungen den Zustand der Erde zu Grunde, vergleichen die Potentialdifferenzen gegen dieselbe, erhalten daher dieselben Differenzen der Körper unter einander, wie wir auch den Wert des Potentials der Erde nennen mögen.

Wir haben gesehen (§ 230), dass der Ausdruck für das Potential ist: $\frac{m}{r} = P$. Haben wir zwei Punkte, p und p_1 , welche um die sehr kleine Strecke ρ entfernt sind, in welchen das Potential P und P_1 ist, so nennt man $\frac{P_1 - P}{\rho}$ das Potentialgefälle auf der Strecke ρ in der Richtung von P_1 nach P . Es ist mit entgegengesetztem Vorzeichen gleich der Komponente der Kraft, welche die elektrische Einheit vom ersten zum zweiten Punkt zu treiben sucht; denn $P_1 - P$ ist die Arbeit, die nötig ist, um die positive Einheit um ρ von P nach P_1 zu verschieben, dieselbe ist aber gleich ρ mal der herrschenden Kraft, also letztere gleich $\frac{P_1 - P}{\rho}$.

Die Potentialdifferenz spielt bei den elektrischen Vorgängen dieselbe Rolle, wie bei der Hydrostatik der hydrostatische Druck infolge von Höhenunterschied zwischen Flüssigkeitsniveaus, oder auch wie der Temperaturunterschied in den Erscheinungen der Wärmeleitung und wir werden diese noch mehrfach zur Vergleichung benutzen können. Wie das Heraufschaffen von Wasser zu einem höheren Niveau Arbeit kostet, die potentielle Energie vermehrt, so kostet das Heraufschaffen von Elektrizität von einem Potentialniveau zu einem anderen Arbeit, und man spricht auch hier von höherem Potential an einer Stelle, wenn die Elektrizität von dort nach einer anderen abzufließen sucht.

Das Potential der Elektrizitätsmenge m ist im Abstände r : $P = \frac{m}{r}$, d. h. dies ist die Arbeit, welche zu leisten ist, um die Einheit der Elektrizitätsmenge von der Erde bis in die Entfernung r von m zu bringen. Sind verschiedene Massen m vorhanden, so wird das Potential oder die Arbeit $P = \Sigma \frac{m}{r}$; wird nicht die Einheit, sondern die Menge M herangeführt, so ist dazu die Arbeit nötig: $M \Sigma \frac{m}{r} = \Sigma \frac{Mm}{r} = MP$.

Bei der Lehre von der Elektrizität ist noch eine besondere Art des Potentials von grosser Wichtigkeit, das sog. Potential

der Elektrizität auf sich selbst. Dasselbe misst die Arbeit, die zu leisten ist, wenn man eine bestimmte Elektrizitätsmenge M auf einen isolierten zunächst unelektrischen Leiter bringen will. Denken wir uns M in einzelne Teilchen $m_0, m_1, m_2 \dots m_n$ zerlegt, die wir nach einander heranbringen. Für das Aufbringen des ersten Teilchens m_0 ist keine Arbeit nötig, da noch keine Elektrizität auf dem Körper ist, die abstossend wirkte. Für jedes folgende Teilchen aber wird die Arbeit grösser, und für das letzte Teilchen m_n , welches schon gegen fast die ganze Masse M und deren Potential $\frac{M}{r}$ heranzubringen ist, ist die Arbeit $\frac{M m_n}{r}$. Wäre nun dauernd, wie beim ersten Teilchen, das Potential 0, so wäre die Gesamtarbeit: $0 \cdot m_0 + 0 \cdot m_1 + 0 \cdot m_2 \dots + 0 \cdot m_n = 0$. Wäre dagegen dauernd, wie beim letzten Teilchen, das Potential $\frac{M}{r}$, so wäre die Gesamtarbeit:

$$\frac{M m_0}{r} + \frac{M m_1}{r} \dots + \frac{M m_n}{r} = \frac{M}{r} (m_0 + m_1 \dots + m_n) = \frac{M^2}{r}.$$

Es ist plausibel, dass wir den wirklichen Wert der Arbeit erhalten, wenn wir das arithmetische Mittel aus diesen Grenzwerten

nehmen, also $\frac{0 + \frac{M^2}{r}}{2} = \frac{1}{2} \frac{M^2}{r}$, und die höhere Rechnung zeigt, dass das richtig ist.

Die Grösse $\frac{1}{2} \frac{M^2}{r}$ misst also die Arbeit, die verbraucht wird, wenn man z. B. auf eine isolierte Metallkugel vom Radius r die Elektrizitätsmenge M bringt; sie stellt daher auch die Energie des geladenen Körpers vor. (Vgl. § 252.)

§ 244. Auf dem Coulombschen Gesetze beruhen die Apparate zur Messung der Elektrizitätsmengen; es seien folgende genannt: Einer der einfachsten Apparate ist das Henleysche Elektrometer, welches bei der Elektrisiermaschine noch verwandt wird; auf den Konduktor A (Fig. 174) wird ein Draht B gesteckt, an welchem drehbar ein Draht befestigt ist, der sich vor einer Gradteilung drehen kann und an seinem Ende ein Kügelchen aus Hölzchen trägt. Dasselbe wird durch den Draht geladen und von B abgestossen, um so weiter, je höher das Potential oder, wie man es auch nennt, die Spannung in A ist.

Das absolute Elektrometer von W. Thomson besteht aus zwei horizontalen parallelen Metallscheiben; die obere hängt an einem Wagebalken. Die Platten werden geladen, und ihre Anziehung oder Abstossung kann durch aufgelegte Gewichte ausgeglichen werden und so die Kraft direkt in absolutem Maß bestimmt werden.

Die Quadrantelektrometer rühren ebenfalls von W. Thomson her und werden in vielen verschiedenen Formen gebaut. Sie bestehen aus einer flachen kreisrunden Metallschachtel, welche in vier Quadranten zerschnitten ist (Fig. 175 A). Je zwei gegenüber-

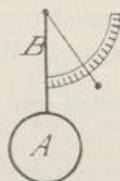


Fig. 174.

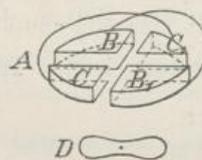


Fig. 175.

liegende Quadranten, B und B_1 , und C und C_1 , sind durch einen Draht leitend verbunden. Im Innern der Schachtel schwebt an einem dünnen Draht- oder Glasfaden ein biskuitförmiger Flügel D aus Aluminiumblech. Derselbe wird auf irgend eine Weise dauernd geladen, z. B. positiv, und mittelst des Aufhängedrahts so gestellt, dass er sich gerade unter einem Spalt zwischen den Quadranten befindet. Wird dann einem der Quadrantenpaare Elektrizität mitgeteilt, so wird der Flügel angezogen oder abgestossen, man misst die Drehung durch Spiegelablesung; sie ist für kleine Ablenkung dem Potential der mitgeteilten Elektrizität proportional.

§ 245. Schon Coulomb hat untersucht, wie stark die Elektrisierung bei Reibung verschiedener Körper an einander wird, und hat eine Reihe, die sog. Spannungsreihe, aufgestellt derart, dass stets der früher genannte Körper negativ elektrisch wird bei Reibung mit einem später genannten, der positiv wird. Eine solche Reihe ist folgende: — Schwefel, Seide, Harze, Metalle, Siegellack, Wachs, Holz, Papier, Federn, Wolle, Felle, Glas +. Je weiter zwei Körper in der Reihe aus einander stehen, desto stärker wird die Elektrisierung. Die Körper erweisen sich übrigens sehr variabel je nach der zufälligen Beschaffenheit ihrer Oberfläche.

§ 246. Bei den bisher besprochenen Erscheinungen hat sich die Wirkung der Elektrizität in einer Anziehung oder Abstossung der geladenen ponderablen Körper geltend gemacht. Es tritt aber gleichzeitig noch eine andere, die eigentlich fundamentale Wirkung auf, nämlich eine Bewegung, ein Fliesen der Elektrizität selbst. Man schreibt daher einem elektrisierten Körper zweierlei Kräfte zu, ponderomotorische und elektromotorische. Der Fundamentalversuch, der dies zeigt, ist folgender: Wir nehmen einen länglichen metallischen isoliert befestigten Leiter A; es seien in der Mitte und an den Enden je zwei Drähte mit kleinen Korkkugeln angehängt; der Leiter sei unelektrisch. Wir nähern ihn einem z. B. positiv geladenen Körper B, dann zeigt sich, dass die äusseren Kugelpaare sich sträuben (siehe Fig. 176), das mittlere dagegen

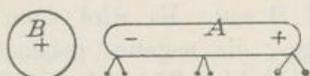


Fig. 176.

schlaff herunterhängt; sobald wir B entfernen, fallen auch die äusseren wieder zusammen, A ist unelektrisch wie vorher.

Das Sträuben der äusseren Paare beweist, dass hier Elektrizität vorhanden war, und wir erklären den Versuch so: Bei Annäherung von B wurden die in A vorhandenen gleichen Mengen von positiver und negativer Elektrizität, die bisher gemischt und daher nach aussen unwirksam waren, getrennt; die negative Elektrizität wird von dem positiven B angezogen, sammelt sich an dem B zugekehrten Ende, die positive Elektrizität wird möglichst weit abgestossen, geht nach dem anderen Ende. Die Enden von A erscheinen daher elektrisch, die Mitte unelektrisch. Sobald wir B entfernen, hört die scheidende Kraft auf, positive und negative Elektrizität in A ziehen sich an und vermischen sich wieder, der Körper ist unelektrisch.

Dass diese Erklärung richtig ist, können wir so erkennen: Wir nähern wieder B, die äusseren Paare sträuben sich; nun bringen wir A in Verbindung mit der Erde, die Paare fallen zusammen. Es wird nämlich die B gleichnamige Elektrizität, also in unserem Falle die positive, so weit wie möglich abgestossen, sie fliesst also zur Erde ab, die Enden werden unelektrisch. Lösen wir darauf die Verbindung mit der Erde, entfernen B, so zeigt sich, dass alle

drei Paare sich sträuben, A erweist sich negativ elektrisiert. Die vorher an dem B zugekehrten Ende befindliche negative Elektrizität wurde eben durch B angezogen und festgehalten, so dass sie nicht zur Erde abfloss, sobald aber B entfernt wird, verteilt sie sich über den ganzen Leiter, der sonach negativ elektrisch erscheint.

Man nennt diese elektromotorische Wirkung von B auf A, die Trennung der Elektrizitäten, elektrische Influenz. Die durch Influenz getrennten Elektrizitäten verhalten sich verschieden: nur die eine, die gleichnamige, hat das Bestreben abzufliessen, die ungleichnamige aber wird festgehalten, sie ist gebundene Elektrizität.

Halten wir zwischen die geladene Kugel B und den Körper A einen Metallschirm C, der mit der Erde verbunden ist, so hört jede Wirkung von A auf B auf. Es wird dann nämlich auf C die Elektrizität geschieden, die negative gebunden, die positive zur Erde abgeleitet. Die positive Elektrizität auf B und die negative auf C binden sich nun gegenseitig, d. h. neutralisieren sich in ihrer Wirkung auf A hin vollständig. Umgeben wir B mit einer allseitig geschlossenen Metallhülle, die zur Erde abgeleitet ist, so verhält sich also dies System nach aussen, wie ein unelektrischer Körper; umgeben wir A mit einer ebensolchen Hülle, so wird A vor allen äusseren elektrischen Einflüssen geschützt, und man benutzt vielfach derartige Schutzhüllen, z. B. aus Drahtnetz.

§ 247. Es ist leicht einzusehen, dass die Influenz, die elektromotorische Wirkung, Ursache der ponderomotorischen ist. Wenn wir eine geriebene Glasstange einem Papierschnitzel nähern, so wird in demselben die negative Elektrizität an das benachbarte Ende gezogen, und nun ziehen sich die ungleichnamigen Elektrizitäten an, wodurch das Papierchen als Träger mit herangezogen wird. Ein Körper, der keine Elektrizität enthielte, würde nie angezogen werden, ebensowenig wie ein unmagnetisierbarer Körper von einem Magneten (§ 226).

§ 248. Auf Influenz beruht ein Apparat, der viel benutzt wird, um Elektrisierung und das Vorzeichen derselben zu erkennen, das Elektroskop: Durch den Deckel eines Glasgefässes geht ein Metallstab, an dessen unterem Ende zwei Streifen von Blattgold hängen, während am oberen Ende eine Metallkugel befestigt ist.

Der Kugel wird eine kleine Menge Elektrizität durch Berühren mit einer geriebenen Glas- oder Siegellackstange mitgeteilt; dadurch sträuben sich die Goldblättchen. Es sei ihnen positive Elektrizität mitgeteilt. Nähert man einen positiv geladenen Körper dem Knopf, so wird durch Influenz in diesen negative Elektrizität hineingezogen, das gleiche Quantum positiver möglichst weit fort, d. h. in die Goldblättchen getrieben, die daher noch stärker divergieren. Bei Annäherung eines negativen Körpers dagegen vermindert sich ihre Divergenz.

Noch empfindlicher ist das sog. Bohnenbergersche Elektroskop (Fig. 178). In einem Gehäuse liegt eine sog. Zambonische Säule (§ 265), welche durch Drähte mit den Platten B und C verbunden ist, und dieselben dauernd ziemlich stark lädt, B positiv, C negativ. Dazwischen hängt unter einer Glasglocke ein Blatt-

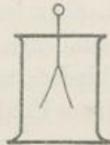


Fig. 177.

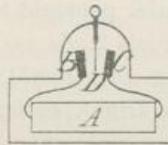


Fig. 178.

goldstreifen D an einem Metallstab mit Kugel. Nähert man dieser einen geladenen Körper, so wird wieder durch Influenz die gleichnamige Elektrizität in das Blattgold getrieben, welches daher je nach dem Vorzeichen der Ladung nach B oder C hin ausschlägt. Die grössere Empfindlichkeit dieses Instrumentes rührt davon her, dass hier ausser dem schwach geladenen Blattgold die stark geladenen Platten wirken, bei dem gewöhnlichen Elektroskop aber zwei schwach geladene Goldblätter.

§ 249. Wenn wir einen geladenen Körper mit einem isolierten ungeladenen metallisch verbinden, so fliesst von ersterem Elektrizität zum zweiten, und zwar so viel, bis auf beiden das Potential identisch ist; denn erst dann ist kein Potentialgefälle (§ 243), also keine Kraft vorhanden, welche die Elektrizität zu bewegen strebt. Es wird also in den zweiten Körper nur ein gewisses Quantum der Elektrizität des ersten überfliessen. Durch Benutzung der Influenz und Bindung sind wir aber im stande, viel grössere Mengen von Elektrizität zu sammeln. Ein dazu dienender Apparat ist die

Franklinsche Tafel. Eine Glasplatte ist auf beiden Seiten mit Stanniol beklebt, doch so, dass die Stanniolblätter sich am Rande nicht berühren. Verbinden wir das eine Stanniolblatt nun z. B. mit einem positiv geladenen Körper K, so lädt es sich ebenfalls positiv. Im zweiten Stanniolblatt wird durch Influenz Elektrizität geschieden, die negative angezogen, die positive abgestossen. Wir denken uns jetzt die Verbindung zwischen K und Blatt 1 unterbrochen, dagegen 2 mit der Erde verbunden; dann fliesst von 2 die positive Elektrizität ab, während auf 1 die positive Elektrizität gebunden wird durch die negative von 2. Verbinden wir daher jetzt wieder K mit 1, so verhält es sich wie ein unelektrischer Körper, es fliesst von K so viel neue Elektrizität über, bis das Potential das gleiche ist. Dabei wird wieder 2 influenziert, bei Verbindung mit der Erde fliesst positive Elektrizität ab u. s. w. Man sieht leicht, dass so sehr grosse Quantitäten von Elektrizität auf beide Seiten der Franklinschen Tafel gebracht werden können, aber immer enthält 1 mehr Elektrizität als 2, da es ausser der gebundenen noch die von K nachgeflossene Elektrizität besitzt. Verbindet man die Seiten dann durch einen Draht, so findet unter starkem Funken und Knall ein Ueberströmen von einer Seite zur anderen, eine Verbindung beider Elektrizitäten, eine Entladung statt.

Gewöhnlich verwendet man die Sammelapparate in der bequemeren Form der Leidner Flasche; ein Glas ist aussen und innen mit Stanniol beklebt; darauf wird ein isolierender Deckel gesetzt, durch welchen ein oben mit Knopf versehener Draht bis auf den Boden reicht und hier die innere Belegung berührt. Durch diesen Draht wird beim Laden der inneren Belegung Elektrizität zugeführt, während die äussere mit der Erde in Verbindung ist.

Man kann eine ganze Anzahl Flaschen mit einander verbinden und erhält dadurch eine sog. elektrische Batterie; dabei kann man entweder je alle inneren und alle äusseren Belegungen mit einander verbinden. Dann wirken n Flaschen wie eine von n -facher Grösse. Oder man kann stets die innere Belegung der einen Flasche mit der äusseren der nächsten verbinden; dann erhält man zwischen den Endbelegungen die n -fache Potentialdifferenz einer Flasche, aber bei der Entladung nur die Elektrizitätsmenge einer Flasche. Diese Anordnung heisst Kaskadenbatterie.

Es ist noch ein Sammelapparat zu erwähnen, der Kondensator. Er besteht aus zwei kreisrunden Metallplatten, welche durch eine dünne isolierende Schicht, z. B. Lack oder Luft, getrennt

sind; die eine wird Kollektor-, die andere Kondensatorplatte genannt. Schraubt man die erstere statt der Kugel auf ein Elektroskop, setzt die zweite auf, berührt erstere mit dem Finger, während man mit der zweiten einen sehr schwach geladenen Körper in Verbindung bringt, so sammelt sich durch Bindung in der Kollektorplatte eine grosse Menge Elektrizität; hebt man dann die Kondensatorplatte ab, so wird die Elektrizität im Kollektor frei und wirkt auf das Elektroskop viel stärker, als es bei direkter Verbindung der Elektrizitätsquelle mit demselben der Fall gewesen wäre.

§ 250. Bei allen Sammelapparaten hängt die Menge e der gebundenen Elektrizität von folgenden Umständen ab: 1. von der Menge der bindenden Elektrizität E , sie ist dieser proportional, also $e = kE$, wo k ein echter Bruch ist; 2. vom Abstand der beiden Leiter und ihrer Gestalt; bei ∞ ausgedehnten ebenen Flächen ist e umgekehrt proportional dem Abstand; 3. von der Natur der Zwischenschicht, welche k in obiger Gleichung bestimmt.

Daraus geht hervor, dass die Isolatoren nicht einfach durch Trennung der Leiter wirken — denn dann müssten sich alle gleich verhalten — sondern dass sie sich aktiv an der Fortleitung der Fernwirkung beteiligen. Faraday, welcher zuerst diese Verhältnisse studierte, nennt sie daher Dielektricum.

Den Quotienten aus der Elektrizitätsmenge, die sich bei Ladung zu derselben Potentialdifferenz auf einem Kondensator sammelt, wenn eine bestimmte Substanz die Zwischenschicht bildet, zu der Elektrizitätsmenge, die sich ansammelt, wenn Luft die Zwischenschicht bildet, nennt man nach Faraday das spezifische Induktionsvermögen oder die Dielektrizitätskonstante der Substanz.

§ 251. Es sind noch weitere Apparate zu nennen, bei welchen die Influenz eine wichtige Rolle spielt. Der Elektrophor besteht aus einer flachen Scheibe von Harz oder Ebonit, dem Kuchen, welche auf einer Metallplatte ruht und daher mit der Erde leitend verbunden ist. Durch Reiben mit einem Tierfell kann man ihn stark negativ elektrisch machen. Seine metallische Unterlage wird dabei durch Influenz positiv elektrisch, und beide Elektrizitäten halten sich fest, so dass der Kuchen sehr lange elektrisch bleibt. Legen wir eine andere an Seidenfäden hängende Metallplatte, den

Deckel, auf den Kuchen, so wird durch Influenz in ihm die Elektrizität geschieden, die negative Elektrizität abgestossen, so dass man sie durch Berührung entfernen kann. Der Deckel behält dann positive Elektrizität, welche nach Abheben mittelst der Seidenfäden frei wird, und einem beliebigen anderen Körper mitgeteilt werden kann. Man kann dies Auflegen, Berühren, Abheben des Deckels beliebig oft wiederholen, jedesmal enthält der Deckel positive Ladung.

§ 252. Wir gehen nun über zu der Frage, wo sich die Elektrizität in einem geladenen Körper befindet, und zwar zunächst, wenn derselbe ein Leiter ist.

Da gleichnamige Elektrizität sich abstösst, so ist es klar, dass bei einem Leiter, in welchem die Elektrizität sich frei bewegen kann, dieselbe sich nur auf der Oberfläche befindet, weil dann ihre Teilchen so weit wie möglich von einander getrennt sind. Die Elektrizitätsmenge, die sich auf der Flächeneinheit befindet, heisst die elektrische Dichte der Ladung.

Unter Oberflächenspannung versteht man eine dem Quadrat der Dichte proportionale Grösse. Sie stellt die Kraft dar, mit welcher die Elektrizität von der Oberfläche fortgetrieben wird; da jede Menge hierbei als abgestossene und als abstossende wirkt, ist es klar, dass diese Kraft dem Quadrat der Dichte proportional sein muss.

Die Dichte an verschiedenen Stellen einer Leiteroberfläche ist so beschaffen, dass überall die bewegende Kraft, das Potentialgefälle, in der Oberfläche Null oder das Potential auf der ganzen Oberfläche und im Innern des Körpers identisch ist (§ 243 und 249).

Bei einer Metallkugel wird dies der Fall sein, wenn die Dichte auf der ganzen Oberfläche konstant ist; bei einem verlängerten Rotationsellipsoid dagegen muss an den Enden der grossen Axe die Dichte zunehmen, weil diese Teile der Oberfläche weiter von der Mitte entfernt sind. Man übersieht leicht, dass je spitzer das Ellipsoid, desto grösser die Dichte wird, und man kommt so zu dem Resultat, dass, wenn wir an einem Leiter Spitzen anbringen, in diesen die Dichte ausserordentlich gross wird.

Das Potential P auf einem Körper ist der in ihm enthaltenen Elektrizitätsmenge M proportional (§ 243). Das Verhältnis $\frac{M}{P} = K$ nennt man die Kapazität des Körpers. Für $P = 1$ ist $K = M$,

also können wir sagen: die Kapazität eines Körpers ist gleich der Elektrizitätsmenge, welche in ihm das Potential 1 erzeugt. Auf einer Kugel vom Radius r ist die Dichte überall dieselbe; das Potential ist $P = \frac{M}{r}$, also $K = \frac{M}{P} = r$, d. h. die Kapazität einer Kugel ist gleich ihrem Radius. Man erkennt daraus, dass die Dimension der Kapazität eine Länge ist, $K = [L]$. Das ergibt sich auch so:

$$K = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Potential}} = \frac{[M^{1/2} L^{3/2} T^{-1}]}{[M^{1/2} L^{1/2} T^{-1}]} = [L].$$

Aus $\frac{M}{P} = K$ folgt, dass wir das Potential der Elektrizität auf sich selbst (§ 243) für eine Kugel auch schreiben können

$$\frac{1}{2} \frac{M^2}{r} = \frac{1}{2} \frac{M^2}{K} = \frac{1}{2} P^2 K = \frac{1}{2} P M.$$

§ 253. Der Umstand, dass in Spitzen die Dichte der Elektrizität so gross wird, wird vielfach benutzt. Eine Folge davon ist nämlich, dass die Spitzen die Elektrizität entladen; infolge der grossen Dichte ist die Abstossungskraft normal zur Oberfläche, die Oberflächenspannung, ausserordentlich gross; kleine Staubteilchen, die stets in der Luft schweben, werden angezogen, geladen, dann sehr kräftig abgestossen. Es entsteht dadurch ein förmlicher Wind, der elektrische Wind, welcher von einer stark geladenen Spitze ausgeht, und z. B. im Stande ist, ein Licht auszublasen.

Wie die Spitze einen mit ihr verbundenen Körper entladen kann, so kann sie, mit der Erde leitend verbunden und einem geladenen Körper gegenübergestellt, auch diesen entladen. Das beruht auf Influenz; denken wir uns einen positiv elektrischen Körper, ihm gegenüber die Spitze; durch Influenz wird in sie negative Elektrizität gezogen, sie strömt aus und neutralisiert die positive Elektrizität des Körpers; so viel negative Elektrizität aus der Spitze ausströmt, so viel positive Elektrizität fliesst aber gleichzeitig nach der Erde. Die Wirkung in der Erdleitung ist also ganz dieselbe, als ob wir den positiv elektrischen Körper direkt berührt hätten. Man nennt daher solche Spitzen: Saugspitzen.

Ebenso wie Spitzen wirken Flammen: mit einem geladenen Körper leitend verbunden, oder unter ihn gestellt, entladen sie ihn; es hat sich gezeigt, dass die von einer Flamme aufsteigenden

Gase bis zu einem gewissen Grade leitend geworden sind (vgl. § 456).

Wir können nun auch den Zweck der (§ 240) beschriebenen Konstruktion der Elektrisiermaschine erkennen. Als Reibzeug und geriebener Körper sind zwei möglichst weit in der Spannungsreihe (§ 245) aus einander stehende Substanzen gewählt, von welchen die eine, das Reibzeug, Leiter sein muss, damit sich nicht die negative Elektrizität ansammelt und schliesslich auf die Glasplatte übergeht. — Die positive Glasplatte bewegt sich zunächst zwischen Seidenzeug, welches dabei auch negativ wird und daher die positive Elektrizität des Glases bindet. Wo das Glas aus der Seide austritt, die positive Elektrizität wieder frei wird, ist es von Saugspitzen umgeben. Durch Influenz wird positive Elektrizität in den Konduktor getrieben, negative Elektrizität strömt aus den Spitzen und entlädt die Glasscheiben.

§ 254. Während bei Leitern die Elektrizität sich nur auf der Oberfläche befindet, dringt sie bei Isolatoren auch in das Innere ein, ohne dass wir jedoch über die Verbreitung Näheres wüssten. Folgende Erscheinungen sind hier zu erwähnen: Wenn man eine Leidner Flasche durch kurz andauernde metallische Verbindung beider Belegungen entladen hat, und stellt nach einiger Zeit von neuem Verbindung her, so erhält man einen zweiten schwächeren Funken, ebenso nach Pausen einen dritten, vierten u. s. w. Man bezeichnet dies als elektrischen Rückstand. Zur Erklärung nimmt man an, die Elektrizität dringe ganz langsam von beiden Seiten in das Glas ein unter dem Einfluss der Oberflächenspannung; ist diese aber durch die Entladung beseitigt, so komme die Elektrizität langsam wieder zurück an die Oberfläche.

Eine andere Erscheinung, welche die Bewegung der Elektrizität im Isolator, gleichzeitig eine Verschiedenheit der positiven und negativen Elektrizität zeigt, sind die Lichtenbergschen Figuren: Lässt man von einer Leidner Flasche stärkere Funken nach einer Harzplatte oder Ebonitplatte überspringen, streut dann Pulver von Mennige, Schwefel, Siegellak oder dgl. auf, so haftet dies an den elektrischen Stellen, bezeichnet die Wege, auf welchen die Elektrizität sich verteilt hat. Dabei gibt die negative Elektrizität rundliche wolkige Figuren, die positive strahlig verzweigte Sterne.

§ 255. Auch auf Isolatoren wird die Wirkung der Influenz sichtbar, und darauf beruhen die neueren, weit wirksameren In-

fluenzelektrisiermaschinen; es gibt verschiedene Konstruktionen derselben, wir wollen hier nur die erste, von Holz, besprechen, da die anderen von Töpler, Kundt, Voss, Wimshurst nichts wesentlich Neues bieten. Die Einrichtung der Holzschen Maschine zeigt Fig. 179: Eine kreisrunde Glasscheibe K ist fest senkrecht aufgestellt, indem sie von 4 Knöpfen b gehalten wird; eine zweite, etwas kleinere Glasscheibe g sitzt an einer die erste Scheibe durchdringenden Axe und lässt sich durch Kurbel A und Schnurlauf C in schnelle Rotation versetzen im Sinne des Pfeils; die feste Scheibe hat zwei Ausschnitte, a und a_1 , auf ihre Rück-

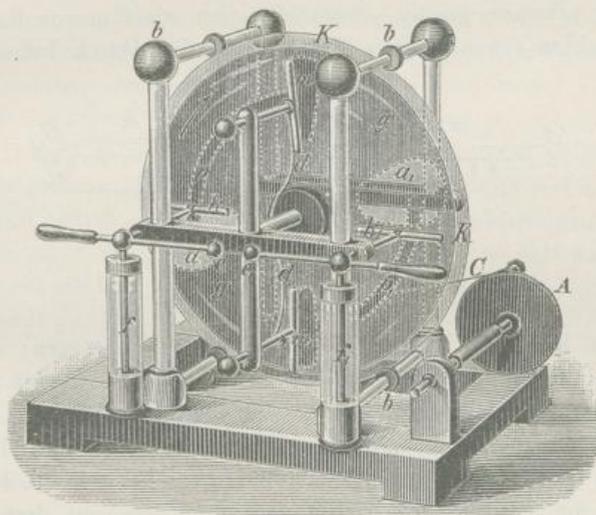


Fig. 179.

seite sind zwei Papierstücke p und p_1 geklebt, von welchen noch Papierspitzen s und s_1 (nur diese ist in der Figur sichtbar) in die Oeffnungen ragen und der rotierenden Scheibe zugebogen sind. Dem einen Rande der Ausschnitte gegenüber, diesseits von der rotierenden Scheibe, befinden sich Spitzenkämme k und k_1 , welche durch metallische Leitung zu den Konduktorkugeln e und e_1 führen; e und e_1 lassen sich einander nähern bis zur Berührung, oder entfernen; die Konduktoren sind in der Figur noch verbunden mit den inneren Belegungen zweier Leidner Flaschen f und f_1 , deren äussere Belegungen unterhalb des Fussbrettes auch leitend verbunden sind. Endlich sieht man noch zwei Spitzenkämme m und m_1 , die den

anderen Enden der Papierstreifen p und p_1 gegenüber liegen und durch den sog. Hilfskonduktor d leitend verbunden sind.

Die Wirkung der Maschine lässt sich klar machen an der Fig. 180. Es ist hier der Umfang der festen Scheibe in eine Linie ausgestreckt gedacht, AB ; wir verfolgen eine Stelle der rotierenden Scheibe, welche sich am ganzen Umfange AB vorbeidreht, in der Figur die Linie CD beschreibt.

Wenn wir irgend ein System von Körpern haben, so wird es sehr selten vorkommen, dass dasselbe in absolutem elektrischem Gleichgewicht ist, d. h. dass alle Teile genau ebenso viel oder wenig elektrisiert sind. Wir wollen annehmen, das Papierchen p sei ganz schwach positiv, eventuell teilen wir ihm vor Benutzung der Maschine etwas positive Elektrizität mit. Durch Influenz wird

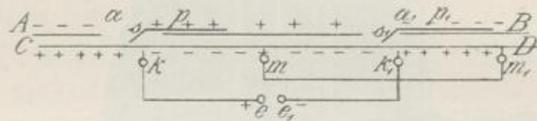


Fig. 180.

aus dem Kamm k negative Elektrizität herausgezogen; sie geht auf die rotierende Scheibe über, während die gleiche Menge positiver Elektrizität nach dem Konduktor e getrieben wird.

Mit der rotierenden Scheibe wird die negative Elektrizität fortbewegt; sie wird hier noch festgehalten dadurch, dass auf der festen Scheibe die positive Elektrizität sich besonders auf dem Papierstreifen, aber auch noch weiter auf dem Glase verbreitet, beide Scheiben also einen Kondensator bilden.

Nun kommt die rotierende Scheibe vor den Ausschnitt a_1 ; die bisher gebundene negative Elektrizität wird frei; durch Influenzwirkung auf die Papierspitze s_1 wird aus dieser positive Elektrizität herausgezogen, sie und das ganze Papier p_1 werden negativ elektrisch, während die rotierende Scheibe neutral wird. — Die Scheibe tritt jetzt vor den Kamm k ; aus ihm wird durch Influenzwirkung von p_1 positive Elektrizität auf die Glasscheibe gezogen, während e_1 die gleiche Menge negativer Elektrizität erhält. Die Scheibe geht geladen weiter, hat jetzt einen Umlauf gemacht, kommt zum zweitenmal von C her nach a ; sie ist positiv geladen, zieht aus s etwas negative Elektrizität, macht daher p stärker positiv. Unter k lädt

sie sich selbst negativ, kommt an a_1 , zieht aus s_1 positive Elektrizität, macht also p_1 stärker negativ u. s. w.

Die Maschine verstärkt also bei ursprünglich ganz schwacher Ladung diese selbst, und man erhält einen kräftigen Funkenstrom zwischen e und e_1 . Die Leidner Flaschen haben die Wirkung, dass die Funken weniger zahlreich, aber kräftiger werden, indem durch die zuströmende Elektrizität zunächst die Flaschen geladen werden, bis sie sich zwischen e und e_1 entladen. Der Hilfskonduktor m m_1 hat folgenden Zweck: Zieht man bei rotierender Scheibe e und e_1 immer weiter aus einander, um längere Funken zu erhalten, so kommt ein Moment, wo die zuströmende Elektrizität nicht genügende Spannung besitzt, um überzuspringen. Dann strömt sie leicht nach der rotierenden Scheibe zurück, und diese wird nach dem Passieren von k nicht negativ, sondern positiv elektrisch, ebenso hinter k_1 negativ elektrisch; dadurch würden dann auch p_1 und p entgegengesetzt geladen, kurz wenn man e und e_1 wieder zusammenschiebt, wird e negativ geladen, e_1 positiv. Diese Umladung verhindert der Hilfskonduktor, indem er den etwa zur Scheibe zurückströmenden Elektrizitäten einen Weg zur Ausgleichung darbietet, so dass die Scheibe unelektrisch nach a_1 und a gelangt, also regelmässig weiter funktionieren kann.

§ 256. Wir haben schon wiederholt von der Entladung elektrisirter Körper gesprochen; wir müssen nun näher auf die verschiedenen Arten der Entladung eingehen.

Haben wir einen ausgedehnten Leiter, dessen eines Ende wir etwa laden, so fliesst die Elektrizität ungehindert durch den ganzen Leiter, und ist das andere Ende etwa mit der Erde verbunden, so geht die Entladung ausserordentlich schnell, aber zunächst ohne äussere merkbare Kennzeichen vor sich. Man hat früher vielfach versucht, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektrizität in Drähten zu bestimmen, und hat auch bestimmte Zahlen dafür erhalten, welche aber von einem Leiter zum anderen ausserordentlich stark variierten. In neuerer Zeit hat man erkannt, dass von einer eigentlichen Geschwindigkeit dabei keine Rede sein kann, dass man ganz andere Grössen auf diese Weise misst. Wenn wir nämlich einem Ende des Leiters Elektrizität zuführen, und sie soll weiter fliessen, so muss eine Potentialdifferenz gegen benachbarte Stellen vorhanden sein. Das Entstehen eines Potentials an einer Stelle kann aber durch Bindung der Elektrizität verzögert werden; denken wir uns

ein Stück des Leiters gebildet durch eine Platte eines Kondensators, während die andere Platte desselben zur Erde abgeleitet ist, so erkennen wir, dass eine ganze Menge Elektrizität einfließen kann, ohne dass das Potential einen messbaren Wert erhält; erst wenn der Kondensator geladen ist, fließt die Elektrizität weiter. Ähnliches gilt von jedem Leiter, welcher mit der umgebenden Luft oder dem sonstigen Dielektricum eine Art Kondensator bildet. Wir messen daher die Geschwindigkeit, mit welcher die Ladung fortschreitet, und diese ist ganz verschieden, wenn wir Drähte von verschiedener Beschaffenheit, oder denselben Draht einmal in Luft, ein andermal, mit Guttapercha umgeben, in Wasser haben. — Die Geschwindigkeit, welche man so in metallischer Leitung beobachtet hat, ist sehr gross, über $100\,000 \frac{km}{sec}$; sie wird kleiner, wenn man mangelhafte Leiter, z. B. feuchte Schnüre benutzt.

Eine sehr eigentümliche Art der Entladung kommt zu stande, wenn man stark geladene Körper, z. B. die Belegungen einer Leidner Flasche, durch gute Leitung verbindet. Dann tritt oscillierende Entladung auf, d. h. von der positiven Belegung fließt mehr positive Elektrizität zur negativen Belegung über, als nötig ist, um dieselbe zu neutralisieren, so dass sich diese nun positiv lädt. Dann fließt der Ueberschuss zurück, aber wieder zu viel u. s. w., so dass die Elektrizität mehrfach hin und her fließt. Wir können diesen Fall mit folgendem vergleichen: Es seien zwei Gefässe A und B durch eine weite Röhre mit Hahn C verbunden, A bis oben mit Wasser gefüllt, B leer. Oeffnen wir den Hahn, so strömt das Wasser nach B über, aber infolge der Trägheit hört das Strömen nicht auf, wenn in A und B der gleiche Druck erreicht ist, sondern es strömt mehr über; daher kehrt sich nach kurzer Zeit die Bewegung um, Flüssigkeit strömt von B nach A u. s. w. So kommt erst nach längerem Schwanken Gleichgewicht zu stande. — Hier ist Trägheit der Grund der Oscillationen; wir können daher annehmen, dass auch die Elektrizität Trägheit besitze. Zahl und Dauer der Oscillationen hängen von der Schliessung und der Kapazität ab, doch ist der ganze Vorgang in 0,00001 bis 0,0001 *sec* beendigt. Die Erscheinung ist namentlich von Feddersen studiert worden, indem er die Leitung an einer Stelle unterbrach und den hier entstehenden Funken mittelst eines rotierenden Spiegels aus einander gezogen photographierte, wobei sich eben zeigte, dass eine ganze Reihe von Funken in der einen und anderen Richtung übergeht.

§ 257. Ist ein geladener Körper von einem Dielektricum umgeben, so kann die Elektrizität sich nicht auf so ruhige Weise entfernen, wie es durch einen Leiter möglich ist. Es sind hier zwei Arten der Entladung möglich; diejenige durch Spitzen, die Glimmentladung, welche wir schon besprochen haben (§ 252), und die disruptive Entladung durch Funken.

Der Versuch zeigt nämlich, dass die Isolatoren den Durchgang der Elektrizität nicht absolut verhindern, sondern nur bis zu einer gewissen Spannung derselben, wird aber die Dichte oder Potentialdifferenz zu gross, so tritt eine Durchbrechung des Isolators ein, indem ein Funke nach einem benachbarten Leiter übergeht. Die erforderliche Spannung ist desto grösser, je dicker die zu durchbrechende Schicht des Isolators ist. Wir können mit den Laboratoriumsmitteln Glasplatten von 10 *cm* durchbohren, in der Luft Funken von über 1 *m* Länge erhalten, während die Natur uns in den Blitzen Funken von mehreren Kilometern Länge zeigt. In Luft ist die Schlagweite der elektrischen Dichte etwa proportional. Verdünnen wir die Luft, so wächst die Schlagweite, und in Röhren, die mit Gasen gefüllt sind, deren Druck nur einige Millimeter beträgt, steigt die Schlagweite bis zu vielen Metern.

Die disruptiven Entladungen bringen eine ganze Reihe wichtiger Wirkungen hervor:

1. Mechanische Wirkungen: Die Durchbohrung fester Isolatoren ist schon erwähnt. Von den Leitern, von welchen die Funken ausgehen, werden kleinste Teilchen losgerissen und im Funken fortgeführt; lässt man z. B. Funken zwischen Kupfer und Platin überspringen, so finden sich auf dem Platin Kupferteilchen und umgekehrt.

2. Chemische Wirkungen: Gase können durch Funken entweder zersetzt werden, z. B. CO_2 , NH_3 , oder sie verbinden sich, z. B. H und O zu H_2O ; dies wird in der Chemie viel benutzt in den Eudiometern. Zu den chemischen Wirkungen gehört auch die Umwandlung von Sauerstoff in Ozon; entzieht man einer Maschine eine ganze Anzahl von Funken, so wird ein eigentümlicher Geruch bemerkbar, der von dem aus der Luft gebildeten Ozon, einer Modifikation des Sauerstoffs, herrührt.

3. Polare chemische Zersetzungen von Verbindungen: Der säuernde Bestandteil scheidet sich an der Stelle des Leiters aus, wo die positive Elektrizität austritt, der basische Bestandteil

an dem negativ geladenen Leiter. Auf diese Erscheinungen kommen wir später ausführlich zurück (§§ 289 u. ff.).

4. Physiologische Wirkungen auf die Nerven und Muskeln von Menschen und Tieren: Man spricht von elektrischen Schlägen. Bei starken Schlägen von Leidner Batterien können Lähmungen und Tod eintreten.

5. Wärmewirkungen: Leicht entzündliche Körper, wie Leuchtgas, Aether u. s. w., werden durch Funken entzündet. Auch wenn die Entladung nicht disruptiv ist, sondern durch Leiter, Drähte, geht, erhitzen sich diese, so dass sie glühend werden und schmelzen können. Die genauesten Untersuchungen hat Riess mit seinem elektrischen Thermometer ausgeführt; dies ist ein sehr empfindliches Luftthermometer, durch dessen Kugel der Draht geht durch welchen die Entladung geführt wird. Riess fand die Erwärmung proportional dem Quadrat der Elektrizitätsmenge, umgekehrt der Oberfläche des Sammelapparates, also proportional der Dichte oder dem Potential der Elektrizität und ihrer Menge, also proportional der Arbeit, die zum Laden verbraucht war (§ 243).

6. Lichtwirkungen: Dieselben sind zum Teil Folge der Wärmewirkung. So werden in der Bahn des Funkens die Gase so stark erhitzt, dass sie glühend werden, und auch die von den Leitern losgerissenen Teilchen werden in glühenden Dampf verwandelt. Das Spektrum des Funkens (§ 378) zeigt daher die Linien des Metalls und der Gase. Besonders wichtig und eigentümlich ist die Wirkung in verdünnten Gasen, welche wir später ausführlicher besprechen wollen (§ 323). Hier sei nur erwähnt, dass dabei die Gase leuchten können ohne Temperaturerhöhung, also auch eine direkte Wirkung der Elektrizität auf den Lichtäther anzunehmen ist.

Zu erwähnen ist noch, dass bei starken Entladungen, bei welchen gleichzeitig ganze Büschel von Funken übergehen, der positive Pol sich anders verhält, als der negative; von ersterem gehen von verschiedenen Stellen die Funkenbahnen divergent aus, vereinigen sich kurz vor dem negativen Pol, der also nur an einer Stelle getroffen wird.

§ 258. Ganz dieselben Erscheinungen, welche wir mit den stärksten Elektrisiermaschinen hervorbringen können, zeigt uns in grossartigem Maßstabe die Natur bei den Gewittern.

Die atmosphärische Luft erweist sich stets elektrisch in verschieden starkem Grade, und zwar meist positiv elektrisch, wogegen die Erde selbst negativ elektrisch erscheint. Woher diese Elektrisierung stammt, ist noch nicht festgestellt, obgleich zahlreiche verschiedene Vermutungen ausgesprochen sind: chemische Prozesse, namentlich Oxydation, die Reibung des Meeres an den Küsten, die Verdampfung des Wassers u. s. w. sollten die Quelle sein. Nach einer neueren Annahme von Sohnke haben wir die Quelle in der Atmosphäre selbst zu suchen: die Reibung von Wasser an Eis. Ein Teil der Wolken, die hochgehenden Cirruswolken, bestehen aus Eisnadeln, die Cumuluswolken aus Wasser; ihre Vermischung soll die Elektrizität bedingen. Nach Elster und Geitel soll die Bestrahlung durch das Sonnenlicht die Ursache sein (§ 456).

Die atmosphärische Elektrizität lässt sich nachweisen, indem man z. B. an einer langen Stange eine Metallspitze befestigt, welche durch einen Draht mit dem Elektrometer verbunden ist. Durch Influenz wird dann die negative Elektrizität aus dem Draht gezogen, er bleibt positiv, was das Elektrometer anzeigt.

Während die Elektrisierung meist sehr schwach ist, wird sie zu Zeiten in dichten Wolken sehr gross; durch Influenz kann sich dann auch in benachbarten Wolken oder auf der Erde die ungleichnamige Elektrizität stark ansammeln. Der Ausgleich geschieht dann durch den Blitz. Die Luft wird dabei gewaltig erschüttert, es entstehen Schallwellen, der Donner, ähnlich wie durch die Geschützkugel oder die Peitschenschnur ein Knall entsteht. Es sind Blitze von 12 000 *m* Länge beobachtet; sie bringen alle Wirkungen hervor, die wir an den Funken kennen. Isolatoren werden durchbohrt und zertrümmert, Leiter geschmolzen, es entsteht Feuer, Menschen und Tiere werden gelähmt oder getötet. — Die Blitze verlaufen meist in sehr kurzer Zeit und sind so hell, dass das Auge ihre Gestalt nicht richtig aufzufassen vermag; erst seitdem man sie photographiert, kennt man sie etwas besser. Es hat sich gezeigt, dass die meisten Strahlen stark verzweigt sind, sich baumartig verästeln, die Erde gleichzeitig durch einen Blitz an vielen Stellen getroffen wird, kurz, dass gleich ein grosses Gebiet entladen wird. Auch oscillierende Entladungen sind beobachtet worden.

Zum Schutz gegen Blitze hat man nach dem Vorgange Franklins (1753) Blitzableiter angelegt. Ihr Hauptzweck ist, den Blitz zu verhindern, erst Nebenzweck, ihm einen unschädlichen Weg zu geben, falls er doch zu stande kommt. Das wird durch

Spitzenwirkung erreicht: der Boden und alle grösseren Metallmassen des Hauses werden durch ein gut leitendes Kupfertau mit einer auf dem Dache befindlichen scharfen Spitze verbunden. Aus ihr strömt die negative Influenzelektrizität aus, entlädt gleichzeitig das Haus und die darüber ziehende Wolke, wodurch die Spannung so verringert werden soll, dass der Blitz nicht mehr überschlagen kann. Dazu muss die Spitze scharf sein; man stellt sie aus Platin oder Gold her, damit sie nicht rostet; ferner muss mit dem Erdboden gut leitende Verbindung da sein; man lötet daher das Tau an eine grössere Metallplatte, welche an einer feuchten Stelle in den Erdboden eingegraben wird, in das Grundwasser, den Brunnen oder dgl. Ist aber die Entladung durch die Spitze doch nicht genügend, schlägt der Blitz ein, so sucht er sich den bequemsten Weg, die metallische Leitung. Das Tau muss daher so stark sein, dass es sich nicht zu sehr erhitzt.

Eine mit der atmosphärischen Elektrizität wahrscheinlich zusammenhängende Erscheinung ist das Nordlicht: in hohen Breiten zeigen sich weiss oder meist rot leuchtende Lichtbogen, welche sich eigentümlich bewegen, so als ob leuchtende faltige Tücher bewegt würden. Es scheint, als ob wir es hier mit elektrischen Entladungen in hohen und daher dünnen Schichten der Atmosphäre zu thun hätten; doch ist die Erscheinung keineswegs aufgeklärt.

§ 259. Es sind noch einige andere Quellen der Elektrizität ausser der Reibung fester Körper zu erwähnen. Zunächst kann auch durch Reibung von Dämpfen an festen Körpern Elektrizität erzeugt werden. Dies geschieht z. B. bei der Hydroelektrisiermaschine von Armstrong: aus einem Dampfkessel strömt durch hölzerne Mundstücke Dampf gegen den Spitzenkamm eines Konduktors. Das Mundstück ist so eingerichtet, dass der Dampf sich stark reibt; je nach der Natur des Mundstücks wird der Dampf und Konduktor positiv oder negativ, während der Kessel die ungleichnamige Elektrizität erhält.

In ähnlicher Weise entsteht Elektrizität beim Auslassen der im Handel befindlichen flüssigen Kohlensäure aus den eisernen Flaschen.

Viele Krystalle, z. B. Quarz, Turmalin, Topas u. s. w., zeigen die Eigenschaft, während Temperaturänderung elektrisch zu sein. Diese Elektrizität hat man Pyroelektrizität genannt. Es sind dabei nur einzelne Punkte oder Linien, namentlich die

Kanten, deutlich elektrisch, und zwar beim Erwärmen entgegengesetzt als beim Abkühlen. Eine Stelle, welche beim Erwärmen positiv, bei Abkühlung negativ elektrisch wird, nennt man analogen Pol, die, welche beim Erwärmen negativ wird, antilogen Pol. Ein genaueres Studium der Elektrizitätsverteilung ist durch die Methode von Kundt ermöglicht: Er streut durch ein Sieb ein Gemisch von Mennige und Schwefelpulver auf den Krystall; durch die Reibung werden die Pulver entgegengesetzt elektrisch, Schwefel negativ, Mennige positiv, und zeichnen daher die positiven und negativen Stellen des Krystalls rot und gelb.

Endlich sei noch erwähnt, dass eine ganze Anzahl Fische in ihrem Körper Elektrizität erzeugen — auf welche Weise ist unbekannt. Sie besitzen eigentümliche Organe, aus vielen Zellen bestehend und wie eine Leidner Batterie wirkend. Berührt man Kopf und Schwanz, so erhält man einen kräftigen Schlag; eigentümlich ist dabei, dass derselbe nicht immer erfolgt, sondern nur, wenn der Fisch will, wenn er die Berührung merkt und sich dagegen wehrt.

Weitere Arten der Elektrizitätserzeugung, nämlich durch Berührung verschiedener Körper oder auch verschieden warmer Teile derselben, und durch chemische Prozesse, werden weiterhin ausführlich zu behandeln sein.

§ 260. Wir haben besprochen, dass die Zuführung von Elektrizität zu einem Punkte, die Ladung eines Körpers, Arbeit erfordert, indem die Abstossung des ersten, auf dem Körper befindlichen Teilchens gegen die folgenden zu überwinden ist, und dass diese Arbeit gemessen wird durch das Potential der Elektrizität auf sich selbst (§ 242). Der geladene Körper besitzt also einen Energievorrat; wenn wir ihn dann durch einen Draht mit der Erde verbinden, so fließt die Elektrizität ab, das Potential im Körper verschwindet, und wir würden einen Widerspruch gegen das Gesetz von der Erhaltung der Energie haben, wenn dafür nicht etwas anderes aufträte. Das ist aber der Fall, wie wir bei Besprechung der Entladungswirkungen gesehen haben (§ 257).

Wir haben namentlich gefunden, dass stets Wärme auftritt, welche wir schon als Form der Energie kennen, und dass nach den Versuchen von Riess die entstehende Wärme dem verschwindenden Potential und der Elektrizitätsmenge proportional ist. Wir können somit vermuten — und Messungen bestätigen es —, dass

auch hier das Gesetz von der Erhaltung der Energie streng gültig ist. Wenn wir mittelst der Elektrisiermaschine eine Leidner Flasche laden, diese dann wieder entladen, so haben wir zum Drehen der Maschine Arbeit verbraucht, welche sich zunächst wiederfindet in Erwärmung der Maschinenteile durch Reibung und in dem Potential der Leidner Flasche, welches bei Entladung dann auch noch in Wärme verwandelt wird. Als verschiedene Formen der Energie kennen wir somit jetzt: potentielle Energie, kinetische Energie, Wärme, Potential; damit ist auch die Reihe der möglichen Formen erschöpft; alle sind in einander beliebig verwandelbar, aber die Summe der Energie bleibt konstant.

§ 261. Wir wollen schliesslich die Anschauungen von Faraday und Maxwell über die elektrischen Erscheinungen kurz auseinandersetzen.

Nach der älteren Auffassung, der wir bisher in der Ausdrucksweise allein gefolgt sind, hat die Elektrizität ihren Sitz in den Leitern, während die Isolatoren, die Dielektrica, nur das Abfliessen von ersteren verhindern, nicht selbst elektrisierbar sind. Die Wirkung von einem Leiter auf den anderen ist dabei eine Fernwirkung, die nicht von Teilchen zu Teilchen vermittelt wird.

Nach Faradays Auffassung dagegen sind gerade die Dielektrica Träger der Elektrizitätswirkung, welche sich in ihnen von Teilchen zu Teilchen fortpflanzt. Wir haben gesehen, dass um einen elektrisierten Körper Niveauflächen existieren, auf welchen überall senkrecht Kraftlinien stehen. Bei jedem Leiter ist die Oberfläche eine Niveaufläche oder Fläche gleichen Potentials, von ihr gehen nach allen Richtungen die Kraftlinien aus, um im Unendlichen oder an einem anderen Leiter zu endigen; dazwischen befinden sie sich im Dielektricum. Faraday nimmt nun an, dass die kleinsten Teilchen desselben von der elektrischen Kraft beeinflusst werden, dass in ihnen in Richtung der Kraftlinien die Elektrizität verschoben wird, wodurch ihr eines Ende negativ, das andere positiv elektrisch erscheint. Diesen Zustand bezeichnet er als eine dielektrische Polarisierung. Das Dielektricum unter dem Einfluss einer elektrischen Kraft befindet sich daher in einem ähnlichen Zustande, wie ein magnetischer Stahlstab, der auch lauter gleich gerichtete polare Teilchen besitzt (§ 228). Da im ganzen Innern stets zwei ungleichnamige Pole sich berühren, ist nach aussen keine Wirkung vorhanden, wohl aber an den Enden des Dielektri-

cum, wo es Leiter berührt; da äussert sich die Elektrizität frei, und wir fassen sie als Elektrisierung der Leiteroberfläche auf.

In einem polarisierten Dielektricum liegen je zwei Teilchen in der Kraftlinie mit ungleichnamigen Polen gegen einander, sie müssen sich anziehen, die Kraftlinie muss streben, sich zu verkürzen, es findet ein Zug in Richtung der Kraftlinien statt; dagegen suchen in den dazu senkrechten Richtungen die Teilchen sich zu entfernen. Erscheinungen, welche diese Auffassung zu bestätigen scheinen, werden wir in der Optik kennen lernen (§ 455). Diese Spannung, welche ganz analog einer elastischen Spannung ist, so dass Maxwell von elektrischer Elastizität spricht, ist der wirkenden Kraft proportional und hört mit ihr auf. Der Unterschied zwischen Dielektricum und Leiter besteht nach Faraday darin, dass nur die ersteren dieser Spannung, also der eigentlichen Elektrisierung fähig sind, die letzteren dagegen nicht, sondern sofort der schwächsten Spannung nachgeben.

Was nun eigentlich die Elektrizität sei, was in den Teilchen verschoben wird, darüber hat weder Faraday noch Maxwell eine bestimmte Behauptung ausgesprochen, wohl aber vermutet, dass es der Lichtäther sei. Wir werden bei der Optik sehen, dass wir für die optischen Erscheinungen annehmen müssen, ein Stoff, den man Lichtäther nennt, sei überall da verbreitet, wo gerade kein ponderables Molekel liegt. Er soll auch der Träger der elektrischen Erscheinungen sein, und diese Hypothese hat gerade in den letzten Jahren ausserordentlich an Wahrscheinlichkeit gewonnen, indem man zahlreiche Wechselwirkungen von Elektrizität auf Licht und umgekehrt kennen gelernt hat. Wir kommen darauf später zurück.

B. Elektrizität in Bewegung.

a) Der galvanische Strom.

§ 262. Bei den bisher besprochenen elektrischen Erscheinungen hatten wir es durchweg mit einer sehr kleinen Elektrizitätsmenge zu thun, welche aber auf engen Raum gebracht ist und daher grosse Energie besitzt. Sie entspricht einer kleinen Menge Wasser unter hohem Druck. Wir sind aber auch im stande, grosse Elektrizitätsmengen von kleiner Energie hervorzubringen, und zwar verdanken wir diese Möglichkeit einer zufälligen Beobachtung.

1789 experimentierte Galvani mit einer Elektrisiermaschine; auf dem Tische befanden sich Froschschenkel und da bemerkte er, dass dieselben zuckten, sobald aus dem Konduktor ein Funken gezogen wurde. Wir erklären dies heute sehr einfach, indem wir sagen: durch Influenz vom Konduktor waren in den Froschschenkeln die Elektrizitäten getrennt; sobald er entladen wurde, fliessen hier die Elektrizitäten zusammen und bringen dabei die physiologische Wirkung auf die Muskeln hervor. Aber Galvani und seine Zeitgenossen glaubten im Zucken eine Aeusserung des gesuchten belebenden Agens sehen zu müssen, und es wurde viel mit Froschschenkeln weiter experimentiert. Dabei hatte nun Galvani eines Tages (1792) Froschschenkel mittelst kupferner Haken an einem eisernen Geländer aufgehängt und sah, dass die Schenkel zuckten, sobald die Hinterpfoten das Geländer berührten. Weitere Versuche führten Volta zu dem Schluss, dass damit eine neue Quelle der Elektrizität entdeckt sei, dass nämlich bei Berührung zweier verschiedener Metalle, im obigen Falle Eisen und Kupfer, zwischen diesen eine Potentialdifferenz entsteht, das eine sich positiv, das andere negativ lädt. Die Froschschenkel dienten also nur dazu, der Elektrizität einen Weg zum Ausgleich darzubieten, und ihr Durchfliessen anzuzeigen.

Diese Ansichten Voltas siegten nach einem längeren Kampfe gegen Galvani, der in den Froschschenkeln und einer Lebenselektrizität den Grund des Zuckens sah. Wir wissen jetzt, dass, sobald zwei Metalle sich berühren, sie sich zu einer bestimmten Potentialdifferenz laden. Man nennt sie auch die elektromotorische Kraft der Kombination, oder ihre Spannung oder Spannungsdifferenz (nicht zu verwechseln mit der Oberflächenspannung eines geladenen Körpers, § 252). Diese Potentialdifferenz stellt sich unter allen Umständen zwischen den sich berührenden Körpern her, mögen sie unelektrisch oder von einer anderen Quelle her schon elektrisiert sein, immer ist das Potential des einen Körpers um diesen Betrag höher, als das des zweiten.

§ 263. Man kann die Ladung von Metallen bei Berührung leicht nachweisen, wenn man sie nach der Berührung trennt und mit einem empfindlichen Elektrometer verbindet; man kann so auch durch die Grösse des Ausschlags die Potentialdifferenz zwischen verschiedenen Metallen messen.

Schon Volta fand, dass man die Metalle in eine Reihe ordnen

kann, so dass jedes sich positiv lädt bei Berührung mit einem in der Reihe folgenden, dagegen negativ bei Berührung mit einem voraufgehenden. Man nennt eine solche Reihe Spannungsreihe; eine solche ist z. B.

+ Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Kohle, Platin,
Braunstein —.

Man pflegt die Potentialdifferenz zwischen zweien dieser Körper symbolisch auszudrücken durch ihre chemischen Zeichen mit dazwischen gesetztem Strich; so bedeutet $\text{Fe} | \text{Cu}$ die Potentialdifferenz, welche bei Berührung von Eisen mit Kupfer entsteht.

Volta hat zuerst diese Potentialdifferenzen roh gemessen; so fand er nach willkürlichem Maß:

$\text{Zn} \text{Pb} = 5$	$\text{Zn} \text{Ag} = 12$
$\text{Pb} \text{Sn} = 1$	$\text{Sn} \text{Cu} = 5$
$\text{Sn} \text{Fe} = 3$	$\text{Zn} \text{Fe} = 9$
$\text{Fe} \text{Cu} = 2$	u. s. w.
$\text{Cu} \text{Ag} = 1$	
u. s. w.	

Vergleicht man diese Zahlen, so ergibt sich das von Volta gefundene Gesetz der Spannungsreihe: wenn eine Kette mehrerer sich berührender Metalle gebildet wird, so ist die Potentialdifferenz der Endglieder gleich der Summe der Potentialdifferenzen aller einzelnen Kombinationen, oder gleich der Potentialdifferenz, welche bei direkter Berührung der Endglieder entsteht. Aus diesem Gesetz kann man mehrere wichtige Schlüsse ziehen: 1. Die grösste erreichbare Potentialdifferenz erhält man bei Berührung der Endglieder der Spannungsreihe: $\text{Zn} | \text{Braunstein}$. 2. Durch Wiederholung derselben Kombination, z. B. Zn-Pt-Zn-Pt , kann man die elektromotorische Kraft nicht steigern, sie ist gleich $\text{Zn} | \text{Pt}$. 3. In einem geschlossenen metallischen Kreise kann kein Strom entstehen; denn haben wir etwa die Kette: Ag-Zn-Pt-Cu-Fe , so haben wir an den Enden die Potentialdifferenz $\text{Fe} | \text{Ag}$. Bringen wir dann diese Enden zur Berührung, so haben sie also schon die Potentialdifferenz, welche ihnen entspricht, die Elektrizität bleibt in Ruhe. Man nennt die Metalle, welche dem Gesetz der Spannungsreihe gehorchen, Leiter erster Art oder Klasse. 4. Die Potentialdifferenz, z. B. $\text{Zn} | \text{Cu}$, ist $= - \text{Cu} | \text{Zn}$.

§ 264. Auch bei Berührung zwischen Metallen und Flüssigkeiten tritt Potentialdifferenz ein, während die bei der Berührung verschiedener Flüssigkeiten entstehende so klein ist, dass sie gleich 0 gesetzt werden kann. Aber die Flüssigkeiten lassen sich nicht in die Spannungsreihe einordnen, sie werden bei Berührung mit Metallen teils positiv, teils negativ, ohne dass eine Gesetzmässigkeit bemerkbar wäre. Man nennt die Flüssigkeiten Leiter zweiter Klasse.

Um einen Begriff von der Grösse der Potentialdifferenz zu geben, seien einige Zahlen nach R. Kohlrausch angeführt: wir setzen $Zn | Cu = 100$, so ist

$$\begin{array}{l} Zn | Cu = 100 \\ Zn | Pt = 123 \end{array} \quad \left\| \quad \begin{array}{l} Zn | Zinkvitriol = - 129 \\ Zn | Schwefelsäure = - 115 \\ Cu | Kupfervitriol = - 21,5 \\ Pt | Salpetersäure = + 149. \end{array} \right.$$

Mit Hilfe der Flüssigkeiten kann man nun, da sie dem Gesetz der Spannungsreihe nicht gehorchen, durch Wiederholung derselben Kombinationen die Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft beliebig verstärken. Nehmen wir an, wir hätten zuerst eine Kombination: Cu-Zn-Flüssigkeit (F, Fig. 181), an welche noch eine Kupferplatte zur Ableitung der Elektrizität gefügt sei, und es sei deren elektromotorische Kraft: $Cu | Zn + Zn | F + F | Cu = e$; die erste Kupferplatte sei zur Erde abgeleitet, so dass ihr Potential 0

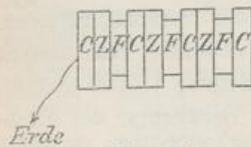


Fig. 181.

ist, dann hat also das andere Ende das Potential e . Nun denken wir uns eine zweite Kombination Zn-F-Cu angelegt; da sie die Elektrizität leitet, wird sie sich zunächst auch auf das Potential e laden. Dazu kommt aber nun noch die elektromotorische Kraft der zweiten Kombination $Cu | Zn + Zn | F + F | Cu = e$, welche bewirkt, dass zwischen der zweiten Zinkplatte und der dritten Kupferplatte die Potentialdifferenz e erzeugt wird; also wird nun die dritte Kupferplatte das Potential $2e$ haben.

Fügen wir eine dritte Kombination an, so wird die Endplatte das Potential $3e$ erhalten u. s. w. Bei Zusammenfügung von n Kombinationen von Leitern erster und zweiter Klasse wird daher die elektromotorische Kraft n mal so gross, als sie eine Kombination erzeugt. Ist das eine Ende nicht zur Erde abgeleitet, so

ist das Potential am einen Ende $+\frac{1}{2} ne$, am anderen $-\frac{1}{2} ne$, die Differenz ist wieder ne .

§ 265. Man nennt eine solche Kombination ein galvanisches Element, eine Verbindung von vielen eine galvanische Batterie oder Säule. Volta baute die erste solche Batterie aus zusammengelötheten Kupfer- und Zinkplatten mit dazwischen gefügten Tuchscheiben, welche mit verdünnter Schwefelsäure getränkt waren. Sie zeigt an ihren Enden Ladung, denn wenn wir dieselben durch einen Draht verbinden, geht ein wenn auch sehr kleiner Funken über, der Draht erwärmt sich, kurz wir können alle die Zeichen, die wir bisher als Beweis einer Ladung kennen lernten, erhalten.

Eine für manche Zwecke sehr bequeme Form ist die trockene oder Zambonische Säule. Sie besteht aus Scheibchen von unechtem Gold- ($Cu + Zn$) und Silber- ($Zn + Sn$) Papier, die mit den Metallseiten zusammengelegt und dann zu Tausenden auf einander geschichtet werden; an die Enden kommen Metallplatten. Das Papier, welches immer etwas Feuchtigkeit enthält, spielt hier die Rolle der Flüssigkeit und daher laden sich die Platten an den Enden bis zu ziemlich hohem Potential. Eine solche trockene Säule wird benutzt beim Bohnenbergerschen Elektroskop, ebenso bei Elektrometern (§ 244), um die Nadel dauernd geladen zu halten, indem man das eine Ende der Säule mit der Erde, das andere mit der Nadel leitend verbindet.

§ 266. Wenn wir die mit dem Potentialunterschied E geladenen Enden eines Elementes leitend verbinden, so muss ein Strom entstehen, da stets Elektrizität von der Stelle mit höherem Potential zu dem mit niedrigerem hinfließt. Da aber die Ursache der Ladung, die Kontakte, im Innern des Elementes bestehen bleiben, welche die Potentialdifferenz E in den Enden verlangen, so strömt nach den Enden sofort neue Elektrizität, die sich wieder durch den Verbindungsdraht ausgleicht. Wie man sieht, muss Zuströmen und Ausgleich gleichzeitig kontinuierlich fortgehen, die Elektrizität kommt nie zum Gleichgewicht, sondern es entsteht ein dauernder Strom; man nennt ihn einen galvanischen Strom, erzeugt durch galvanische Elektrizität.

Diese Thatsache, dass ein dauernder Strom zu stande kommt, scheint zunächst sehr überraschend, weil sie dem Satz von der Er-

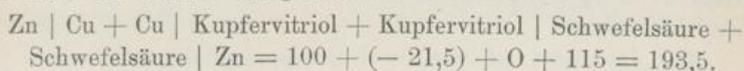
haltung der Kraft zu widersprechen scheint. Aber der Widerspruch ist nur scheinbar; wir werden noch ausführlich besprechen, dass in den Leitern zweiter Klasse — und solche sind zur Herstellung eines stromgebenden Elementes ja unbedingt erforderlich — der Strom chemische Veränderungen hervorbringt, und zwar solche, welche Wärme erzeugen, d. h. Energie frei machen würden. In dieser frei werdenden chemischen Energie haben wir daher die Quelle für den Strom zu suchen, und wir werden sehen, dass sie in der That gerade so gross ist, wie die erzeugte Arbeit. Von einzelnen Physikern wird die Kontaktwirkung ganz geleugnet, nach ihnen soll nur chemische Wirkung die Potentialdifferenz hervorbringen. Die Mehrzahl der Physiker dagegen nimmt an, wie es oben ausgeführt ist, dass die Kontaktwirkung die Ursache der Potentialdifferenz, die chemische Wirkung die Quelle des aus der Potentialdifferenz entstehenden Stromes sei. Wir kommen später (§ 295 u. ff.) darauf zurück.

§ 267. Wenn wir in ein Gefäss mit Wasser oder besser mit verdünnter Schwefelsäure eine Kupfer- und eine Zinkplatte halb eintauchen, und bringen ausserhalb die beiden Platten in Verbindung durch direkte Berührung oder durch einen Metalldraht, so wird sofort das Zn positiv, das Cu negativ. Durch die Flüssigkeit findet die Entladung statt, die positive Elektrizität geht hier vom Zink zum Kupfer; an der Berührungsstelle ausserhalb der Flüssigkeit dagegen wird sofort der Potentialunterschied wieder hergestellt, wir haben hier also den positiven Strom vom Kupfer zum Zink. Wir haben so einen geschlossenen Stromkreis. In demselben kursiert zuerst ein kräftiger Strom, was man z. B. erkennt, wenn man die Verbindung zwischen Cu und Zn durch einen kurzen dünnen Platindraht herstellt; derselbe erhitzt sich zum Glühen. Aber man findet bei dem Versuch, dass das Glühen schnell abnimmt, bald ganz aufhört, also der Strom wird schwächer. Wir werden später (§ 284) finden, dass daran die Zersetzung des Wassers im Element schuld ist; dasselbe zerfällt in H und O, H scheidet sich am Cu aus, O am Zn, und die Anwesenheit dieser Gase vernichtet den Strom. Ein solches Element heisst daher ein inkonstantes.

Um diesen Uebelstand zu vermeiden, um konstante Elemente zu erhalten, müssen wir dafür sorgen, dass die ausgeschiedenen Gase fortgeschafft werden, was durch kompliziertere Einrichtung des Ele-

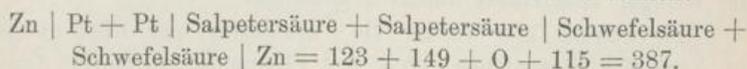
mentes zuerst Daniell (1836) gelang. Es sind seitdem eine ganze Anzahl von Elementen angegeben worden, von denen hier die wichtigsten genannt seien:

Das Daniellsche Element besteht aus Zink in verdünnter Schwefelsäure und Kupfer in Kupfervitriollösung. In ein Glasgefäß kommt ein cylindrisch gebogenes Kupferblech; in dessen Mitte wird ein cylindrisches Gefäß aus unglasiertem Thon oder Porzellan gesetzt, welches porös ist, so dass durch Osmose Flüssigkeiten, die sich aussen und innen befinden, in Berührung kommen. Darin steht ein Zinkkolben; in das Glasgefäß wird Kupfervitriollösung, in die poröse Thonzelle verdünnte Schwefelsäure geschüttet. Bei Verbindung von Zn und Cu entsteht der Strom; dabei werden die Flüssigkeiten zersetzt: am Zink tritt O auf, welcher sofort Zinkoxyd bildet, das durch die Schwefelsäure in Zinkvitriollösung verwandelt wird. Am Cu wird H ausgeschieden; dasselbe reduziert aber die Kupfervitriollösung, es bildet sich Kupfer, welches den Cylinder dicker macht, und Schwefelsäure. Wie man sieht, werden die Gase am freien Auftreten verhindert, der Strom daher nicht geschwächt. Wollen wir die Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elementes berechnen, so ist sie nach den Zahlen des § 264:



Der Strom fließt aussen vom Kupfer zum Zink.

Das Grovesche Element hat die gleiche Form; es besteht aus Zn in verdünnter Schwefelsäure und Platin in Salpetersäure. Hier wird der O auch wieder durch Bildung von Zinkvitriol beseitigt, H aber bildet Untersalpetersäure und Wasser. Die elektromotorische Kraft liesse sich wie oben berechnen:



Der positive Strom fließt vom Platin zum Zink.

Das Bunsensche Element benutzt statt des teuren Platins Retortenkohle; die Wirkungsweise ist die gleiche, ebenso wenn man Eisen statt Platin nimmt (Schönbein). Das Chromsäure-Element, ebenfalls von Bunsen angegeben, besitzt nur eine Flüssigkeit; in eine Lösung von chromsaurem Kali in Schwefelsäure wird Zink und Kohle getaucht; die gebildete Chromsäure be-

seitigt H, das Zink und Schwefelsäure den O, doch ist das Element nicht ganz konstant.

Endlich seien noch erwähnt:

Das Smeesche Element, welches aus Platin oder platinirtem Silber und Zink in Schwefelsäure besteht.

Das Leclanchésche Element, bestehend aus Kohle in Braunstein, darüber Salmiak, in welchem der Zinkstab steckt. Dies Element wird namentlich zu Haustelegraphen viel verwandt.

Das Clarksche Element enthält Quecksilber, darüber einen Brei von schwefelsaurem Quecksilberoxyd und schwefelsaurem Zinkoxyd, darin Platte von amalgamirtem Zink.

§ 268. Die wichtigste Grösse bei einem galvanischen Strom ist seine Stromstärke oder Intensität. Man versteht darunter die Elektrizitätsmenge, welche in der Zeiteinheit durch irgend einen Querschnitt des Stromkreises fliesst. Es ist dabei ohne weiteres klar, dass die Intensität in allen Querschnitten die gleiche sein muss, denn sonst würde sich irgendwo Elektrizität anhäufen müssen, wodurch sofort an dieser Stelle das Potential, d. h. die treibende Kraft wachsen würde, so dass ein Ausgleich erfolgte.

Die Intensität ist von zwei Grössen abhängig: 1. von der Potentialdifferenz oder der elektromotorischen Kraft der Stromquelle; diese ist es, welche die Elektrizität in Bewegung setzt, mit ihr wird also die Intensität wachsen; 2. von dem Widerstand, welchen der Stromkreis dem Strome darbietet. Wir haben gesehen, dass die verschiedenen Substanzen die Elektrizität sehr verschieden gut oder schlecht leiten; je nachdem wird durch dieselbe Kraft mehr oder weniger Elektrizität hindurch getrieben.

Wir können hier wieder die Verhältnisse der Flüssigkeiten zum Vergleich heranziehen. Wie viel Flüssigkeit durch den Querschnitt einer Leitung fliesst, hängt auch ab von zwei Grössen: von dem Druck, unter welchem die Flüssigkeit steht, er repräsentiert die elektromotorische Kraft; und von dem Widerstand, welchen die Reibung in der Röhre verursacht.

§ 269. Bevor wir dazu übergehen, das Gesetz zu ermitteln, nach welchem die Intensität von elektromotorischer Kraft und Widerstand abhängt, müssen wir zwei Wirkungen des Stromes kurz

besprechen, welche wir benutzen, um seine Anwesenheit zu erkennen und seine Stärke zu messen.

Wenn wir über einer Magnetnadel, die im magnetischen Meridian NS schwebt, einen Strom in der NS-Richtung vorbeileiten, so wird die Nadel abgelenkt, der Strom sucht sie senkrecht gegen seine Richtung zu stellen. Auf die Nadel wirken also zwei senkrecht zu einander stehende Kräfte: die Erdkraft E und die Stromkraft. Letztere heisse F, wenn die Nadel im magnetischen Meridian steht; sie ist proportional der Stromstärke I, also $F = kI$. Wenn aber die Nadel abgelenkt wird, so ändert sich die Strom-

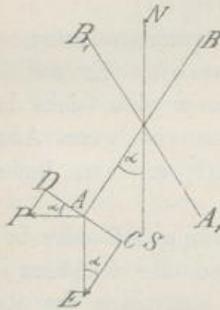


Fig. 182.

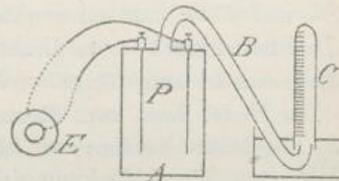


Fig. 183.

kraft, da die Pole sich vom Strom entfernen; sie heisse dann P. Sie hängt vom Ablenkungswinkel α ab, wir wollen schreiben $P = Ff(\alpha)$, wo $f(\alpha)$ bedeutet, dass P sich in unbekannter Weise mit α ändert. Die Nadel dreht sich nun so weit, bis P und E sich das Gleichgewicht halten. Wir können (Fig. 182) $E = AE$ in die Komponenten $AC = E \sin \alpha$ und EC zerlegen, $P = AP$ in $AD = Q = P \cos \alpha$ und in DP . Nur AC und $AD = Q$ wirken auf Drehung der Nadel, die sich so stellt, dass beide gleich sind, also

$$AC = Q \text{ oder } E \sin \alpha = P \cos \alpha = F f(\alpha) \cos \alpha = kIf(\alpha) \cos \alpha.$$

Folglich ist

$$I = \frac{E \sin \alpha}{kf(\alpha) \cos \alpha}.$$

Hier kennen wir nicht $f(\alpha)$. Diese Schwierigkeit können wir auf zwei Wegen umgehen: entweder lassen wir die Nadel sich nur ausserordentlich wenig aus ihrer ursprünglichen Richtung im magnetischen Meridian herausdrehen, so dass die Kraft sich nicht merkbar ändert. Dann können wir $P = F$ setzen, für $\cos \alpha$ aber 1 und für

$\sin \alpha \approx \alpha$, da es sich um sehr kleine Winkel handelt. Dann wird $I = \frac{E}{kF} \alpha = C \alpha$, d. h. die Intensität proportional dem sehr kleinen Drehungswinkel.

Oder wir machen die Nadel so klein im Vergleich zu ihrem Abstand vom Stromleiter, dass sie als punktförmig zu betrachten ist, d. h. dass ihre verschiedene Stellung gegen den Strom für die Kraft nicht in Betracht kommt. Auch dann ist $P = F$ zu setzen, aber $Q = F \cos \alpha$, folglich $I = \frac{E \sin \alpha}{kF \cos \alpha} = C_1 \operatorname{tg} \alpha$, d. h. die Intensität ist für beliebige Ablenkungswinkel proportional deren Tangente.

Die beiden nach diesen Prinzipien konstruierten Instrumente heissen Galvanometer und Tangentenbussole. Es soll hier auf ihre Konstruktion nicht näher eingegangen werden (siehe dafür §§ 305 und 313); nur sei erwähnt, dass man eine ganze Anzahl von Drahtwindungen, eine Drahtrolle, benutzt, in deren Innerem die Magnetnadel aufgehängt wird.

Die Nadel kann vom Strom in die Richtung AB oder in die $A_1 B_1$ abgelenkt werden; es hängt dies von der Richtung des Stromes ab. Die Ablenkungsrichtung lässt sich nach der Regel bestimmen, dass, wenn man sich mit dem Strome schwimmend und nach der Nadel hinsehend denkt, deren Nordpol nach links abgelenkt wird.

Wir haben gesehen, dass I dem $\sin \alpha$ oder seiner Tangente proportional ist. Der Proportionalitätsfaktor C , den wir vorläufig nicht kennen, heisst der Reduktionsfaktor des Instrumentes.

§ 270. Als zweites Mittel zur Messung des Stromes benutzt man seine chemische Wirkung, die Zersetzung einer durchströmten Flüssigkeit. Leiten wir den Strom des Elementes E (Fig. 183) zu zwei Platinplatten P , welche sich in einem z. B. mit angesäuertem Wasser gefüllten Glase A befinden, so wird das Wasser in $2H$ und O zersetzt, d. h. in Knallgas verwandelt. Schliessen wir das Glas durch einen Deckel, von dem das Entbindungsrohr B ausgeht, so können wir das Knallgas in dem geteilten Rohre C auffangen und messen. Ein solches Instrument heisst Voltmeter, und zwar, wenn Wasser zersetzt wird, Wasservoltmeter. Der Versuch zeigt, dass die Menge des in der Zeiteinheit entwickelten Knallgases der Intensität proportional ist.

Jacobi machte den Vorschlag, als Einheit der Intensität diejenige zu nehmen, welche in 1 *min* 1 *cbcm* Knallgas liefert (dies gemessen bei 0° und 760 *mm* Druck). Wir wollen uns vorläufig dieser Jacobischen Einheit bedienen.

Mittelst des Voltameters können wir nun auch den Reduktionsfaktor eines Galvanometers bestimmen: Lassen wir denselben Strom durch Voltameter und Galvanometer hinter einander durchfliessen, so gibt uns ersteres die Intensität in Jacobischen Einheiten; setzen wir diesen Wert und den Ablenkungswinkel α des Galvanometers in die Gleichung $I = C\alpha$ ein, so ist dadurch C bestimmt.

§ 271. Wir haben nun zu untersuchen, wie I abhängt von der elektromotorischen Kraft E der Stromquelle und von der Beschaffenheit des Schliessungskreises.

Wir denken uns ein Element, etwa ein Daniellsches, geschlossen durch einen langen, dünnen Draht und durch ein Galvanometer, welches nur wenige Windungen von dickem Draht besitzt. Wir werden gleich sehen, dass wir dann den Widerstand des Galvanometers vernachlässigen können, also nur den, zunächst unbekanntem, Widerstand des langen Drahtes im Stromkreise haben. Es ergebe sich ein Ausschlag α . Nun schalten wir ein zweites gleiches Daniellsches Element ein, indem wir die Kupferplatte des ersten mit der Zinkplatte des zweiten verbinden; wir wissen, dass die elektromotorische Kraft dieser Batterie $= 2E$ ist. Wir finden, dass der Ausschlag 2α geworden ist. Nehmen wir 3, 4 ... Elemente, so finden wir ebenso den Ausschlag 3, 4 ... mal so gross, wie bei einem Element, also: Die Intensität ist der elektromotorischen Kraft proportional.

Um den Einfluss des Widerstandes zu finden, schliessen wir 1 Element durch einen 2, 3, 4 ... mal so langen Draht von dem gleichen Material, wie im ersten Falle; wir finden, dass der Ausschlag $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$... mal so gross wird, also: Die Intensität ist dem Widerstand umgekehrt proportional.

Zusammen können wir dies ausdrücken durch die Gleichung:

$$I = k \frac{E}{W}.$$

Wenn wir für I die Jacobische Einheit nehmen, für W auch eine Einheit festsetzen, die gleich zu besprechen ist, so können wir auch für die elektromotorische Kraft E eine Einheit aus dieser

Gleichung erhalten, indem wir die elektromotorische Kraft = 1 setzen, die im Kreise mit dem Widerstand = 1 die Intensität = 1 erzeugt; dann wird die Gleichung $1 = k \frac{1}{1}$, d. h. $k = 1$, und wir

$$\text{erhalten: } I = \frac{E}{W}, \quad IW = E, \quad W = \frac{E}{I}.$$

Diese Gleichung, welche das Fundament für alle galvanischen Messungen bildet, ist zuerst von Ohm gefunden worden und wird das Ohmsche Gesetz genannt.

Sie lässt sich in noch allgemeinerer Form schreiben: Sind in einem Kreise verschiedene elektromotorische Kräfte vorhanden, e_1, e_2, e_3, \dots , und sind die Widerstände der einzelnen Leiter im

$$\text{Kreise } w_1, w_2, w_3, \dots, \text{ so ist } i = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + \dots}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots} = \frac{\sum e}{\sum w}.$$

§ 272. Als Einheit des Widerstandes wollen wir vorläufig denjenigen nehmen, welchen eine Quecksilbersäule von 1 m Länge, 1 qmm Querschnitt bei 0° C. darbietet; diese Einheit ist von Werner Siemens vorgeschlagen, und wird nach ihm Siemens-Einheit (S.-E.) oder Quecksilbereinheit genannt. (Die absolute Widerstandseinheit siehe § 336.)

Dieser theoretische Widerstand wird praktisch natürlich nicht gebraucht, sondern man stellt Drähte her, welche den gleichen, doppelten u. s. w. Widerstand haben, wie eine solche Quecksilbersäule, und benutzt diese. Es werden Kästen, sog. Rheostate, gebraucht, welche eine ganze Anzahl solcher Drähte von verschiedenem Wider-

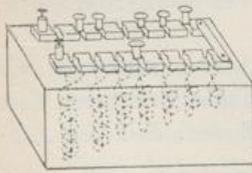


Fig. 184.

stande erhalten. Die zweckmässigste Form ist der Siemenssche Stöpselrheostat. Auf dem Deckel eines Kastens (Fig. 184) sind eine ganze Reihe dicker Messingklötze angeschraubt, welche durch Einschieben von dicken Stöpseln mit einander in leitende Verbindung gebracht werden können. Der erste und letzte Klotz tragen Klemmschrauben zur Zu- und Ableitung des Stromes, der, wenn alle Stöpsel eingesetzt sind, durch die dicken Klötze läuft; der Widerstand derselben ist = 0. Je zwei benachbarte Klötze sind ausserdem durch im Innern des Kastens liegende Drähte verbunden. Sobald wir einen Stöpsel herausziehen, zwingen wir den Strom, zwischen den betreffenden Klötzen durch den Draht zu

fließen, wodurch also dessen Widerstand in den Stromkreis eingeschaltet wird. Die vorhandenen Drähte haben die Widerstände: 1, 1, 2, 5, 10, 10, 20, 50, 100, 100, 200, 500 u. s. w., sind also wie die Stücke eines Gewichtssatzes (§ 48) so gewählt, dass man mit möglichst wenigen jeden Widerstand herstellen kann.

§ 273. Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes kann man untersuchen, von welchen Umständen der Widerstand eines Drahtes bedingt ist; benutzen wir als Schluss desselben Elementes verschiedene

Drähte, so ist ja nach $W = \frac{E}{I}$: der Widerstand der Intensität,

also dem Ausschlag des Galvanometers umgekehrt proportional. Auf diese Weise findet man, dass der Widerstand eines Drahtes 1. proportional seiner Länge ist, 2. umgekehrt proportional seinem Querschnitt, 3. abhängig von der Substanz des Drahtes, also

$W = k \frac{L}{q}$. k heisst der spezifische Widerstand der be-

treffenden Substanz, $\frac{1}{k} = l$ ihr spezifisches Leitungsvermögen; k und l sind der Widerstand oder das Leitungsvermögen eines Drahtes von 1 m Länge, 1 qmm Querschnitt.

Auch der Widerstand von Flüssigkeiten, vorausgesetzt, dass in ihnen keine gasförmigen Zersetzungsprodukte auftreten, folgt dem gleichen Gesetz.

§ 274. Wenn wir ein oder mehrere Elemente zu einem Stromkreise schliessen, so unterscheidet man zwei Arten von Widerständen: den inneren oder wesentlichen Widerstand des Elementes, und den äusseren oder unwesentlichen Widerstand ausserhalb der Batterie. In den Elementen ist es die zu passierende Flüssigkeitsschicht, welche den Widerstand darbietet; bei Einschalten eines neuen Elementes wird daher wider Willen gleichzeitig auch ein neuer Widerstand zugefügt. Den inneren Widerstand können wir vermindern, wenn wir den Querschnitt der Flüssigkeit, also die Höhe des Elementes vergrössern; zu demselben Ziele führt es aber auch, wenn wir mehrere Elemente so mit einander verbinden, dass wir alle gleichen Platten verbinden, also z. B. alle Zinke und alle Kupferplatten, denn dann repräsentieren sie zwei Bleche von grosser Fläche. Man nennt dies Verbindung der Elemente neben einander (oder auf Quantität), während die

Verbindung Zn—Cu—Zn—Cu Verbindung hinter einander oder auf Spannung heisst.

Es sind daher bei vielen Elementen, z. B. 6, eine ganze Anzahl Kombinationen möglich: 6 hinter einander; je 2 neben einander, die 3 Paare hinter einander; je 3 neben einander, die 2 Reihen hinter einander; alle 6 neben einander. Von diesen Kombinationen will man meistens die kennen, welche unter den gegebenen Umständen den stärksten Strom liefert. Nennen wir den inneren Widerstand eines Elementes W , den äusseren w , so ist bei einem Element:

$$I = \frac{E}{W + w}, \text{ bei } n \text{ hinter einander } I_n = \frac{nE}{nW + w}. \text{ Ist hier } nW \text{ klein gegen } w, \text{ d. h. ist der äussere Widerstand sehr gross,}$$

so können wir nW vernachlässigen, $I = \frac{E}{w}$, $I_n = n \frac{E}{w} = nI$. Ist

dagegen w klein gegen W , so wird $I_n = \frac{nE}{nW} = I$.

Schalten wir die n Elemente neben einander, so wird der innere Widerstand $\frac{1}{n}$, da der Querschnitt ver- n -facht ist, also

$$I_n^1 = \frac{E}{\frac{1}{n}W + w}; \text{ ist daher } W \text{ klein gegen } w, \text{ so ist } I_n^1 = I; \text{ ist}$$

dagegen W gross gegen w , so wird $I_n^1 = \frac{nE}{W} = nI$. Daraus ergibt sich die Regel: ist der äussere Widerstand gross, so schalte man die Elemente hinter einander, ist er sehr klein, so neben einander. Es lässt sich zeigen, dass die Stromstärke am grössten wird, wenn der innere Widerstand gleich dem äusseren ist.

Der innere Widerstand der üblichen Elemente liegt zwischen $\frac{1}{4}$ und 1 S.-E.

§ 275. Wir können der Elektrizität, die in einem Stromkreise zirkuliert, verschiedene Wege darbieten, indem wir z. B. die Platten eines Elementes durch zwei oder mehr Drähte schliessen, oder auch zwischen diesen Drähten noch Verbindungsdrähte ziehen, so dass ein kompliziertes Stromnetz entsteht. Man nennt eine solche Leitung eine verzweigte Leitung, jeden Draht einen Zweig, jeden Punkt, von dem 3 oder mehr Drähte ausgehen, einen Verzweigungspunkt. Die Beantwortung der Frage: wie gestalten sich in

allen diesen Zweigen die Intensitäten, scheint sehr schwierig, lässt sich aber sehr einfach beantworten durch zwei von Kirchhoff angegebene Sätze. Diese Kirchhoffschen Sätze lauten:

1. Für jeden Verzweigungspunkt ist die Summe der zuströmenden Intensitäten gleich der Summe der abströmenden. — Da die Intensität gleich der durch den Querschnitt in der Zeiteinheit fließenden Elektrizitätsmenge ist, so sagt dieser Satz nichts anderes aus, als dass sich die Elektrizität nirgends stauen kann.

2. In jedem geschlossenen Kreise gilt die Gleichung $E = \Sigma(IW)$, d. h. wenn wir die Intensität in jedem Zweige des Kreises mit dem Widerstand des Zweiges multiplizieren, so ist die Summe aller dieser Produkte gleich der in diesem Kreise vorhandenen elektromotorischen Kraft. Ist keine elektromotorische Kraft vorhanden, so ist also die Summe = 0. Der zweite Satz ergibt sich folgendermaßen: in jedem Zweige entsteht ein Strom, weil an seinen Enden die Potentiale verschieden sind, also ein Potentialunterschied oder eine elektromotorische Kraft vorhanden ist. Wir nennen das Potential an den Enden der verschiedenen sich folgenden Zweige des betrachteten Kreises: e_1 und e_2 , e_2 und e_3 , e_3 und $e_4 \dots$, e_{n-1} und e_n , die Intensitäten und Widerstände der Zweige: i_1 und w_1 , i_2 und $w_2 \dots$ i_{n-1} und w_{n-1} . Für jeden Zweig gilt das Ohmsche Gesetz $e = iw$; wenden wir es für alle Zweige an, so erhalten wir: $e_1 - e_2 = i_1 w_1$; $e_2 - e_3 = i_2 w_2$; \dots $e_{n-1} - e_n = i_{n-1} w_{n-1}$. Addieren wir alle, so folgt: $e_1 - e_n = \Sigma iw$, wobei die linke Seite die Summe aller elektromotorischen Kräfte des Kreises darstellt. Hervorzuheben ist noch, dass die Intensität je nach der Richtung des Stromes positiv oder negativ zu rechnen ist; geht man im Stromkreis in irgend einem Sinne, z. B. dem des Uhrzeigers, herum, so sind alle Intensitäten in dieser Richtung positiv zu rechnen, die entgegengesetzt fließenden negativ.

§ 276. Wir wollen die Kirchhoffschen Sätze auf den in Fig. 185 dargestellten verzweigten Stromkreis anwenden. E ist das Element, dessen elektromotorische Kraft E sei; der Strom fließe in der Richtung des Pfeils, also von E nach a ; hier verzweigt er sich, in b kommen die Zweige wieder zusammen. Wir nennen die Intensität im Zweige bEa : I , den Widerstand W ; ebenso für acb und adb Intensität und Widerstand i_1 und w_1 , i_2 und w_2 . Der erste Kirchhoffsche Satz ergibt für a und b : 1) $I = i_1 + i_2$. Der zweite Satz gibt:

für $a c b d a$: 2) $i_1 w_1 - i_2 w_2 = 0$,
 für $b E a d b$: 3) $I W + i_2 w_2 = E$,
 für $b E a c b$: 4) $I W + i_1 w_1 = E$.

Bezeichnen wir ferner den Gesamtwiderstand der Verzweigung zwischen a und b mit u , so ist 5) $I W + I u = E$, da die Gesamtintensität in der Verzweigung dieselbe wie im unverzweigten Teil sein muss, d. h. I .

Aus 4), 3) und 5) folgt: $i_1 = \frac{E - I W}{w_1}$; $i_2 = \frac{E - I W}{w_2}$;
 $I = \frac{E - I W}{u}$; die Summe der beiden ersten Gleichungen gibt links $i_1 + i_2$, welches nach 1) gleich I , der linken Seite der dritten Gleichung ist. Folglich sind die rechten Seiten auch gleich, d. h.

$$\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} = \frac{1}{u}.$$

Das Reciproke des Widerstandes haben wir Leitungsfähigkeit genannt; danach können wir die letzte Gleichung so aussprechen:

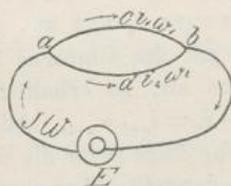


Fig. 185.

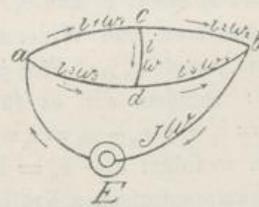


Fig. 186.

die Leitungsfähigkeit einer Verzweigung ist gleich der Summe der Leitungsfähigkeiten der einzelnen Zweige. Dies gilt natürlich auch, wenn mehr als zwei Zweige vorhanden sind.

Die Gleichung 2) ergibt: $i_1 : i_2 = w_2 : w_1$, d. h. in der Verzweigung verhalten sich die Intensitäten umgekehrt wie die Widerstände. Verhalten sich z. B. $w_1 : w_2 = 1 : 9$, so fließt durch w_1 : $\frac{9}{10}$ des ganzen Stromes, durch w_2 nur $\frac{1}{10}$. Man benutzt dies häufig, um die Intensität auf einer Strecke eines Stromkreises zu schwächen: wollen wir z. B. einen Strom messen, für welchen das Galvanometer zu empfindlich ist, also der Ausschlag zu gross, so verbindet man einen Punkt vor dem Galvanometer mit einem Punkt hinter ihm durch einen sog. Nebenschluss; ist dessen

Widerstand $\frac{1}{9}, \frac{1}{99}, \frac{1}{999}$ u. s. w. von dem des Galvanometers, so misst dessen Ausschlag $\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}$. . . des ganzen Stromes.

§ 277. Wir machen eine weitere wichtige Anwendung der Kirchhoffschen Sätze auf folgenden Fall (Fig. 186). Der von E erzeugte Strom verzweige sich in a über c und d nach b. Ausserdem seien noch c und d durch einen Zweig, die sog. Brücke, verbunden. Durch dieselbe wird im allgemeinen auch ein Strom fließen, in der Richtung cd oder dc je nach der Lage der Punkte c und d. Zur Aufstellung der Gleichungen wollen wir annehmen, er fliesse in der Richtung cd. Die Intensitäten und Widerstände in den einzelnen Zweigen nennen wir: in bEA: I und W; in ac: i_1 und w_1 ; in cb: i_2 und w_2 ; in ad: i_3 und w_3 ; in db: i_4 und w_4 ; in cd: i und w.

Dann ergibt der erste Kirchhoffsche Satz für die Punkte a und b: 1) $I = i_1 + i_3 = i_2 + i_4$; und für die Punkte c und d: 2) $i = i_1 - i_2 = i_4 - i_3$.

Der zweite Kirchhoffsche Satz gibt ferner: für acd: 3) $i_1 w_1 + i w - i_3 w_3 = 0$; für cdb: 4) $i_2 w_2 - i_4 w_4 - i w = 0$; für EacbE und EadbE: 5) $I W + i_1 w_1 + i_2 w_2 = E = I W + i_3 w_3 + i_4 w_4$.

Wir wollen diese Gleichungen für den Fall anwenden, dass durch die Brücke kein Strom fliesse, dass also $i = 0$ sei, und untersuchen, welche Bedingungen sich daraus für die Lage der Punkte c und d ergeben. Für $i = 0$ gibt 2): 6) $i_1 = i_2$; $i_3 = i_4$; es wird 3) $i_1 w_1 = i_3 w_3$ und 4): $i_2 w_2 = i_4 w_4$. Ersetzen wir hier nach 6) i_2 durch i_1 , i_4 durch i_3 , so haben wir die beiden Gleichungen:

$$i_1 w_1 = i_3 w_3$$

$$i_1 w_2 = i_3 w_4$$

daraus folgt: $w_1 : w_2 = w_3 : w_4$,

d. h. wenn kein Strom durch die Brücke fließen soll, müssen die Punkte c und d so gelegen sein, dass die Widerstände acb und adb in demselben Verhältnis geteilt sind.

§ 278. Eine der wichtigsten Aufgaben im Gebiete des Galvanismus ist die Bestimmung von Widerständen und es gibt dafür eine ganze Menge Methoden, welche wir nun besprechen wollen.

1. Die Substitutionsmethode: wir schliessen die Stromquelle durch den zu messenden Widerstand und ein Galvanometer oder Tangentenbussole, beobachten den Ausschlag. Dann ersetzen wir den unbekanntem Widerstand durch einen bekannten, etwa dem Siemensschen Rheostaten entnommenen, von solcher Grösse, dass der Ausschlag derselbe wird. Da in beiden Fällen Intensität und elektromotorische Kraft identisch sind, so müssen auch die Widerstände identisch sein.

2. Die Methode nach dem Ohmschen Gesetz: wir schliessen ein Element mit der elektromotorischen Kraft e durch eine Tangentenbussole; es ergebe sich die Intensität i , der unbekanntem Widerstand des Elementes und der Bussole sei w , so ist $i = \frac{e}{w}$. In diesen Stromkreis schalten wir noch einen bekannten Widerstand, er sei w_1 , es finde sich die Intensität i_1 , so ist $i_1 = \frac{e}{w + w_1}$. Endlich setzen wir statt des bekannten Widerstandes w_1 den zu bestimmenden x , es ergebe sich i_2 , so ist $i_2 = \frac{e}{w + x}$.

Aus den 3 Gleichungen folgt: $e = iw = i_1(w + w_1)$; $e = iw = i_2(w + x)$ oder $w(i - i_1) = i_1 w_1$; $w(i - i_2) = i_2 x$. Durch Division folgt: $\frac{i - i_1}{i - i_2} = \frac{i_1 w_1}{i_2 x}$, also $x = w_1 \frac{(i - i_2) i_1}{(i - i_1) i_2}$.

3. Methode des Differentialgalvanometers: wenn wir auf eine Magnetnadel zwei Drahtspiralen wirken lassen von genau derselben Grösse und symmetrischer Stellung zur Nadel, so wird dieselbe in Ruhe bleiben, wenn durch beide Spiralen Ströme von gleicher Intensität, aber in entgegengesetzter Richtung fließen. Ein solches Instrument heisst Differentialgalvanometer. Es sei in Fig. 187 a die Magnetnadel, b und c die beiden Spiralen. Der Strom des Elementes E teilt sich in beide Spiralen, durchfliesst sie von d nach e und von f nach g, geht einerseits durch den zu bestimmenden Widerstand x , andererseits durch einen Siemensschen Rheostaten w , und kommt so zum Element zurück. Sei in dem einen Stromkreis der Widerstand $W_1 + x$, die Intensität i_1 , so ist $i_1 = \frac{e}{W_1 + x}$; im anderen sei vorhanden $W_2 + w$ und i_2 , so ist $i_2 = \frac{e}{W_2 + w}$; wir

ändern w so lange, bis die Nadel keinen Ausschlag gibt, d. h. bis $i_1 = i_2$; dann ist $\frac{e}{W_1 + x} = \frac{e}{W_2 + w}$, $W_1 + x = W_2 + w$. Nun haben beide Spiralen identische Widerstände, also ist $W_1 = W_2$, folglich auch $x = w$.

§ 279. Eine Methode, wie diese letzte, bei welcher es darauf ankommt, einen Strom zu Null zu machen, nennt man Nullmethode. Ebenfalls Nullmethode ist 4. die Wheatstonesche Brückenmethode, die wichtigste und genaueste von allen. Sie beruht auf Benutzung der in § 277 besprochenen Verzweigung, welche in folgender Form angewandt wird: auf einem Brett AB (Fig. 188) ist eine Millimeterteilung angebracht, darüber ein Draht von möglichst gleichmässiger Beschaffenheit und von derselben

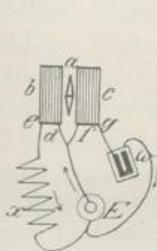


Fig. 187.

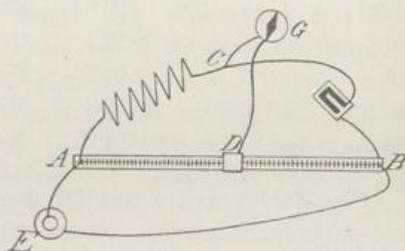


Fig. 188.

Länge wie die Teilung (1 m) befestigt. Er endigt in Klemmschrauben, zu welchen der Strom des Elementes E zugeleitet wird. Ferner ist mit A das eine Ende des zu bestimmenden Widerstandes AC verbunden; von C führt ein Draht zu einem Rheostaten und von hier zu B . Der Brückendraht CD endlich führt von C zu einem Galvanometer G , von da zu einer Klemmschraube an einem Klotz D , der auf AB entlang gleiten kann; die Klemmschraube steht durch ein am Klotz D vertikal befestigtes Platinblech mit dem Messdraht AB in leitender Verbindung.

Zur Messung wird in den Rheostaten irgend ein Widerstand eingeschaltet, dann der Klotz so lange verschoben, bis das Galvanometer keinen Strom anzeigt; dann wissen wir (§ 277), dass $AC : CB = AE : DB$. Da aber AD und DB Teile desselben Drahtes sind, so verhalten sich diese Widerstände direkt wie die Drahtlängen. War daher z. B. der Kontaktklotz auf 500 mm zu

schieben, so sind beide Widerstände gleich, also der gesuchte AC gleich dem bekannten eingeschalteten CB. Für Benutzung der Methode ist noch zu erwähnen, dass sie, wie leicht ersichtlich, am empfindlichsten ist, wenn AC und CB nahezu gleichen Widerstand haben, der Kontaktklotz sich in der Mitte der Teilung befindet.

§ 280. Mit diesen und noch einigen anderen Methoden sind die spezifischen Widerstände oder Leitungsfähigkeiten bestimmt worden; dabei sprechen wir zunächst nur von den Leitern erster Klasse, welche den Strom leiten, ohne zersetzt zu werden, während für Leiter zweiter Klasse andere später (§ 328) zu besprechende Methoden anzuwenden sind. In folgender Tabelle¹⁾ sind einige Zahlen angegeben, welche sich auf die Temperatur 0° C. beziehen:

Silber	0,015	Zinn	0,134
Kupfer	0,016	Blei	0,199
Gold	0,021	Quecksilber	1,000
Zink	0,057	Kohle	40—120
Platin	0,092	Messing	0,051
Eisen	0,099	Neusilber	0,212

Diese Zahlen gelten nur für die chemisch reinen Metalle; die kleinsten Verunreinigungen können oft die Grösse des Widerstandes erheblich ändern; so schwankt z. B. die Zahl für käufliches Kupfer zwischen dem oben gegebenen und dem sechsfachen Wert. Auch die Behandlung des Metalles, ob gezogen, gewalzt, gegossen, angelassen u. s. w. ist von erheblichem Einfluss.

Das Reciproke obiger Zahlen ist die spezifische Leitungsfähigkeit. An denselben Stücken ist von Wiedemann und Franz die elektrische und die Wärmeleitungsfähigkeit (§ 167) bestimmt worden; es fand sich, dass die Zahlen einander proportional sind. So ergab sich, wenn man die Leitungsfähigkeit des Silbers in beiden Fällen = 100 setzt, die Leitungsfähigkeit:

¹⁾ Ausführliche Tabellen siehe in Landolt-Börnstein, Physikalisch-chemische Tabellen, Berlin 1894, und Wiedemann, Elektrizität.

	für Wärme	für Elektrizität
Silber	100	100
Kupfer	73,6	79,3
Zink	28,1	27,3
Zinn	14,8	17,0

Von grossem Einfluss auf den Widerstand erweist sich die Temperatur. Der Widerstand wächst mit ihr; man setzt daher $w_1 = w_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$, wo α und β empirisch bestimmte Konstanten sind, w_0 den Widerstand bei 0° C. bedeutet. Es zeigt sich, dass für die meisten reinen Metalle der hauptsächlich in Betracht kommende Wert von α nahezu derselbe ist, und zwar etwa 0,0037, also fast gleich dem Ausdehnungskoeffizienten der Gase. Bei dem absoluten Nullpunkt wäre danach der Widerstand fast 0; dies bestätigte Wroblewski, welcher den Widerstand des Kupfers bei -200° etwa 0,001 fand. Bei Quecksilber ist $\alpha = 0,0008$, bei Neusilber $\alpha = 0,0004$. Diese Aenderung ist wichtig für Rheostaten und Normalwiderstände. Man hat verschiedene Legierungen hergestellt, bei welchen der Einfluss der Temperatur sehr gering ist, und stellt aus ihnen die Normalwiderstände her. Eine derartige Legierung ist z. B. das sog. Konstantan. Bei Kohlefäden und einigen Erden nimmt der Widerstand mit steigender Temperatur stark ab. Darauf beruht z. B. das Nernstsche Licht: ein Stab aus Magnesia leitet bei gewöhnlicher Temperatur fast gar nicht; wärmt man ihn schwach an, so sinkt sein Widerstand so bedeutend, dass er einen kräftigen Strom durchlässt, der ihn nun bis zur Weissglut erhitzt (vgl. § 287).

§ 281. Die Aenderung des Widerstandes mit der Temperatur wird bei zwei wichtigen Instrumenten zur Temperaturmessung benutzt. Das eine ist das elektrische Pyrometer (§ 127) von Siemens: ein Platindraht, welcher den zu messenden Zweig einer Wheatstoneschen Brücke bildet, wird, eingeschlossen in ein Porzellanrohr, in den Ofen geschoben, und sein Widerstand bestimmt. Daraus lässt sich seine Temperatur berechnen, und es ist dies nächst der Anwendung des Luftthermometers die zuverlässigste Methode zur Bestimmung hoher Temperatur.

Das zweite Instrument, das Langleysche Bolometer, dient

zur Messung ausserordentlich kleiner durch strahlende Wärme hervorgebrachter Temperaturänderung, oder besser gesagt, zum Nachweis der Existenz strahlender Wärme an irgend einer Stelle. Es besteht ebenfalls aus einer Wheatstoneschen Brückenkombination mit ausserordentlich empfindlichem Galvanometer. Den Zweig, dessen Widerstandsänderung beobachtet werden soll, bildet ein sehr feiner und kurzer Platindraht, der mit Russ überzogen ist, um die Wärme zu absorbieren. Langley ist damit im stande gewesen, strahlende Wärme nachzuweisen, welche ein milliontel Grad C. Temperaturerhöhung hervorbrachte. (Vgl. § 369.)

§. 282. Ausser der Intensität und dem Widerstande ist als dritte Grösse die elektromotorische Kraft zu bestimmen. Auch dafür gibt es mehrere Methoden; es seien folgende erwähnt:

1. Die Ohmsche Methode: Die Stromquelle wird durch ein Galvanometer geschlossen; dabei hat man im Stromkreis einen unbekanntem Widerstand w ; man beobachtet eine Intensität i , so dass $i = \frac{e}{w}$. Nun schaltet man einen bekannten Widerstand w_1 ein,

man findet: $i_1 = \frac{e}{w + w_1}$. Daraus ergibt sich: $i w = e = i_1 (w + w_1)$,

also $w = \frac{i_1 w_1}{i - i_1}$, folglich aus $e = i w$: $e = \frac{i i_1}{i - i_1} w_1$.

2. Die Fechnersche Methode: man nimmt ein Galvanometer von sehr grossem Widerstand w , so dass daneben die verschiedenen Widerstände verschiedener Elemente zu vernachlässigen sind. Dann erhält man für ein erstes Element: $i_1 = \frac{e_1}{w}$, für ein anderes $i_2 = \frac{e_2}{w}$; daher ist $\frac{e_1}{e_2} = \frac{i_1}{i_2}$.

Diese Methoden setzen voraus, dass die Elemente ganz konstant sind. Das ist aber auch bei den sog. konstanten Elementen nicht vollkommen der Fall; sobald sie Strom geben, finden kleine Zersetzungen statt, durch welche die elektromotorische Kraft geschwächt wird. Man benutzt daher besser sog. Kompensationsmethoden, die so eingerichtet sind, dass kein Strom zu stande kommt, während die elektromotorische Kraft gemessen wird.

3. Die Poggendorffsche Methode: Man stellt eine Drahtkombination nach Schema der Fig. 189 her: E ist eine Hilfsstrom-

quelle von grösserer elektromotorischer Kraft, als die der zu vergleichenden Elemente; der Strom sei, wie in der Zeichnung durch die Pfeile angedeutet, oben nach links gerichtet. Er geht durch ein Galvanometer G , verzweigt sich dann in b , um teils durch den Rheostaten R nach a und zurück nach E zu gelangen, teils durch ein zweites Galvanometer G_1 nach a und E zu kommen. In diesen Zweig ist das zu messende Element e_1 eingeschaltet, so dass es einen Strom in entgegengesetzter Richtung erzeugt. Ist der Widerstand in $R = \infty$, so wird das stärkere Element E überwiegen, der Strom wird von b über G_1 nach a gehen; ist der Widerstand $= 0$, so wird der Strom von E nur durch $b R a$ fließen, das Element e_1 wird seinen Strom in der Richtung $a G_1 b$ erzeugen. Man erkennt so, dass es einen mittleren Widerstand in R geben muss, bei welchem in dem Zweige $a G_1 b$ gar kein Strom zu stande kommt, was wir an dem Galvanometer G_1 erkennen. Diesen Fall stellen wir her. Wir nennen in dem linken Zweige Intensität und Widerstand i und w , in dem rechten i_1 und w_1 , in dem Brückendraht I_1 und W_1 . Nach dem zweiten Kirchhoffschen Satz ist für den rechten Stromkreis: $e_1 = i_1 w_1 + I_1 W_1$, oder, da bei unserer Wahl des Widerstandes W_1 in R der Strom $i_1 = 0$ ist:

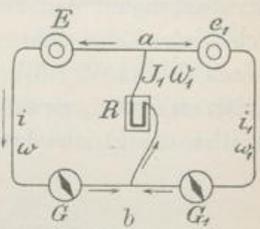


Fig. 189.

Die Intensität I_1 ist aber dieselbe, die im linken Stromkreis vorhanden ist, welche also durch G angezeigt und gemessen wird, folglich $e_1 = i W_1$. — Nehmen wir nun für e_1 ein anderes Element e_2 , müssen den Widerstand W_2 einschalten, damit G_1 in Ruhe bleibe, und beobachten dann an G die Intensität i_2 , so ist: $e_2 = i_2 W_2$, also $\frac{e_1}{e_2} = \frac{i W_1}{i_2 W_2}$.

§ 283. Eine der zweckmässigsten Methoden ist 4. die Duboissche Methode. Zu ihrer Erklärung wollen wir etwas weiter ausholen. Ein Element liefert einen Strom, weil zwischen seinen Enden eine Potentialdifferenz besteht, welche wir elektromotorische Kraft genannt haben. Ist sie $= e$, so können wir sagen, das eine Ende hat das Potential e , das andere das Potential 0 (wenn wir das eine Ende mit der Erde verbinden), oder das eine Ende hat das Potential $+\frac{e}{2}$, das andere das Potential $-\frac{e}{2}$ (wenn wir etwa die

Mitte des Verbindungsdrahtes mit der Erde verbinden). Jedenfalls ist es klar, dass längs des Verbindungsdrahtes das Potential abnehmen muss, wenn wir von einer Platte des Elementes zur anderen gehen. Man spricht daher von einem Potentialgefälle längs des Schliessungsdrahtes.

Es ist leicht zu erkennen, dass das Potentialgefälle von dem Widerstand bedingt ist, dass die Abnahme des Potentials längs der Schliessung proportional dem Widerstand erfolgt. Um dies zu erkennen, nennen wir das Potential an einem Ende des Drahtes E , am anderen Ende E_n , die Intensität des Stromes I und den Widerstand des ganzen Drahtes W , so haben wir $E - E_n = WI$ nach dem Ohmschen Gesetz.

Das Ohmsche Gesetz gilt aber für jeden Teil der Strombahn; wir denken uns den Draht in beliebige Stücke geteilt, nennen das Potential an den Enden $E_1, E_2, E_3 \dots$, die Widerstände der einzelnen Stücke $W_1, W_2, W_3 \dots$. Dann ist die elektromotorische Kraft im ersten, zweiten \dots Stücke: $E - E_1, E_1 - E_2, \dots$ und da in allen die gleiche Intensität I vorhanden, so haben wir

$$\begin{aligned} E - E_1 &= W_1 I \\ E_1 - E_2 &= W_2 I \\ E_2 - E_3 &= W_3 I \\ \hline E_{n-1} - E_n &= W_n I. \end{aligned}$$

Summieren wir alle diese Gleichungen, so erhalten wir, wie es sein muss: $E - E_n = (W_1 + W_2 + \dots + W_n) I = WI$; aus je zweien folgt: $\frac{E - E_1}{E_1 - E_2} = \frac{W_1}{W_2}$, d. h. die Aenderung des Potentials auf einer Strecke, das Potentialgefälle, ist dem Widerstand dieser Strecke proportional.

Daraus folgt unmittelbar, dass, wenn wir einen Draht von durchweg gleicher Beschaffenheit zur Schliessung nehmen, der Potentialabfall auf einer gewissen Strecke proportional der Länge dieser Strecke ist, da der Widerstand der Länge proportional ist. Man stellt dies zweckmässig graphisch dar: wir wollen $E_n = 0$ setzen. Es sei in Fig. 190 ab der Schliessungsdraht; seine Länge nehmen wir als Abscissen, das Potential als Ordinaten, also $ac = E$, so wird der Abfall des Potentials durch die gerade Linie cb dargestellt, falls ab homogen ist. Wenn wir zwei Punkte des Schliessungsdrahtes, z. B. a und d, durch einen anderen Draht verbinden, apd, so muss in diesem ein Strom entstehen, denn an seinen Enden sind

verschiedene Potentiale vorhanden, ac und de (vorausgesetzt, dass der Hauptstrom durch den Nebenschluss nicht geändert würde); es ist also in dem Kreise apd eine elektromotorische Kraft $ac - de = cf$ wirksam. Diese verhält sich zu der E der Hauptschliessung, wie die Länge ad zu ab , da $fc : ac = ad : ab$. Nur in einem Falle wird in apd kein Strom entstehen, wenn nämlich in diesem Zweige auch eine elektromotorische Kraft vorhanden ist, welche an den Enden gerade die gleiche Potentialdifferenz $= cf$ hervorruft; dann kann weder Elektrizität vom Hauptdraht nach apd herüberfließen — denn dadurch würde in der Nebenschliessung die Potentialdifferenz erhöht —, noch umgekehrt.

Diese Ueberlegung wird in der Duboisschen Methode in folgender Weise benutzt: den Enden eines homogenen Drahtes AB (Fig. 191), welcher über einer Millimeterteilung aufgespannt ist, wird der Strom einer Batterie E zugeführt, welche grössere elektromotorische Kraft besitzt, als die zu vergleichenden Elemente. Innerhalb des Drahtes haben wir dadurch ein Potentialgefälle, welches dem Abstand von A proportional wächst. Das eine Ende

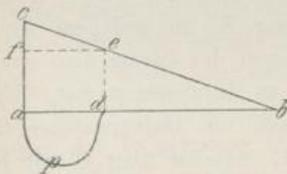


Fig. 190.

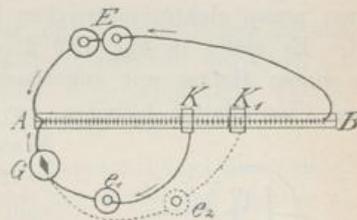


Fig. 191.

des Elementes e_1 wird mit A verbunden, wobei noch ein Galvanometer G eingeschaltet ist, das andere Ende wird zu dem auf AB verschiebbaren Kontaktklotz K geführt. Man schiebt den Kontaktklotz so, dass das Galvanometer Stromlosigkeit anzeigt; dann ist die elektromotorische Kraft e_1 gleich dem Potentialabfall auf der Strecke AK . Müssen wir bei einem anderen Element e_2 den Klotz auf K_1 schieben, so ist

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{AK}{AK_1}$$

Dasselbe Resultat lässt sich leicht mittelst des Kirchhoffschen Satzes ableiten: Nennen wir die Intensität in dem Zweige AK : i_1 , in Ae_1K : i_2 , den Widerstand in AK : w_1 , in Ae_1K : w_2 , so ist

$i_1 w_1 + i_2 w_2 = e_1$. Beim Versuch wird $i_2 = 0$ gemacht; w_1 ist gleich $A \bar{K} r$, wenn wir mit r den Widerstand der Längeneinheit bezeichnen, also $e_1 = i_1 r A \bar{K}$; ebenso für ein zweites Element $e_2 = i_1 r A \bar{K}_1$.

Mit diesen und anderen Methoden haben sich folgende Werte für die elektromotorischen Kräfte einiger Elemente ergeben:

Bunsen . . .	= 1,7 Daniell	Leclanché . . .	= 1,2 Daniell
Grove . . .	= 1,7 „	Smee . . .	= 1,2 „
Chromsäure . .	= 1,8 „	Clark . . .	= 1,07 „

§ 284. Wir haben die Flüssigkeiten bei unserer Betrachtung der Bestimmung von Widerständen ausschliessen müssen, weil sie zersetzt werden, so dass z. B. H und O an den Platten ausgeschieden wird, durch welche wir den Strom aus- und eintreten lassen. Der Versuch zeigt nämlich, dass solche mit Gas bedeckten Platten eine elektromotorische Kraft erzeugen, so dass durch Einschaltung einer Flüssigkeitsschicht in einen Stromkreis die Stromstärke nicht nur durch Vergrößerung des Widerstandes nach dem Ohmschen Gesetz geändert wird, sondern auch durch Hinzufügung einer neuen elektromotorischen Kraft.

Es stelle in Fig. 192 E eine Batterie dar; der Strom geht zu einem Gefäss mit angesäuertem Wasser A, in welchem sich zwei Platinplatten befinden, zwischen welchen der Strom also eine

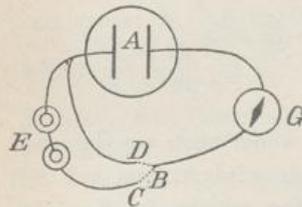


Fig. 192.

Wasserschicht zu durchsetzen hat. Er geht dann durch ein Galvanometer G zum Punkte B, welcher über C mit E verbunden werden kann, so dass der Stromkreis geschlossen ist. Lassen wir den Strom eine Weile wirken, so dass Wasser zersetzt wird, verbinden dann B mit D, so ist nun die Batterie ausgeschlossen, das Galvanometer wird mit

der Zersetzungszelle zu einem Kreis geschlossen. Der Versuch zeigt, dass das Galvanometer auch jetzt einen Strom anzeigt, welcher aber dem ursprünglichen entgegengesetzt gerichtet ist und schnell an Stärke abnimmt.

Man nennt Platten, welche durch Zersetzung mit Gasen überzogen sind, polarisirt, den Strom, welchen sie nach dem vorigen Versuch erzeugen, Polarisationsstrom. Wir finden daher, dass die Wasserzersetzung einen dem zersetzenden Strom entgegen ge-

richteten Polarisationsstrom erzeugt. Dass dieser, wenn er allein fließt, schnell aufhört, erklärt sich leicht: er bringt selbst wieder Polarisation hervor, aber die entgegengesetzte, als welche ihn bedingt; an der Platte, wo der Zersetzungsstrom H ausgeschieden hatte, scheidet der Polarisationsstrom, da er umgekehrt gerichtet ist, O aus, welcher sich mit dem H zu Wasser verbindet, und umgekehrt ist es an der anderen Platte. Die polarisierenden Gase werden somit durch den Strom selbst zerstört.

Die elektromotorische Kraft der Polarisation hängt von der des erregenden Stromes ab, wächst mit ihr, erreicht aber ein Maximum, wie folgende Zahlen für Platinplatten in verdünnter Schwefelsäure zeigen:

Erregender Strom	0,03	0,2	0,6	1,03	2,11	2,54	4,03	10
Polarisationsstrom	0,03	0,2	0,6	1,03	2,00	2,03	2,03	2,03

Die elektromotorische Kraft ist in Daniells gemessen.

Es ergibt sich daraus, dass man mit 1 Daniellschen Element Wasser nicht zersetzen kann; sobald die Zersetzung begonnen hat, bildet sich eine gerade ebenso starke entgegengesetzte elektromotorische Kraft aus, beide zusammen heben sich auf.

Bei sehr schwachen zersetzenden Strömen hängt übrigens die Grösse der Polarisation auch noch von der Grösse der Platten ab; werden diese vergrößert, z. B. durch galvanisches Ueberziehen mit schwammigem Platin, so wird die Gasschicht dünner, die Polarisation schwächer.

§ 285. Die Thatsache, dass polarisierte Elektroden einen Strom liefern, der so lange andauert, bis die Zersetzungsprodukte durch ihn verbraucht sind, hat zur Konstruktion der sog. sekundären Elemente oder Akkumulatoren geführt.

Nachdem im Anfange des Jahrhunderts Ritter die ersten Versuche gemacht hatte, gelang es 1860 Planté, brauchbare Elemente derart herzustellen, indem er zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure tauchte. Wird ein Strom hindurchgeschickt, so wird an der einen Platte Sauerstoff ausgeschieden, der Bleisuperoxyd bildet; schliesst man dann den Akkumulator in sich, so entsteht

ein umgekehrt gerichteter Polarisationsstrom, welcher das Superoxyd reduziert, während die zweite Platte oxydiert wird. Der Strom hört auf, sobald beide Platten die gleiche Beschaffenheit haben. Der Akkumulator kann aber beliebig oft von neuem geladen werden, er liefert jedesmal wieder einen Entladungsstrom. Die Plantéschen Elemente mussten lange Zeit geladen und entladen werden, bevor sich reichliche Mengen von Superoxyd bildeten, so dass ein länger andauernder Entladungsstrom zu stande kam. Diesem Uebelstand suchte Faure dadurch abzuhelpfen, dass er auf Bleiplatten Mennige (bleisaures Bleioxyd) aufpresste. Die Herstellung der Akkumulatoren wurde dadurch wesentlich einfacher, aber ihre Haltbarkeit liess noch viel zu wünschen. Erst in neuerer Zeit ist es gelungen, sekundäre Elemente in brauchbarer und haltbarer Form herzustellen. Sie sind deshalb wichtig, weil sie Elektrizität aufzuspeichern gestatten und sie mit sehr konstantem Strom wieder abgeben.

b) Wirkungen des Stromes innerhalb der Leitung.

§ 286. Wenn ein galvanischer Strom zirkuliert, so bringt er in seiner Leitung Wirkungen hervor, die verschieden sind, je nachdem wir es mit Leitern erster oder zweiter Klasse zu thun haben. Wir betrachten zunächst die ersteren.

Wir haben schon besprochen, dass bei Entladung von Leidner Flaschen Erwärmung der Drähte auftritt, welche von Riess gemessen wurde (§ 257). Sehr viel deutlicher tritt diese Erwärmung der Leiter auf bei der starken Intensität der galvanischen Ströme; sie wurde von Lenz und Joule näher untersucht. Beide fanden, dass die in der Zeiteinheit entwickelte Wärme in einem Stücke der Leitung proportional dem Widerstand dieses Stückes und dem Quadrat der Intensität sei, also $q = cwI^2$. Dies liess sich leicht ermitteln, indem man das betreffende Stück der Leitung in ein Kalorimeter einsenkte. Es zeigte sich, dass dieselbe Gleichung auch für eingeschaltete Flüssigkeiten gilt, in welchen keine bleibenden chemischen Veränderungen stattfinden; dies ist z. B. der Fall, wenn wir Kupferplatten in Kupfervitriollösung haben. Dann wird zwar die Lösung zersetzt in Cu und Schwefelsäure, das Cu scheidet sich an der einen Platte aus und macht sie dicker, die Schwefelsäure bildet aber auf Kosten der anderen Platte neues Kupfervitriol und zwar gerade so viel, als zersetzt wurde. Aehnlich

verhält sich z. B. Zink in Zinkvitriol. In diesen Fällen ist also auch für die Zersetzungszelle: $q = c w I^2$.

Endlich wies Joule nach, dass auch für das Element selbst die Gleichung gilt. Nennen wir daher den Widerstand des ganzen Stromkreises W , die in ihm in der Zeiteinheit entwickelte Wärmemenge Q , so ist $Q = c W I^2$, oder auch, da nach dem Ohmschen Gesetz $E = W I$ ist: $Q = c E I$ oder $Q = c \frac{E^2}{W}$. Diese Gleichung wird das Joulesche Gesetz genannt.

Es lässt sich leicht nachweisen, dass das Joulesche Gesetz nichts anderes aussagt, als dass die durch das Fliessen des Stromes verlorene Arbeit als Wärme auftritt. Die Potentialdifferenz an den Enden des Elementes sei E ; wir haben gesehen, dass die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten der Arbeit entspricht, welche nötig ist, um die Einheit der Elektrizität von dem Punkte des niedrigeren Potentials zu dem des höheren zu bringen. Der Strom fliesst nun in umgekehrter Richtung, bei Uebergang der Einheit wird also die Arbeit E verloren; hat aber der Strom die Intensität I , so gehen in der Zeiteinheit I Einheiten über, also ist die verlorene Arbeit $L = I E$. Da nach Ohm $E = I W$, so ist $L = W I^2$. Dividieren wir durch das mechanische Wärmeäquivalent A , so ist $\frac{L}{A}$ die Wärme Q , welche die Arbeit repräsentiert, also $Q = \frac{1}{A} W I^2$.

§ 287. Die in einem Drahtstück entwickelte Wärme erhöht dessen Temperatur; wie hoch, das hängt ab vom Widerstande des Drahtes, von seiner Masse, also Querschnitt und Länge, von seiner spezifischen Wärme, endlich auch von seinem Emissionsvermögen (§ 172) und der Wärmeleitungsfähigkeit der ihn umgebenden Körper. Wird der Draht über 500° erhitzt, so beginnt er zu glühen und kann bei noch gesteigerter Intensität schmelzen.

Diese Wärme- und Lichtentwicklung wird praktisch viel benutzt; es seien folgende Fälle erwähnt:

In der Sprengtechnik werden viele Minen gleichzeitig entzündet, indem durch die Zündmasse jeder Patrone ein sehr dünner Draht geführt wird; alle diese Drähte sind verbunden. Sobald man einen genügend starken Strom durchfliessen lässt, entzünden sie die Patronen.

In neuester Zeit hat man mit Erfolg die hohe Temperatur zum Löten und Schweissen, z. B. geborstener Dampfkessel benutzt: das eine der zusammen zu schweisenden Stücke ist mit dem einen Pol der Kette verbunden, der andere Pol mit einem Kohlestab, welcher der Verbindungsstelle entlang geführt wird. An der berührten Stelle wird die Temperatur so hoch, dass das Eisen weich wird und eine Verbindung der beiden Ränder herbeigeführt wird.

Glühende Platindrähte werden in der Chirurgie zum Fortbrennen einzelner Teile, z. B. Polypen, viel angewandt.

Bei weitem die wichtigste Anwendung, welche das Glühen der Leiter gefunden hat, ist die zur Beleuchtung durch Glühlampen. Nachdem man früher ohne Erfolg Platindrähte in gleicher Weise zu benutzen gesucht, nahm die Anwendung einen gewaltigen Aufschwung, als Edison 1879 dünne Fäden von Kohle einführte. Da dieselben in atmosphärischer Luft glühend durch deren Sauerstoffgehalt verzehrt werden würden, schliesst man sie in Glaskugeln ein, welche luftleer gemacht werden. Der Kohlefaden wird durch Glühen verschiedener Materialien hergestellt; so nimmt Edison Bambusfaser, Swan Baumwolle, Maxim Papier u. s. w.

§ 288. Wenn wir eine metallische Leitung an einer Stelle unterbrechen, so findet im letzten Moment Berührung in einem Punkte statt; hier wird daher der Widerstand und die Temperatur sehr hoch, es tritt im Moment der Trennung ein Funke auf, welcher auf Verdampfen und Glühen der sich zuletzt berührenden Punkte (und der umgebenden Gase) beruht (§ 257). Die so die beiden Enden des Stromkreises verbindenden glühenden Dämpfe und Gase leiten aber viel besser als Luft; wenn daher der Strom stark genug ist, geht er dauernd durch die Unterbrechungsstelle über, immer von neuem die Enden der Drähte verdampfend. Es entsteht auf diese Weise ein ausserordentlich helles Licht, welches man als den galvanischen Lichtbogen oder auch den Davyschen Lichtbogen bezeichnet. Er wurde von Davy zuerst beobachtet, als er Kohlestäbe als Enden der Leitung nahm, und in dieser Form wird er, wie bekannt, auch heute noch hergestellt und zur Beleuchtung benutzt.

Die positive Kohle erhitzt sich stärker als die negative, sie brennt daher auch schneller ab (das Verhältniss ist dabei etwa 8:5); sie höhlt sich aus, während die negative Kohle spitz brennt.

Nach Messungen von Violle soll die Temperatur der positiven Kohle etwa 3700° C. betragen und die Verdampfungstemperatur der Kohle sein. Sie lässt sich daher auch nicht durch stärkeren Strom erhöhen, und wäre somit die höchste Temperatur, die wir überhaupt mit irgend welchen Mitteln erreichen können.

Dadurch, dass die Kohlen abbrennen, wird der Widerstand des Lichtbogens immer grösser, und schliesslich erlischt er; dann müssen die Kohlen wieder erst zur Berührung gebracht und langsam entfernt werden, wenn er von neuem entstehen soll. Es sind eine grosse Menge Lampen konstruiert worden, welche diese Bewegung der Kohle mechanisch bewirken, und zum Teil gleichzeitig die positive Kohle stärker vorschieben als die negative, so dass der Lichtbogen an derselben Stelle bleibt. Es sei hier nur das Prinzip einer solchen Lampe besprochen, welche von v. Hefner-Alteneck angegeben ist und von Siemens gebaut wird: die beiden Kohlestäbe A (die positive) und B der Siemensschen Kontaktlampe (Fig. 193) werden von Zahnstangen getragen, die durch das doppelte Zahnrad C nach entgegengesetzten Richtungen und im Verhältnis 8:5 bewegt werden. Der Halter von A ist viel schwerer, daher sucht er zu sinken; dabei dreht er das Zahnrad C, B wird gehoben, wodurch die Kohlen zur Berührung kommen. Sie sollen nun getrennt werden, sobald Strom durch die Lampe geht, und dies wird folgendermassen erreicht: der positive Strom tritt durch die Klemmschraube D ein und geht einerseits in den Metallstab F, andererseits durch die Spirale G, welche einen weichen Eisenstab H umgibt, zum Metallgehäuse der Lampe, welches in leitender Verbindung mit A ist. Von A geht der Strom nach B, welches von dem Gehäuse isoliert ist, und durch den Draht J zur negativen Klemme E. Dadurch, dass der Strom um H fliesst, verwandelt er dies in einen Magneten. Darüber sitzt ein um L drehbarer Winkelhebel K aus Eisen; sobald daher H ein Magnet wird, wird K angezogen, das obere Ende von K bewegt sich nach links. Dadurch kommt aber K in Berührung mit F, der Strom fliesst jetzt nicht mehr durch G, sondern direkt über F und K zum Gehäuse, der Magnetismus in H verschwindet, K geht zurück. Dadurch ist der direkte Strom wieder unterbrochen, der Elektromagnet wird von neuem erregt, K wieder angezogen u. s. w. Das obere Ende von K kommt also in vibrierende Bewegung; nun sitzt hier mittelst Gelenk befestigt der sog. Stösser M, dessen Spitze auf einem kleinen Zahnrad N schleift. Wird K angezogen, so schiebt der Stösser

das Zahnrad N um einen Zahn weiter, beim Zurückgehen gleitet der Stösser über den nächsten Zahn, den er beim Vorgehen wieder weiter dreht und so fort. Durch das Vibrieren des Hebels wird also das Zahnrad N gedreht, und durch andere Zahnräder wird diese Bewegung auf C übertragen, so dass die Kohlen aus einander geschoben werden. Dadurch wächst der Widerstand, der Strom wird schwächer, endlich wird die Magnetisierung von H so

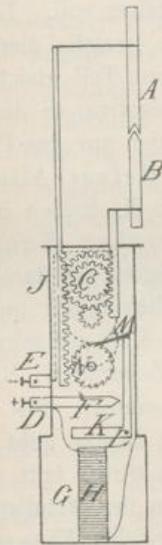


Fig. 193.

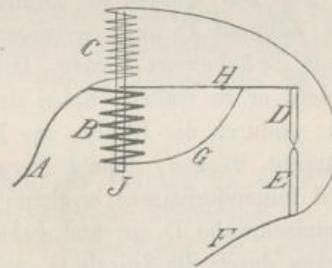


Fig. 194.

schwach, dass K nicht mehr angezogen wird; sofort fangen die Kohlen an, zusammenzukommen, der Strom wird verstärkt, das Spiel von K beginnt u. s. w.

Von den Lampen, welche nicht die Aufgabe haben, das Bogenlicht an derselben Stelle zu halten, sei noch als besonders wichtig die ebenfalls von v. Hefner-Alteneck konstruierte Differentiallampe erwähnt: der Strom tritt bei A (Fig. 194) ein, teilt sich in die dickdrahtige Spirale B von kleinem Widerstand und die dünndrahtige C von grösserem Widerstand. Von C geht er nach der negativen Kohle E und weiter zur Stromquelle durch F. Von B dagegen wird er durch G zum Halter der positiven Kohle D geführt. D sitzt an einem um H drehbaren Hebel, dessen anderes Ende einen Eisenstab J trägt, welcher sich in den Spiralen

B und C bewegen kann, und in diejenige hineingezogen wird (§ 308), welche stärkeren Strom besitzt. Berühren sich die Kohlen, so ist der Widerstand des Weges ABGDEF kleiner, daher hier der Strom stärker, J wird nach B gezogen, die Kohlen entfernt. Dadurch und durch Abbrennen der Kohlen wird der Widerstand hier vermehrt, ein immer grösserer Teil des Stromes fliesst durch ACEF, wodurch J nach C gezogen, die Kohlen genähert werden. Erlischt der Bogen ganz, so geht der ganze Strom durch C, die Kohlen werden zur Berührung gebracht. — Die grosse Wichtigkeit dieser Lampe beruht darin, dass bei Erlöschen der Lampe der Strom nicht aufhört, sondern über CE dauernd zirkuliert; man kann daher eine ganze Reihe von Lampen in denselben Stromkreis schalten; das Erlöschen von einer zieht nicht das Erlöschen aller nach sich, sondern jede brennt unabhängig von den übrigen. Alle zur Beleuchtung benutzten Lampen sind nach diesem Prinzip, wenn auch in verschiedenen Formen konstruiert.

§ 289. Wir betrachten nun die Wirkung des Stroms auf Flüssigkeiten. Dieselben leiten den Strom nur, wenn sie von ihm chemisch zersetzt werden. Diese Zersetzung ist von Faraday Elektrolyse genannt worden, die Leiter zweiter Klasse daher Elektrolyte. Wir müssen den Strom in sie durch Leiter erster Klasse, Metallplatten oder Drähte ein- und austreten lassen; man nennt sie Elektroden, die, durch welche der Strom eintritt, heisst positive Elektrode oder Anode, die, durch welche er austritt, negative Elektrode oder Kathode. Die Zersetzungsprodukte, welche nur an den Elektroden auftreten, heissen Ionen, und zwar Anion und Kation. Elektrolyte sind die Säuren und die Salze, letztere können dabei gelöst, geschmolzen oder fest sein.

§ 290. Wir wollen zunächst untersuchen, was geschieht, wenn wir den Strom durch eine verdünnte Säure, z. B. Schwefelsäure, hindurchleiten. Wir benutzen dazu den in Fig. 195 abgebildeten Apparat; er besteht aus dem U-förmigen Glasgefäss AB, an welches sich unten ein drittes längeres Glasrohr C anschliesst, welches oben eine offene Kugel trägt. A und B sind oben durch Hähne verschlossen und in Kubikcentimeter geteilt; unten befinden sich darin zwei Platinplatten D und E, welche durch in die Glaswand eingeschmolzene Platindrähte mit der Batterie verbunden werden können. Wir füllen die drei Röhren mit verdünnter

Schwefelsäure bis an die Hähne, schliessen diese und lassen den Strom durchgehen. Dann steigen von beiden Platten Gasblasen in die Höhe, sammeln sich in A und B, während die Flüssigkeit verdrängt wird und in der Kugel von C Platz findet. Die Gasmenge an der Anode nimmt nur das halbe Volumen ein, wie die an der Kathode, und die Untersuchung des Gases zeigt, dass an der Anode O, an der Kathode 2H auftreten, während zwischen den Elektroden die Flüssigkeit unverändert bleibt.

Der Versuch wird in folgender Weise erklärt: Es seien in Fig. 196 eine Reihe von Schwefelsäuremolekeln H_2SO_4 zwischen den Elektroden gelagert. Durch die Wirkung des Stromes werden

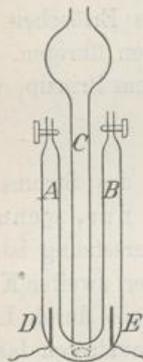


Fig. 195.

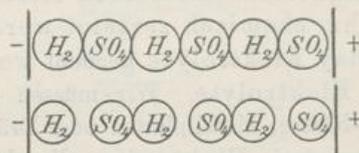


Fig. 196.

die den Elektroden benachbarten Molekeln zerfällt; an der Kathode tritt H_2 gasförmig aus, das zugehörige SO_4 wird frei; aber es verbindet sich sofort mit dem H_2 des anliegenden zweiten Molekels, ebenso dessen SO_4 mit dem H_2 des dritten u. s. w., bis schliesslich ein SO_4 an der Anode übrig bleibt. Da dies aber nicht frei bestehen kann, so wird ein Molekel des vorhandenen Wassers H_2O zerfällt, H_2 zur Herstellung des Schwefelsäuremolekels benutzt, während O nun gasförmig an der Anode austritt. Derselbe Prozess wiederholt sich fortwährend, so dass im ganzen Innern der Flüssigkeit stets verdünnte Schwefelsäure vorhanden ist, nur an den Elektroden Gase auftreten.

Clausius nimmt an, dass in Flüssigkeiten die Molekeln überhaupt nicht fest zusammengefügt sind, sondern die einzelnen Atome dauernd in Bewegung sind, so dass z. B. in Schwefelsäure ein Atom H_2 bald mit dem, bald mit jenem Atom SO_4 sich verbindet;

dann braucht der Strom also die Lösung der Molekeln gar nicht zu bewirken, sondern er beeinflusst nur die Bewegungsrichtung der Atome, so dass die H_2 vorwiegend nach der Kathode, die SO_4 nach der Anode hin wandern.

§ 291. Die Zersetzung sieht in diesem Beispiel so aus, als würde nur das Wasser zersetzt, als wäre die Schwefelsäure ganz ohne Einfluss. In der That hat man das früher angenommen; später aber wurde, namentlich durch F. Kohlrausch, bewiesen, dass reines Wasser gar kein Elektrolyt sei, sondern nur durch Zusatz von Salzen oder Säuren leitend werde. Es ist freilich unmöglich, absolut reines Wasser herzustellen, da dasselbe durch minimale Auflösung der Gefässwände und Aufnahme von Staub aus der Luft sich sofort verunreinigt. Es ist indes Kohlrausch gelungen, durch wiederholtes Destillieren in Platingefässen und sofortigen Gebrauch die Leitungsfähigkeit auf $\frac{0,3}{10^{10}}$ herunter zu bringen, so dass wir schliessen müssen, absolut reines Wasser würde die Leitungsfähigkeit Null haben.

Der eigentliche Leiter ist also bei unserem Versuch H_2SO_4 , und das Auftreten der dem H chemisch äquivalenten Menge O beruht auf einem sekundären Prozess, wie wir solche nachher noch besprechen wollen.

§ 292. Wenn wir alle möglichen Elektrolyte der Stromwirkung unterwerfen, so zeigt sich, dass stets der basische Bestandtheil der Verbindung, das Metall bei Salzen, H bei Säuren, an der Kathode ausgeschieden wird, er wird daher der elektropositive Bestandteil genannt; dass dagegen der säuernde Bestandteil, der elektronegative, an der Anode frei wird.

Ueber die Mengen der Zersetzungsprodukte ist von Faraday das elektrolytische Grundgesetz, oder das Gesetz der festen elektrolytischen Aktion ausgesprochen worden, welches aussagt, dass

1. die von einem Stoff in der Zeiteinheit zersetzten Mengen der Stromstärke proportional sind;

2. dass die von demselben Strom in verschiedenen Elektrolyten ausgeschiedenen Mengen chemisch äquivalent sind. Dabei nennen wir chemisch äquivalent solche Mengen, die sich in Verbindungen ersetzen können. Auf ein Gramm Wasserstoff kommen

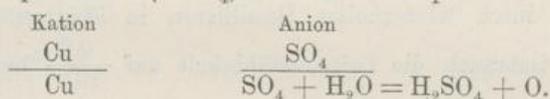
also, wenn es sich um ausgeschiedene Metalle handelt, Massen, welche gleich Atomgewicht dividiert durch Wertigkeit sind.

Lassen wir z. B. denselben Strom hinter einander durch verdünnte Schwefelsäure (H_2SO_4), geschmolzenes Chlorsilber ($AgCl$), Kupfervitriollösung ($CuSO_4$) hindurch gehen, so werden die Mengen in folgenden Verhältnissen auftreten:

1 mg H und 8 mg O; 35,5 mg Cl und 108 mg Ag; 8 mg O und 31,7 mg Cu.

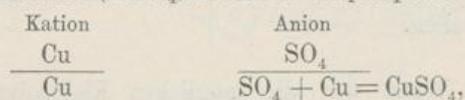
§ 293. Wie wir schon bei der Schwefelsäure sahen, treten nicht immer die ursprünglichen Zersetzungsprodukte auf, sondern sie erzeugen oft sekundäre chemische Zersetzungen. Im folgenden seien einige Beispiele angeführt:

1. Kupfervitriol ($CuSO_4$) zwischen Platinplatten:



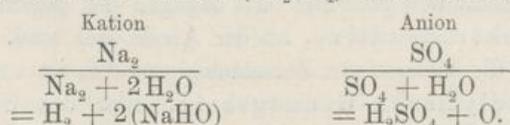
Also an der einen Platte scheidet sich metallisches Kupfer aus, an der anderen eigentlich SO_4 , welches aber Wasser zerlegt, so dass O austritt.

2. Kupfervitriol ($CuSO_4$) zwischen Kupferplatten:



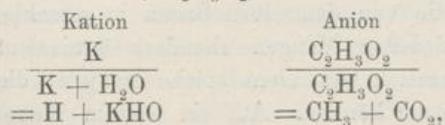
d. h. an der einen Platte wird Kupfer ausgeschieden, von der Anode Kupfer aufgelöst.

3. Schwefelsaures Natron (Na_2SO_4) zwischen Platin:



An der Kathode tritt H_2 aus, und es bildet sich Natronlauge, an der Anode tritt O aus.

4. Essigsäures Kali ($KC_2H_3O_2$) zwischen Platin:



d. h. an der Kathode tritt H aus, Kalilauge wird gebildet; an der Anode treten Methylgas (CH_3) und Kohlensäure (CO_2) auf.

Diese Beispiele mögen genügen, um zu zeigen, wie die eigentliche Wirkung des Stromes oft verdeckt werden kann.

§ 294. Die Zersetzung der Elektrolyte ist nicht die einzige sichtbare Wirkung des Stromes. Man würde zunächst erwarten, dass die Konzentration der Flüssigkeit an beiden Elektroden die gleiche bleibe, weil ja äquivalente Mengen der Ionen ausgeschieden werden, welche durch Wanderung der Ionen in der Flüssigkeit zugeführt sind. — Allein dies ist nicht der Fall; Wiedemann und namentlich Hittorf zeigten, dass, wenn man z. B. Kupfervitriol zwischen Platinplatten elektrolysiert, der Kupfergehalt an der negativen Elektrode viel schneller abnimmt, als an der positiven. Diese Thatsache erklärte Hittorf so, dass er den sich in entgegengesetzter Richtung bewegenden Molekeln verschiedene Geschwindigkeit zuschrieb. So muss sich in obigem Beispiel SO_4 schneller zur Anode bewegen, als Cu zur Kathode; dann wird hier der Kupfergehalt abnehmen. Es zeigt sich, dass im allgemeinen das Anion schneller wandert, als das Kation. Hittorf hat den Begriff der Ueberführungszahl eingeführt; er versteht darunter die Zahl der durch einen Querschnitt, in welchem die Flüssigkeit unverändert geblieben ist, durchgegangenen Aequivalente des Anions im Verhältnis zu der in derselben Zeit zersetzten Zahl Aequivalente des Elektrolyts.

§ 295. Die Menge der in der Zeiteinheit gebildeten Zersetzungsprodukte, z. B. des austretenden Wasserstoffs, ist der Intensität, d. h. der in der Zeiteinheit durchgehenden Elektrizitätsmenge proportional. Wenn daher eine bestimmte Elektrizitätsmenge durch angesäuertes Wasser oder irgend einen anderen Elektrolyt fließen soll, so kann dies, wie das Faradaysche Gesetz lehrt, nicht anders geschehen, als indem eine ganz bestimmte Menge Wasserstoff gleichzeitig von der Anode zur Kathode wandert und dort austritt. Diese Proportionalität in der Bewegung der Elektrizität und der Ionen legt es nahe, die Ionen direkt als Träger der Elektrizität zu betrachten. Wenn wir weiter sehen, dass unter allen Umständen, welche Verbindung wir auch nehmen mögen, die positive Elektrizität mit dem Wasserstoff oder dem Metall wandert, so wird man annehmen müssen, dass die positive Elektrizität sich nicht zufällig

den Wasserstoff als Träger wählt, sondern dass H in der Verbindung H_2SO_4 eine grössere Verwandtschaft zur positiven Elektrizität habe, als SO_4 , welches als Träger der negativen Elektrizität auftritt.

Es ist danach folgende Anschauung über das Wesen der Elektrolyse entwickelt worden: Jedes Atom einer Verbindung ist mit einer ganz bestimmten Menge Elektrizität geladen, und zwar Basis und Säure mit ungleichnamigen Elektrizitäten. So betrachten wir das Molekel H_2SO_4 als entstanden durch Zusammenlegen von $[\text{+ H}_2]$ und $[\text{- SO}_4]$, so dass das ganze Molekel elektrisch neutral ist. Sind nun die Pole eines galvanischen Elementes mit Platinplatten verbunden, welche in verdünnter Schwefelsäure stehen, so wird zunächst die elektromotorische Kraft des Elementes nur die Platinplatten bis zur gleichen Potentialdifferenz laden können, die Anode positiv, die Kathode negativ; dann würde der Strom in der Leitung aufhören. Nun tritt aber die Beschaffenheit der Molekeln in Wirksamkeit: von der positiven Anode werden die positiven H-Atome abgestossen und zur Kathode getrieben, die sie anzieht. Sobald sie die Platte berühren, geben sie ihre halbe positive Ladung an die Kathode ab, entziehen dieser genau die gleiche Menge negativer Elektrizität. Das Gas steigt unelektrisch, als neutraler Wasserstoff, in Gasform auf. Die Kathode aber ist zum Teil entladen worden, die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden ist kleiner geworden, vom Element strömt Elektrizität nach.

Ganz derselbe Vorgang spielt sich an der Anode ab; hier kommt $[\text{- SO}_4]$ an, es zerlegt Wasser = $[\text{+ H}_2] + [\text{- O}]$, es wird der Anode die halbe negative Elektrizität zugeführt, die gleiche Menge positiver neutralisiert, also die Anode zum Teil entladen, während neutraler O aufsteigt.

Nach dieser Auffassung ergibt sich sofort, dass die Intensität der Menge der Zersetzungsprodukte proportional sein muss, dass eine Flüssigkeit nur leiten kann, indem sie zersetzt wird, dass der Kontakt die Ursache, die chemische Wirkung aber die Quelle des Stromes ist.

Jedes H-Ion trägt also eine ganz bestimmte Menge Elektrizität mit sich, jedes andere einwertige Ion ebensoviel, während die zwei-, dreiwertigen die doppelte oder dreifache Menge transportieren. Misst man die durchfliessende Elektrizität und den ausgeschiedenen Wasserstoff, so kann man natürlich bestimmen, wieviel Elektrizität auf 1 g Wasserstoff oder auf 1 Ion kommt. Man hat letztere Menge wohl Elektron genannt; sie berechnet sich zu etwa 6×10^{-10} elektrostatischen Einheiten, während man für das Verhältnis der Elektri-

tätsmenge e zu der sie transportierenden ponderablen Masse m des Wasserstoffs findet: $\frac{e}{m} = \text{circa } 10^4$.

Da jeder Valenz ein Elektron entspricht, kann man die chemische Affinität auffassen als hervorgebracht durch die Anziehung der Elektrons.

Der Polarisationsstrom erklärt sich durch die Rückwanderung der Ionen und den dadurch hervorgebrachten Rücktransport der Elektrizität.

Die Annahme von Clausius, dass in einer Lösung eines Elektrolyten ein Teil der Molekeln schon von vornherein in Ionen zerfallen ist, ist in neuerer Zeit, namentlich von Arrhenius, weiter ausgebildet worden, und spielt in der theoretischen Chemie eine fundamentale Rolle. Dieser Zerfall, die elektrolytische Dissoziation, nimmt mit wachsender Verdünnung der Lösung zu, bis schliesslich alle Molekeln dissoziiert sind, aber nicht in einfache Atomgruppen, sondern in Ionen, d. h. Atomgruppen, welche mit bestimmten Elektrizitätsmengen beladen sind.

§ 296. Wir haben in § 286 besprochen, dass durch einen Strom Wärme erzeugt wird, welche für die durch den Strom verloren gegangene Arbeit auftritt. Wir müssen nun nach der Quelle dieser Wärme fragen und untersuchen, ob das Prinzip von der Erhaltung der Energie sich auch hier bewährt. v. Helmholtz hat zuerst ausgesprochen, dass die im ganzen Stromkreis erzeugte Wärme genau gleich derjenigen sein müsse, welche durch die chemischen Prozesse im Element erzeugt wird.

Um einen möglichst einfachen Fall zu haben, denken wir uns ein Smeesch'sches Element, bestehend aus Platin und Zink in Schwefelsäure. Ist das Element geschlossen, so tritt am Platin Wasserstoff auf, während das Zink aufgelöst, in Zinkvitriol verwandelt wird. Tauchen wir zunächst die beiden Platten in die Säure, ohne sie ausserhalb zu verbinden, so wird auch jetzt das Zink aufgelöst unter Wasserstoffentwicklung, der chemische Prozess ist also der gleiche. Wir finden, dass dabei eine Erwärmung stattfindet, und können die für die Auflösung von 1 Äquivalent Zink = 65 g Zink entstehende Wärme messen: es ergeben sich etwa $Q = 37\,700$ Kalorien. Jetzt verbinden wir die Platten aussen durch Drähte von verschiedenem Widerstande, so dass der Strom zu stande kommt. Man findet dann folgende Veränderungen:

1. Die Zeit, die zur Lösung von 65 g Zink nötig ist, ist variabel, hängt vom Widerstand des Drahtes, d. h. von der Intensität des Stromes ab.

2. Die im Element während der Lösung von 65 g Zn entwickelte Wärme Q_1 ist unter allen Umständen kleiner als Q , um so kleiner, je grösser der Widerstand der Schliessung ist. Dafür tritt aber in der Schliessung Wärme Q_2 auf, deren Menge desto grösser ist (§ 286), je grösser der Widerstand ist. Man findet, dass stets $Q_1 + Q_2 = Q$, d. h. dass die ganze im Stromkreise entwickelte Wärmemenge genau gleich der durch die chemischen Prozesse frei werdenden ist, wie es das Prinzip von der Erhaltung der Kraft fordert.

Die Arbeit, welche unsere galvanischen Elemente liefern, wird also auf Kosten des oxydierten, „verbrannten“, Zinks geleistet, gerade wie die Dampfmaschine Arbeit durch die verbrannte Kohle leistet. Da aber Zink ein sehr teures Brennmaterial ist, ist die Arbeitserzeugung durch Elemente unrationell.

§ 297. Daraus ergibt sich die wichtige Folgerung, dass die elektromotorische Kraft e eines Elementes durch seine Wärmetönung (§ 155) gemessen wird, d. h. durch die Wärmemenge, welche die chemischen Prozesse in ihm hervorbringen.

Wird nämlich in einem Element in der Zeiteinheit bei der Intensität 1 bei Auflösung von 1 g Zn die Wärme q frei, so beträgt bei der Stromstärke I und der Auflösung von n g Zn die Wärmemenge Inq , welche die Arbeit $EInq$ repräsentiert, wenn E das mechanische Wärmeäquivalent ist. Die Arbeit des Stroms aber ist (§ 286): Ie , also $EInq = Ie$, $e = Enq$.

In der folgenden Tabelle ist dies Gesetz zahlenmässig geprüft, indem für einige Elemente die Wärmetönung angegeben ist, dahinter die berechnete und beobachtete elektromotorische Kraft, indem die des Daniellschen Elementes = 1 gesetzt ist.

Element	Wärmetönung	Elektromotorische Kraft	
		berechnet	beobachtet
Daniell	50 130	1	1
Grove	96 080	1,92	1,86
Bunsen	99 790	1,99	1,85
Smee	37 730	0,75	0,73

Wie man sieht, bestätigen die Zahlen das Gesagte vollständig, wenn auch kleine Abweichungen wegen sekundärer chemischer Prozesse vorhanden sind.

§ 298. Wir haben in § 270 das Wasservoltameter als Instrument zur Messung der Stromstärke kennen gelernt; es wurde das gebildete Knallgas aufgefangen. Dieses Voltameter leidet aber an verschiedenen Mängeln: die gebildeten Gase werden leicht zum Teil vom Wasser absorbiert, namentlich der O; ferner zeigt sich, dass Wasserstoffsperoxyd (H_2O_2) gebildet wird, durch welches ein grosser Teil des Sauerstoffes nicht zur Entwicklung kommt. Daher ist es zweckmässiger, nur das H aufzufangen und zu messen.

Viel besser aber ist es, nicht die Zersetzung des Wassers, sondern die von Kupfervitriol- oder Höllensteinlösung zu benutzen. Derselbe Strom, welcher 1 mg H ausscheidet, gibt 31,7 mg Cu oder 108 mg Ag (§ 290); daher entsprechen 1 cbcm Knallgas 1,889 mg Cu und 6,432 mg Ag, so dass namentlich letztere Zersetzung sehr genaue Messungen durch Wägung zulässt. Man benutzt beim Silvervoltameter als Kathode einen Platintiegel, der mit Höllensteinlösung ($AgNO_3$) gefüllt wird, nachdem er leer gewogen war. Als Anode wird ein Silberstab eingetaucht. Geht der Strom hindurch, so wird der Silberstab aufgelöst, während sich Silber am Tiegel niederschlägt. Nach gemessener Zeit wird der Tiegel entleert, getrocknet, gewogen; die Gewichtszunahme, dividirt durch die Zeit und 6,432, gibt die Intensität in Jacobischen Einheiten.

§ 299. Die Elektrolyse ist auch praktisch in verschiedener Richtung von grosser Bedeutung geworden. Wenn Metallsalzlösungen von passender Konzentration von nicht zu starken Strömen durchflossen werden, so wird an der Kathode das Metall in Form eines sehr dünnen festen Ueberzuges ausgeschieden. Nimmt man als Kathoden vollkommen reine Metallgegenstände, so kann man sie auf diese Weise mit fest haftenden Metallüberzügen versehen, sie galvanisch vergolden, versilbern, vernickeln u. s. w. Die geeignetste Salzlösung ist durch die Erfahrung festgestellt worden; so nimmt man Cyan-Gold-Kalium; Cyan-Silber-Kalium, Platinatriumchlorid, Zinnchlorid, essigsäures Blei u. s. w.

Lässt man den Strom lange wirken, so erhält man dicke Metallschichten, welche, wenn die Unterlage schwach gefettet war, sich abheben lassen. Man stellt auf diese Weise ausserordentlich getreue

galvanoplastische Abdrücke von Münzen, gravierten Kupferplatten, Statuen her, welche auf gleiche Weise zur Reproduktion des Originals benutzt werden.

In neuester Zeit endlich hat man begonnen, Metalle im grossen auf diese Weise zu gewinnen, indem man die Erze oder Rückstände in Lösung bringt und elektrolytisch die Metalle ausscheidet; sie können auf diese Weise in sehr grosser Reinheit erhalten werden.

Diese ganze Anwendung der Elektrolyse wird Galvanoplastik genannt und ist von Jacobi 1838 eingeführt worden.

§ 300. Wir haben gesehen, dass in einem Kreise von lauter Metallen ein Strom nicht zu stande kommen kann nach dem Gesetz der Spannungsreihe (§ 263); dabei ist aber immer stillschweigend vorausgesetzt, dass die Temperatur des ganzen Kreises konstant sei. Seebeck wies zuerst 1821 nach, dass, wenn eine Berührungsstelle zweier Metalle in rein metallischem Kreise auf höhere oder niedrigere Temperatur gebracht wird, ein Strom entsteht, den man thermoelektrischen Strom nennt. Seebeck fand, dass sich die Metalle in eine Reihe ordnen lassen, so dass der Strom an einer erhitzten Berührungsstelle (Lötstelle) stets vom vorhergehenden zum nachfolgenden Metall fliesst, bei Abkühlung der Stelle aber in umgekehrter Richtung; die Seebecksche thermoelektrische Reihe ist:

+ Wismut, Platin, Kupfer, Quecksilber, Blei, Zinn, Gold,
Silber, Zink, Eisen, Antimon —.

Je weiter die Metalle in der Reihe aus einander stehen, desto stärker ist der Strom für dieselbe Temperaturdifferenz.

Denken wir uns als einfachsten Fall zwei Drähte von Fe und Pt an beiden Enden zusammengelötet, die Lötstelle A stets auf 0° gehalten, die B auf verschiedene Temperatur gebracht; es zeigt

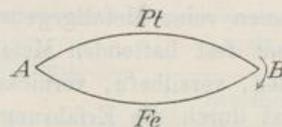


Fig. 197.

sich, dass für kleine Temperaturdifferenz die elektromotorische Kraft, welche den Strom hervorbringt, dieser Differenz proportional ist. Bei grösserer Differenz ist das aber nicht mehr der Fall; bei

vielen Kombinationen wächst die elektromotorische Kraft immer langsamer, erreicht für eine bestimmte Temperaturdifferenz ein Maximum, nimmt dann ab, wird 0, und bei noch grösserer Differenz kehrt der Strom seine Richtung um.

So liegt für Cu — Fe das Maximum bei 140°, die elektromotorische Kraft wird 0 bei 360°, dann fliesst der Strom von Fe zu Cu. Man nennt die Temperatur, für welche der Strom verschwindet, Neutraltemperatur.

Nach Avenarius kann man setzen

$$e = \beta (t - t') + \gamma (t^2 - t'^2) = (t - t') [\beta + \gamma (t + t')],$$

wo β und γ zwei von der Kombination abhängige Konstanten, t und t' die Temperaturen der Lötstellen sind. Daraus ergibt sich: $e = 0$ für $t = t'$ oder für $\beta + \gamma (t + t') = 0$, d. h. $t + t'$

$$= -\frac{\beta}{\gamma}.$$

Die elektromotorischen Kräfte, um welche es sich hier handelt, sind sehr klein, und sehr veränderlich mit der Reinheit der Metalle. Es ist z. B. für $t - t' = 100^\circ$: für Bi-Sb: $e = 0,07$, für Cu-Sb: 0,03, für Neusilber-Kupfer 0,01, wenn man die elektromotorische Kraft des Daniellschen Elementes gleich 1 setzt.

§ 301. An der erhitzten Lötstelle Bi-Sb geht der Strom vom Bi zum Sb. Peltier beobachtete zuerst das nach ihm benannte Peltiersche Phänomen, das ein in der Richtung Bi-Sb durch die Lötstelle gesandter Strom die Lötstelle abkühlt. Dasselbe gilt von allen thermoelektrischen Kombinationen: schicken wir einen Strom hindurch in der Richtung, wie er bei erhitzter Lötstelle entstehen würde, so kühlt sich die Lötstelle ab, bei umgekehrter Stromrichtung erhitzt sie sich. Die Temperaturänderung ist proportional der Intensität des Stromes. Man nennt diese Wärme Peltiersche Wärme, im Gegensatz zur Jouleschen Wärme, die in homogener Leitung auftritt und dem Quadrat der Intensität proportional ist (§ 286).

§ 302. Zur Erklärung dieser Erscheinung sind zwei Theorien aufgestellt, welche sie gleich gut erklären. Die erste Theorie nimmt an, dass die Potentialdifferenz bei Berührung zweier Metalle noch von der Temperatur abhängig sei; dann wird an den beiden Lötstellen eine verschiedene Potentialdifferenz entstehen und ein Strom zu stande kommen.

Die andere von F. Kohlrausch stammende Theorie nimmt an, dass ein Wärmestrom stets Elektrizität mit sich führe, und umgekehrt ein elektrischer Strom Wärme. Da Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit proportional sind (§ 280), so soll Wärme und Elektrizitätsmenge einander proportional sein. Nennen wir die Intensität des Stromes i , die fließende Wärmemenge q , so ist also $i = \alpha q$. Der Intensität i entspricht die Potentialdifferenz e , so dass $e = iw$, wenn w den Widerstand bedeutet, $w = \frac{l}{Q \cdot c}$, wo l = Länge, Q = Querschnitt, c = elektrische Leitfähigkeit ist. Ist andererseits k die thermische Leitfähigkeit, so ist (§ 167) $q = \frac{kQ}{l} (t - t')$; also $e = iw = \alpha q w = \alpha \frac{l}{Qc} \frac{kQ}{l} (t - t')$
 $e = \frac{\alpha k}{c} (t - t') = \vartheta (t - t')$.

ϑ hängt hiernach nur von der Beschaffenheit der Substanz ab, wird also in verschiedenen Metallen verschieden sein, und es muss bei Erwärmung der einen Lötstelle ein dauernder Strom entstehen; denn sei für den Draht b (Fig. 198) ϑ die Konstante, für a : ϑ' , und sei $\vartheta > \vartheta'$, so wird bei Erhitzung von B mit der Wärme in b

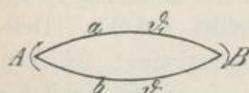


Fig. 198.

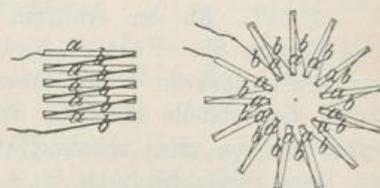


Fig. 199.

mehr Elektrizität nach A befördert, als in a , das Potential in A auf b wird grösser als auf a , es muss ein Strom von b über A nach a gehen, daher in B von a nach b . Lassen wir andererseits einen ebenso gerichteten Strom von A aus zirkulieren, so wird längs a weniger Wärme nach B geführt, als längs b von B abströmt, d. h. B muss sich abkühlen — das Peltiersche Phänomen.

§ 303. Die Erscheinungen der Thermoelektrizität werden benutzt, sowohl um Ströme zu erzeugen, als auch um Temperaturen zu messen.

Da die elektromotorische Kraft einer Lötstelle sehr gering ist,

muss man eine ganze Anzahl solcher gleichzeitig erhitzen, wenn man einen kräftigen Strom erhalten will; man verwendet daher Thermosäulen. Fig. 199 zeigt die üblichen Anordnungen; dickere Stäbe *a* aus Antimonlegierung sind parallel oder besser (bei den sog. Sternsäulen) radial gelagert. Das eine Ende jedes Stabes ist mit dem anderen Ende des folgenden durch angelötete Drähte von Wismutlegierung oder einem anderen Metall verbunden. Erhitzt man durch Flammen alle Lötstellen der einen Seite, so wird in jeder eine elektromotorische Kraft erregt, und dieselben summieren sich. Da der innere Widerstand der Säule sehr klein ist, erhält man ziemlich starke Ströme. Die anderen Lötstellen müssen kühl gehalten werden, was meist dadurch bewirkt wird, dass an sie grössere Bleche angelötet sind, welche wegen der grossen ausstrahlenden Fläche bedeutend abkühlen. Derartige Säulen sind namentlich von Noë und Clamond hergestellt worden.

§ 304. Wichtiger ist die Benutzung der Thermostrome zur Temperaturmessung geworden. Löten wir zwei dünne Drähte, z. B. aus Platin und Eisen, an beiden Enden zusammen, schalten irgendwo ein Galvanometer ein, halten die eine Lötstelle auf konstanter Temperatur t (in Wasser oder Eis) und berühren mit der anderen Lötstelle verschiedene Körper, so nimmt sie deren Temperatur t_1 an, es entsteht ein Thermostrom, sobald nicht $t = t_1$ ist, und aus der durch das Galvanometer angegebenen Stromstärke können wir die Temperaturdifferenz berechnen. Noch sicherer ist es, wenn wir die Temperatur t so lange ändern, bis kein Strom vorhanden ist, dann wissen wir, dass $t = t_1$ ist. Der grosse Vorteil dieser Methode besteht darin, dass wir der Lötstelle die Form einer feinen Spitze geben können; dann entzieht sie dem berührten Körper keine merkbare Wärmemenge, wie es ein Thermometer thut. Solche spitze Nadeln können wir z. B. auch in den lebenden Körper bringen, z. B. ins Muskelfleisch stechen, und die Erwärmung bei Arbeitsleistung u. dgl. messen. Oder wir können die Lötstelle auf den Grund des Meeres versenken, und so die dort herrschende Temperatur messen. Aehnlicher Anwendungen gibt es sehr viele.

Auch zur Messung sehr kleiner Temperaturdifferenzen sind die Thermosäulen zuerst durch Nobili (1831) verwandt worden. Sie werden meist aus Antimon- und Wismutstäben hergestellt, welche wie in Fig. 200 neben einander gelegt und in abwechselnder Reihenfolge zusammengelötet werden. Eine ganze Anzahl solcher Schichten

wird dann auf einander gelegt, so dass ein kleiner Würfel entsteht, von welchem zwei gegenüberliegende Seiten durch lauter Lötstellen gebildet sind, hundert und mehr. Die letzten Stäbe sind mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden. Temperaturdifferenzen von weniger als $0,01^{\circ}$ C. zwischen beiden Seiten lassen sich deutlich nachweisen, ein brennendes Streichholz der einen Seite auf 1 m genähert gibt einen starken Ausschlag des Galvanometers. Namentlich Melloni und Knoblauch haben die Thermosäulen mit Erfolg zur Untersuchung der strahlenden Wärme verwandt (§ 172). Noch viel empfindlicher ist freilich das Bolometer (§ 281).

In neuester Zeit haben die Thermolemente auch als Pyrometer wichtige Verwendung gefunden, und sie sind wohl das bequemste und gleichzeitig recht genaue Instrument für Messung von Temperaturen bis zu 1700° C. Man benutzt dazu 2 Drähte, deren einer aus reinem Platin, der andere aus Platin mit 10% Rhodium besteht; ihre Enden werden in der Knallgasflamme zusammen-

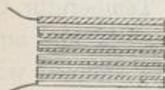


Fig. 200.

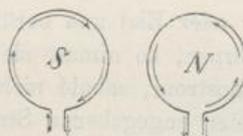


Fig. 201.

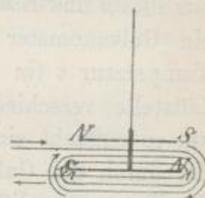


Fig. 202.

geschmolzen und so die zu erhitzende Lötstelle gebildet. Die anderen Enden werden mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden. Man bringt dann die Lötstelle in schmelzendes Eis, Blei, Silber, Gold, in siedendes Wasser, Quecksilber, Schwefel, Zink, und erhält so eine Reihe von Galvanometerausschlägen für bekannte Temperaturen. Aus dem Ausschlag, der bei Einbringen der Lötstelle in einen Raum von unbekannter Temperatur entsteht, kann man dann diese Temperatur bis auf wenige Grade genau ermitteln.

e) Wirkungen ausserhalb des Stromkreises.

§ 305. Wir haben schon in § 269 erwähnt, dass der Strom auf eine Magnetonadel ablenkend wirkt, und zwar in der Weise,

dass, wenn man sich im Strome mit dem Gesicht nach der Nadel gekehrt schwimmend denkt, deren Nordpol nach links abgelenkt wird. Man nennt dies die Ampèresche Regel. Daraus folgt, dass, wenn wir etwa einen kreisförmigen oder rechteckigen Stromkreis nehmen, in seinem Innern an jeder Stelle die Nadel in gleichem Sinne abgelenkt wird und zwar umgekehrt, wie ausserhalb des Stromkreises. Zirkuliert der Strom im Sinne des Uhrzeigers, so haben wir nach der uns zugekehrten Seite den Südpol der Nadel (Fig. 201), den Nordpol bei umgekehrter Stromrichtung.

Diese Einwirkung des Stromes auf den Magnet, deren Entdeckung wir Oerstedt (1820) verdanken, findet ihre wichtigste Verwendung bei den Galvanoskopen und Galvanometern. Zunächst ersetzte Schweigger die eine ablenkende Drahtwindung durch eine grosse Anzahl, in deren Mitte die Magnetnadel schwebt, indem er den sog. Multiplikator konstruierte. Dann lehrte Nobili die Empfindlichkeit in sehr hohem Grade zu vermehren durch Anwendung des astatischen Nadelpaars; wir haben in § 267 gesehen, dass die Ablenkung, unter welcher die Nadel zur Ruhe kommt, abhängt von der Stromwirkung und der magnetischen Wirkung der Erde. Wenn wir letztere verkleinern, während erstere konstant bleibt, so wird offenbar die Empfindlichkeit ausserordentlich wachsen. Nobili verbindet (Fig. 202) zwei Magnetnadeln von möglichst gleichem Moment (§ 231) NS und N_1S_1 durch einen festen Stab in umgekehrter Richtung mit einander. Auf ein solches astatisches Paar wirkt die Erde fast gar nicht, da S gerade so stark abgestossen, wie N_1 angezogen wird. Die Wirkung des Stromes aber wird nicht geschwächt, sondern sogar verstärkt: S_1N_1 befindet sich im Stromkreis; kursiert der Strom im Sinne des Uhrzeigers, so wird der Pol S_1 nach vorn gelenkt; NS liegt ausserhalb des Kreises, durch denselben Strom wird daher N nach vorn gelenkt; beide Wirkungen summieren sich also.

Durch dies Mittel und Benutzung sehr vieler Windungen — man hat bis zu 30000 genommen — kann man Instrumente von solcher Empfindlichkeit herstellen, dass sie einen Strom anzeigen, der in 15 Millionen Jahren ein Milligramm Wasser zersetzen würde.

§ 306. Die Galvanoskope sollen nur die Existenz eines Stromes anzeigen, die Galvanometer seine Stärke messen; dazu sind nur kleine Ausschläge brauchbar (§ 269), man benutzt daher Spiegelablesung (§ 342).

Die Konstruktion der Galvanometer ist ausserordentlich mannigfaltig. Der einfache, seltener astatische Magnet hat entweder die Form von Nadeln oder die eines Stahlringes, einer runden Stahlscheibe, eines Fingerhutes (Siemens' Glockenmagnet). Er hängt an einem Stäbchen, an welchem auch ein leichter Spiegel befestigt ist; oder der Spiegel befindet sich im Stahlring; oder die magnetisierte Stahlplatte ist auf der einen Seite poliert und dient selbst als Spiegel. Das Stäbchen hängt an einem langen Kokonfaden oder Quarzfaden innerhalb eines vertikalen Glasrohres, so dass die Torsionskraft sehr gering ist.

Der Magnet schwingt meist im Innern einer grösseren Kupfermasse, des Dämpfers; diese ist umgeben von den Windungen, welche meist aus zwei oder vier einzelnen Spiralen bestehen, welche man entweder hinter einander schalten kann, oder neben einander, wenn der Widerstand des Instrumentes klein sein soll, oder auch gegen einander, wenn man Differentialgalvanometer braucht. Der Dämpfer bewirkt (§ 325), dass der Magnet nicht lange um die neue Gleichgewichtslage hin und her schwingt, wenn er aus der Ruhelage abgelenkt wird, sondern direkt in diese Lage übergeht. Solche Bewegung nennt man nach Dubois aperiodische.

Bei nicht astatischen Magneten kann man die Empfindlichkeit noch beliebig steigern, indem man einen Magnetstab von aussen so nähert, dass er der Erdkraft entgegenwirkt; solche Kompensierungsmagnete (auch Hauyscher Magnet genannt) sind häufig fein verstellbar am Galvanometer angebracht.

§ 307. Der Strom wirkt nicht nur auf einen fertigen Magneten, sondern er erzeugt auch einen solchen aus weichem Eisen oder Stahl. Wir haben im § 228 gesehen, dass den magnetischen Erscheinungen am besten die Annahme entspricht, die Molekeln des Eisens und Stahls seien von vornherein Magnete, deren Axen aber nach allen Richtungen gleichmässig verteilt sind, so dass sich nach aussen die Wirkungen aufheben. Sobald nun ein Strom um den Eisenstab herumgeführt wird, muss er auf alle Molekularmagnete richtend wirken, sie senkrecht zu seiner Ebene zu stellen suchen, und den Stab in einen Magnet verwandeln, welchen man Elektromagnet nennt. Es ist klar, dass das Ende des Stabes ein Südpol wird, das andere ein Nordpol.

Der durch die elektromagnetische Wirkung des Stromes erzeugte Magnetismus wächst bei allmählich gesteigerter Strom-

stärke zunächst proportional der Zahl der Windungen und der Intensität, dann langsamer und erreicht ein Maximum, wenn nämlich alle Molekeln gedreht sind. Bei diesem Sättigungspunkt ist der Magnetismus dem Querschnitt des Stabes proportional.

Bei weichem Eisen verschwindet der Magnetismus mit Aufhören des Stromes, die Molekeln drehen sich in ihre anfängliche Ruhelage zurück; beim Stahl dagegen bleibt wegen seiner Koerzitivkraft die Richtung der Molekeln mehr oder weniger erhalten, es entsteht ein permanenter Magnet. So werden in neuerer Zeit die Magnete hergestellt, indem man möglichst harte Stahlstäbe für kurze Zeit in eine Strom durchflossene Spirale einschiebt.

Man hat Elektromagnete in sehr grossen Dimensionen gebaut, indem auf starker Eisenplatte zwei Eisenkerne von 10 bis 15 cm Durchmesser und 1 m Länge oder mehr angeschraubt und je von mehreren hundert Windungen umgeben werden. Bei Benutzung eines kräftigen Stromes erhält man so Hufeisenmagnete, zwischen deren Polen ein magnetisches Feld von sehr grosser Intensität entsteht, wie man es z. B. zur Anstellung der diamagnetischen Versuche gebraucht (§ 237).

Da ein stromumflossener Eisenkörper als Magnet erscheint, stellte Ampère die Hypothese auf, jedes Molekel des Eisens sei dauernd von einem Strom umflossen, wodurch es eben zu einem Melekularmagnet würde.

Auch die magnetischen Eigenschaften der Erde können wir uns von um sie fliessenden Strömen erzeugt denken.

§ 308. Wie der Strom richtend auf den Magnet wirkt, so wirkt umgekehrt auch der Magnet auf den Strom. Wir können einen Stromkreis so aufhängen, dass er sich drehen kann; dazu dient das Ampèresche Gestell: zwei Metallträger A und B (Fig. 203) tragen oben senkrecht über einander zwei Näpfehen mit Quecksilber, C und C₁. In diesen ist in Spitzen ein, wie die Figur zeigt, gebogener Draht D aufgehängt, dessen Schwerpunkt gerade unter den Spitzen liegt. Tritt der Strom durch A ein, so fliesst er von C durch den Drahtbügel und nach C₁ durch B ab. Wir haben so einen drehbaren Stromkreis, welcher bei der gezeichneten Stellung im Sinne des Uhrzeigers durchflossen wird, also einem hin-

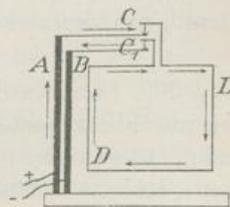


Fig. 203.

durchgesteckten Eisenstab vorn einen Südpol geben würde. Nähern wir dem Kreise einen Nordpol, so zeigt sich, dass der Kreis angezogen wird, während ein Südpol ihn abstösst. Kehren wir die Stromrichtung um, so vertauschen sich auch Anziehung und Abstossung. Dies beweist, dass der Stromkreis als solcher sich wie ein magnetisches Blatt verhält, welches begrenzt ist durch den Strom, und auf einer Seite mit süd magnetischer, auf der anderen mit nord magnetischer Masse belegt ist.

Infolge davon wirkt auch der Erdmagnetismus auf den Stromkreis; derselbe stellt sich senkrecht zum magnetischen Meridian.

Noch kräftiger wird die Wirkung, wenn wir eine Drahtspirale drehbar aufhängen. In jeder Windung derselben können wir uns ein magnetisches Blatt ausgespannt denken, welche alle ihre nord magnetische Seite nach derselben Richtung liegend haben. In diesem Sinne nannte Ampère eine stromdurchflossene Spirale Solenoid.

Trotz der Aehnlichkeit des Stromkreises mit einem magnetischen Blatt besteht aber doch ein wesentlicher Unterschied in folgendem: wenn wir einer magnetischen Fläche den ungleichnamigen Pol eines Magnets nähern, so wird derselbe angezogen und genähert, bis er die Fläche berührt. Bei einem Stromkreise aber endigt die Wirkung nicht bei dieser Stellung, sondern der Magnet wird in die Windung hineingezogen und befindet sich erst im Gleichgewicht, wenn seine Mitte mit der der Stromwindung zusammenfällt.

Um jeden Strom herum ist ein magnetisches Feld (§ 230) vorhanden, in welchem die Kraftlinien konzentrisch die Strombahn umgeben, wie wir uns andererseits jedes magnetische Teilchen von einem kreisförmigen Strome umflossen denken können. Die kreisförmigen magnetischen Kraftlinien und die kreisförmigen Ströme durchschlingen sich wie die Glieder einer Kette, deren Ebenen senkrecht auf einander stehen.

§ 309. Da ein Strom nach aussen magnetisch wirkt, ein Kreisstrom als magnetisches Blatt betrachtet werden kann, so liegt es nahe, zu erwarten, dass, wie zwei Magnete auf einander einwirken, auch zwei Ströme wirken, d. h. sich je nach ihrer Richtung anziehen oder abstossen müssen. Man bezeichnet diese Wirkungen, welche von Ampère aufs eingehendste studiert und klargelegt worden sind, als elektrodynamische Wirkungen des Stromes.

Es lassen sich die Thatsachen leicht ermitteln mit Hülfe des Ampèreschen Gestells (Fig. 203), indem man dem beweglichen Leiter andere in verschiedener Richtung nähert. Man findet so leicht, dass zwei Ströme sich anziehen, wenn sie einander parallel laufen, sich abstossen, wenn entgegengesetzt.

Es gelang Ampère, die Wirkung zweier Ströme zurückzuführen auf die Wirkung zweier kleinster Teile derselben, aus welcher durch Summation über beliebig gestaltete geschlossene Ströme deren Wirkung berechnet werden kann. Das Ampèresche elektrodynamische Gesetz lautet folgendermassen: Nennen wir

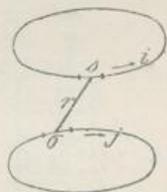


Fig. 204.

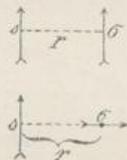


Fig. 205.

unendlich kleine Stücke der Stromkreise s und σ , ihren Abstand r , die Intensitäten in den Stromkreisen i und j , so ist die Kraft, welche von jedem Teilchen auf das andere ausgeübt wird,

$$p = \frac{isj\sigma}{r^2} \left[\cos(s\sigma) - \frac{3}{2} \cos(rs) \cos(r\sigma) \right],$$

wobei unter $(s\sigma)$ der Winkel zu verstehen ist, welchen die Stromstücke s und σ mit einander bilden, ebenso unter (rs) und $(r\sigma)$ die Winkel, welche die Verbindungslinie r der beiden Stromstücke mit diesen bildet.

Da bei i und j noch das positive oder negative Vorzeichen zu nehmen ist, je nachdem die Ströme im Sinne des Uhrzeigers oder entgegengesetzt fließen, wird der Ausdruck von p auch positiv oder negativ werden.

Daraus ergibt sich für einige Spezialfälle (Fig. 205): 1. sind die Leiterstücke parallel und senkrecht zur Verbindungslinie r , so ist $(s\sigma) = 0$, $\cos(s\sigma) = 1$; $rs = r\sigma = 90$, $\cos(rs) = \cos(r\sigma) = 0$, also $p = \pm \frac{isj\sigma}{r^2}$, wobei, je nach der Richtung der Ströme, Anziehung oder Abstossung vorhanden; 2. stehen die Leiterstücke senkrecht zu einander, das eine auch zu r , so ist $(s\sigma) = 90^\circ$,

$\cos(s\sigma) = 0$; $(rs) = 90^\circ$, $\cos(rs) = 0$; $(r\sigma) = 0$, $\cos(r\sigma) = 1$, also $p = 0$.

Für sog. gekreuzte Ströme folgt daraus (Fig. 206): Die Teile, in welchen der Strom zur Kreuzungsstelle oder von derselben fließt, ziehen sich an, also CA und EA, AB und AD; die anderen stossen sich ab, also EA und AB, CA und AD; die Folge ist, dass die Leiter sich so zu stellen suchen, dass die Ströme parallel fließen.

Das Ampèresche Gesetz gilt unverändert für die gegenseitige Wirkung einer magnetischen Masse μ und eines Stromstückchens. Es ist dann nur in der Gleichung etwa $j\sigma$ durch μ zu ersetzen.

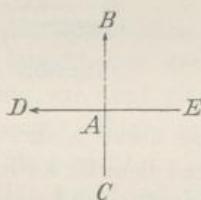


Fig. 206.

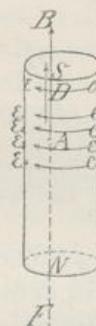


Fig. 207.

§ 310. Durch die gegenseitige Wirkung von Strömen und Magneten können dauernde Rotationen des einen um den anderen erzeugt werden. Die eintretende Bewegung lässt sich am einfachsten nach der von Faraday ausgesprochenen Regel finden: der bewegliche Teil, Strom oder Magnet, bewegt sich stets senkrecht gegen die Ebene, welche man durch den Stromleiter und die magnetischen Kraftlinien legen kann.

Wir wollen diese Regel für einen Fall aus dem Ampèreschen Gesetz ableiten. Es sei in Fig. 207 ein cylindrischer Magnetstab gegeben, dessen Südpol sich oben befindet. Ihm parallel stehe der bewegliche Leiter AB, in welchem der Strom von unten nach oben fließt. Die Kraftlinien des Magneten sind rings um den Cylinder radial; eine Ebene durch Leiter und Kraftlinie wird also stets eine Vertikalebene durch die Axe des Cylinders sein, und da der Leiter sich senkrecht zu ihr bewegen soll, muss er um den Magnet rotieren.

Nach dem Ampèreschen Gesetz finden wir das Gleiche: den Südpol können wir uns ersetzt denken durch ihn im Sinne CE umkreisende Ströme. In CE und AB haben wir 2 gekreuzte Ströme, der Kreuzungspunkt sei D. Nun stösst CD das Stück DB ab, während DB von DE angezogen wird; also DB muss sich nach links bewegen. Das unter dem Kreuzungspunkt liegende Stück des Leiters wird dagegen nach rechts gezogen. Dasselbe gilt für alle Ströme $C_1 E_1$, $C_2 E_2$ u. s. w.; man erkennt leicht, dass, wenn der Draht AB über den Magnet herausragt, die nach links gerichtete Kraft überwiegt, der Strom vorn nach links herum rotieren

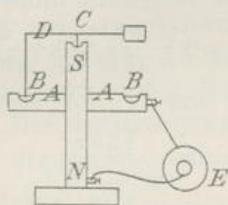


Fig. 208.

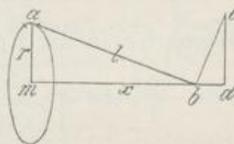


Fig. 209.

muss. Ein oben liegender Nordpol würde ihn umgekehrt bewegen. Daraus folgt, dass, wenn der Leiter sich nach unten etwa bis F erstrecken würde, also der Wirkung beider Magnetpole ausgesetzt wäre, keine Rotation entstehen könnte. Der Apparat wird meist in der Form Fig. 208 ausgeführt: NS ist der auf einem Gestell vertikal befestigte Magnet, der gleichzeitig als Zuleiter des Stromes vom Element E dient. Auf ihn ist ein kreisförmiges Brett A geschoben, welches eine mit Quecksilber gefüllte Rinne B hat. Der Strom geht von S in den mittelst einer Spitze C drehbar aufgesetzten Drahtbügel D und zum Quecksilber, von da zum Element zurück. So kann der Bügel rotieren, ohne dass der Strom unterbrochen wird.

Es sind zahlreiche Apparate konstruiert, um solche Rotationen von Strömen um Magnete oder Ströme, und von Magneten um Ströme zu zeigen; wir wollen darauf nicht näher eingehen; sie sind nur möglich, wenn ein Teil des Stromes rotiert, der andere Teil ruht.

§ 311. Wir wollen nun das magnetische Moment eines Kreisstroms berechnen. Derselbe liege im magnetischen Meridian, sein Mittelpunkt sei m (Fig. 209), sein Radius r. Auf einer im Mittel-

punkt errichteten Senkrechten befinde sich im Abstände x ein magnetischer Pol, dessen Menge b sei. Die von demselben ausgehenden Kraftlinien werden überall radial zu b sein. Wir fassen ein sehr kleines Stück a des Stromkreises an dessen oberstem Punkte ins Auge, ziehen $ab = l$, wobei l eine Kraftlinie ist. Eine durch l senkrecht zur Ebene der Zeichnung gelegte Ebene enthält also die Kraftlinie und das Stromelement; senkrecht zu ihr muss nach der Faradayschen Regel (§ 310) der Magnetpol verschoben werden. Sei die Kraft, welche die Verschiebung bewirkt, \overline{bc} ; sie ist proportional der magnetischen Menge des Pols, der Länge a des Stromstückes, der Intensität I desselben, endlich umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung l , also $\overline{bc} = k \frac{Iba}{l^2} = k \frac{Iba}{x^2 + r^2}$. Wir zerlegen \overline{bc} in die Komponenten \overline{dc} und \overline{bd} ; $\overline{bd} : \overline{bc} = r : l$, also $\overline{bd} = \frac{r\overline{bc}}{l} = \frac{r\overline{bc}}{\sqrt{x^2 + r^2}}$ oder $bd = k \frac{Ibar}{(x^2 + r^2)^{3/2}}$.

Wenn wir nun die Wirkung aller Teilchen des Stromkreises betrachten, so erhalten wir lauter Kräfte gleich bc , welche einen Kegel um die Axe bd bilden. Jede dieser Kräfte können wir, wie bc , in 2 Komponenten zerlegen; als eine Komponente erhalten wir jedesmal bd , während die anderen, cd entsprechenden Komponenten nach allen Richtungen um d gleichmässig verteilt sind und senkrecht zu bd stehen, sich also gegenseitig aufheben. So erhalten wir, wenn wir die Teilchen des Kreisstromes mit $a, a_1, a_2 \dots a_n$ bezeichnen, als Wirkung des ganzen Stromes:

$$F = k \frac{Ibar}{(x^2 + r^2)^{3/2}} + k \frac{Iba_1r}{(x^2 + r^2)^{3/2}} + \dots + k \frac{Iba_nr}{(x^2 + r^2)^{3/2}}$$

$$F = k \frac{Ibr}{(x^2 + r^2)^{3/2}} (a + a_1 + \dots + a_n) = k \frac{Ibr}{(x^2 + r^2)^{3/2}} 2r\pi.$$

Nehmen wir einen magnetischen Pol von der Menge 1 , also $b = 1$, so ist die Kraft des Kreisstromes auf den Pol, der sich im Abstand x befindet: $F_x = k \frac{2\pi r^2 I}{(x^2 + r^2)^{3/2}}$. Liegt der Magnetpol im

Mittelpunkt des Kreises, also $x = 0$, so wird $F_0 = k \frac{2\pi I}{r}$.

§ 312. Die Konstante k hängt von den Einheiten für F und I ab. Bisher haben wir als Einheit der Intensität die willkürliche

Jacobische Einheit benutzt, die mit dem absoluten Maßsystem in keinem Zusammenhang steht. W. Weber hat zuerst die elektromagnetische Wirkung des Stromes nach obiger Gleichung benutzt, um eine andere Einheit, die elektromagnetische Einheit der Intensität zu definieren. Dafür setzen wir $k = 1$, d. h. definieren als Einheit der Intensität diejenige, welche für $r = 1 \text{ cm}$ $F_0 = 2\pi$ Dyne macht.

Die Versuche zeigen, dass die Einheit nach absolutem elektromagnetischem oder Weberschem Maß gleich 0,948 Jacobischen Einheiten ist.

§ 313. Die Wirkung einer Tangentenbussole (§ 269) lässt sich nun genauer erforschen. Sie bestehe aus n Kreiswindungen vom Radius r , sei μ das magnetische Moment der Magnetnadel, E die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus. Dann ist die Kraft des Stromes mit der Intensität I , wenn wir diese nach Weberschem Maß messen, $F = \frac{2\pi n \mu I}{r}$ und ist senkrecht gegen

die im magnetischen Meridian befindlichen Windungen gerichtet. Ist die Nadel um den $\sphericalangle \alpha$ abgelenkt, so ist die zur Drehung wirkende Komponente der Stromkraft: $F \cos \alpha$, die Komponente der Erdkraft: $E \mu \sin \alpha$. Diese halten sich das Gleichgewicht (§ 269), also $\frac{2\pi n \mu}{r} I \cos \alpha = E \mu \sin \alpha$, also $I \frac{r E}{2n\pi} \operatorname{tg} \alpha = C \operatorname{tg} \alpha$.

C heisst der Reduktionsfaktor auf elektromagnetisches Maß; er lässt sich, wie man sieht, berechnen aus Zahl und Grösse der Windungen und aus der Horizontalkomponente E , und es lässt sich daher mit der Tangentenbussole die Intensität in Weberschem absoluten Maß bestimmen.

§ 314. Die elektromagnetische Wirkung des Stromes hat vielseitige praktische Verwertung gefunden. Zunächst seien die Telegraphenapparate kurz besprochen. Wenn wir an einer Stelle in einem Stromkreis einen Elektromagneten einschalten, so wird bei Stromschluss der Magnet erregt und ein dicht über seinen Polen befindlicher Anker angezogen. Es ist klar, dass der Stromschluss in weiter Entfernung vom Elektromagnet erfolgen kann, und so auf diese Entfernung hin sich Zeichen geben lassen. Die Einrichtung zum Zeichengeben ist bei dem üblichsten Morseschen Telegraphen folgende (Fig. 210): das Element A liefert den

Strom, welcher auf der zeichengebenden Station geschlossen wird durch den Schlüssel oder Taster B. Derselbe besteht aus einem um c drehbaren Hebel; drückt man den Griff d hinunter, so wird der Strom geschlossen, indem der Metallknopf e, zu welchem der Strom geführt ist, in Berührung kommt mit dem Hebel, von dessen Drehaxe der Strom abgeführt wird. Sobald dies geschieht, wird auf der Empfangsstation der Elektromagnet f erregt; über ihm befindet sich die Eisenplatte g, der Anker, welcher an dem um h drehbaren Hebel sitzt. Durch die schwache Feder i wird der Anker vom Magnet abgezogen, sobald kein Strom fließt. Das

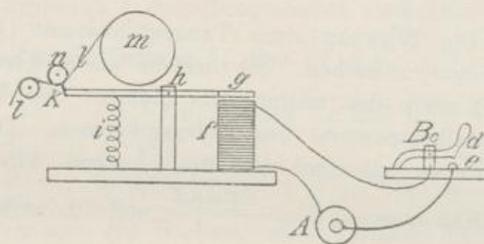


Fig. 210.

zweite Ende des Hebels trägt eine Spitze oder ein mit Farbe getränktes Rädchen k; sobald der Anker g angezogen ist, wird k gegen einen Papierstreifen l gedrückt, der von der Papierrolle m sich abwickelnd unter der Walze n durchgeht und durch ein (nicht gezeichnetes) Uhrwerk langsam weiter gezogen wird. Sobald g angezogen ist, macht k einen Strich auf dem Papier, dessen Länge abhängt von der Dauer des Stromschlusses. Man kann so Punkte und Striche machen, aus welchen die Buchstaben des Alphabets zusammengesetzt werden. So ist z. B. a = Punkt, Strich; e = Punkt; i = Punkt, Punkt; o = Strich, Strich, Strich; u = Punkt, Punkt, Strich u. s. w.

Für die praktische Benutzung der Telegraphen sind noch folgende Punkte zu erwähnen: Der Strom wird durch den Widerstand der langen Leitung zwischen entfernten Orten so geschwächt, dass er den Elektromagneten nicht genügend erregt, um den Hebel kräftig gegen das Papier zu drücken. Daher benutzt man den schwachen Linienstrom, um durch ein Relais einen Lokalstrom zu schliessen; das Relais ist ein sehr leicht beweglicher Hebel, dessen eines Ende durch einen vom Linienstrom erregten Elektromagnet angezogen wird, wodurch das andere Ende gegen

eine Spitze gedrückt und so der Lokalstrom geschlossen wird; dieser bewegt erst den Schreibapparat.

Die Apparate werden ferner so einzurichten sein, dass dieselbe Leitung ein Telegraphieren in beiden Richtungen gestattet. Endlich wird für den Strom nicht Hin- und Rückleitung durch 2 Drähte gegeben, sondern nur eine Leitung gelegt, deren Enden mittelst grösserer Platten in das feuchte Erdreich vergraben werden. Die Verbindung zweier Stationen gestaltet sich nach dem Schema der Fig. 211. A und B sind die beiden Stationen, S und S₁ die

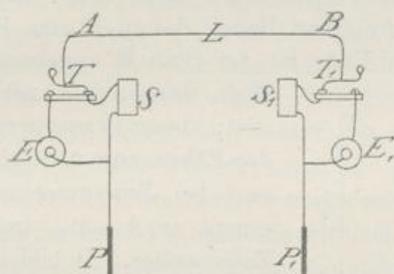


Fig. 211.

Elektromagnete der Schreibapparate oder Relais, T und T₁ die Taster, E und E₁ die Batterien, P und P₁ die Platten der Erdleitung, L der Verbindungsdraht der beiden Orte. Die Taster sind etwas anders eingerichtet, als oben angegeben, sie schliessen nämlich in der Ruhelage an beiden Orten L durch S an die Erdplatte an, während an beiden Stationen der Stromkreis des Elementes ungeschlossen ist. Wird nun etwa in A der Taster heruntergedrückt, so ist hier S ausgeschaltet, dagegen E in den Kreis P E T L T₁ S₁ P₁ eingeschaltet, der Strom muss fließen, S₁ wird erregt. Die Erde wirkt hier als grosses Reservoir: sei z. B. P mit dem negativen Pol des Elementes verbunden, so wird dadurch dessen Potential = 0, während der andere Pol das Potential = e hat, wenn dies die elektromotorische Kraft der Batterie bedeutet. Sobald E mit P₁ verbunden, bekäme P₁ auch das Potential e, wenn es nicht in der Erde läge; so aber fliesst hier fortwährend Elektrizität ab, die vom Element aus stets ersetzt wird.

Soll umgekehrt von B nach A telegraphiert werden, so wird bei Ruhelage des Tasters T der Elektromagnet S erregt durch Niederdrücken von T₁, da hierdurch S₁ ausgeschaltet, E₁ eingeschaltet wird.

Auf die zahlreichen komplizierten Apparate, z. B. die, welche die Depesche gleich drucken (Hughes' Typendrucker), oder gar die Handschrift des Originals reproduzieren (Casellis Pantelegraph), kann hier nicht eingegangen werden.

§ 315. Die elektromagnetische Wirkung des Stromes findet weiter Anwendung bei den elektrischen Uhren; eine der einfachsten Konstruktionen ist in Fig. 212 schematisch dargestellt. A ist das Rad, welches den Sekundenzeiger trägt; es besitzt 60 Zähne, die nach links steil, nach rechts langsamer abfallen. B ist ein um C drehbarer Hebel, der in D eine Eisenplatte trägt, an seinem oberen Ende ist der Stab E angebracht, welcher am

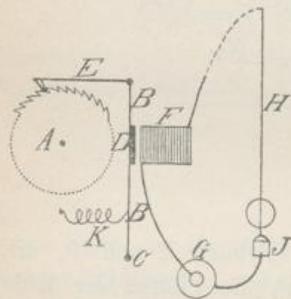


Fig. 212.

Ende einen auf A ruhenden Zahn besitzt; dieser kann wegen der Gestalt der Zähne von A nach links frei gleiten, bei Bewegung nach rechts aber nimmt er A mit, dreht es um einen Zahn weiter. D bildet den Anker des Elektromagneten F, der erregt wird, sobald der Strom des Elementes G geschlossen ist. In diesen Stromkreis ist ein Sekundenpendel H mit metallener Stange eingeschaltet; unter deren Spitze steht ein Röhrchen J mit Quecksilber, welches eine hervorragende Kuppe bildet, so dass das Pendel bei jeder Schwingung, d. h. jede Sekunde, die Kuppe berührt und den Strom schliesst. Dadurch wird der Elektromagnet erregt, D angezogen, A um einen Zahn gedreht, während, sobald der Strom aufhört, die Feder K den Hebel wieder nach links zieht.

Ferner wären die elektromagnetischen Registrierapparate zu erwähnen, die in zahlreichen Formen je nach dem Zweck konstruiert werden. Eine recht brauchbare Form zur Messung kurzer Zeiten ist im wesentlichen ein telegraphischer Schreibapparat mit zwei Elektromagneten und Schreibhebeln dicht neben einander. Der eine Schreibhebel wird durch ein Sekundenpendel erregt, macht daher auf dem rasch abrollenden Papierstreifen Zeichen, deren Abstand konstant ist und 1 Sekunde entspricht. Der andere Schreibstift wird durch einen Taster beliebig bewegt, und damit Anfang und Ende der zu messenden Zeit markiert. Stehen z. B. die Sekundenmarken 200 mm aus einander, und wir

finden die Marken des zweiten Hebels im Abstand $12,4 \text{ mm}$ und $123,6 \text{ mm}$ von einer Sekundenmarke, so hat die beobachtete Erscheinung $\frac{123,6 - 12,4}{200} = 0,556 \text{ Sek.}$ gedauert.

d) Induktion.

§ 316. Wir haben im vorigen Abschnitt Wirkungen des Stromes kennen gelernt, bei welchen der Strom Arbeit leistet, indem er einen Magnet oder magnetische Moleküle, oder einen anderen Stromkreis dreht oder bewegt. Nach dem Prinzip von der Erhaltung der Kraft kann diese Arbeit aber nicht ohne Verschwinden eines gleichen Aequivalentes an Energie geleistet werden. Die Energie eines Stromes ist aber gegeben (§ 286) durch das Produkt aus elektromotorischer Kraft mal Stromstärke; dieses Produkt muss also abnehmen, sobald der Strom Arbeit leistet, es muss die elektromotorische Kraft abnehmen (und damit auch die Stromstärke), oder wie wir auch sagen können, es muss eine entgegengesetzt gerichtete elektromotorische Kraft hinzugefügt werden. Das ist nun in der That der Fall.

§ 317. Wenn man einer geschlossenen Leitung b , in welche ein Galvanometer eingeschaltet ist, eine stromdurchflossene Leitung a nähert oder von ihr entfernt, so macht das Galvanometer einen Ausschlag, zeigt also, dass b von einem Strom durchflossen wird. Derselbe dauert aber nur so lange, als a bewegt wird, und ist entgegengesetzt gerichtet bei Annäherung und bei Entfernung. Lenz fand, dass seine Richtung so beschaffen sei, dass die elektrodynamische Wirkung beider Ströme der Bewegung von a zu widerstehen suche, d. h. bei Annäherung entsteht in B ein Strom, welcher dem in a fließenden entgegengesetzt gerichtet ist, so dass beide sich abstossen; bei Entfernung entsteht ein gleichgerichteter Strom, so dass sie sich dann anziehen.

Genau ebenso wie Entfernung von a bis ins Unendliche wirkt die Unterbrechung seines Stromes, wie die Annäherung aus dem Unendlichen die Schliessung desselben.

Wir haben gesehen, dass ein Magnetpol ersetzt werden kann durch einen Stromkreis und umgekehrt. Dementsprechend entstehen in b auch Ströme, wenn ein Magnet genähert oder entfernt wird, oder wenn in einem in unveränderter Entfernung bleibenden Eisenkern durch einen elektromagnetisch wirkenden Strom Magnetismus hervorgerufen oder vernichtet wird.

In diesen Fällen wirkt der Südpol stets wie ein im Sinne des Uhrzeigers fließender Strom, der Nordpol entgegengesetzt.

Man nennt diese Erscheinung Induktion, die in *b* fließenden Ströme induzierte Ströme, wobei man Schliessungsströme (bei Schliessung oder Annäherung von *A*, Annäherung oder Erzeugung eines Magneten) und Oeffnungsströme unterscheidet. *a* wird der primäre Leiter oder der induzierende Leiter genannt, *b* der sekundäre oder induzierte Leiter.

§ 318. Die Stärke des induzierten Stromes ist bei Schliessung und Oeffnung des primären Stromes dessen Intensität proportional, hängt bei Annäherung oder Entfernung des primären Stromes ferner von der Geschwindigkeit der Bewegung ab. Es ist nämlich die gesamte Elektrizitätsmenge *M*, welche im induzierten Strome in Bewegung gesetzt wird, dieselbe, ob ich einen primären Leiter mit dem Strom von der Stärke *i* aus dem Unendlichen bis zur Entfernung *x* heranbringe, oder ob ich den primären Leiter stromlos in die Entfernung *x* bringe und dann den Strom von der Intensität *i* in ihm schliesse. Wird die Annäherung schnell vollzogen, so muss *M* in kurzer Zeit durchfließen, es wird also in der Zeiteinheit mehr durch den Querschnitt fließen, als bei langsamer Annäherung. Die ganze Menge *M* ist *i* proportional.

Nennen wir *I* die mittlere Intensität des induzierten Stromes in einer Windung, *t* die Zeit, während welcher er fließt, so ist die durch jeden Querschnitt fließende Elektrizitätsmenge: $It = ki$.

Der Induktionsstrom wird verstärkt, wenn wir dem induzierten Leiter die Gestalt einer Spirale geben, da auf jede einzelne Windung derselben die gleiche Wirkung hervorgebracht wird; bei einer Spirale von *n* Windungen haben wir also $It = nki$.

Ist der Widerstand jeder Windung *w*, so ist der der ganzen Spirale *n w*, der mittleren Intensität *I* entspricht nach dem Ohmschen Gesetz eine elektromotorische Kraft des Induktionsstromes

$$e = Inw = \frac{kin^2w}{t}.$$

Dieselbe ist proportional der Intensität des primären Stromes, dem Quadrat der Zahl der Windungen, dem Widerstand jeder Windung, endlich umgekehrt proportional der Zeit, in welcher der Induktionsstrom fließt, d. h. in welcher der primäre Leiter um eine bestimmte Strecke bewegt wird, also proportional der Geschwin-

digkeit der Verschiebung, oder ebenso proportional der Dauer der Schliessung oder Oeffnung.

§ 319. Genau ebenso, wie ein Strom beim Entstehen und Vergehen induzierend auf einen benachbarten Leiter wirkt, so wirkt er auch auf seinen eigenen Leiter, wenn dieser aus einer Anzahl benachbarter Windungen besteht. Man nennt dies Selbstinduktion. Den so entstehenden Induktionsstrom nennt man nach Faraday Extracurrent oder Extrastrom. Er ist wie jeder Induktionsstrom beim Schliessen des induzierenden Stromes diesem entgegengesetzt, beim Oeffnen gleich gerichtet. Er wirkt daher auf den Hauptstrom verschieden bei Oeffnung und Schliessung; Stelle in Fig. 213 die Abscisse die Zeit, die Ordinate die Intensität dar. Die erste Kurve entspricht dem Fall, dass wir in einer Spirale plötzlich den Strom schliessen, so dass die Intensität momentan von 0 auf i steigt; etwas später, bei Unterbrechung, fällt sie ebenso plötzlich auf 0. Ohne Extrastrome wäre die Intensitätskurve ABCD. Es entstehen aber die Extrastrome (Fig. 213, 2) E und F. F kann nicht zu stande kommen — falls wir ihm nicht eine Nebenleitung

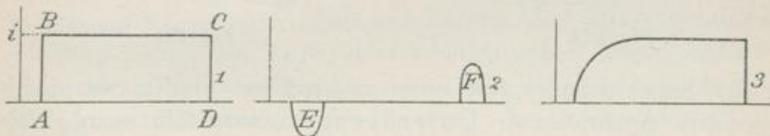


Fig. 213.

geben —, da bei seinem Beginn die Leitung unterbrochen ist, aber E besteht und addiert sich zum Hauptstrom, bewirkt, dass dieser nicht plötzlich die Intensität i erreicht, sondern allmählich (Fig. 213, 3).

Man kann den Extrastrom bei Oeffnung leicht nachweisen, indem man ihm eine Nebenschliessung darbietet, wenn der Hauptstrom unterbrochen wird: Stelle in Fig. 214 E das Element dar; sein Strom teilt sich in A, geht teils durch das Galvanometer G nach B und zurück, teils durch die Rolle R über B zurück. Sei bei C eine Unterbrechungsstelle des Hauptstromes. Sobald wir hier öffnen, entsteht in R der dem Hauptstrom gleich gerichtete Extrastrom, welcher, wie der doppelt gefiederte Pfeil andeutet, G in entgegengesetzter Richtung durchfließt und daher einen Ausschlag nach der anderen Seite hervorbringt.

§ 320. Zur Erzeugung von Induktionsströmen hat man besondere Apparate konstruiert, die man Induktorien oder nach ihrem ersten Hersteller Ruhmkorffsche Apparate nennt. Sie bestehen aus zwei über einander gewickelten Spiralen: die innere, primäre oder induzierende Spirale besteht aus einer mässigen Anzahl von Windungen aus dickem Draht; die äussere, sekundäre oder induzierte Spirale aus sehr vielen Windungen von sehr feinem Draht. In den grössten Apparaten derart hat der äussere Draht eine Länge von 100,000 *m*. Die Mitte der inneren Spirale wird durch ein Bündel weicher Eisendrähte gebildet; beim Schliessen und Oeffnen des primären Stromes werden dieselben magnetisiert und entmagnetisiert, sie wirken also auf die sekundäre Spirale ebenso induzierend wie der primäre Strom und verstärken dessen Einfluss bedeutend. In der primären Spirale muss der Strom sehr

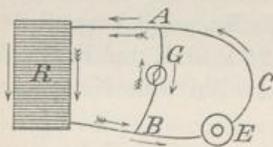


Fig. 214.

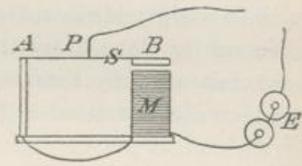


Fig. 215.

schnell hinter einander geschlossen und geöffnet werden, was durch besondere Apparate, die Unterbrecher, ausgeführt wird. Die einfachste und gebräuchlichste Form derselben bildet der Wagnersche Hammer: er besteht aus einer Stahlfeder S, die mit dem Ende A an einer Säule befestigt ist, am Ende B eine Eisenplatte trägt; darunter steht ein kleiner Elektromagnet M, der B anzieht. Ueber S befindet sich eine Platinspitze P, welche S gerade berührt, wenn B nicht angezogen ist. Der Strom, welchen man durch die primäre Spirale schicken will, wird durch die Batterie E geliefert; er umfliesst zuerst M, geht von hier zur Feder S, dann durch die berührende Spitze P, fliesst von hier durch die primäre Spirale und zurück zu E. Dadurch wird aber M erregt, B angezogen; dies unterbricht den Kontakt zwischen S und P, der Strom hört auf; sofort wird B von M losgelassen, schwingt in die Höhe, S berührt P, der Strom ist wieder geschlossen, M wird magnetisiert, B angezogen, der Strom unterbrochen u. s. w. Die Feder S führt also Schwingungen aus, wodurch der primäre Strom selbstthätig fortwährend geschlossen und geöffnet wird.

Bei jeder Schliessung und Oeffnung entsteht in der sekundären Spirale ein Induktionsstrom, aber von entgegengesetzter Richtung; sind die Stromunterbrechungen sehr zahlreich, so folgen die Induktionsströme fast kontinuierlich, wir haben einen Strom, der fortwährend seine Richtung ändert; solche Ströme nennt man Wechselströme.

Bei den beschriebenen Induktionsapparaten ist der durch Schliessung induzierte Strom sehr verschieden von dem durch Oeffnung induzierten. Wir haben gesehen, dass infolge des Extrastroms bei Schliessung einer Spirale die Intensität nur allmählich ihr Maximum erreicht, bei Oeffnung dagegen plötzlich auf 0 abfällt. Ferner haben wir (§ 319) besprochen, dass die Intensität des induzierten Stromes desto grösser ist, je schneller der Intensitätswechsel des induzierenden stattfindet. Somit wird der Induktionsstrom der Schliessung längere Zeit andauern, aber schwächer sein, kleinerer elektromotorischer Kraft entsprechen, der der Oeffnung sehr kurzdauernd, aber von grosser Intensität; die Elektrizitätsmenge, welche durch beide bewegt wird, ist die gleiche.

§ 321. In § 316 haben wir besprochen, dass für die Arbeit, welche ein Strom durch elektromagnetische oder elektrodynamische Wirkung leistet, ein Aequivalent verloren gehen muss, indem die Intensität des Stromes geringer wird. Es ist nun leicht zu übersehen, wie die Induktion dies bewirkt. Lenkt ein Strom A eine Magnetnadel ab, so wird durch die Bewegung des Magnets im Stromkreise ein induzierter Strom B entstehen, der dem ursprünglichen A entgegengesetzt ist, ihn also schwächt; er dauert genau so lange, als die Magnetnadel sich bewegt, der Strom A also Arbeit leistet. Hört der Strom A auf, so dreht sich die Magnetnadel zurück, jetzt leistet die Erdkraft Arbeit, genau dieselbe, welche vorhin der Strom leistete; auch jetzt entsteht ein Induktionsstrom, in derselben Richtung, die vorher der Hauptstrom A hatte, im Stromkreise entsteht ein Strom, dessen Arbeitswert genau der von der Erde geleisteten Arbeit äquivalent ist.

Auch der Satz von Lenz über die Richtung der Induktionsströme, dass sie stets der stattfindenden Bewegung entgegenzuwirken suchen, ergibt sich ohne weiteres; haben wir zwei parallel fliessende Ströme, so ziehen sie sich an; lassen wir sie dieser Wirkung folgen, so leisten die Ströme Arbeit; dem entsprechend entsteht in beiden ein entgegengesetzt gerichteter Induktionsstrom, ihre Intensität und

Wärmeentwicklung wird geschwächt, gerade so viel, dass der Wärmeausfall der geleisteten Arbeit äquivalent ist. Zwei entgegengesetzt fließende Ströme stossen sich ab: nähern wir sie, so leisten wir Arbeit, die ihr Äquivalent darin findet, dass nun in beiden Leitern mit den Hauptströmen gleich gerichtete Induktionsströme entstehen, die Wärmeentwicklung vermehrt wird. In allen Fällen hört der Induktionsstrom auf, somit Gewinn oder Verlust an Wärme, sobald die Bewegung, d. h. Arbeitsleistung aufhört.

Es gibt kaum ein anderes Beispiel, welches den Satz von der Erhaltung der Energie schöner bestätigt, als diese Erscheinungen der Induktion.

§ 322. Wir hatten zwei sehr verschiedene Quellen der Elektrizität in der Elektrisiermaschine und in den galvanischen Elementen kennen gelernt. Erstere liefern Elektrizität von sehr hohem Potential, aber in sehr geringer Quantität, wie man einerseits aus der grossen Schlagweite der Funken von 1 *m* und mehr, andererseits aus der Unfähigkeit, merkbare Mengen von Ionen auszuscheiden, erkennt. Die galvanischen Elemente hingegen liefern enorme Mengen von Elektrizität, aber von sehr geringem Potential. Wir können die ersteren in ihrer Wirkung vergleichen mit einer Wasserleitung von sehr kleinem Querschnitt, aber ausserordentlich grosser Druckhöhe, letztere mit einer breiten unter geringem Druck fließenden Wassermasse.

In den durch Induktionsapparate gelieferten Wechselströmen haben wir ein Mittelding zwischen jenen beiden; die Menge der Elektrizität ist nicht so gross, wie bei Elementen, nähert sich ihr aber; das Potential ist nicht so gross, wie wir es mit Elektrisiermaschinen erreichen können, aber ausserordentlich viel höher, als bei galvanischer Elektrizität.

Die Induktionsapparate enthalten in ihrem Fussbrett noch einen Kondensator, dessen Belegungen mit den Teilen des Wagner'schen Hammers verbunden sind, zwischen welchen die Unterbrechung stattfindet. Das hat einmal den Zweck, den Funken an der Unterbrechungsstelle kleiner zu machen, indem die noch zuströmende Elektrizität in den Kondensator hineingeht; dann aber wirkt der Kondensator auch in dem Sinne, dass er die Unterbrechung schneller erfolgen lässt, also höhere Spannung im sekundären Kreis erzeugt.

Zu vielen Zwecken verbindet man auch die Enden der sekundären Spirale noch mit einem Kondensator, Leidner Flaschen. Sie

haben auch eine doppelte Wirkung: erstens lädt der induzierte Strom die Leidner Flasche und bei der Entladung geht die ganze angesammelte Elektrizität mit einemmal über; dann aber wird auch die Entladung zu einer stärker oscillierenden (§ 256).

§ 323. Wegen des hohen Potentials der entwickelten Elektrizität sind die Induktionsapparate besonders geeignet zu Versuchen über Funkenentladung durch Dielektrika. Versieht man die Enden des induzierten Drahtes, seine Pole, mit Spitzen, die man einander gegenüber stellt, so geht zwischen ihnen ein Funkenstrom über. Trotzdem Wechselströme induziert werden, geht bei etwas grösserer Schlagweite die Elektrizität nur in einer Richtung, der des Oeffnungsfunkens, über, da der Induktionsstrom der Schliessung zu schwach ist (§ 320), um den Widerstand zu überwinden.

Bringt man feste Isolatoren zwischen die Spitzen, Pappe, Glas u. dergl., so werden sie durchbohrt. Gehen die Funken durch Luft von gewöhnlicher Dichte, so sieht man, dass die eigentliche Bahn des zackigen Funkens von einer leuchtenden Hülle, der Aureole, umgeben ist. Dieselbe lässt sich auf die Seite blasen, wird von einem Magnet abgelenkt, der eigentliche Funke nicht.

Besonders bequem lassen sich mit dem Induktor die Entladungen in verdünnten Gasen untersuchen. Man schliesst dieselben in sog. Geisslersche Röhren ein; dies sind zugeschmolzene Glasröhren von verschiedenen Formen, an deren Enden Platindrähte eingeschmolzen sind, welche mit dem Induktorium verbunden werden. Wenn wir in einem solchen Rohr, während Entladungen hindurchgehen, den Druck allmählich verringern, so treten folgende Erscheinungen auf: Bei gewöhnlichem Druck geht die Entladung in Gestalt eines scharf begrenzten Funkens durch; mit Druckverminderung beginnt sie sich auszubreiten, bis bei einem Druck von einigen Centimetern oder Millimetern (je nach dem Gase) der gesamte Gasinhalt des Rohres leuchtet. Dabei hat sich immer entschiedener ein Unterschied zwischen den beiden Polen entwickelt: die Kathode ist zunächst von einer dünnen hellen Schicht umkleidet, auf welche ein dunklerer Raum, der dunkle Kathodenraum, folgt, an den sich wieder eine helle Schicht, die helle Kathodenschicht, anschliesst. Von ihr erstrecken sich mit abnehmender Helligkeit nach der Anode hin die Glimmlichtstrahlen. Es folgt nun ein dunkler Trennungsraum, hinter welchem das positive Licht beginnt. Dasselbe besteht aus einer grossen

Zahl abwechselnd hellerer und dunklerer Schichten. Bei abnehmendem Druck wird ihr Abstand grösser, indem die der Anode benachbarten Schichten sich eine nach der anderen um die Anode herumlegen und in ihr verschwinden, wobei die übrig bleibenden Schichten gedehnt werden. Nimmt der Druck noch weiter ab, so sind nur noch wenige Schichten in der Nähe der Anode übrig, die leuchtende Hülle der Kathode beschränkt sich immer mehr auf einen leuchtenden Punkt an ihre Spitze, während der dunkle Kathodenraum und das Glimmlicht sich immer weiter nach der Anode hin erstrecken.

§ 324. Treibt man die Verdünnung sehr weit, bis zu $0,01 \text{ mm}$ Druck oder noch weniger, so entwickeln sich ganz neue Erscheinungen, welche von Hittorf und Crookes eingehend studiert und als ein vierter Aggregatzustand beschrieben wurden, welchen Crookes strahlende Materie nannte. Das negative Glimmlicht dringt immer weiter in den Raum des Rohres ein, aber es geht nur geradlinig vorwärts, bildet Strahlen, die normal zur Oberfläche des negativen Pols stehen. Man nennt sie Kathodenstrahlen. Die Entladung verbindet also gar nicht mehr beide Pole, sondern geht scheinbar nur von der Kathode geradlinig aus. Besteht z. B. die Kathode aus einer kleinen Platinplatte, welche senkrecht an das Ende des eingeschmolzenen Drahtes gelötet ist (Fig. 216, 1), so geht von ihr ein paralleles Strahlenbündel bis an die Wand, während

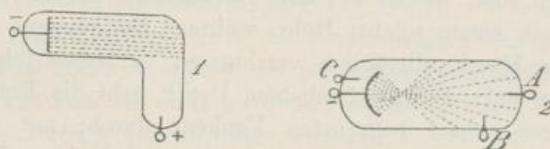


Fig. 216.

der andere Teil des Rohres mit der Anode dunkel bleibt. Nehmen wir ein sphärisch gekrümmtes Platinblech (Fig. 216, 2), einen kleinen Hohlspiegel, so schneiden sich die konvergenten Strahlen in einem Brennpunkt, treffen dann die Wand, ganz einerlei, wo die Anode sitzt, ob in A, B oder C. Die Kathodenstrahlen bringen einzelne besondere Wirkungen hervor: sie erregen in hohem Grade die Fluoreszenz (§ 371). Wo sie die Glaswand treffen, leuchtet diese sehr hell. Eine grosse Reihe von Körpern sendet, von ihnen getroffen, helles Licht aus, welches durch das Spektroskop betrachtet ein dis-

kontinuierliches Spektrum (§ 373) zeigt. So leuchtet Rubin und Smaragd rot, Diamant grün, Schwefelcalcium bläulich u. s. w. — Ferner üben die Kathodenstrahlen eine sehr starke Wärmewirkung aus; wo die Glaswand getroffen wird, kann das Glas erweicht werden und schmelzen; im Brennpunkt einer Hohlspiegelkathode wird die Temperatur so hoch, dass Platin glühend wird und sogar schmilzt. Auch mechanische Wirkung hat Crookes hervorgebracht: Bringt man in einer Röhre (Fig. 217) 2 parallele horizontale Glasstäbe A an, auf welchen die Axe eines sehr leichten, aus Glimmerblättchen hergestellten Schaufelrades B rollen kann; lässt man dann die Kathodenstrahlen die eine Hälfte des Rades treffen, so werden die Schaufeln fortgestossen, das Rad rollt in Richtung der Strahlen.

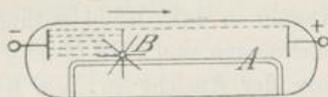


Fig. 217.

Das Material der Kathode wird bei allen diesen Entladungsversuchen, namentlich wenn der Druck sehr gering ist, stark angegriffen; es werden kleinste Teilchen abgerissen und auf der gegenüberliegenden Glaswand abgelagert. Man kann auf diese Weise Spiegelbelegungen aus Platin, Eisen, Gold u. s. w. herstellen.

Hertz fand zuerst, dass wenn man in einem hoch evakuierten Rohr eine Scheidewand aus dünnem Aluminium anbringt, die Kathodenstrahlen durch die Metallschicht hindurch gehen können. Dann zeigte 1893 Lenard, dass wenn man einen Teil der Glaswand, auf welchen die Kathodenstrahlen treffen, durch ein dünnes Aluminiumblech ersetzt, die Kathodenstrahlen durch dasselbe in die äussere Luft austreten können. Sie bringen dort z. B. noch Phosphoreszenz hervor, sie zeigen aber auch noch weitere, früher unbekannte Wirkungen: 1. Sie können durch undurchsichtige Körper hindurch gehen, wobei im grossen und ganzen die Durchlässigkeit der verschiedenen Körper ihrem spezifischen Gewicht umgekehrt proportional ist. 2. Sie machen Luft oder andere Gase, durch welche sie hindurch gehen, für Elektrizität leitend. 3. Sie wirken auf photographische Platten, wie die Lichtstrahlen.

Endlich fand Röntgen 1895, dass auch direkt von der Glaswand eines Rohres, welches von innen durch Kathodenstrahlen getroffen ist, Strahlen mit denselben Eigenschaften ausgehen, welche

Lenard bei den äusseren Kathodenstrahlen fand. Es scheint, dass diese Strahlen, welche man Röntgenstrahlen nennt, nicht mit den Kathodenstrahlen selbst identisch sind, sondern dass jeder von Kathodenstrahlen getroffene Körper Röntgenstrahlen nach allen Seiten aussendet.

Ihre Hauptanwendung haben die Röntgenstrahlen durch ihre Fähigkeit, durch undurchsichtige Körper hindurchzugehen, gefunden: Setzt man z. B. den menschlichen Körper solchen Strahlen aus, so gehen sie hindurch, leichter durch das Fleisch, schwächer durch die Knochen; auf einem hinter den Körper gehaltenen fluoreszierenden Schirm von Baryumplatincyanoür oder auf einer photographischen Platte entsteht daher ein Schattenbild, in welchem die Knochen dunkler, das Fleisch heller erscheint. Man kann so namentlich Fremdkörper, Kugeln u. dgl., leicht auffinden.

Alle diese Erscheinungen sind noch nicht genügend aufgeklärt. Man neigt aber heute der Ansicht zu, die Kathodenstrahlen beständen aus kleinen materiellen Teilchen, welche mit negativer Elektrizität beladen sind, ähnlich den Ionen (§ 295). Darauf deutet hin, dass sie einen getroffenen Leiter negativ laden, dass sie von einem Magnet abgelenkt werden u. s. w. Nach Messungen von Thomson ist aber die materielle Masse der Teilchen viel kleiner, als bei den elektrolytischen Ionen, nur etwa $\frac{1}{1000}$ so gross, während die elektrische Ladung in beiden Fällen identisch ist.

Die Röntgenstrahlen werden nicht, wie Lichtstrahlen, gebrochen. Trotzdem neigt man der Ansicht zu, dass sie sehr kurzwellige Lichtstrahlen seien.

Noch ist zu erwähnen, dass nach Versuchen von E. Wiedemann und Hasselberg das Leuchten der Gase in Geisslerschen Röhren ohne wesentliche Temperatursteigerung zu stande kommen kann. Wiedemann setzte die Röhre in ein Wasserkalorimeter und maß die Wärme, die bei einer bestimmten Zahl von Entladungen abgegeben wurde. Aus der bekannten Masse des Gases und seiner spezifischen Wärme ergab sich, dass dasselbe bei hellem Leuchten nur um 10° bis 20° erhitzt zu sein braucht.

§ 325. Eine eigentümliche Art von Induktionsströmen beobachtete Foucault; lässt man eine Magnetnadel über einer Metallplatte schwingen, so kommt sie viel schneller zur Ruhe, als ohne Metallplatte. Die Erscheinung erklärt sich durch Induktion: durch Bewegung des Magnets in der Nähe der leitenden Platte werden

in dieser Induktionsströme erzeugt, die nach dem Lenzschen Gesetz der Bewegung widerstehen. Schwingt also der Nordpol nach rechts (Fig. 218), so kreisen links von ihm die Ströme im Sinne des Uhrzeigers, so dass sie die Wirkung eines Südpols erzeugen, rechts von ihm im entgegengesetzten Sinne, so dass ein Nordpol entsteht. Beide Pole widerstehen der Schwingung des Magneten, bringen ihn bald zur Ruhe. — Dass diese Erklärung richtig ist, erkennt man durch folgenden Versuch: macht man in die Scheibe eine grosse Zahl radialer Einschnitte, so können die Ströme nicht ordentlich zu stande kommen, daher bleibt die Wirkung aus.



Fig. 218.

Die Thatsache wird bei den Galvanometern (§ 306) benutzt, um die Schwingung zu dämpfen, indem man die Magnete im Innern grösserer Kupfermassen schwingen lässt.

Wenn man umgekehrt die Scheibe dreht, während die Magnetnadel ruhig hängt, so wird durch Wirkung der Induktionsströme der Magnet in Richtung der Drehung abgelenkt. — Wenn eine Metallmasse zwischen kräftigen Magnetpolen rasch rotiert, so erhitzt sie sich durch die Ströme sehr bedeutend. Alle diese Folgerungen ergeben sich leicht.

§ 326. Wechselströme, wie sie durch Induktion hervorgebracht werden, wirken auf Galvanometer nicht, da die Ströme die Nadel hin und her zu treiben suchen; wenn sie sich rasch folgen, sind sie wegen der Trägheit der Nadel ohne Einfluss.

Von W. Weber ist ein Instrument hergestellt worden, das Elektrodynamometer, welches Wechselströme zu messen gestattet; dasselbe ist wie ein Galvanometer eingerichtet, nur ist statt der Magnetnadel eine zweite Spirale an zwei Drähten, welche den Strom zu- und ableiten, im Innern der festen Spirale aufgehängt. Die Windungsebenen der Spiralen liegen senkrecht zu einander. Man leitet die Wechselströme durch beide Spiralen hinter einander, dann laufen sie bei jeder Richtung in den Spiralen in gleichem Sinne, lenken die bewegliche Spirale ab, da sie sich nach den Gesetzen der Elektrodynamik der festen Spirale parallel zu stellen suchen.

Die anziehende Kraft ist nach Ampères Gesetz (§ 309) dem Produkt beider Intensitäten proportional, also, da in beiden Spiralen

derselbe Strom fließt, dem Quadrat von dessen Intensität. Die Ausschläge des Elektrodynamometers sind somit dem Quadrat der Intensität proportional.

§ 327. Die Erscheinungen der Induktion finden vielfache wichtige praktische Verwertung. Es seien zunächst die Telephone genannt.

Wir haben gesehen (§ 219), dass Klänge oder Laute der menschlichen Sprache durch ganz bestimmte Schwingungen charakterisiert sind; ferner haben wir besprochen (§ 209), dass dünne Platten oder Membranen fast aller denkbaren Schwingungen fähig sind. Wird daher gegen eine solche Platte gesprochen, so macht sie die Schwingungen der Luftwellen mit. Beim Telephone ist eine dünne Eisenplatte A vorhanden, gegen welche durch einen kurzen

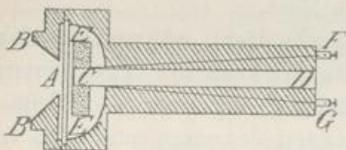


Fig. 219.

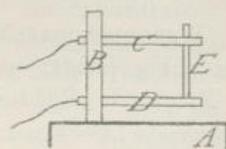


Fig. 220.

Schalltrichter B gesprochen wird, wodurch sie in die gleichen Schwingungen gerät, wie die Luftwellen sie machen. Dicht hinter ihr befindet sich der eine Pol eines Magneten CD. Sobald die Platte A schwingt, sich C nähert oder davon entfernt, wird in ihr Magnetismus stärker oder schwächer induziert; da Wirkung und Gegenwirkung gleich sind, wird in demselben Rhythmus C stärker oder schwächer magnetisch. Ueber C befindet sich eine Induktionsspirale E von sehr dünnem Draht, in welcher in gleichem Rhythmus Induktionsströme entstehen, deren Intensität von der Amplitude der Schwingungen, d. h. der Schallstärke, abhängen. Die Spirale endet in den Klemmschrauben F und G; von hier wird der Strom zu einem zweiten, ganz gleichen Apparat geleitet, wo er daher den Pol des Magneten umfließt. Je nach seiner Richtung und Intensität bewirkt er verschieden grosse Stärkung oder Schwächung des Magnetpols, infolge wovon die Platte des zweiten Telephons mehr oder weniger angezogen wird. So gerät auch sie in Schwingungen, deren Amplitude und Schwingungszahl genau übereinstimmt mit dem der ersten Platte; dadurch wird auch die Luft in Be-

wegung gesetzt und das zweite Telephon ist im stande, die Laute zu reproduzieren, welche in das erste hineingesprochen werden.

Statt des ersten Telephons wird vielfach ein anderes Instrument, das Mikrophon, benutzt. In seiner einfachsten Form ist es in Fig. 220 dargestellt: auf einem Holzkästchen A, welches als Resonanzboden dient, sitzen an einer Säule B zwei parallele Kohlestäbe C und D. Der obere hat ein Loch, durch welches lose ein dritter Kohlestab E hindurchgestreckt ist, der auf D ruht. Die drei Kohlestäbe sind also in losem Kontakt mit einander, immerhin genügend, um einem in C zugeleiteten Strom den Durch- und Abfluss von D aus zu gestatten. Dieser Strom wird durch eine galvanische Batterie geliefert, und durchfließt die Induktionsrolle eines Telephons, dessen Magnet daher mit bestimmter konstanter Kraft die Platte anzieht, solange die Intensität des Stromes konstant ist. Wird nun aber gegen das Kästchen gesprochen, so gerät dasselbe in Schwingungen, die sich auch auf die Kohlestäbe übertragen. Dabei wird rhythmisch der Kontakt besser und schlechter, der Widerstand kleiner und grösser, also auch die Intensität variabel, und es muss die Platte des Telephons in Schwingungen geraten, welche die gegen das Mikrophon gesprochenen Worte reproduzieren.

Der Vorzug des Mikrophons vor dem Telephon als Aufgabedepartment besteht darin, dass man durch die Batterie beliebig starke Ströme benutzen und daher über weitere Strecken die Sprache vermitteln kann, als mit dem Telephon, dessen Induktionsströme durch sehr lange Leitungen gar zu sehr geschwächt werden.

§ 328. Wir können nun auf eine physikalisch wichtige Frage zurückkommen, deren Beantwortung wir früher (§ 278) aufschieben mussten, nämlich wie der Leitungswiderstand von Flüssigkeiten zu bestimmen sei. Wir sahen, dass dies mit gewöhnlichen Strömen nicht ausführbar ist, da dieselben die Flüssigkeiten zersetzen, sobald sie von ihnen geleitet werden, und dass mit sehr wenigen Ausnahmen (z. B. Kupferelektroden in Kupferlösung) dadurch ein dem zersetzenden Strom entgegenesetzt gerichteter Polarisationsstrom hervorgerufen wird, der, ganz abgesehen von dem eingeschalteten Widerstande, den Strom in unbekannter Weise schwächt.

Nun bieten uns aber die Wechselströme ein Mittel, über diese Schwierigkeiten fortzukommen; wenn wir solche Ströme z. B. durch angesäuertes Wasser leiten, und sie wechseln in der Sekunde 50mal ihre Richtung, so wird an der einen Elektrode während 0,02 sec 2 H

ausgeschieden; dessen Menge, daher auch die Polarisation, wird ausserordentlich gering sein. In den folgenden 0,02 *sec* wird nach Umkehrung des Stromes an der Elektrode O ausgeschieden, welches sich mit H zu Wasser verbindet; die Polarisation sinkt also auf O. So schwankt sie überhaupt zwischen dem Wert, den sie in den ersten 0,02 *sec* erreicht, und dem Wert O. Sollte dabei noch eine Polarisation wahrnehmbar sein, so muss man noch häufigere Wechsel der Stromrichtung anwenden oder grössere Elektroden (S. 284); jedenfalls gelingt es leicht, die Polarisation unschädlich zu machen.

Auch hier ist als Hauptmethode zur Bestimmung des Widerstandes die Wheatstonesche Brückenmethode (§ 279) zu nennen, wobei an Stelle der Batterie die sekundäre Spirale des Induktoriums tritt. Zum Nachweis der Stromlosigkeit ist im Brückenzweig natürlich nicht das Galvanometer brauchbar, sondern man benutzt entweder das Elektrodynamometer oder nach dem Vorgang von F. Kohlrausch besser ein Telephon. Das Dynanometer nämlich ist für „Nullmethoden“ schlecht brauchbar; da seine Angaben dem Quadrat der Intensität proportional sind, wird es für schwache Ströme, die es hier allein anzeigen soll, ausserordentlich unempfindlich. Vorzüglich geeignet ist dagegen das Telephon, in welchem man einen Ton hört, dessen Schwingungszahl der Zahl der Stromunterbrechungen in der Sekunde entspricht; ist der Kontaktklotz D (Fig. 188, § 279) richtig eingestellt, so verschwindet der Ton.

Die Bestimmungen werden meist so ausgeführt, dass man die gleich grossen Elektroden aus Platin in parallelepipedische Glas-tröge setzt; ist die eingetauchte Elektrodenfläche q , der Abstand beider l , so ist der gemessene Widerstand der Flüssigkeitsschicht $W = k \frac{l}{q}$ (§ 273), wo k den spezifischen Widerstand darstellt.

Der Widerstand der Flüssigkeiten ist ausserordentlich gross im Vergleich zu dem der festen Körper; auch nimmt er im Gegensatz zum Verhalten dieser mit steigender Temperatur ab, offenbar, weil die Ionen beweglicher werden. Bei den Säuren und Salzlösungen ist er abhängig von der Konzentration, aber in sehr verwickelter Weise, so dass sich keine allgemeinen Gesetze aufstellen lassen. Bei vielen Substanzen erreicht er bei bestimmter Konzentration ein Minimum, um bei noch grösserer Konzentration wieder zuzunehmen.

Als Beispiel für die Grösse der spezifischen Widerstände sei angeführt, dass der einer 5prozentigen Schwefelsäurelösung gleich 51282 ist; er nimmt ab bis zu 14472 bei einer 30prozentigen

Lösung, und wächst dann wieder; für Kupfervitriol liegt der Wert zwischen 277777 und dem doppelten, und von ähnlicher Grösse sind die Zahlen für die meisten Flüssigkeiten.

§ 329. Von hervorragender praktischer Bedeutung ist die Induktion geworden durch die Konstruktion von Maschinen, welche theils zur Erzeugung von Arbeit durch Strom, theils zur Erzeugung von Strom durch Arbeit dienen.

Die älteste Maschine, welche zur Stromerzeugung diente, war die magnetoelektrische Maschine von Pixii: ein vertikalstehender Hufeisenmagnet wurde um eine vertikale Axe gedreht, während der zugehörige Anker feststand. Bei den späteren Maschinen von Saxton und von Stöhrer stand dagegen der Magnet fest, während der Anker rotiert. Das Prinzip der Maschine ist aus Fig. 221 zu entnehmen: NS ist der Magnet, AB der Anker, auf dessen Enden zwei mit einander verbundene Spiralen geschoben sind. In der gezeichneten Stellung ist A ein Südpol; wird der Anker gedreht, so wird der Pol immer schwächer, dann kehrt sich die Magnetisierung um, in B ist ein Nordpol entstanden, der wieder schwächer wird u. s. w. Bei jeder Umdrehung werden also in den Spiralen 2 Ströme von entgegengesetzter Richtung erzeugt. Um sie gleich zu richten, ist auf der Axe der Kommutator C angebracht; er besteht (wie der Querschnitt deutlicher zeigt) aus einem Cylinder von isolierender Masse D, auf welchem zwei metallische Halbcylinder E und F geschraubt sind, die mit den Enden der Spulen A und B verbunden sind.

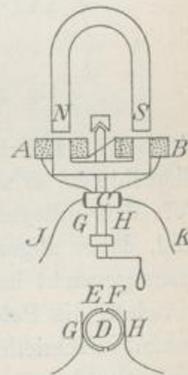


Fig. 221.

E und F sind also die Pole, die nach jeder halben Drehung das Vorzeichen ihrer Elektrisierung ändern. An E und F schleifen 2 Federn G und H, von denen der Strom durch die Drähte J und K weiter fortgeleitet wird. Die Federn sind so gestellt, dass z. B. die Berührung von G mit E aufhört, die mit F beginnt in dem Moment, wo die Stromrichtung in den Spiralen sich umkehrt. So ist der Wechselstrom in einen gleichgerichteten verwandelt.

Diese Maschinen waren insofern höchst unvollkommen, als das magnetische Feld weder sehr kräftig, noch genügend ausgenutzt war, und in dieser Beziehung ist die Einrichtung von Siemens

weit vorzüglicher: die Pole eines Hufeisenmagnets NS sind so ausgehöhlt, dass zwischen ihnen ein Cylinder rotieren kann. Es ist dies der sog. Siemenssche Doppel-T-Anker, dessen Querschnitt aus der Figur ersichtlich ist; um den eigentümlich geformten Eisenkern sind parallel zu dessen Axe, senkrecht zur Ebene der Zeichnung, Drahtwindungen gelegt; sobald der Anker rotiert, wird in seinen Teilen abwechselnd ein Nord- und Südpol induziert, in der Windung entstehen Wechselströme, welche wieder durch einen Kommutator gleich gerichtet werden. Diese Maschinen werden hauptsächlich in kleinem Maßstabe umgekehrt benutzt, um durch Strom Arbeit

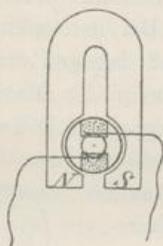


Fig. 222.

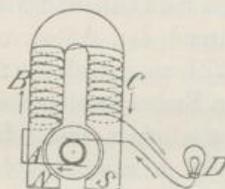


Fig. 223.

zu leisten. Führt man nämlich dem Kommutator den Strom einiger Elemente zu, so wird der Doppel-T-Anker ein Elektromagnet, dessen Pole den anliegenden Polen des permanenten Magnets gleichnamig sind, daher abgestossen werden. Sobald der Anker eine halbe Drehung gemacht hat, wird durch den Kommutator die Stromrichtung geändert, die Pole werden wieder abgestossen, — kurz, der Anker kommt in schnelle Rotation, welche man zu beliebiger Arbeitsleistung verwerten kann.

§ 330. Die magnetoelektrischen Maschinen litten an einem grossen Uebelstande: die permanenten Magnete verloren schnell an Kraft; nach dem Lenzschen Gesetz ist ja der induzierte Strom so gerichtet, dass er bei Annäherung der Spirale dem gleichnamigen Pol entspricht, wodurch der permanente Magnet geschwächt wird. Diesem Mangel half Siemens nach, indem er 1867 das Prinzip der dynamoelektrischen Maschinen aussprach; statt des permanenten Magnets nimmt man einen Elektromagnet, der erzeugt wird, indem man den Induktionsstrom selbst um die Eisenkerne fließen lässt. Auch die weichsten Eisenkerne haben Spuren von remanentem Magnetismus (§ 229); es wird also bei den ersten Ro-

tationen des Ankers immer ein, wenn auch sehr schwacher Strom zu stande kommen. Man leitet diesen schwachen Strom um den Elektromagnet, bevor er nach aussen geht. In Fig. 223 ist die Umänderung der vorher beschriebenen magnetoelektrischen Maschine in eine dynamoelektrische skizziert: der von dem Kommutator zur Feder A gelangende Strom umfließt in 2 Spiralen B und C den Elektromagnet, geht dann nach aussen, z. B. bei D durch eine Glühlampe, um durch die zweite Feder wieder zum Anker zu gelangen. Der erste schwache Strom verstärkt nun den Magnet, daher entstehen stärkere Induktionsströme, die den Magnet von neuem stärker machen. Diese gegenseitige Steigerung kann fort dauern, bis der Magnet die Sättigung (§ 228) erreicht hat.

Erst durch diese ebenso einfache wie wichtige Idee ist die Erzeugung starker elektrischer Ströme durch Aufwendung von Arbeit möglich geworden. Freilich konnten auch früher starke Ströme durch grosse Batterien geliefert werden, und sie wurden in einzelnen Fällen benutzt. Aber sie waren sehr teuer; die Arbeit des Stromes wird ja hier durch Oxydation von Zink kompensiert, und Zink ist ein teures Brennmaterial. Durch die Dynamomaschinen sind wir im stande, die chemische Affinität (potentielle Energie) zwischen Kohle und Sauerstoff in elektrischen Strom zu verwandeln, indem wir durch Verbrennung der Kohle Wärme (kinetische Energie) erzeugen, welche eine Dampfmaschine treibt. Diese setzt die Dynamomaschine in Bewegung, und so wird ein Potentialunterschied hervorgebracht, der einen Strom liefert, wodurch wir weder chemische Zersetzungen (potentielle Energie) oder Wärme- und Lichtwirkung (kinetische Energie) erzeugen können. Wir haben hier in grossartigem Maßstab einen Wechsel aller verschiedenen Formen, in denen die Energie auftreten kann.

§ 331. Auf die unzähligen Formen, in denen die Dynamomaschinen gebaut werden, kann hier natürlich nicht näher eingegangen werden. Es soll nur ganz kurz das Prinzip zweier verschiedener Typen besprochen werden, des sog. Siemensschen Trommelinduktors und des Grammeschen Ringes.

Die Siemenssche Maschine ist folgendermaßen gebaut: der Trommelinduktor besteht aus einem hohlen Eisencylinder AA, der mit Axen A und C versehen ist. Um ihn sind eine Anzahl von Windungen parallel der Axe gewickelt, ähnlich wie bei dem Doppel-T-Anker, nur dass nicht, wie bei jenem, eine Spule ge-

wickelt ist, sondern eine ganze Anzahl, die von einander isoliert sind. Die Enden jeder Spule sind an den Kommutator D geführt; er besteht aus von einander isolierten, rund um die Axe angebrachten Metallstücken, die einen Cylinder bilden, auf welchem zur Ableitung des Stromes Federn, Bürsten genannt, schleifen. Jede

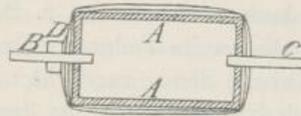


Fig. 224.

Spule endet an zwei Stellen des Kommutators. Der Anker rotiert zwischen den kräftigen Polen der Elektromagnete, deren Gestalt Fig. 225 zeigt; dabei wird stets in der Eisentrommel durch magnetische Induktion oben ein Südpol, unten ein Nordpol erzeugt, so dass die Spulen sich durch das starke magnetische Feld zwischen Trommel und Elektromagnet durchbewegen. Dadurch wird in jeder Spule ein Strom erzeugt, der seine Richtung ändert, sobald die Spule die neutrale Lage AB passiert. Es werden daher gleichzeitig immer alle Spulen Strom liefern, und es kommt darauf an, dieselben so zu verbinden, dass alle ihren Strom in immer gleicher Richtung erst um den Elektromagnet, dann nach aussen senden.

Wir wollen annehmen, es seien 4 Spulen vorhanden, deren Enden in der Fig. 225 mit 1 und 5, 2 und 6, 3 und 7, 4 und 8

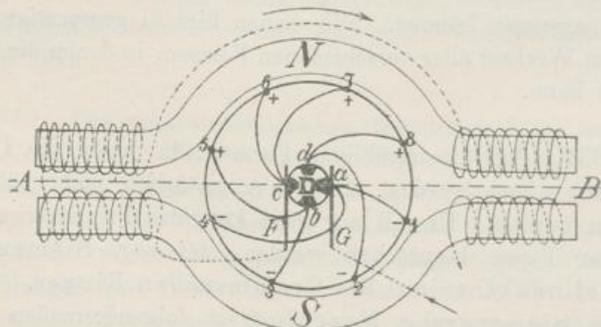


Fig. 225.

bezeichnet sind. Die Trommel drehe sich in Richtung des Pfeils, oben liege im Elektromagnet ein Nordpol, so stellen die Punkte

5, 6, 7, 8 im gezeichneten Momente die Enden der Spulen dar, aus welchen der positive Strom austritt, die Punkte 1, 2, 3, 4 die Enden, wo er eintritt oder der negative Strom austritt. Der Kommutator D oder Kollektor, wie er in diesem Falle genannt wird, besteht aus 4 isolierten Metallstücken a, b, c, d. Von den Stücken a und c wird der Strom nach aussen durch die Bürsten F und G abgeleitet. Alle Spulen sind zu zwei Stromkreisen vereinigt, welche beide ihr negatives Ende in a, ihr positives in c haben, nach aussen also ihre Ströme in gleichem Sinne senden. Die Verbindungen sind aus der Figur ersichtlich, noch leichter aus folgendem Schema: — a, 1, 5, b, 3, 7, c +, + c, 6, 2, d, 8, 4, a —. Dreht sich die Trommel weiter, so wird der Strom von d und b nach aussen geleitet; dann sind aber 3 und 4 positiv, 7 und 8 negativ geworden, so dass wir haben: — d, 8, 4, a, 1, 5, b +, + b, 3, 7; c, 6, 2, d —.

An der einen Bürste haben wir also fortdauernd den positiven Pol, an der anderen den negativen. Das Schema lässt auch bei vielen Spulen, wo die Verbindung der Spulen mit den Kollektorstücken nur schwer zu übersehen ist, das Gesetz leicht erkennen. So wäre für 8 Spulen mit den Enden 1 und 9, 2 und 10 u. s. w. und den Kollektorstücken a bis h das Schema

$$\begin{aligned} & - a, 1, 9, b, 3, 11, c, 5, 13, d, 7, 15, e + \\ & + e, 10, 2, f, 12, 4, g, 14, 6, b, 16, 8, a - \end{aligned}$$

Es muss stets eine grade Zahl von Spulen vorhanden sein.

§ 332. Wesentlich einfacher und übersichtlicher ist die Einrichtung der Grammeschen Maschine: Zwischen den Polen N und S des Elektromagneten rotiert ein Eisenring AA, auf welchen eine grosse Anzahl von Drahtspulen, in der Fig. 226 deren 8, geschoben sind, von welchen je zwei benachbarte mit einander und einem isolierten Stück des Kollektors verbunden sind. Rotiert der Eisenring, so entstehen in demselben stets Pole in der Nähe von N und S, die sich also durch die Rotation scheinbar im Ringe weiter schieben und durch die Spulen wandern. In diesen werden daher Ströme erzeugt, welche in allen Spulen oberhalb der neutralen Linie BB nach einer Richtung laufen, in allen anderen Spulen nach entgegengesetzter Richtung, wie die Pfeile in der Figur andeuten. Berühren wieder zwei Bürsten die Kollektorstücke, welche sich grade in der neutralen Linie befinden, so werden, wie man aus

der Figur leicht erkennt, die Ströme aller Spulen von a durch die Elektromagnete und die äussere Leitung nach b geführt. Der Grammesche Ring liefert also gleichgerichtete Ströme.

Ausser den beiden beschriebenen und vielen ähnlichen Gleichstrommaschinen werden noch Wechselstrommaschinen gebaut, auf deren Beschreibung wir hier nicht eingehen können.

§ 333. Sowohl bei den magnet-elektrischen, als bei den dynamoelektrischen Maschinen hängt die Stromstärke oder die

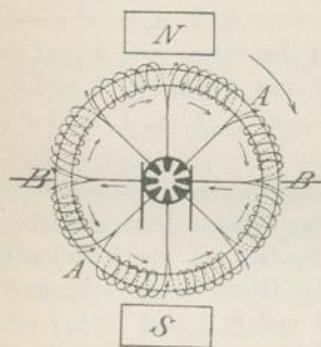


Fig. 226.

elektromotorische Kraft von der Umdrehungsgeschwindigkeit ab, ist dieser im ganzen proportional. Die Arbeit, welche zur Drehung verbraucht wird, ist dem Widerstande der Leitung und dem Quadrat der Stromstärke proportional, also derselben Grösse, welche die im Stromkreis entwickelte Wärme repräsentiert. Diese Arbeit entsteht dadurch, dass nach dem Lenzschen Gesetz die Induktionsströme der Bewegung widerstehen, nach dem Ampèreschen Gesetz um so mehr, je stärker das magnetische Feld und der

Induktionsstrom ist; schon daraus erkennt man, dass die Arbeit zur Ueberwindung dieses Widerstandes dem Quadrat der Intensität proportional sein muss, da ja das magnetische Feld durch den Induktionsstrom selbst geschaffen wird, also auch seiner Intensität proportional sein muss (§ 308).

Bei den Dynamomaschinen tritt ein eigentümlicher Uebelstand ein: vergrössert man den äusseren Widerstand, so wird dadurch die Stromstärke nicht nach dem Ohmschen Gesetze geschwächt, sondern viel stärker; denn derselbe Strom stellt ja die Magnete her, die also auch schwächer werden und daher schwächeren Strom induzieren. Man hat dem so abzuhelpen gewusst, dass man den von den Bürsten kommenden Strom verzweigt, einen Teil nur um die Elektromagnete fließen lässt, den anderen Teil in die äussere Leitung führt. Oder man verbindet mit der eigentlichen Maschine eine zweite kleinere, deren Strom nur um die Elektromagnete der grösseren fliesst, diese also in konstanter Weise magnetisiert, während der Strom der grösseren Maschine ganz für die äussere Leitung verwandt wird.

Führt man den Bürsten einer Dynamomaschine Strom zu, so beginnt ihre Trommel zu rotieren in entgegengesetzter Richtung, als sie bei Erzeugung des Stromes rotiert haben würde. Verbindet man daher zwei Maschinen, deren erste man durch einen Motor treibt, so erzeugt man hier Strom durch Arbeit, während die zweite Maschine durch den Strom in Bewegung kommt und wieder Arbeit leisten kann. Man nennt dies elektrische Kraftübertragung; Versuche haben gezeigt, dass sich auf weite Entfernung über 50 % der Kraft übertragen lassen, während der Rest durch Wärmeentwicklung in der Leitung und Reibung in den Maschinen verloren geht.

e) Die elektrischen Masseinheiten.

§ 334. Wir haben gesehen, dass für alle physikalischen Grössen die Messung zweckmässig auf die absoluten Einheiten, Centimeter, Gramm, Sekunde, zurückgeführt wird, und dass man auf diese Weise eine absolute Einheit der betreffenden Grösse definieren kann. Für die elektrischen Grössen haben wir diese Einheiten bisher noch nicht besprochen, weil sich sämtliche Einheiten übersichtlicher zusammen behandeln lassen.

Seit die Elektrizität in ihrer technischen Anwendung so grossen Aufschwung genommen hat und Handelsartikel geworden ist, hat sich die Notwendigkeit herausgestellt, gesetzliche Maße festzustellen, ebenso wie es mit Länge und Gewicht längst geschehen ist. Diese Festsetzungen fanden auf einem internationalen Elektriker-Kongress zu Paris im Jahr 1881 statt. Die absoluten Einheiten erwiesen sich für die Praxis vielfach als unbequem gross oder klein; man multipliziert sie daher mit positiven oder negativen Potenzen von 10, und gab den so gewonnenen praktischen Einheiten Namen, die wir in folgendem ebenfalls berücksichtigen müssen.

§ 335. Die Lehre von der Elektrizität teilt sich in 2 Kapitel, in die Elektrostatik, welche die Wirkungen ruhender Elektrizität betrachtet, und in den Galvanismus, der sich mit strömender Elektrizität beschäftigt. Man kann aus den Erscheinungen beider Abschnitte Einheiten definieren, von welchen aber die ersteren praktisch geringe Wichtigkeit haben. Diese elektrostatischen Einheiten sind bereits in dem betreffenden Abschnitte definiert, mögen aber hier noch einmal zusammengestellt werden.

Die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge

ist diejenige, welche auf eine gleichgrosse Menge im Abstand 1 die Kraft 1 ausübt (§ 242). Die Dimension ergibt sich nach dem Coulombschen Gesetz zu $[M^{1/2}L^{3/2}T^{-1}]$.

Wir sahen (§ 243), dass das elektrische Potential gegeben ist durch $P = \frac{m}{r}$. Einheit des elektrostatischen Potentials übt also die Elektrizitätsmenge 1 auf einen Punkt im Abstände 1, die Dimension ist $[M^{1/2}L^{1/2}T^{-1}]$.

Die elektrostatische Kapazität eines Körpers ist der Quotient aus einer Elektrizitätsmenge und dem Potential, welches der Körper durch sie erhält (§ 252). Einheit der Kapazität hat der Leiter der durch die Elektrizitätsmenge 1 das Potential 1 erhält, also z. B. eine Kugel vom Radius = 1 *cm*. Die Dimension ist [L].

Die Dichte und Oberflächenspannung sind in § 252 definiert; ihre Dimensionen sind:

$$\text{Dichte} = [M^{1/2}L^{-1/2}T^{-1}]; \text{Oberflächenspannung} = [ML^{-1}T^{-2}].$$

Die Intensität des elektrischen Feldes (vgl. die Intensität des magnetischen Feldes, § 230) ist die Kraft, welche auf die Elektrizitätsmenge 1 im Felde wirkt, ihre Dimension ist

$$= \frac{\text{Kraft}}{\text{Elektrizitätsmenge}} = [M^{1/2}L^{-1/2}T^{-1}].$$

Das spezifische Induktionsvermögen oder die Dielektrizitätskonstante (§ 250) ist eine Zahl.

Auch die Stromstärke oder Intensität lässt sich definieren; die Einheit der elektrostatischen Intensität ist vorhanden, wenn die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge in der Zeiteinheit durch den Querschnitt fliesst; die Dimension ist $[M^{1/2}L^{3/2}T^{-2}]$.

§ 336. Weit wichtiger sind die Einheiten, welche bei strömender Elektrizität in Betracht kommen:

1. Für die Intensität konnten wir die chemische Wirkung, die Elektrolyse, benutzen; so entstand z. B. die Jakobische Einheit (§ 270), die aber keine absolute ist. Eine solche ergab sich aus der elektromagnetischen Wirkung des Stromes (§ 312): ein Strom von der Länge l , der Intensität I , übt auf die magnetische Masse μ , die um die Länge L senkrecht zur Richtung des Stromes absteht, die Kraft $K = \text{Const} \frac{II\mu}{L^2}$. Die Einheit der Stromstärke, welche

wir elektromagnetische oder Webersche Einheit nennen, erhalten wir, wenn wir $l = 1$, $L = 1$, $\mu = 1$, $K = 1$ Dyne setzen, oder wir können sagen: die Einheit hat der Strom, welcher auf die magnetische Masse 1 die Kraft $\frac{1}{L^2}$ ausübt.

Die Dimension ist

$$I = \frac{KL^2}{\mu l} = \frac{\text{Kraft} \times (\text{Länge})^2}{\text{magnet. Masse} \times \text{Länge}} = [M^{1/2} L^{1/2} T^{-1}].$$

Statt dessen können wir auch, wenn wir die Wirkung eines Kreisstromes auf eine in seiner Mitte liegende kurze Magnetnadel betrachten (§ 312) sagen: die Einheit der Intensität hat der Strom, welcher im Kreise vom Radius 1 fließend auf eine Magnetnadel vom Moment 1 das Drehungsmoment 2π ausübt.

Ein Strom von der Intensität 1 zersetzt in 1 Sekunde 0,000942 *g* Wasser und befördert 3×10^{10} elektrostatische Einheiten durch den Querschnitt.

Für die Praxis ist diese Einheit zu gross; man nimmt 0,1 davon und nennt diese praktische Einheit der Intensität 1 Ampère. 1 Ampère ist gleich 0,0948 der früher definierten Jakobischen Einheit der Intensität.

2. Die absolute Einheit der Elektrizitätsmenge ergibt sich ohne weiteres aus der Intensität: der Strom mit der Intensität 1 fließend befördert in 1 Sekunde die Einheit der Elektrizitätsmenge. Dann folgt: der Strom mit der Intensität i befördert in der Zeit t die Menge $m = it$ durch den Querschnitt der Leitung. Daher ist die Dimension der Elektrizitätsmenge

$$m = it = [M^{1/2} L^{1/2}].$$

Die praktische Einheit der Elektrizitätsmenge heisst 1 Coulomb; sie wird durch 1 Ampère in 1 Sek. durch den Querschnitt befördert, zersetzt 0,000094 *g* Wasser, scheidet 0,00033 *g* Kupfer oder 0,00112 *g* Silber aus.

3. Zur Definition der elektromotorischen Kraft werden die Erscheinungen der Induktion benutzt: Es sei an einem Ort die magnetische Intensität H vorhanden; senkrecht zu den Kraftlinien liege ein Stromleiter von der Länge l , der mit der Geschwindigkeit v verschoben wird senkrecht gegen die Ebene, welche sich durch l und die Kraftlinien legen lässt. Dann entsteht ein Induktionsstrom, dem die elektromotorische Kraft e entspricht: $e = klHv$

(vgl. § 318). Nun definieren wir die absolute Einheit der elektromotorischen Kraft so, dass der Proportionalitätsfaktor $k = 1$ wird, d. h. wir nennen diejenige elektromotorische Kraft die Einheit, welche in einem Leiter von der Länge 1 induziert wird, wenn er sich in einem magnetischen Felde von der Intensität 1 mit der Geschwindigkeit 1 in der angegebenen Richtung bewegt. Daraus ergibt sich die Dimension, da $H = [M^{1/2} L^{-1/2} T^{-1}]$ nach § 230, zu

$$e = [LM^{1/2} L^{-1/2} T^{-1} L T^{-1}] = [M^{1/2} L^{3/2} T^{-2}].$$

Die absolute Einheit ist für die Praxis viel zu klein; als praktische Einheit der elektromotorischen Kraft, welche man 1 Volt nennt, nimmt man das 10^8 fache der absoluten Einheit.

1 Volt ist etwa 0,89 Daniell, also die elektromotorische Kraft von 1 Daniell = 1,12 Volt, von 1 Bunsen = 1,92 Volt.

4. Absolute Einheit und Dimension des Widerstandes ergibt sich aus dem Ohmschen Gesetz: $w = \frac{e}{i}$; also die absolute Einheit des Widerstandes hat der Leiter, in welchem die absolute Einheit der elektromotorischen Kraft die Webersche Intensitätseinheit hervorbringt.

$$\text{Die Dimension ist: } w = \frac{e}{i} = \frac{[M^{1/2} L^{3/2} T^{-2}]}{[M^{1/2} L^{1/2} T^{-1}]} = [T^{-1}].$$

Die praktische Einheit des Widerstandes heisst Ohm; derjenige Leiter besitzt sie, in welchem 1 Volt die Intensität 1 Ampère erzeugt.

Da 1 Volt = 10^8 , 1 Ampère = 0,1 absolute Einheiten, so folgt $1 \text{ Ohm} = \frac{10^8}{0,1} \frac{cm}{sec} = \frac{10^9}{1} \frac{cm}{sec} = \frac{1 \text{ Erdquadrant}}{sec}$. Der Widerstand ergibt sich daher als Geschwindigkeit, und zwar entspricht dem Ohm eine solche, bei welcher der Erdquadrant in 1 sec durchlaufen wird.

1 Ohm ist = 1,06 Siemenschen Einheiten, d. h. das Ohm ist gleich dem Widerstande einer Quecksilbersäule von 1 mm Querschnitt, 106 cm Länge bei 0° .

5. Aus diesen Einheiten sind noch einige andere abgeleitet und bezeichnet worden:

Die praktische Einheit der Kapazität, welche Farad genannt wird, hat ein Leiter, welcher durch Zuführung von 1 Cou-

lomb das Potential 1 Volt erhält. Da diese Einheit viel zu gross ist, rechnet man nach dem millionsten Teil derselben, welcher Mikrofarad genannt wird.

Endlich sei erwähnt, dass auch eine neue Einheit der Arbeit und des Effektes (§ 59) eingeführt worden ist.

Nehmen wir nämlich statt g , cm , sec als neue absolute Einheiten $m = 10^{-11} g$, $C = 10^9 cm$, sec , so würden sich daraus die praktischen elektrischen Einheiten als absolute ergeben, z. B.

1 Ohm = $\frac{1C}{sec}$, 1 Volt = $m^{1/2} C^{3/2} T^{-2}$; denn für letzteres haben wir

$$\begin{aligned} 1 \text{ Volt} &= (10^{-11})^{1/2} g^{1/2} (10^9)^{3/2} cm^{3/2} sec^{-2} \\ &= \frac{10^{27/2}}{10^{11/2}} g^{1/2} cm^{3/2} sec^{-2} = 10^8 g^{1/2} cm^{3/2} sec^{-2}. \end{aligned}$$

Führt man nun in die Dimension der Arbeit $[ML^2T^{-2}]$ diese neuen absoluten Einheiten ein, so erhält man

$$(10^{-11}) g (10^9)^2 cm^2 sec^{-2} = 10^7 g cm^2 sec^{-2} = 10^7 \text{ Erg.}$$

Diese neue Arbeitseinheit, welche gleich 10 Millionen Erg ist, wird Joule genannt, und die Einheit des Effektes muss sein: 1 Joule oder 10^7 Erg in der Sekunde; dies wird 1 Watt genannt.

1 Joule ist = $\frac{1}{10g}$ Kilogramm-meter (da $\text{Erg} = \frac{10^{-8}}{g}$ Kilogramm-meter ist), oder angenähert = 0,102 Kilogramm-meter; 1 Watt ist daher = $\frac{1}{750g}$ Pferdekraft = 0,00136 Pferdekraft.

Wir sahen, dass die Arbeit eines Stromes gemessen wird durch das Produkt aus elektromotorischer Kraft mal Stromstärke, Volt \times Ampère. Ein Strom von 1 Ampère bei 1 Volt fließend leistet daher 1 Joule.

Aus den Einheiten werden durch Vorsetzung von Mega- oder Mikro- andere abgeleitet, welche 10^6 mal grösser oder kleiner sind. So bedeutet 1 Megohm den Widerstand von 10^6 Ohm, ein Mikroampère die Intensität von 10^{-6} Ampère.

Die elektrostatischen und die elektromagnetischen Einheiten haben verschiedene Dimensionen; so ist die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge $[M^{1/2} L^{3/2} T^{-1}]$, die elektromagnetische $[M^{1/2} L^{1/2}]$. Das Verhältnis beider Dimensionen ist also $[LT^{-1}]$, d. h. eine Geschwindigkeit, die wir v nennen wollen. Ebenso ergibt sich als

Verhältnis der Intensitäten v , der Potentiale $\frac{1}{v}$, der Widerstände v^2 u. s. w. Es lässt sich zeigen, dass diese Geschwindigkeit einen ganz bestimmten Wert hat, welcher mehrfach, zuerst durch W. Weber und R. Kohlrausch bestimmt worden ist und sich zu $300\,000 \frac{km}{sec}$, also gleich der Lichtgeschwindigkeit ergab. Clausius hat diese Geschwindigkeit die kritische Geschwindigkeit genannt¹⁾.

¹⁾ Zum eingehenden Studium der Elektrizität seien folgende Spezialwerke genannt:

Faraday, Experimental researches in Electricity.

Maxwell, Treatise on Electricity and Magnetism, Oxford 1873, deutsch von Weinstein, Berlin 1883.

Wiedemann, Lehre von der Elektrizität.

Mascart und Joubert, deutsch von Levy, Berlin 1888.

Wallentin, Einleitung in die moderne Elektrizitätslehre, Stuttgart 1892.

Cohn, Das elektromagnetische Feld, Leipzig 1900.