



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der Experimentalphysik

Lommel, Eugen von

Leipzig, 1908

VIII. Elektrische Ströme.

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83789](https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:466:1-83789)

VIII. Elektrische Ströme.

196. **Entladungsströme. Konstante Ströme.** Wenn man zwei Leiter von verschiedenem elektrischen Potential durch einen Draht oder eine feuchte Schnur miteinander verbindet, so gleichen sich die elektrischen Ladungen durch den Draht hindurch so lange aus, bis beide Leiter das gleiche Potential erlangt haben. Verbindet man z. B. eine isolierte geladene Kugel mit der Erde, so verschwindet ihre Ladung, indem sie sich der unendlich viel größeren Erde mitteilt, und die Kugel nimmt das Potential der Erde an. Die kurze Zeit des Überganges aus dem ersten in den neuen Gleichgewichtszustand ist dadurch charakterisiert, daß während dieser Zeit die elektrische Ladung durch den Draht hindurch sich ausgleicht; man sagt, die Elektrizität strömt während dieser Zeit durch den Draht, oder ein elektrischer Strom fließt in dem Draht. Seine Ursache ist offenbar die ursprüngliche Potentialdifferenz zwischen den beiden Körpern, die man verbunden hat. Da man sich diesen Zustand des Ausgleichs unter dem Bilde einer Bewegung der Elektrizitäten vorstellt, so bezeichnet man die wirkende Potentialdifferenz auch als die treibende Kraft dieser Bewegung oder als **elektromotorische Kraft**.

Da nun der Strom dadurch entsteht, daß die elektrische Ladung durch den Draht hindurch abfließt, so vermindert sich infolge des Stromes die Ladung und mit ihr das Potential der isolierten Kugel, und der Strom erlischt nach kurzer Zeit. Wenn man dagegen die Kugel mit einer Elektrizitätsquelle, z. B. einer in dauernder Rotation befindlichen Influenzmaschine verbindet, so ersetzt die von der Elektrizitätsquelle zuströmende Elektrizität die abströmende, und man erhält einen dauernden Strom in dem zur Erde führenden Draht. Ersetzt man diesen durch einen schlechten Leiter (leinenes Band oder dergl.) von einiger Länge, so erfolgt der Ausgleich so langsam, daß die Elektrisiermaschine imstande ist, die Ladung und das Potential der Kugel auf ihrer ursprünglichen Höhe zu erhalten. Man kann dann mit Hilfe eines Elektroskops nachweisen, nicht nur daß zwischen der Kugel und der Erde trotz der leitenden Verbindung eine konstante Potentialdifferenz besteht, sondern auch daß längs des feuchten Leiters ein gleichmäßiges Herabsinken des Potentials von dem Werte auf der Kugel bis zu dem Werte 0 auf der Erde stattfindet. In diesem Falle besteht also in dem feuchten Leiter ein dauernder Ausgleichszustand oder ein konstanter elektrischer Strom.

Aber die elektrischen Ströme, die man auf diese Weise erhalten kann, sind viel zu schwach, um die eigentümlichen Wirkungen, die

ein stromführender Leiter ausübt, an ihnen leicht erkennen oder bequem vorführen zu können. Man hat auch die Eigenschaften der elektrischen Ströme nicht auf diesem Wege, von den Entladungserscheinungen statisch geladener Körper aus gefunden, sondern auf einem ganz anderen Wege, der an eine von Galvani gemachte Entdeckung anknüpfte. Aus diesem Grunde bezeichnet man den Teil der Elektrizitätslehre, der von den elektrischen Strömen und ihrer Entstehung handelt, auch häufig als Galvanismus.

197. **Galvanis Entdeckung.** Ludwig Galvani, Professor der Anatomie in Bologna, beobachtete eines Tages (6. Nov. 1780), daß enthäutete Froschschenkel jedesmal zusammenzuckten, wenn aus dem Konduktor einer nahen Elektrisiermaschine ein Funke gezogen wurde. Galvani glaubte in dieser Erscheinung eine Bestätigung seiner Lieblingsansicht von einer dem Tierkörper eigenen Elektrizität zu erblicken und widmete sich mit großem Eifer der weiteren Verfolgung der beobachteten Tatsache. Einmal hatte er mehrere Froschschenkel mittels Drahthaken an dem eisernen Geländer seines Balkons aufgehängt, um eine etwaige Einwirkung der Luftelektrizität zu prüfen, und sah jedesmal lebhafte Zuckungen eintreten, sobald er einen der Froschschenkel gegen das Eisengeländer bog. Er überzeugte sich, daß diese Erscheinung mit der Luftelektrizität nichts zu tun hatte, aber jedesmal eintrat, wenn er die Nerven oder das Rückenmark des Frosches mit den Muskeln durch einen Metallbogen verband. Galvani meinte, daß der Froschschenkel gleichsam als eine Leidener Flasche zu betrachten sei, deren entgegengesetzt elektrische Beladungen, nämlich der Nerv einerseits und die Muskeln andererseits, durch den Metallbogen sich entladen. Die von Galvani selbst bereits gemachte Bemerkung, daß die Zuckungen lebhafter auftreten, wenn der Metallbogen aus zwei verschiedenen Metallen besteht, veranlaßte jedoch Alexander Volta, Professor der Physik in Pavia, die Elektrizitätsquelle in dem Metallbogen statt in dem Froschschenkel zu suchen. Indem Volta die Elektrizitätsentwicklung im Tierkörper völlig leugnete, ging er freilich zu weit; denn später hat sich gezeigt, daß zwischen der Spitze und der Breitseite eines frisch präparierten Muskels elektrische Spannungsunterschiede bestehen (Du Bois-Reymond, 1848). Seine Ansicht führte ihn aber zu der wichtigen und folgenreichen Entdeckung, daß, wenn man zwei verschiedenartige Metalle miteinander, oder Metalle mit leitenden Flüssigkeiten in Berührung bringt, die beiden sich berührenden Körper entgegengesetzt elektrisch werden. Diese Art der elektrischen Erregung hat man deswegen die Berührungs- oder Kontakt-Elektrizität genannt.

198. **Voltascher Becher. Galvanisches Element.** Die Spannungsdifferenzen, die man auf diesem Wege erhält, sind sehr gering. Sie sind außerordentlich viel kleiner als die Spannungsdifferenzen, mit denen wir es bei den elektrostatischen Versuchen zu tun hatten. Aber der Froschschenkel ist so empfindlich gegen die schwächsten elektrischen Reize, daß er auch auf diese geringen Spannungsdiffe-

renzen lebhaft reagiert. Diesem Umstände verdanken wir die Entdeckung dieser geringfügigen Spannungsdifferenzen. Um sie aber auch mit den üblichen Mitteln der Elektrostatik nachzuweisen, bediente sich Volta des von ihm erfundenen, auf ein Elektroskop geschraubten Kondensators (180), um die elektrischen Ladungen, welche durch jene geringen Potentialdifferenzen hervorgebracht werden, durch Ansammlung zu verdichten. Ersetzt man den Froschschenkel durch ein angefeuchtetes Stück Filz oder Filtrierpapier, berührt man die eine Seite desselben mit einer Kupfer-, die andere mit einer Zinkplatte und setzt nun die Kupferplatte mit der einen, die Zinkplatte mit der anderen Platte des Kondensators auf kurze Zeit durch Drähte in Verbindung, so gibt das Elektroskop beim Abheben der Kondensatorplatte einen Ausschlag, und zwar von positiver Ladung, wenn das Kupfer, von negativer, wenn das Zink mit der unteren Platte des Kondensators in Verbindung gebracht war. Durch die Berührung mit der Kupfer- und der Zinkplatte hatten sich die beiden Belegungen des Kondensators bis zu einer gewissen aber kleinen Potentialdifferenz geladen. Dabei hatten sich die gegenüberliegenden Flächen der Kondensatorplatten mit positiven und negativen sich gegenseitig bindenden Elektrizitätsmengen belegt. Beim Abheben der oberen Platte wird die Elektrizität der unteren frei und bringt die Blättchen des Elektroskops zum Ausschlag. Statt die beiden Metallplatten mit einem angefeuchteten Stoff in Berührung zu bringen, kann man sie einfacher und bequemer in ein Gefäß mit Wasser oder verdünnter Schwefelsäure eintauchen. Eine solche Vorrichtung nennt man einen Voltaschen Becher oder ein galvanisches Element. Die aus der Flüssigkeit herausragenden Enden der Metalle nennt man die Pole des Elements, und bezeichnet entsprechend dem Sinne der zwischen ihnen bestehenden Potentialdifferenz den Kupferpol als den positiven, den Zinkpol als den negativen Pol des Elements.

Die Potentialdifferenz zwischen den Polen ist unabhängig von der Größe der Berührungsfläche zwischen Metall und Flüssigkeit und den sonstigen Dimensionen des Elements; sie ist gleich groß, ob man die Metalle in Form von dünnen Drähten oder von breiten Platten in die Flüssigkeit eintaucht. Sie hängt nur von der stofflichen Natur der drei Körper ab, aus denen sich das Element zusammensetzt.

199. Sitz der elektromotorischen Kraft. Diese Differenz bleibt auch unverändert, wenn man das Element etwa auf isolierter Unterlage aufstellt und durch äußere Zufuhr von Elektrizität ladet. Dann steigt das Potential auf allen drei Bestandteilen; aber die Differenz des Potentials zwischen ihnen bleibt die gleiche. Da jeder Bestandteil als ein Leiter auf konstantem Potentiale ist, solange die Elektrizitäten im Gleichgewichtszustande sind, so bestehen offenbar Potentialsprünge an den Berührungsflächen der Metalle mit der Flüssigkeit. Hier sind Kräfte wirksam, die entgegengesetzte Elektrizitäten nach den beiden verschiedenen Seiten der Trennungsfläche treiben, solange, bis diesen

Kräften durch das Bestreben der getrennten Ladungen, sich wieder zu vereinigen, das Gleichgewicht gehalten wird. So entsteht an jeder Berührungsfläche eine bestimmte Potentialdifferenz, die als Maß jener treibenden elektromotorischen Kräfte genommen werden kann. Die Spannungsdifferenz an den Polen des Elements aber ist dann die algebraische Summe der Potentialsprünge an den verschiedenen Berührungsflächen. Doch müssen wir berücksichtigen, daß auch zwischen den verschiedenen Metallen eine Potentialdifferenz bestehen kann. Verbinden wir den Kupfer- und Zinkpol durch kupferne Drähte mit den Platten des Kondensators, so ist die ganze Potentialdifferenz an den Enden dieser Drähte die Summe der drei Potentialdifferenzen Kupfer/Zink + Zink/Flüssigkeit + Flüssigkeit/Kupfer.

Volta bemühte sich, und nach ihm viele andere, die einzelnen Potentialdifferenzen zwischen zwei Körpern nachzuweisen und zu messen, vor allem die Potentialdifferenz zwischen zwei sich berührenden Metallplatten. Er bediente sich auch hierbei seines Kondensator-Elektroskops. Aber die Deutung, die Volta den Resultaten dieses unter dem Namen des Voltaschen Fundamentalversuches bekannten Versuches gegeben hat, wird heute nicht mehr anerkannt. Während Volta zu der Auffassung kam, daß die Spannungsdifferenz an den Polen seines Elements wesentlich durch den Potentialsprung zwischen den beiden Metallen bedingt sei, ist man heute ganz der gegenteiligen Ansicht. Über den Betrag der elektromotorischen Kraft zwischen zwei Metallen vermag man auch heute noch keine bestimmten Angaben zu machen, da es keine einwandfreien Methoden zu ihrer Messung gibt. Dagegen läßt sich die elektromotorische Kraft zwischen Metallen und Flüssigkeiten messen. Doch ergibt die Messung immer nur die algebraische Summe von mindestens zwei Potentialsprüngen, da man zur Ausführung der Messung die Flüssigkeit immer mit zwei verschiedenen Metallen in Berührung bringen muß. Den Wert der einzelnen Glieder dieser Summe, d. h. die Potentialsprünge der einzelnen Metalle gegen die Flüssigkeit oder die sog. Einzelpotentiale könnte man aus diesen Summen für alle Metalle berechnen, sobald es möglich wäre, den Wert eines einzigen Einzelpotentials zu ermitteln. Das ist jedoch bis jetzt in eindeutiger Weise noch nicht gelungen. Die Wirksamkeit der galvanischen Elemente beruht im wesentlichen auf den Potentialdifferenzen der Metalle gegen die Flüssigkeiten.

Die Versuche haben ergeben, daß die meisten Metalle, wenn sie in verdünnte Schwefelsäure getaucht werden, negativ elektrisch werden, die Säure positiv. Aber die Größe der entstehenden Potentialunterschiede ist für die verschiedenen Metalle sehr verschieden. Z. B. erlangt Zink eine viel stärkere negative Spannung als Kupfer gegen Schwefelsäure.

200. Voltasches Spannungsgesetz. Denkt man sich in der Voltaschen Kombination: Kupfer - Zink - Schwefelsäure - Kupfer den flüssigen Leiter durch ein drittes Metall ersetzt, so erhält man am Kondensator-Elektroskop keinen Ausschlag. Das gilt, welche Metalle man auch in dieser Weise miteinander kombinieren mag. Auch Kohle und einige Metalloxyde verhalten sich so. Wenn also zwischen den verschiedenen Metallen Spannungsdifferenzen bestehen, so sind sie jedenfalls so beschaffen, daß bei obiger Zusammenstellung ihre Summe gleich Null ist. Hat man drei Metalle, a , b , c , so ist also $a/b + b/c + c/a = 0$ oder $a/b + b/c = -c/a = +a/c$.

Volta hatte auf Grund seiner Messungen die Metalle in eine Reihe geordnet, in der jedes Metall in Berührung mit einem folgenden

positiv, mit einem vorhergehenden negativ elektrisch wird — Voltasche Spannungsreihe, die der Reibungsreihe (157) analog ist. Je weiter die Metalle in dieser Reihe auseinanderstehen, um so größer ist ihre Spannungsdifferenz. Gleichviel, wie groß nun diese Spannungsdifferenzen auch sein mögen, jedenfalls gilt der obige Satz, daß die Summe der Spannungsdifferenzen für beliebig viele hintereinander geschaltete Metalle gleich der Spannungsdifferenz zwischen dem ersten und letzten Metalle ist. Dieser Satz heißt das Voltasche Spannungsgesetz. Volta nannte diejenigen Stoffe, welche diesem Gesetz gehorchen, Leiter erster Klasse und im Gegensatz dazu die leitenden Flüssigkeiten (Wasser, Säuren, Alkalien, Salzlösungen), welche sich diesem Gesetze nicht fügen, Leiter zweiter Klasse. Verbindet man die Enden einer beliebigen Kombination von Leitern erster Klasse durch einen Metalldraht, so ist die Elektrizität auf diesem System trotz der Potentialdifferenzen zwischen seinen Teilen im Gleichgewicht und man erhält keinen Strom. Doch gilt dieser Satz nur, wenn die Berührungsstellen der einzelnen Teile sich sämtlich auf derselben Temperatur befinden. Verbindet man dagegen die Enden eines Voltaschen Bechers durch einen Draht, so erhält man einen elektrischen Strom.

201. Voltasche Säule. Man mag noch so viele Plattenpaare aus Metallen (Leitern erster Klasse) aufeinander schichten, so wird die Potentialdifferenz zwischen den Endplatten vermöge des Spannungsgesetzes doch immer dieselbe bleiben, als wenn die Endplatten sich unmittelbar berührten. Indem Volta auch Flüssigkeiten (Leiter zweiter Klasse) zu Hilfe nahm, gelang es ihm, die schwache elektromotorische Wirkung bis zu hohen Potentialdifferenzen zu steigern.

Legt man auf eine isolierte Kupferplatte eine mit verdünnter Schwefelsäure getränkten Scheibe von Pappe oder Filz, und darauf eine Zinkplatte, so sind an den Berührungsflächen der Metalle mit der Flüssigkeit elektromotorische Kräfte tätig, deren jede negative Elektrizität auf das Metall, positive Elektrizität in die Flüssigkeit und das damit leitend verbundene andere Metall treibt. Da aber die elektrische Erregung zwischen Zink und Schwefelsäure größer ist als zwischen Kupfer und Schwefelsäure, so wird der Kupferplatte von der Zinkfläche her mehr positive Elektrizität zugeführt, als sie negative vermöge ihrer eigenen Berührung mit der Schwefelsäure aufnimmt, und in der Zinkplatte wird in demselben Betrage mehr negative Elektrizität erregt, als positive von der Kupferfläche her auf sie übergegangen ist. Die Kupferplatte wird also jetzt positiv, die Zinkplatte ebensostark negativ geladen sein mit einer Spannungsdifferenz, welche gleich dem Unterschied der elektromotorischen Kräfte Kupfer-Schwefelsäure und Zink-Schwefelsäure, oder was dasselbe ist, gleich der Summe Kupfer-Schwefelsäure und Schwefelsäure-Zink ist.

Man kann nun die elektromotorische Wirkung, welche bei einem Plattenpaar nur gering ist, zu hohen Potentialdifferenzen steigern, wenn man, wie Volta (1800) getan hat, viele Elemente immer in der

nämlichen Reihenfolge Kupfer-Flüssigkeit-Zink zu einer Säule aufeinander schichtet. In jedem Elemente ist nämlich die gleiche elektromotorische Kraft wirksam und treibt die von ihr erregten Elektrizitäten nach entgegengesetzten Seiten, die positive auf alle nach dem Kupferende zu, die negative auf alle nach dem Zinkende zu gelegenen Platten. Die Endplatten müssen daher einen Spannungsunterschied erreichen, der im Verhältnis der Anzahl der Elemente vervielfacht ist, und zwar wird das Kupferende positiv, das Zinkende ebensostark negativ elektrisch sein, während die Mitte der Säule unelektrisch ist, weil hier von beiden Seiten gleichgroße, aber entgegengesetzte Spannungen zusammentreffen.

Die Fig. 164 zeigt die Volatasche Säule in ihrer ursprünglichen Gestalt; sie ist zwischen Glasstäben aufgebaut, die in gefirnißte Holzplatten *a* und *b* eingelassen sind. Die beiden Enden der Säule nennt man ihre Pole, und zwar ist das Kupferende der positive, das Zinkende der negative Pol. Befestigt man (Kupfer-)Drähte an den Endplatten, so erscheinen die Pole an die Enden dieser Drähte (Elektroden) verlegt. Solange die Drähte nicht miteinander in Berührung gebracht werden, ist die Säule offen und zeigt elektrometrisch meßbare Spannungserscheinungen. Ist V die von einem Element hervorgebrachte Potentialdifferenz, und n die Anzahl der Plattenpaare, so ist nV die Potentialdifferenz der ganzen Säule; wird ihr eines Ende nach der Erde abgeleitet, d. i. auf das Potential Null gebracht, so hat das andere Ende das Potential $\pm nV$, und in der Mitte der Säule ist das Potential $\pm \frac{1}{2}nV$. Wird die mittelste Platte der Säule mit der Erde verbunden, so ist das Potential am positiven Pol $+\frac{1}{2}nV$, am negativen $-\frac{1}{2}nV$, also der Potentialunterschied wiederum nV . Diese Potentialdifferenz bleibt unverändert, wie man auch die Potentialwerte der Pole selbst, etwa durch Zuleitung von Elektrizität von außen her, abändern mag.

202. Die trockene oder Zambonische Säule (Ritter, 1802; Behrens, 1806; Zamboni, 1812) ist eine Volatasche Säule von sehr vielen (1000—2000) Plattenpaaren, in welcher lufttrockenes Papier die Stelle der feuchten Filzscheiben, unechte Vergoldung (Kupferbronze) und unechte Versilberung (Zinn) die Stelle der Metalle Kupfer und Zink vertritt. Um eine trockene Säule zu vervollständigen, werden Blätter von Gold- und Silberpapier mit der Papierseite zusammengeklebt, Scheiben daraus geschnitten, diese in einer Glasröhre dicht aufeinandergeschichtet, so daß die Zinnseite jeder Scheibe auf die Kupferseite der vorhergehenden zu liegen kommt, und die Glasröhre durch aufgekittete Messingfassungen geschlossen. Die im lufttrockenen Papier noch immer festgehaltene Feuchtigkeit wirkt auf die Metalle in derselben Weise elektrisch erregend wie die Flüssigkeit in einer gewöhnlichen Volataschen Säule; die Enden oder Pole der isolierten Säule laden sich daher bis zu einem der Anzahl der Plattenpaare proportionalen Spannungsunterschied mit entgegengesetzten Elektrizitäten, das Kupferende positiv, das Zinnende negativ.

Da die in jedem Plattenpaar unausgesetzt wirksame elektromotorische Kraft diesen Spannungsunterschied aufrecht erhält und die etwa entzogene Elektrizität sofort wieder ersetzt, so bleiben die Pole viele Jahre lang mit unverminderter Stärke entgegengesetzt elektrisch. In der Fig. 165 ist eine wagrecht liegende trockene Säule dargestellt, deren Pole mittels der Leitungsdrähte c und d nach den Platten a und b verlegt sind, von denen demnach die eine stets positiv, die andere ebensostark negativ elektrisch ist. Über die beiden Polplatten ist eine Glasglocke gestülpt, von deren Wölbung, an einem oben mit einer Kugel versehenen Messingstäbchen befestigt, ein schmales Goldblättchen zwischen die Pole herabhängt. Ein solches Instrument ist ein sehr empfindliches Elektroskop (Säulenelektroskop; Behrens 1806, Bohnenberger 1817, Fechner 1829). Erteilt man dem Goldblatt auch nur eine schwache Ladung, so wird es von dem gleichnamigen Pole der Säule abgestoßen, von

dem ungleichnamigen angezogen und schlägt, je nach dem Vorzeichen seiner Ladung, nach der einen oder der anderen Seite aus. Auch bei dem Quadrantenelektrometer (188) kann die trockene Säule Verwendung finden, um die Nadel des Instruments auf ein konstantes hohes Potential zu bringen.

203. Bechersäule.

Galvanische Batterie.

Da der Aufbau einer Säule mit feuchten Filz-

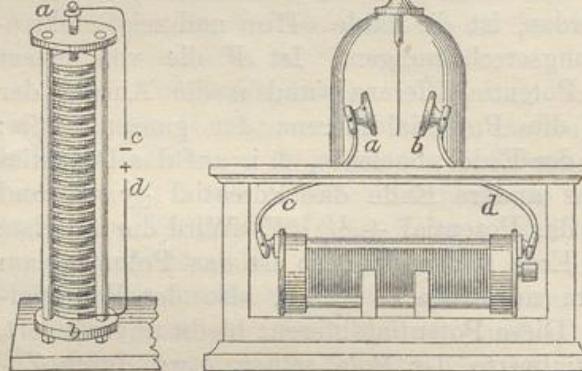


Fig. 164.
Voltaische Säule.

Fig. 165.
Säulenelektroskop.

oder Pappsscheiben mancherlei Übelstände mit sich führt, so kommt die Voltaische Säule in ihrer ursprünglichen Gestalt gegenwärtig nicht mehr zur Verwendung. In derselben Weise aber, wie in der Voltaischen Säule viele Elemente aus Kupfer-, Filz- und Zinkplatten aufeinander geschichtet sind, um an den Enden der Säule eine höhere Spannungsdifferenz zu erzielen, kann man eine größere Anzahl von Voltaischen Bechern oder galvanischen Elementen „hintereinander schalten“, indem man den Zinkpol des einen Bechers mit dem Kupferpol des nächsten Bechers durch einen Draht oder Streifen von Kupfer verbindet, zu welchem Zweck die Platten gewöhnlich mit Klemmschrauben versehen sind (Bechersäule, Fig. 166). Eine solche Verbindung mehrerer oder vieler galvanischer Elemente nennt man eine galvanische Batterie. Die Spannungsdifferenz an den Enden einer solchen Batterie ist ebenso wie bei der Säule nV , wenn n die Anzahl der Elemente und V die Spannungsdifferenz des einzelnen

Elements ist. Eine aus zahlreichen Elementen von Kupfer und Zink in gewöhnlichem Wasser zusammengestellte „Wasserbatterie“ eignet sich ebenso wie die Zambonische Säule zur Ladung des Quadrantalektrometers.

204. **Der elektrische (galvanische) Strom.** Werden die Drahtenden (Elektroden) der Voltaischen Säule oder der galvanischen Batterie miteinander in Berührung gebracht und hiermit die Säule geschlossen, so gleichen sich die auf den Endplatten der offenen Säule angehäuften Elektrizitäten durch den nunmehr hergestellten Schließungsbogen aus, indem positive Elektrizität von dem Kupferende der Säule durch den Schließungsdraht nach dem Zinkende und ebensoviel negative von dem Zinkende nach dem Kupferende strömt. Man kann die Tatsache dieses Ausgleichs in derselben Weise wie bei der Entladung einer Batterie von Leidener Flaschen, durch die dabei entstehende Wärmeentwicklung nachweisen, indem man die Enden der Batterie durch ein Stück eines passend gewählten dünnen Drahtes verbindet. Man erhält dann ein Glühen des Drahtes, aber nicht ein kurz vorübergehendes, wie bei der Entladung einer Flaschenbatterie, sondern ein dauerndes, das uns das Bestehen eines dauernden elektrischen Ausgleichs in dem Drahte anzeigt. Dieser elektrische oder galvanische Strom fließt dauernd und stetig, weil die in den Elementen der Säule tätigen elektromotorischen Kräfte in ihrem Bestreben, die Spannungsunterschiede aufrecht zu erhalten, unausgesetzt positive Elektrizität nach dem Kupferende, negative nach dem Zinkende und von hier aus durch den Schließungsdraht treiben; die geschlossene Säule selbst wird also ebenfalls von dem elektrischen Strom durchflossen und bildet daher mit dem Schließungsbogen zusammen einen ununterbrochenen Schließungskreis, in welchem sich schon in sehr kurzer Zeit nach erfolgter Schließung ein stationärer Bewegungszustand derart herstellt, daß durch jeden Querschnitt des Schließungskreises in gleicher Zeit gleichgroße Mengen entgegengesetzter Elektrizitäten in entgegengesetzter Richtung hindurchgehen. Man nennt die Elektrizitätsmenge, welche in 1 Sekunde durch einen beliebigen Querschnitt des Schließungskreises geht, Stromstärke, und bezeichnet als Stromrichtung diejenige Richtung, in welcher die positive Elektrizität fließt. Man sagt also: der galvanische Strom fließt im Schließungsdraht vom Kupferpol zum Zinkpol, in der Säule dagegen vom Zink zum Kupfer.

205. **Andere Formen der galvanischen Elemente.** Das Voltaische Element ist zur Erzeugung elektrischer Ströme nicht gut geeignet, weil die chemischen Prozesse, die beim Durchgange des Stromes im Element auftreten, seine Wirksamkeit schwächen (s. 216). Man

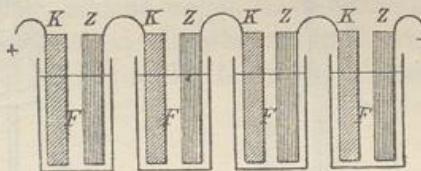


Fig. 166.
Bechersäule.

bedient sich daher zur Stromerzeugung anders zusammengesetzter Elemente, von denen wir die wichtigsten im folgenden beschreiben; die Gründe für die bessere Wirksamkeit dieser Elemente werden wir später (216) kennen lernen.

Das sehr bequeme und für sich allein schon kräftig wirksame von Bunsen angegebene Flaschenelement (Fig. 167) enthält zwei miteinander leitend verbundene Platten von Gaskohle (Retortenkohle),



Fig. 167.
Flaschenelement.

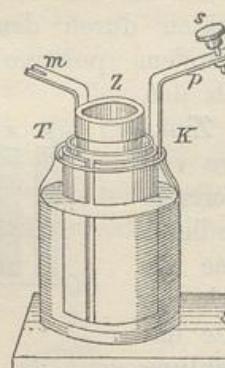


Fig. 168.
Daniellsches Element.

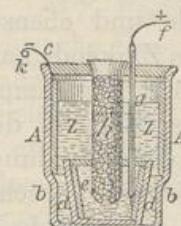


Fig. 169.
Meidingersches Element.

welche in eine Chromsäurelösung (oder in ein Gemisch von Kaliumbichromat und Schwefelsäure) tauchen, die den bauchigen Teil eines flaschenförmigen Gefäßes ausfüllt; zwischen beiden befindet sich eine Zinkplatte, welche mittels eines durch den Deckel des Gefäßes gehenden Messingstabes beim Gebrauch in die Flüssigkeit hinabgeschoben wird; von zwei auf dem Deckel angebrachten messingenen Klemmschrauben, welche zur Aufnahme der Poldrähte bestimmt sind, ist die eine mit den beiden Kohlenplatten, die andere mit der Zinkplatte verbunden. Bei der Bunsenschen Chromsäure-Tauchbatterie sind die Plattenpaare (Kohle und Zink) an einem gemeinsamen Holzrahmen befestigt, mittels dessen sie gleichzeitig in die darunterstehenden Glasgefäße mit Chromsäureflüssigkeit eingesenkt werden können.

Das Daniellsche Element (1836, Fig. 168) besteht aus Zink in verdünnter Schwefelsäure oder Zinksulfatlösung und Kupfer in einer gesättigten Lösung von Kupfervitriol (Kupfersulfat); die verdünnte Schwefelsäure befindet sich in einem zylindrischen Gefäß *T* aus porösem Ton (Biskuit), die Kupfervitriollösung in dem Glasgefäß selbst; die feinporöse Tonwand verhindert die Vermischung der Flüssigkeiten, aber nicht den Durchgang des Stromes, da sie wie Fließpapier von der Flüssigkeit durchtränkt und dadurch leitend wird. Die Zinkplatte *Z* und die Kupferplatte *K* sind zylindrisch gebogen, um sich der Form der Gefäße anzubekommen. Zur Verbindung der Zink- und Kupferplatte mit den Nachbarelementen oder mit den Poldrähten dienen die an sie angelöteten Kupferstreifen *m* und *p* und die Klemmschraube *s*.

Eine praktisch bewährte Abänderung des Daniellschen Elements ist das Meidingersche (1859, Fig. 169). Auf einem Vorsprung *bb* der Glaswand des Gefäßes *AA* steht eine zylindrisch gebogene Zinkplatte *ZZ*, an welche der Leitungsdräht *ck* angelötet ist. In dem auf den Boden des Glases *AA* angekitteten kleineren Glasgefäß *dd* befindet sich ein rundgebogenes Kupferblech *e*, zu welchem ein durch Kautschukumhüllung isolierter Kupferdraht *fg* hinabreicht. Von dem Deckel des Gefäßes *AA* hängt ein weites, unten mit einer Öffnung versehenes Glasrohr *h* bis ins Gefäß *dd* hinab. Dieses Rohr *h* wird mit Stücken von Kupfervitriol, das Gefäß *AA* mit einer Lösung von Bittersalz (Magnesiumsulfat) gefüllt; indem das Kupfersulfat sich auflöst, bildet es eine Lösung, welche wegen ihres größeren spezifischen Gewichts in dem Gefäß *dd* in Berührung mit der Kupferplatte bleibt, während die Zinkplatte von der leichteren Bittersalzlösung umgeben ist; so wird ohne Anwendung einer Tonscheidewand eine genügende Trennung der beiden Salzlösungen erreicht.

Das Grove-sche Element (1839) besteht aus Zink in verdünnter Schwefelsäure und innerhalb einer Tonzelle Platin in konzentrierter Salpetersäure. Im Bunsenschen Element (1842) ist das Platin durch die ebenso wirksame Kohle ersetzt. Die Fig. 170 stellt eine aus drei Bunsenschen Elementen zusammengesetzte Batterie dar, bei welchen sich die Kohle in Form von dicken Stäben mit der Salpetersäure in der porösen Tonzelle, das Zink mit der verdünnten Schwefelsäure außerhalb in einem glasierten Tongefäß befindet.

Bei allen diesen Elementen wird das Zink, um es während der Untätigkeit der Batterie vor dem unmittelbaren Angriff der Schwefelsäure zu schützen, amalgamiert, d. h. mit Quecksilber eingerieben, bis sich die Oberfläche mit einer Verbindung von Zink und Quecksilber (Zinkamalgam) gleichmäßig bedeckt hat.

Bei dem Element von Leclanché (1868, Fig. 171) ist in einer porösen Tonzelle eine Kohlenplatte *K* mit einem aus Braunstein und Kohle gemischten groben Pulver umgeben, während außerhalb in dem Glasgefäß eine Salmiaklösung den Zinkstab *Z* umgibt.

In den Trockenelementen ist die Flüssigkeit ersetzt durch eine mit geeigneten Lösungen durchtränkte und sodann erhärtete

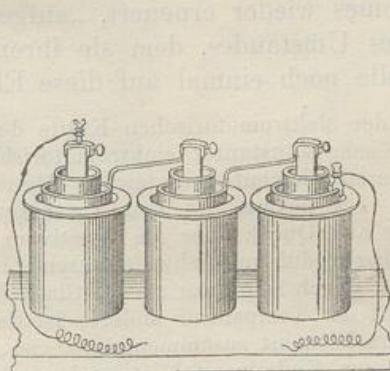


Fig. 170.
Bunsensche Elemente.

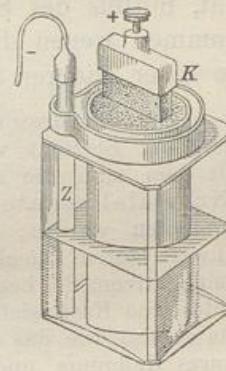


Fig. 171.
Leclanchés Element.

Füllmasse, zu deren Herstellung Gips, Kalkhydrat, Kreide, Ton und dergleichen verwendet werden. Bei den in den Handel gebrachten Trockenelementen bildet gewöhnlich die äußere Umhüllung aus Zink zugleich die eine Erregerplatte, die andere besteht aus Retortenkohle.

Das wichtigste galvanische Element der Neuzeit ist das „Sekundärelement“ oder der „Akkumulator“, der die Erzeugung elektrischer Ströme im großen gestattet. Er entspricht in seiner Form dem alten Voltaschen Element, das aus zwei Metallen in verdünnter Schwefelsäure bestand, und enthält statt des Zinks eine gewöhnliche Bleiplatte, statt des Kupfers eine mit Bleisuperoxyd überzogene Bleiplatte. Während aber die oben beschriebenen Elemente aus ihren Bestandteilen zum Gebrauche fertig zusammengesetzt werden (Primärelemente), werden die Sekundärelemente mit Hilfe des galvanischen Stromes zum Gebrauche hergestellt, und können, wenn sich durch den Gebrauch ihre elektromotorische Kraft erschöpft hat, mittels des Stromes wieder erneuert, „aufgeladen“ werden. Wir kommen wegen dieses Umstandes, dem sie ihren Namen verdanken, an einer anderen Stelle noch einmal auf diese Elemente zu sprechen.

Für die Messung der elektromotorischen Kräfte der Elemente ist es nützlich, ein Element von sehr konstanter elektromotorischer Kraft zu besitzen, mit dem man die anderen Elemente vergleicht. Man nennt solche Elemente „Normalelemente“. Als solches ist von Latimer Clark ein Element empfohlen worden, das aus Quecksilber als positivem Pol, einem Brei aus schwefelsaurem Quecksilberoxydul und schwefelsaurem Zink und einem Zinkstab als negativem Pol besteht. Noch bequemer als das Clark-Element, dessen elektromotorische Kraft sich mit der Temperatur ändert, ist das Weston-Element, das ebenso wie das Clark-Element zusammengesetzt ist, nur daß es schwefelsaures Cadmium und einen Cadmiumstab statt des schwefelsauren Zinks und des Zinkstabes enthält. Seine elektromotorische Kraft ist von der Temperatur fast unabhängig. Beide Elemente bleiben in ungeschlossenem Zustande unverändert. Bei stärkerer Stromentnahme ändern sie sich; sie dürfen daher nur mit ganz schwachen Strömen benutzt werden.

206. **Stromwender (Kommutatoren, Gyrotrope)** dienen dazu, um den galvanischen Strom bequem zu schließen und zu öffnen und im Schließungsbogen nach Belieben umzukehren. Von den zahlreichen Formen mögen die folgenden als Beispiele dienen. Der Stromwender von Pohl (1828, Fig. 172) besteht aus einem Brettchen mit sechs Quecksilbernäpfchen, von welchen die an den Ecken liegenden durch diagonale Drähte paarweise verbunden sind. Zwei dreiarmige Metallbügel sind durch einen Glasstab zu einer Wippe vereinigt, deren mittlere Arme in die zwei mittleren Näpfchen tauchen; in diese Näpfchen sind auch die Enden der Poldrähte der Batterie eingesenkt, während die Enden der Leitung, in welcher der Strom umgewendet werden soll, in die zwei Ecknäpfe rechts tauchen. Liegt die Wippe wie in der Figur, so fließt der Strom in der diese Näpfe verbindenden Leitung nach der durch den Pfeil angegebenen Richtung; legt man aber die Wippe um, so daß ihre hinteren Arme jetzt in die Ecknäpfe links eintauchen, so fließt der Strom der Leitung in der entgegengesetzten Richtung wie vorhin. Der Stromwender von Ruhm-

korff (1846, Fig. 173) besteht aus einer Elfenbeinwalze, welche mit zwei diametral gegenüberliegenden Messingwülsten versehen ist und von zwei metallenen Zapfen getragen wird, deren jeder im Innern der Walze mit einem der Wülste leitend verbunden ist. Die beiden Zapfen stehen durch ihre messingnen Lager mit Klemmschrauben, welche die Poldrähte aufnehmen, in Verbindung, während die zwei Klemmschrauben, in welche die Enden der Leitung geklemmt werden, auf Messinglechstreifen, die gegen die Walze federn, leitend aufgesetzt sind. Wird die Walze mittels des Griffes so gestellt, daß die Wülste mit den Federn in Berührung kommen, so geht der Strom in der einen Richtung durch die Leitung; dreht man aber die Walze um 180° , so kehrt sich der Strom in der Leitung um. Berühren die Messingwülste die Blechstreifen nicht, so ist der Strom unterbrochen.

207. Elektrolyse. Im Jahre 1800 entdeckte Ritter, daß flüssige Leiter beim Durchgange des galvanischen Stromes chemisch zerlegt werden. Taucht man zwei Platinplatten, welche mit den Polen einer galvanischen Batterie verbunden sind (die Elektroden), in Wasser, welchem etwas Schwefelsäure zugesetzt ist, so sieht man an beiden Platten Gasbläschen aufsteigen, nicht aber in der Flüssigkeit zwischen den Platten. Mittels der in Fig. 174 dargestellten Einrichtung lassen sich die an jeder Polplatte entwickelten Gasmengen gesondert auffangen. Das angesäuerte Wasser befindet sich in einem trichterförmigen Glasgefäß, durch dessen Boden zwei isolierte Zuleitungsdrähte f und f' hindurchgehen, welche die Platinplatten tragen; über jede Platinplatte ist eine oben geschlossene und anfangs ganz mit der Flüssigkeit gefüllte Glasröhre gestülpt, so daß die von den Polplatten aufsteigenden Gasblasen sich im oberen Teil der Röhren bei H und O sammeln. Man bemerkt bald, daß das am negativen (—) Pol ausgeschiedene Gas einen doppelt so großen Raum einnimmt wie das am positiven (+) Pol entwickelte; jenes läßt sich anzünden und verbrennt mit schwach leuchtender Flamme, dieses dagegen ist nicht brennbar, bringt aber einen hineingetauchten glimmenden Holzspan zum hellen Aufflammen. Aus diesen Erscheinungen läßt sich schließen,

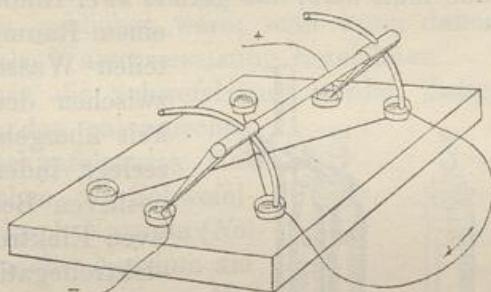


Fig. 172.
Pohl's Stromwender.

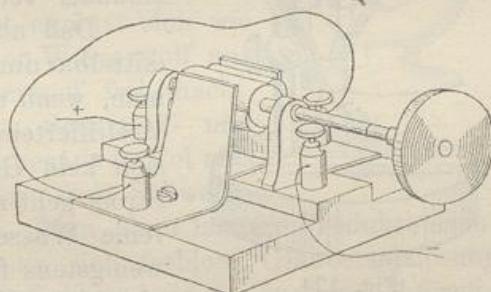


Fig. 173.
Rubmkorff's Stromwender.

daß das erstere Gas Wasserstoff (H), das letztere Sauerstoff (O) ist. Diese beiden Grundstoffe sind aber die Bestandteile des Wassers, und man weiß, daß gerade zwei Raumteile Wasserstoffgas (H_2) sich mit

einem Raumteil Sauerstoff (O) zu zwei Raumteilen Wasserdampf (H_2O) vereinigen. Der zwischen den Elektroden durch die Flüssigkeit übergehende Strom hat also das Wasser zerlegt, indem er den Wasserstoff als elektropositiven Bestandteil (Kation)¹ an der negativen Elektrode (Kathode), den Sauerstoff als elektronegativen Bestandteil (Anion) an der positiven Elektrode (Anode) abschied, und zwar beide Grundstoffe in demselben Mengenverhältnis, in welchem sie in Wasser miteinander vereinigt waren.

Daß aber hierbei das Wasser nicht unmittelbar durch den Strom zersetzt wird, erkennt man, wenn man den Apparat mit ganz reinem (destilliertem) Wasser füllt; alsdann entwickelt sich kein Gas an den Platinplatten, und der Strom geht zwischen ihnen gar nicht über. Das reine Wasser leitet den Strom nicht, oder wenigstens fast nicht. Damit aber Zersetzung eintritt, muß der Strom durch die Flüssigkeit hindurchgehen. Diese Leitung vermittelt die Schwefelsäure. Man kann nun auch sagen,

daß es zunächst die Bestandteile der Schwefelsäure sind, die an den Elektroden abgeschieden werden. Die Schwefelsäure (H_2SO_4) besteht aus Wasserstoff einerseits und Schwefel nebst Sauerstoff andererseits und wird derart zerlegt, daß der Wasserstoff (H_2) an der negativen, der Rest (SO_4) an der positiven Polplatte ausgeschieden wird. Dieser „Schwefelsäurerest“ kann aber für sich nicht bestehen, sondern ergänzt sich sofort wieder zu Schwefelsäure, indem er dem Wasser die hierzu nötige Menge Wasserstoff entzieht und dadurch die entsprechende Menge Sauerstoff in Freiheit setzt, welcher sich an der positiven Platte entwickelt ($SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$). Dieser Sauerstoff ist dann nicht unmittelbar durch elektrochemische Zersetzung, sondern durch mittelbare Einwirkung (sekundäre Aktion) des elektrochemisch abgeschie-

¹ Faraday hat zur bequemen Bezeichnung der bei der elektrochemischen Zersetzung vorkommenden Begriffe gewisse Benennungen eingeführt, welche allgemein Eingang gefunden haben. Nach ihm heißt der Vorgang selbst Elektrolyse, und eine jede durch den galvanischen Strom zersetzbare chemische Verbindung Elektrolyt; die Polplatten, durch welche der Strom ein- und austritt, heißen die Elektroden („Elektrizitätswege“), und zwar die positive Elektrode Anode („Hinaufweg“), die negative Kathode („Hinabweg“). Die abgeschiedenen Bestandteile heißen Ionen (richtiger Ionten, die „Gehenden“), und zwar der zur Anode gehende Bestandteil das Anion (das „Hinaufgehende“), der zur Kathode gehende Bestandteil das Kation (das „Hinabgehende“).

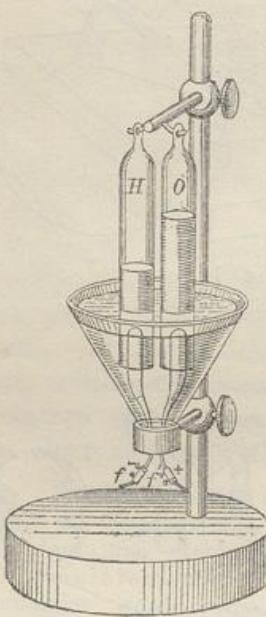


Fig. 174.
Wasserzersetzungssapparat.

denen Säurerestes auf das Lösungsmittel der Schwefelsäure, das Wasser, entstanden. Der schließliche Erfolg ist aber doch derselbe, als ob das Wasser zersetzt worden, die Schwefelsäure dagegen, da sie sich sofort wieder zurückbildet, unangetastet geblieben wäre; man kann daher den ganzen Vorgang immerhin als Wasserzerersetzung bezeichnen.

In ganz ähnlicher Weise wie die Schwefelsäure werden Salze, die in Wasser gelöst sind, durch den galvanischen Strom zersetzt. Glaubersalz (schwefelsaures Natrium, Na_2SO_4) z. B. ist anzusehen als Schwefelsäure, in welcher der Wasserstoff durch Natrium (Na) vertreten ist. Demnach wird zunächst Natrium am negativen, der Schwefelsäurerest am positiven Pol sich ausscheiden; das Natrium aber entzieht dem Wasser Sauerstoff, um Natronlauge (Natriumhydroxyd, $NaHO$) zu bilden ($Na_2 + 2H_2O = 2NaHO + H_2$), und der Schwefelsäurerest ergänzt sich wie vorhin zu Schwefelsäure, indem er Wasserstoff aus dem Wasser entnimmt und Sauerstoff frei macht. Es werden sich daher wiederum Sauerstoff- und Wasserstoffgas am positiven und negativen Pol entwickeln, außerdem wird aber dort freie Schwefelsäure, hier Natronlauge auftreten. Man kann letztere Produkte sichtbar nachweisen, wenn man die an sich farblose Glaubersalzlösung durch Blaukrautabkochung violett färbt und sie nun in einem U-förmig gestalteten Gefäß (Fig. 175) der Elektrolyse unterwirft. Die Flüssigkeit wird alsdann am positiven Pol durch die Säure rot, am negativen durch die Lauge grün gefärbt.

Wenn das in dem gelösten Salz enthaltene Metall in Berührung mit Wasser bestehen kann, ohne letzteres zu zersetzen, so entwickelt sich am negativen Pol kein Wasserstoffgas, sondern das Metall selbst lagert sich auf der Polplatte ab. Dies geschieht z. B., wenn man den galvanischen Strom durch eine Lösung von Kupfervitriol (schwefelsaurem Kupfer, $CuSO_4$) leitet; die Kathode bedeckt sich mit einem zusammenhängenden Überzug von metallischem Kupfer, an der Anode dagegen erscheinen freie Schwefelsäure und Sauerstoffgas. Macht man die Anode aus Kupfer, so ergänzt sich der hier ausgeschiedene Schwefelsäurerest durch Aufnahme von Kupfer zu Kupfervitriol, und es findet keine Wasserzerersetzung und demnach auch keine Sauerstoffentwicklung statt; es wird nur Kupfer an der Anode aufgelöst und gleichzeitig ebensoviel auf der Kathode abgelagert. Will man derartige Einwirkungen der ausgeschiedenen Bestandteile auf die Polplatten vermeiden, so macht man sie, wie bei den beschriebenen Zersetzungsapparaten, aus Platin, weil dieses Metall chemischen Angriffen am wenigsten ausgesetzt ist.

Manche Metalle, z. B. Silber und Blei, scheiden sich kristallisch aus. Man kann den Vorgang der Ausscheidung vielen Zuschauern zugleich sichtbar machen, wenn man ein Bild der mit

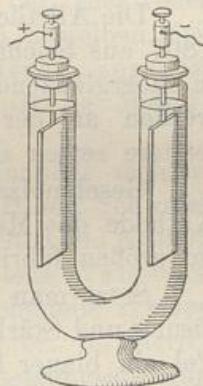


Fig. 175.
U-förmiger
Zersetzungsapparat.

parallelen Glaswänden versehenen Zersetzungszelle, welche eine Lösung von essigsaurem Blei und zwei Bleielektroden enthält, mittels einer Linse auf einen Schirm projiziert. An der Kathode erscheinen die Bleikriställchen in baumförmigen Wucherungen (Bleibaum, arbor saturni), welche, wenn man den Strom umkehrt, sich wieder auflösen und an der anderen Elektrode erscheinen.

Die Alkalien und Erden hatten für unzerlegbar gegolten, bis Davy 1807 aus feuchtem Atzkali (Kaliumhydroxyd, *KHO*) das Kaliummetall in silberglänzenden Kugelchen gewann; bei der Elektrolyse von $2KOH$ werden an der Kathode $2K$, an der Anode $2OH$ abgeschieden; letztere setzen sich in $H_2O + O$ um.

Geschmolzene Metallchloride liefern Chlor an der Anode, an der Kathode das Metall. Magnesium und namentlich Aluminium werden im großen fabrikmäßig durch Elektrolyse dargestellt.

Setzt man die Poldrähte einer Batterie auf ein mit Jodkaliumlösung und Stärkekleister befeuchtetes Papier, so entsteht am positiven Pol ein blauer Fleck, indem das hier abgeschiedene Jod den Kleister blau färbt. Man kann sich daher eines solchen Papiers bedienen, um die Pole zu unterscheiden. In den Handel wird unter dem Namen Polreagenzpapier ein Papier gebracht, das mit einer Salzlösung getränkt ist, der ein wenig Phenolphthalein zugesetzt ist. Unter dem negativen Pol entsteht hier ein roter Fleck.

Die schon lange vor der Entdeckung Galvanis von Sulzer (1760) gemachte Beobachtung, daß zwei Stücke verschiedener Metalle (Kupfer und Eisen) miteinander in Berührung gebracht und mit den freien Enden auf und unter die Zunge gelegt, eigentümliche Geschmacksempfindungen hervorrufen, beruht auf Elektrolyse. Man kann in der Tat die Natur der Pole durch den Geschmack erkennen; der positive Pol auf die Zunge gebracht schmeckt sauer, der negative laugenhaft.

208. Elektrolytische und metallische Leitung. Die Flüssigkeiten, welche den Strom leiten, sind stets Lösungen (200) und leiten nach den obigen Erfahrungen den elektrischen Strom auf ganz andere Weise als ein Metall; während ein metallischer Leiter beim Durchgang des Stromes keine chemische Veränderung erfährt, leitet eine Flüssigkeit (wenn sie nicht selbst ein Metall ist, wie das Quecksilber) den Strom nur, indem sie chemisch zersetzt wird; Flüssigkeiten, welche durch den Strom nicht zersetzt werden, leiten ihn auch nicht, wie z. B. reines Wasser, Alkohol, Petroleum, Schwefelkohlenstoff. Die Unterscheidung Voltas zwischen Leitern erster und zweiter Klasse ist daher wohl begründet; jene umfassen die Metalle und Kohle, diese die Elektrolyte.

Die chemische Zersetzung des Elektrolyten vollzieht sich aber nicht in seinem Innern, sondern an den Elektroden. Die Bestandteile des Elektrolyten wandern also in der Flüssigkeit nach entgegengesetzten Richtungen, das Kation nach der Kathode, das Anion nach der Anode, und scheiden sich an den Elektroden ab. Die Bewegung

der Elektrizitäten ist also bei den elektrolytisch leitenden Körpern verknüpft mit einer Bewegung der Materie.

209. **Faradays elektrolytische Gesetze.** Werden in denselben Stromkreis hintereinander mehrere Wasserzersetzungsapparate (wie Fig. 174) eingeschaltet, so entwickelt sich in allen die gleiche Menge Wasserstoff, auch wenn die Apparate hinsichtlich ihres Fassungsraumes sowie der Gestalt, Größe und Entfernung der Elektroden noch so verschieden sind, und einzeln angewendet in derselben Zeit verschiedene Mengen liefern. Ein und derselbe Strom zersetzt also während derselben Zeit immer die nämliche Menge Wasser (Faraday, 1833).

Schaltet man in denselben Stromkreis hintereinander mehrere Zersetzungsgefäße mit verschiedenen Elektrolyten, z. B. mit Schwefelsäure angesäuertes Wasser, Chlorwasserstoffsäure, Chlorblei und Kupfersulfat, so erhält man im ersten Gefäß 2 Gewichtsteile Wasserstoff und 16 Gewichtsteile Sauerstoff, im zweiten 2 Gewichtsteile Wasserstoff und 71 Chlor, im dritten 207 Blei und 71 Chlor, im vierten 63 Kupfer und 16 Sauerstoff. Oder werden drei Zersetzungsgesetze mit Salzsäure (HCl), Wasser (H_2O) und Ammoniakflüssigkeit (H_3N) eingeschaltet, so entwickelt sich in allen dreien ein gleichgroßes Volumen Wasserstoffgas und daneben im ersten ein gleiches Volumen Chlorgas, im zweiten ein halb so großes Volumen Sauerstoffgas und im dritten ein drittel so großes Volumen Stickstoffgas. Durch einen und denselben Strom werden demnach aus verschiedenen Elektrolyten die Bestandteile genau in jenen Mengenverhältnissen ausgeschieden, in welchen sie sich miteinander chemisch verbinden und sich gegenseitig vertreten können, oder die in demselben Stromkreis ausgeschiedenen Gewichtsmengen verhalten sich wie die chemischen Äquivalente (Verbindungsgewichte). Man kann auch sagen, daß die nämliche Elektrizitätsmenge notwendig und hinreichend ist, um ein Äquivalent eines jeden beliebigen Zersetzungsgesetzes abzuschneiden. Dieses von Faraday (1833) entdeckte Gesetz heißt „das Gesetz der festen elektrolytischen Aktion“.

Teilt man den Schließungsdräht einer Batterie im Punkte *A* (Fig. 176) in zwei genau gleiche Zweige, die sich im Punkte *B* wieder vereinigen, und schaltet man von drei vollkommen gleichen Wasserzersetzungsapparaten *M*, *M*₁, *M*₂ den einen in den unverzweigten Stromteil, die beiden anderen in die Zweige, so ist klar, daß durch *M*₁ und *M*₂ je nur die Hälfte der Elektrizitätsmenge fließt wie durch *M*, oder daß dort die Stärke des Stromes nur die Hälfte ist von derjenigen in *M*. Es zeigt sich alsdann, daß die in *M*₁ und *M*₂ entwickelten Gasmengen unter sich gleich sind und jede nur die Hälfte ist von der in *M* entwickelten

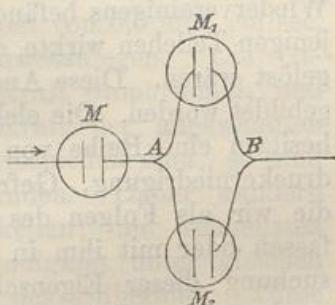


Fig. 176.
Versuch von Faraday.

Gasmenge. Hieraus folgt, daß die in derselben Zeit zersetzenen Mengen eines Elektrolyts der Stromstärke proportional sind.

210. **Theorie der Elektrolyse.** Die beschriebenen Tatsachen der Elektrolyse finden ihren einfachsten zusammenfassenden Ausdruck in der Vorstellung, daß in dem Elektrolyten die Bewegung der Elektrizität durch die Bewegung der materiellen Teilchen vermittelt wird, daß die Ionen, die in den Elektrolyten nach entgegengesetzten Richtungen wandern, elektrische Ladungen mit sich führen, die sie bei ihrer Abscheidung an die Elektroden abgeben. Der elektrische Strom in dem Elektrolyten ist also ein „Konvektionsstrom“. Bei der Schwefelsäure, dem Glaubersalz, dem Kupfervitriol führen Wasserstoff, Natrium, Kupfer, die nach der Kathode wandern, positive Ladung mit sich, der Schwefelsäurerest (SO_4), der nach der Anode wandert, negative Ladung. Diese Ladungen sind nicht bloß für die entgegengesetzten Bestandteile eines und desselben Elektrolyten entgegengesetzt gleich groß, sondern sie sind nach dem zweiten Faradayschen Gesetz auch für verschiedene Elektrolyten gleich groß; zwei Atome Wasserstoff führen so viel Elektrizität mit sich, wie zwei Atome Natrium oder ein Atom Kupfer. In den chemischen Verbindungen vertritt ein Atom Kupfer zwei Atome Wasserstoff; man nennt deswegen Kupfer zweiwertig gegenüber dem einwertigen Wasserstoff, oder sagt, daß Kupfer zwei Valenzen, Wasserstoff, Natrium nur eine Valenz habe. Dann kann man die obigen Tatsachen auch so aussprechen: an jeder freien Valenz eines Ions haftet die gleiche Menge Elektrizität.

Ursprünglich nahm man an, daß der Strom die Spaltung des Elektrolyten in diese entgegengesetzt geladenen Bestandteile bewirke. Da aber schon die geringste elektromotorische Kraft Zersetzung hervorruft, so machte Clausius (1857) die Annahme, daß die Bestandteile des Elektrolyten sich in einem Zustande beständigen Zerfallens und Wiedervereinigens befänden, und daß die elektrische Kraft nur auf diejenigen Teilchen wirkte, die augenblicklich aus dem Molekularverbande gelöst wären. Diese Anschauung ist in neuester Zeit noch weiter ausgebildet worden. Die elektrolytischen Flüssigkeiten sind Lösungen und besitzen eine Reihe von Eigenschaften (osmotische Steighöhe, Dampfdruckerniedrigung, Gefrierpunktserniedrigung, Siedepunktserhöhung), die wir als Folgen des osmotischen Drucks des gelösten Stoffs auffassen oder mit ihm in Zusammenhang bringen können. Die Untersuchung dieser Eigenschaften hat nun für die Elektrolyte zu der merkwürdigen Erfahrung geführt, daß bei ihnen der osmotische Druck immer größer ist, als er nach Konzentration und Molekulargewicht (vgl. 88) sein sollte. Dieser Umstand deutet darauf hin, daß die Zahl der in Lösung befindlichen Teilchen, von der ja, nach der kinetischen Auffassung, die Größe des Drucks abhängt, in dem Elektrolyten größer ist, als z. B. in einer äquimolekularen Zuckerlösung, und diese Vergrößerung der Zahl der Teilchen läßt sich in einfacher Weise darauf zurückführen, daß die Moleküle des gelösten Stoffs sich zum Teil in zwei

unabhängig voneinander wirkende Bestandteile gespalten oder dissoziiert haben. Man hat ferner gefunden, daß die Fähigkeit der Elektrolyte, den galvanischen Strom zu leiten, mit ihrem von den Gesetzen der gewöhnlichen Lösungen abweichenden Verhalten parallel geht und um so größer ist, je mehr dissoziierte Moleküle in der Lösung vorhanden sind. Die dissoziierten Moleküle vermitteln also die Stromleitung oder den Transport der Elektrizitäten; daher kommt man zu der Vorstellung, daß in den Elektrolyten der gelöste Stoff nicht in zwei neutrale, sondern in zwei entgegengesetzt elektrisch geladene Bestandteile, oder in Ionen gespalten sei. (Elektrolytische Dissoziation, Arrhenius, 1887.)

Die Ionen sind in den Elektrolyten vollkommen frei beweglich zu denken. Indem an jeder Stelle gleich viel positive und negative Ionen vorhanden sind, herrscht überall der neutrale elektrische Zustand. Taucht man nun die Polplatten einer galvanischen Batterie in die Flüssigkeit, so zieht die positiv geladene Anode die negativen Ionen an und stößt die positiven ab; ebenso zieht die negativ geladene Kathode die positiven Ionen an und stößt die negativen ab. Durch diese Kräfte werden die Ionen in Bewegung gesetzt, die positiven Ionen nach der Kathode, die negativen Ionen nach der Anode zu. An den Elektroden kehren die Ionen in den neutralen Zustand zurück, indem ihre Ladungen andauernd durch die von der Batterie gelieferten entgegengesetzten Elektrizitäten ausgeglichen werden, wodurch der gesamte Bewegungszustand andauernd erhalten wird. Die Bewegungen der Ionen vollziehen sich unter den sehr großen Hindernissen, die aus der hemmenden (Reibungs-) Wirkung des umgebenden Mittels entspringen. Die Geschwindigkeit der Ionenbewegung nach der Anode oder Kathode zu ist daher außerordentlich klein; ein Silberion z. B. bewegt sich in Wasser, wenn das Potential auf 1 cm um 1 Volt abnimmt, in Richtung dieses Potentialgefälles mit einer Geschwindigkeit von 0,00056 cm/sec, d. h. es braucht 1 Stunde, um 2 cm zurückzulegen. Die Geschwindigkeit der Ionen ist der treibenden Kraft proportional, und wächst daher mit der elektromotorischen Kraft der angewandten Batterie. Da die Dimensionen der Ionen verschieden sind, so sind es auch die Reibungshindernisse, die sie finden. Daher wandern die Ionen mit verschiedenen Geschwindigkeiten; am schnellsten wandert das Wasserstoffion, dessen Geschwindigkeit unter gleichen Umständen 6 mal größer ist als diejenige des Silberions. Diese Zahlen ergeben sich aus Versuchen über die Konzentrationsänderungen, die bei der Elektrolyse in einer Lösung eintreten, und die infolge der verschiedenen Wanderungsgeschwindigkeit der positiven und negativen Ionen im allgemeinen für die Umgebung der Anode und der Kathode ungleich sind (Überführungszahlen. Hittorf, 1853, F. Kohlrausch, 1879).

211. Voltameter. Da an jeder Valenz eines Atoms eine ganz bestimmte Elektrizitätsmenge haftet, so ist die Gesamtmenge eines

elektrolytisch abgeschiedenen Stoffes zugleich ein Maß für die Gesamtmenge der durch den Elektrolyten hindurchgegangenen Elektrizität. Apparate, die zur Messung der elektrolytisch abgeschiedenen Stoffmengen dienen, heißen Voltameter. Mißt man zugleich die Zeitdauer des Stromdurchgangs, so kann man durch Division der

abgeschiedenen Menge mit der Zeit die in einer Sekunde zur Abscheidung gekommene Menge, und daraus die in einer Sekunde durch den Apparat hindurchgegangene Elektrizitätsmenge, das ist die Stromstärke, ermitteln, unter der Voraussetzung, daß der Strom während des Vorgangs konstant war. Die Voltameter, die zunächst als Instrumente zur Messung von Elektrizitätsmengen anzusehen sind, können also auch zur Messung von Stromstärken benutzt werden.

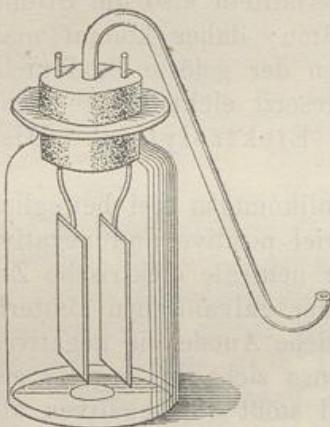


Fig. 177.
Knallgasvoltameter.

als Elektroden Platinplatten tragen; das Gefäß wird mit durch Schwefelsäure angesäuertem Wasser gefüllt. Die an den Platinplatten sich entwickelnden Gase, 1 Raumteil Sauerstoff und 2 Raumteile Wasserstoff, mischen sich im oberen Teil des Gefäßes zu Knallgas; letzteres entweicht durch ein luftdicht durch den Kork gestecktes gebogenes Gasentwickelungsrohr, und wird in einer graduierten Glasröhre über Wasser aufgefangen. Mit dem Voltameter läßt sich leicht nachweisen, daß die Stromstärke an allen Stellen eines unverzweigten Stromkreises die nämliche ist; denn an welcher Stelle man es auch in denselben einschalten mag, überall liefert es in gleicher Zeit die gleiche Menge Knallgas.

Statt durch Wasser kann man den zu messenden Strom auch durch eine Lösung von schwefelsaurem Kupfer (Kupfervoltameter) oder salpetersaurem Silber (Silbervoltameter) leiten und die Menge des am negativen Pol abgeschiedenen Metalls durch Wägung bestimmen. Da derselbe Strom in gleicher Zeit von verschiedenen Elektrolyten äquivalente Mengen zerlegt, so läßt sich hieraus die entsprechende Knallgasmenge, falls man sie zu wissen wünscht, leicht berechnen. Das Kupfer- und besonders das Silbervoltameter liefern genauere Ergebnisse als das Knallgasvoltameter.

Als Einheit für die auf solche Weise zu messenden Stromstärken hat man durch internationales Übereinkommen diejenige Stromstärke festgesetzt, welche in einer Sekunde 1,118 mg, oder in einer Minute 67,08 mg, oder in einer Stunde 4,025 g Silber abscheidet, und hat dieser Einheit den Namen Ampère beigelegt. Die Wahl dieser Größe zur Einheit des Strommaßes ist durch

Überlegungen bedingt gewesen, die wir an einer anderen Stelle kennen lernen werden (243).

Man nennt die durch die Stromeinheit (1 Ampère) in der Zeit-einheit (1 sec) abgeschiedene Menge eines Ions, dessen elektro-chemisches Äquivalent; dasjenige des Silbers ist 1,118 mg. Die Elektrizitätsmenge, welche sich mit 1,118 mg Silber oder dem äqui-valenten Gewicht eines anderen Ions in Elektrolyten bewegt, gilt demzufolge als Einheit der Elektrizitätsmenge unter der Benennung Coulomb.

Mit der vorstehenden Festsetzung ist eine neue Einheit der Elektrizitäts-menge eingeführt. Die bisher von uns benutzte Einheit war die elektro-statische (162). Man hat durch besondere Versuche (243) das Verhältnis beider Einheiten festgestellt. Danach ist $1 \text{ Coulomb} = 3 \times 10^9$ elektrostatischen Einheiten. Die Elektrizitätsmengen, die in den elektrischen Strömen in Bewegung sind, sind also sehr groß im Vergleich zu denjenigen Mengen, deren Wirkungen man in der Elektrostatik beobachtet.

Da 1 Coulomb in der Lösung eines Silbersalzes an 1,118 mg Silber gebunden ist, und da das Atomgewicht des einwertigen Silbers 107,93 ist, so sind mit einem Grammäquivalent Silber und entsprechend mit jedem Grammäquivalent eines beliebigen Elements $107,93 : 0,001118 = 96540$ Coulomb verbunden. Diese Elektrizitätsmenge, die der Abscheidung eines Grammäquivalents eines Ions ent-spricht, wird von 1 Ampère in 26,8 Stunden geliefert. Man sagt deswegen auch, sie sei = 26,8 Ampérestunden.

212. Galvanoplastik. Jacobi in Dorpat machte 1837 die Be-obachtung, daß der auf der negativen Polplatte bei der Elektrolyse von Kupfervitriollösung sich absetzende Kupferüberzug leicht abgelöst werden kann, und die etwaigen Unebenheiten jener Platte in getreuestem Abdruck wiedergibt. Er gründete darauf ein Verfahren, Medaillen, gravierte Platten und andere plastische Gegenstände in galvanisch abgeschiedenem Kupfer nachzubilden, und nannte dasselbe Galvanoplastik. Um eine galvanoplastische Nachbildung einer Medaille oder irgend eines anderen geeigneten Kunstgegenstandes zu erhalten, fertigt man zuerst einen Abdruck des Gegenstandes in Wachs, Stearin, Guttapercha, Gips o. dgl., macht diese Form durch Bepinseln mit feinem Graphitpulver auf ihrer Oberfläche leitend, bringt sie, mit dem negativen Pol einer galvanischen Batterie oder einer anderen geeigneten Stromquelle verbunden, in das Kupferbad und stellt ihr als Anode eine Kupferplatte gegenüber, die in demselben Maß, in welchem Kupfer an der Form ausgeschieden wird, sich auflöst und dadurch die Kupferlösung immer konzentriert erhält.

Auf ganz reinen Metallflächen haften galvanisch niedergeschlagene Metalle sehr fest. Hierauf besteht das „Galvanostegie“ genannte Verfahren, Gegenstände aus minderwertigen Metallen mit einem dünnen, aber festhaftenden Überzuge eines kostbareren Metalls (galva-nische Versilberung, Vergoldung, Vernickelung usw.) zu versehen, indem man den Gegenstand, mit der Kathode verbunden, in eine geeignete Lösung des abzuscheidenden Metalls bringt, und als Anode eine Platte desselben Metalls gegenüberstellt.

213. Galvanische Polarisation. Leitet man den Strom einer galvanischen Batterie mittels zweier mit den Poldrähten verbundener

Platinplatten durch verdünnte Schwefelsäure (z. B. durch ein Voltameter oder einen anderen Wasserzersetzungsapparat), so daß sich an der negativen Polplatte Wasserstoffgas, an der positiven Sauerstoffgas abscheidet, unterbricht sodann den Strom und setzt die beiden Platinplatten unter sich durch einen Schließungsbogen in leitende Verbindung, so zeigt ein in diesen Schließungsbogen eingeschaltetes Galvanometer (220) einen elektrischen Strom an, welcher dem ursprünglich durchgeleiteten Strom entgegengesetzt gerichtet ist (Ritter, 1803).

Während dieses Vorganges verhält sich also der Zersetzungssapparat wie ein galvanisches Element, in welchem die beiden mit Wasserstoff und Sauerstoff beladenen Platinplatten die Rolle des negativen und des positiven Metalles spielen. Um diesen ihren Gegensatz zu bezeichnen, nennt man die Platten polarisiert. Man bezeichnet die elektromotorische Kraft, welche sie infolge ihrer Gasbedeckung gegeneinander besitzen, als die elektromotorische Gegenkraft der Polarisation und den Strom, zu welchem diese Anlaß gibt, sobald die ladende Batterie aus dem Stromkreise entfernt wird, als den Polarisationsstrom.

214. **Sekundärelement. Akkumulator.** Die polarisierten Platinplatten geben nur einen sehr kurz dauernden Polarisationsstrom; denn die aufgenommenen Gase werden durch den umgekehrt fließenden Strom wieder in die Lösung übergeführt und die Platten verlieren schnell ihren polarisierten Zustand, weil sie größere Gasmengen aufzunehmen nicht imstande sind. Verwendet man dagegen Blei statt Platin, so kann man länger andauernde Polarisationsströme erhalten. Taucht man zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure und schickt den Strom einer Batterie von mehreren Bunsenschen Elementen durch sie hindurch, so findet man nach einiger Zeit die mit dem positiven Pol der Batterie verbundene Platte mit einem braunen Überzug bedeckt, während die mit dem negativen Pol verbundene Platte keine merkliche Änderung zeigt. In diesem Falle haben die elektrolytischen Zersetzungssprodukte chemisch auf die Platten eingewirkt. Das schwefelsaure Blei, mit dem sich die Bleiplatten in Berührung mit der Schwefelsäure oberflächlich bedecken, ist an der Anode durch den sich dort abscheidenden Schwefelsäurerest in Schwefelsäure und Bleisuperoxyd verwandelt worden (nach der Gleichung: $PbSO_4 + SO_4 + 2H_2O = 2H_2SO_4 + PbO_2$). Erstere geht in die Lösung, letzteres haftet auf der Platte als brauner Überzug. An der Kathode dagegen hat sich durch den hier abgeschiedenen Wasserstoff das schwefelsaure Blei zu reinem Blei reduziert ($PbSO_4 + 2H = Pb + H_2SO_4$), während ebenfalls Schwefelsäure in Lösung geht. In diesem Zustande sind die Platten „geladen“ und sind nun imstande, einen längere Zeit andauernden schwachen, oder kürzeren starken Strom zu liefern, der die umgekehrte Richtung hat wie der Ladungsstrom, also von der Bleisuperoxydplatte durch den Schließungskreis nach der Bleiplatte verläuft. Sie behalten diese Fähigkeit auch lange Zeit, wenn kein Strom aus ihnen entnommen wird. Bei Stromentnahme aber werden

die beschriebenen chemischen Veränderungen wieder rückgängig gemacht; die Platten kehren in den ursprünglichen Zustand zurück, sie entladen sich und verlieren damit ihre stromerzeugende Wirkung. Indem man dann abermals einen Strom durch sie hindurchschickt, können sie von neuem zur Stromerzeugung umgeformt, „aufgeladen“ werden. Planté war der erste (1860), der ein solches Ladungs- oder sekundäres Element als Ersatz der gewöhnlichen (primären) galvanischen Elemente konstruierte. In neuerer Zeit hat sich für diese Elemente der Name Akkumulator eingebürgert, da die Stromarbeit der primären Batterie in ihnen zu späterer Verwendung gleichsam aufgespeichert wird. Da die Reduzierung des Bleisuperoxyds nach elektrolytischen Gesetzen dem Entladungsstrom parallel geht, so wird die zu entladende Elektrizitätsmenge eines Akkumulators — seine Kapazität, die man in Ampèrestunden auszudrücken pflegt — um so größer sein, je mehr „aktive Masse“ auf den Platten vorhanden ist. Bei dem Plantéschen Element, in dem das Bleisuperoxyd elektrolytisch auf Platten aus reinem Blei erzeugt wurde, bedurfte es eines sehr langwierigen „Formierungsprozesses“, um eine dickere Schicht von Bleisuperoxyd zu erzeugen. Faure lehrte (1881) diesen Prozeß dadurch abkürzen, daß er statt der vollen Bleiplatten Bleigerippe anwandte und deren Hohlräume von vornherein mit aktiver Masse ausfüllte, und zwar für die positiven Platten mit Mennige (Pb_3O_4), für die negativen mit Bleioxyd (PbO). Nach einer zweckmäßigen Vereinigung beider Verfahren werden heutzutage die Akkumulatoren fabrikmäßig hergestellt. Für Entnahme starker Ströme werden die Akkumulatoren aus einer größeren Zahl von positiven und negativen Platten zusammengesetzt, die in großen mit der Schwefelsäurelösung gefüllten Gefäßen abwechselnd nebeneinander gestellt und so verbunden werden, daß alle positiven Platten mit einer, alle negativen mit einer zweiten Bleileiste verlötet sind. Um höhere Spannungen zu erzielen, werden viele solcher Akkumulatoren wie bei einer galvanischen Batterie hintereinander geschaltet (203). Nach dem oben Gesagten geht bei der Ladung Schwefelsäure in Lösung, daher steigt während der Ladung das spezifische Gewicht der Schwefelsäure im Akkumulator, bei der Entladung sinkt es.

215. Unpolarisierbare Elektroden. Die elektromotorische Gegenkraft der Polarisation in einer Zersetzungszelle wirkt nicht bloß nach dem Aufhören des primären Stromes, sondern ebenso während seiner Dauer, und schwächt ihn, indem sie die ursprüngliche elektromotorische Kraft um den Betrag der Gegenkraft vermindert; die polarisierte Zersetzungszelle wirkt in dem Stromkreis wie ein entgegengeschaltetes galvanisches Element. Will man daher eine dauernde Wasserzersetzung erhalten, so muß man eine elektromotorische Kraft anwenden, die größer ist als die Gegenkraft der Polarisation (ca. 2,5 Volt). Es kann jedoch die Polarisation in einer Zersetzungszelle auch vermieden werden, wenn man Elektroden und Elektrolyt so wählt, daß beide beim Durchgang des Stromes unverändert bleiben;

so z. B. bilden Zinkplatten in konzentrierter Zinksulfatlösung „unpolarisierbare Elektroden“, denn ebensoviel Zink, wie an der Kathode niedergeschlagen wird, löst sich gleichzeitig unter Zurückbildung des zersetzen Zinksulfats an der Anode auf (Du Bois-Reymond, 1859).

216. Konstante galvanische Elemente. Da in einem geschlossenen galvanischen Element die Lösung durch den Strom, den das Element liefert, ebenso zersetzt wird wie in einer elektrolytischen Zelle, so macht sich auch hier im allgemeinen die Gegenkraft der Polarisation geltend. Während z. B. in dem Elemente Zink-Schwefelsäure-Platin der Strom vom Platin durch den Schließungskreis zum Zink und von diesem durch die Schwefelsäure zum Platin geht, wird einerseits das Zink aufgelöst, andererseits die Platinplatte mit dem abgeschiedenen Wasserstoff bedeckt und dadurch polarisiert. Das Plattenpaar wird daher, bald nachdem es geschlossen worden, nur einen geschwächten Strom liefern, welcher dem Unterschied der sich entgegenwirkenden elektromotorischen Kräfte entspricht. Nur unmittelbar nach dem Eintauchen der Platten beobachtet man eine größere Stromstärke, weil der in der Flüssigkeit absorbierte atmosphärische Sauerstoff sich mit dem freiwerdenden Wasserstoff sofort zu Wasser verbindet und dessen Ausscheidung und somit auch die Polarisation verhindert. Sobald dieser absorbierte Sauerstoff aufgezehrt ist, sinkt der Strom auf diejenem Unterschied entsprechende geringere Stärke herab und hört endlich ganz auf, wenn sich aus dem gebildeten Zinksulfat metallisches Zink auf der Platinplatte abzusetzen beginnt. Die Zusammenstellung Zink-Schwefelsäure-Platin ist daher ein unbeständiges (inkonstantes) Element, weil sein Strom die ursprüngliche Stärke nicht behält, sondern rasch abnimmt. Um diese durch die Polarisation bewirkte Abnahme möglichst zu vermeiden, braucht man nur dafür zu sorgen, daß um die Platinplatte herum Sauerstoff verfügbar sei, welcher die Ausscheidung des Wasserstoffs verhindert, indem er sich mit ihm zu Wasser verbindet. Dies geschieht, indem man die Platinplatte nicht unmittelbar in die verdünnte Schwefelsäure stellt, sondern sie mit einer porösen Tonzelle umgibt, welche konzentrierte Salpetersäure enthält. Diese an Sauerstoff reiche Säure besitzt nämlich die Eigenschaft, einen Teil ihres Sauerstoffs an solche Stoffe, welche mit ihm in Verbindung zu treten geneigt sind (wie z. B. Wasserstoff), sehr leicht abzugeben. Die Zusammenstellung Zink in verdünnter Schwefelsäure, Platin in konzentrierter Salpetersäure bildet daher ein konstantes (beständiges) Element, in welchem der elektrolytisch ausgeschiedene Wasserstoff sofort wieder zu Wasser oxydiert und sonach die Polarisation vermieden wird. Dieses Grovesche Element liefert daher einen konstanten Strom, der seine ursprüngliche Stärke längere Zeit unverändert beibehält. In derselben Weise wirkt die Salpetersäure in dem Bunsenschen Element, welches sich von dem Groveschen Element dadurch unterscheidet, daß Kohle die Stelle des Platins tritt. In dem sehr konstanten Daniellschen Element (Zink in ver-

dünnter Schwefelsäure, Kupfer in Kupfersulfatlösung) ist die Polarisierung dadurch vermieden, daß überhaupt kein Wasserstoff, sondern Kupfer abgeschieden wird, welches sich metallisch auf der Kupferplatte absetzt. Auch das Element von Latimer Clark (Quecksilber, Brei von Quecksilbersulfat und Zinksulfat, reines Zink) besitzt eine konstant bleibende elektromotorische Kraft.

Auch von dem Vorgange der Stromerzeugung in den galvanischen Elementen hat man sich in jüngster Zeit auf Grund der Vorstellungen der Ionentheorie (210) ein Bild zu machen gesucht. Wird Wasser zwischen Platinelektroden zersetzt, so bekundet die dabei auftretende Gegenkraft offenbar ein Bestreben der abgeschiedenen Gase, in den Ionenzustand zurückzukehren. Sie folgen diesem Bestreben, sobald die treibende elektromotorische Kraft aus dem Stromkreise entfernt wird. Dann gehen positive H -Ionen von der Wasserstoffelektrode, negative O -Ionen von der Sauerstoffelektrode in Lösung; erstere Elektrode wird dadurch negativ, letztere positiv, und werden sie durch einen Draht verbunden, so fließt in diesem ein Strom von der Sauerstoff- zur Wasserstoffelektrode so lange, bis die Gase von den Platten wieder vollständig in Lösung gegangen sind. In gleicher Weise faßt man auch die beim Eintauchen eines Metalls in einen Elektrolyten auftretende Potentialdifferenz als die Folge einer Neigung des Metalls auf, in den Ionenzustand überzugehen. Taucht man z. B. Zink in Schwefelsäure, so gehen Zinkionen, d. h. positiv geladene Zinkatome in die Lösung und laden diese positiv, während das Zink durch den Verlust der positiven Ladung negativ wird. Dieser Vorgang wird so lange andauern, bis die entstandene Potentialdifferenz zwischen Metall und Flüssigkeit, die ja die positiven Ionen nach dem negativ geladenen Metalle zurückzieht, dem Bestreben des Metalles, Ionen zu bilden, das Gleichgewicht hält. Man bezeichnet dieses Bestreben eines Metalles, Ionen zu bilden, als seinen „elektrolytischen Lösungsdruck“ (Lösungstension, Nernst, 1889). Wenn aber die Potentialdifferenz zwischen Metall und Flüssigkeit von diesem Lösungsdrucke abhängt, so wird sie verschieden ausfallen, je nachdem die Flüssigkeit Ionen des betreffenden Metalles schon enthält oder nicht. Taucht man z. B. Zink in eine Lösung von Zinksulfat, die bereits Zinkionen enthält, so werden weniger Ionen entstehen können, da der osmotische Druck der vorhandenen Ionen dem elektrolytischen Lösungsdrucke entgegenwirkt. Infolgedessen wird die Potentialdifferenz zwischen dem Metall und der Lösung kleiner sein, als etwa zwischen dem Metall und reinem Wasser. Dies ist in der Tat der Fall, nicht bloß beim Zink, sondern bei allen unedlen Metallen. Sie laden sich in Berührung mit Flüssigkeiten stets negativ, aber in ihren Salzlösungen weniger als in reinem Wasser. Anders verhalten sich die edlen Metalle. Auch sie können wie alle Metalle nur positive Ionen bilden. Taucht man Kupfer in reines Wasser, so wird es negativ, die Flüssigkeit positiv. Taucht man aber Kupfer in die Lösung eines Kupfersalzes, so wird das Kupfer positiv und die Lösung negativ. Das Kupfer hat einen sehr geringen Lösungsdruck. Sind daher in der Lösung etwa Ionen mit einem beträchtlichen osmotischen Druck vorhanden, so ist die Lösung gegen das Kupfer gewissermaßen übersättigt an Ionen: es schlagen sich einige Ionen auf dem Kupfer nieder; das Metall wird positiv und die Flüssigkeit negativ, so lange, bis dem Drucküberschuß durch die entstandene Potentialdifferenz das Gleichgewicht gehalten wird. Da die an den Ionen haftenden Elektrizitätsmengen sehr groß sind (211), so sind die Substanzmengen, welche die beschriebenen Ladungen in der offenen Kette bewirken, unwägbar klein. Verbindet man aber die Pole eines Daniellschen Elements durch einen Draht und bringt ihre entgegengesetzten Ladungen dadurch zum Ausgleich, so wird auch das Gleichgewicht zwischen den Metallen und den Flüssigkeiten gestört. Der Lösungsdruck des Zinks treibt neue Zinkionen in die Lösung und der osmotische Druck der Kupferionen schlägt neue Kupfermengen auf dem Kupfer nieder. Durch das Spiel dieser Druckkräfte wird der Strom unterhalten, indem andauernd Zink sich auflöst, und Kupfer sich niederschlägt.

Auf Grund dieser Vorstellungen über die Stromerzeugung in den galva-

nischen Elementen hat sich für eine Reihe von Fällen die elektromotorische Kraft der Elemente in befriedigender Übereinstimmung mit der Erfahrung berechnen lassen.

217. Ablenkung der Magnetnadel. Oerstedt entdeckte im Jahre 1820, daß eine in der Nähe eines vom Strom durchflossenen Leiters drehbar aufgestellte Magnetnadel aus ihrer Gleichgewichtslage im magnetischen Meridian, welche sie infolge der magnetischen Einwirkung der Erde annimmt, abgelenkt wird und sich in eine neue Gleichgewichtslage einstellt. Vom Stromleiter aus wirkt also auf die Nadel ein Kräftepaar, durch welches sie so lange gedreht wird, bis demselben das vom Erdmagnetismus herrührende Kräftepaar das Gleichgewicht hält. Kompensiert man die Wirkung der Erde durch einen genähernten Magnet, d. h. macht man die Nadel astatisch (142), so stellt sie sich rechtwinklig zu einem geradlinigen Stromleiter, der über oder unter ihr horizontal verläuft. Der Strom sucht also die Nadel senkrecht zu seiner Richtung zu stellen, oder das vom Strom auf die Nadel ausgeübte Kräftepaar steht senkrecht auf der durch den Strom und den Drehpunkt der Nadel gelegten Ebene.

Umgekehrt wird ein beweglich aufgehängter Stromleiter von einem festliegenden Magnet abgelenkt und sucht sich senkrecht zu dessen magnetischer Achse zu stellen (Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung).

218. Ampèresche Regel. Um die Richtung, nach welcher die Ablenkung erfolgt, zu bestimmen, hat Ampère folgende praktische Regel angegeben: Man denke sich in dem Stromleiter eine kleine menschliche Figur, den Kopf voran und das Gesicht der Nadel zugewendet, mit dem Strome schwimmend, so wird der Nordpol der Nadel stets nach der linken Seite der Figur abgelenkt.

Ist der Leitungsdräht in der durch die Nadel gelegt gedachten lotrechten Ebene um die Nadel herumgebogen, so ergibt sich aus dieser Regel, daß alle Teile dieses Stromkreises die Nadel im gleichen Sinne abzulenken streben, und zwar so, daß ihr Südpol nach der Seite hin abgelenkt wird, von welcher aus betrachtet der Strom die Nadel in der Richtung des Uhrzeigers umkreist.

219. Galvanoskop. Ein an seinen Enden mit Klemmschrauben versehener Kupferstreifen, der um eine auf einer Spitze schwebende Magnetnadel herumgebogen ist, kann daher dazu dienen, nicht bloß aus der Ablenkung der Nadel das Dasein, sondern auch aus dem Sinne der Ablenkung die Richtung eines Stromes, in dessen Schließungskreise dieses Galvanoskop eingeschaltet wird, zu erkennen.

220. Galvanometer. Multiplikator. Die Kraft, mit welcher der Strom die Magnetnadel abzulenken strebt, ist der Stromstärke proportional. Denn hängt man über einem im magnetischen Meridian horizontal ausgespannten Leitungsdräht eine Magnetnadel an einem oben mit Torsionskreis versehenen Drahte auf, so ist der Drehungswinkel, um welchen man diesen Draht drücken muß, um die abgelenkte Nadel wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückzuführen,

der Menge Knallgas proportional, welche in einem gleichzeitig in den Strom eingeschalteten Voltameter entwickelt wird.

Durch Beobachtung der Ablenkung der Magnetnadel können daher Stromstärken miteinander verglichen und somit gemessen werden. Apparate, welche zu derartigen Messungen bestimmt sind, heißen Galvanometer.

Handelt es sich um geringe Stromstärken, so wird der Leitungsdraht, um die Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel zu vergrößern, in zahlreichen Windungen, welche durch Umspinnung mit Seide oder sonstwie voneinander isoliert sind, um die Nadel herumgeführt (Fig. 178). Da alle Windungen in gleichem Sinne auf die Nadel wirken und demnach die ablenkende Kraft im Verhältnis der Anzahl der Windungen vervielfacht (multipliziert) wird, nennt man

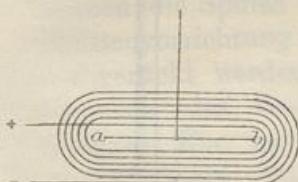


Fig. 178.

Multiplikator mit einfacher Nadel.

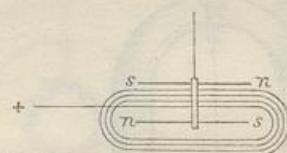


Fig. 179.

Multiplikator mit astaticer Nadel.

eine solche Vorrichtung Multiplikator (Schweigger, Poggendorff, 1821). Die Magnetnadel ist leicht beweglich an einem Kokonfaden aufgehängt.

Um noch größere Empfindlichkeit zu erreichen, wendet man ein astatices Nadelpaar (Nobili, 1825) an (Fig. 179), nämlich zwei durch ein Stäbchen miteinander fest verbundene und mit den gleichnamigen Polen nach entgegengesetzten Seiten gewendete Magnetnadeln *n s* und *s n* (vgl. 142), deren eine innerhalb, die andere außerhalb des Multiplikatorrahmens schwebt. Sind die Nadeln nahezu gleich stark magnetisch, so hebt sich die Wirkung des Erdmagnetismus, der jede Nadel mit ihrem Nordpol nach Norden zu richten strebt, auf das vereinte Paar nahezu auf. Das Nadelpaar wird also nur durch eine sehr geringe Kraft im magnetischen Meridian festgehalten, und kann daher schon durch einen sehr schwachen Strom aus dieser Richtung abgelenkt werden, um so mehr, als der in den Windungen des Multiplikators kreisende Strom nach der Ampèreschen Regel auf beide Nadeln im gleichen Sinne wirkt. Die Fig. 180 zeigt ein solches Galvanometer mit astaticem Nadelpaar; die untere Nadel schwebt verborgen in der Höhlung eines Holzrahmchens, auf welches die Windungen des Multiplikatordrahtes gewickelt sind, die obere spielt über einem in Grade eingeteilten Kreis, an welchem man den Ablenkungswinkel abliest. Um störende Luftströmungen abzuhalten, ist eine Glasglocke über das Instrument gestülpt, vor welcher zwei Klemmschrauben sichtbar sind, die mit den Drahtenden des Multiplikators verbunden sind, und zur Aufnahme der Zuleitungsdrähte dienen.

Der Ablenkungswinkel gibt nun aber keineswegs unmittelbar ein Maß für die Stromstärke; denn die ablenkende Kraft, obwohl bei gleichbleibender Stellung der Nadel der Stromstärke proportional, ändert sich, wenn die Nadel ihre Lage zum Stromkreis ändert, und ist daher vom Ablenkungswinkel selbst abhängig, und zwar je nach der Konstruktion des Instruments in verschiedener Weise. Da jedoch jeder Stromstärke eine bestimmte Ablenkung entspricht, so kann man durch Versuche mit bekannten Stromstärken für

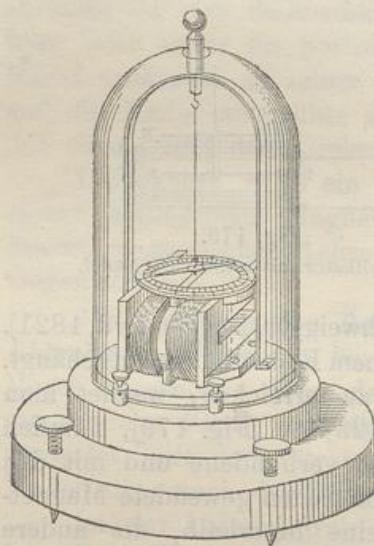


Fig. 180.
Astatices Galvanometer.

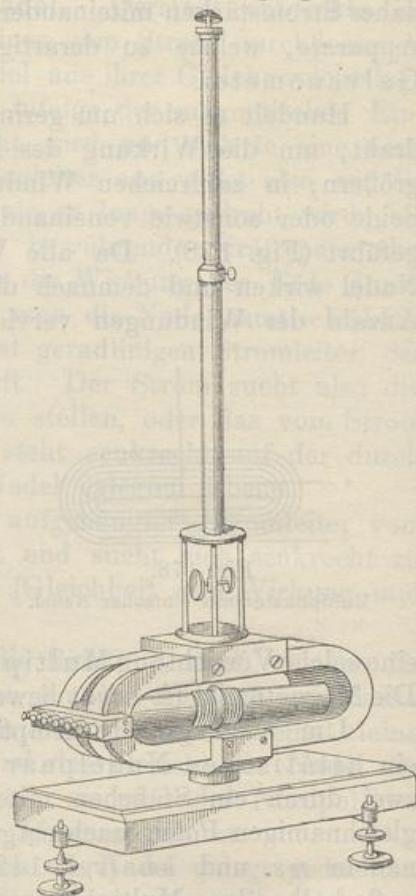


Fig. 181.
Spiegelgalvanometer.

jedes Galvanometer eine Tabelle entwerfen, aus welcher sich für jeden beobachteten Ablenkungswinkel die zugehörige Stromstärke entnehmen lässt.

Für praktische Zwecke sehr bequem sind Instrumente, bei denen der Teilkreis, auf dem der Zeiger spielt, nicht in Grade geteilt ist, sondern unmittelbar die Stromstärken angibt, die die betreffende Ablenkung der Nadel bewirken. Man bezeichnet sie als Milli-Ampèremeter, wenn sie die Stromstärken in Tausendsteln eines Ampères abzulesen gestatten.

221. **Spiegelgalvanometer.** Eine noch größere Empfindlichkeit erreicht man mit den Spiegelgalvanometern. Bei diesen ist über dem Magnet und fest mit ihm verbunden ein kleiner Spiegel angebracht, der, wie beim Magnetometer (147), die Ablenkung durch Fernrohr und Skala zu messen gestattet. Fig. 181 zeigt eine Ausführungsform eines derartigen Instrumentes. Bei ihm schwebt der

Magnetstab in einer dicken Kupferhülse; auf diese ist der Multiplikatordraht in mehreren voneinander getrennten Lagen aufgewickelt, welche man vermittelst der links sichtbaren Klemmschrauben in verschiedener Weise unter sich und mit den Zuleitungsdrähten verbinden kann. Die Kupferhülse hat den Zweck, die Schwingungen des Magnetstabes zu beruhigen (Dämpfung, 276). Da letztere Wirkung um so kräftiger ist, je enger der Magnet von der Kupfermasse umschlossen ist, so hat G. Wiedemann dem Magneten die Gestalt eines leichten Stahlringes gegeben, der in dem Hohlraum eines dicken Kupferzyinders schwingt (Fig. 182 a). Über diesen werden von beiden Seiten die kreisförmig gestalteten Spulen geschoben. Doch können die Spulen auch auf einer Schlittenvorrichtung von dem Magnet abgerückt werden, um die Empfindlichkeit des Instrumentes zu vermindern. Eine andere häufig benutzte Form des Magnets im Galvanometer mit Kupferdämpfung ist der von W. Siemens angegebene Glockenmagnet (Fig. 182 b), der in dem zylindrischen Hohlraum einer Kupferkugel hängt.

Will man bei diesen Instrumenten eine Steigerung der Empfindlichkeit durch Abschwächung der Richtkraft des erdmagnetischen Feldes herbeiführen, so kann man dies erreichen, indem man neben, über oder unter dem Instrument einen größeren Magnetstab in solcher Lage und Entfernung anbringt, daß seine Wirkung auf die Nadel derjenigen des Erdmagnetismus entgegengerichtet ist (142). (Astasierungsmagnet, Hauyscher Stab.)

Aber man kann auch bei den Spiegelgalvanometern eine Verbindung von zwei entgegengesetzt gerichteten Magneten, ein astaticisches Nadelpaar benutzen. Bei der Konstruktion von Sir W. Thomson ist jeder der beiden Magnete von einer besonderen Spule umgeben, und der Strom wird durch die beiden Spulen in entgegengesetzter Richtung geleitet, wodurch eine Verdoppelung der Wirkung erreicht wird.

Mit derartigen hochempfindlichen Instrumenten kann man Ströme messen von der Größenordnung eines tausendmillionstel Ampère. Dabei sind für die Spiegelgalvanometer die Ausschläge der Stromstärke sehr nahe proportional, weil die Ablenkungswinkel der Nadel bei diesen Instrumenten ja immer nur sehr gering sind.

222. **Tangentenbussole** (Pouillet, 1843). Gibt man dem Stromleiter die Gestalt eines kreisförmigen Ringes in vertikaler Ebene (Fig. 183), und macht man die in seinem Mittelpunkt in horizontaler Ebene drehbare Magnetnadel so klein, daß ihre verschiedenen Stellungen in bezug auf den Stromkreis nicht in Betracht kommen, so

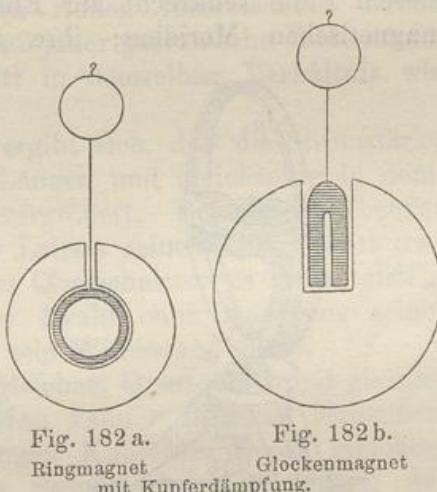


Fig. 182 a.

Ringmagnet

Fig. 182 b.

Glockenmagnet
mit Kupferdämpfung.

ist die ablenkende Kraft, welche zur Ebene des Kreises senkrecht steht, wiederum nur von der Stromstärke abhängig und derselben proportional. Der Ring kann in seinem Fußgestell so gedreht werden, daß seine Ebene mit der Ruhelage der Magnetnadel (d. i. mit dem magnetischen Meridian) zusammenfällt; er wird während der Beobachtung in dieser Stellung belassen, und der Ablenkungswinkel α an einer Kreisteilung abgelesen, in deren Mitte die Magnetnadel schwebt. Die ablenkende Kraft des Stromes $k J$ (Fig. 184) steht in diesem Falle senkrecht zur Ebene des Ringes, d. i. senkrecht zum magnetischen Meridian; ihre zur Nadel senkrechte Komponente

$k J \cos \alpha$ hält der ebenfalls zur Nadel senkrechten Komponente $M \sin \alpha$ der ablenkenden Kraft des Erdmagnetismus das Gleichgewicht; es ist daher $k J \cos \alpha = M \sin \alpha$ oder $J = K \operatorname{tg} \alpha$, d. h. die Stromstärke ist der Tangente des Ablenkungswinkels proportional, weshalb das Instrument

Tangenten-bussole heißt. Da

der Kreis ziemlich

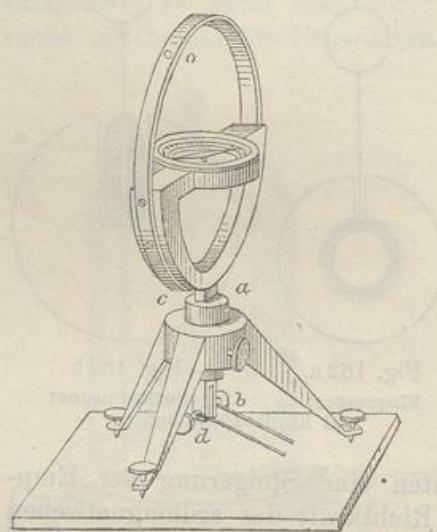


Fig. 183.
Tangentenbussole.

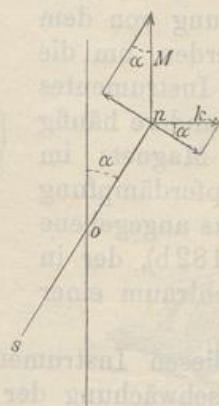


Fig. 184.
Zur Tangentenbussole.

weit von der Magnetnadel entfernt ist (man gibt ihm einen Radius von mindestens 0,2 m), so kann die Tangentenbussole nur bei stärkeren Strömen angewendet werden.

Schaltet man in einen und denselben Stromkreis mehrere Tangentenbussolen hintereinander, so werden dieselben im allgemeinen verschiedene Ablenkungen zeigen; denn der Ausschlag der Nadel ist ja bei jedem Instrument von der individuellen Gestaltung des Stromleiters, sowie von der örtlichen Stärke des Magnetfeldes der Erde abhängig. Ein Voltameter dagegen, wie es auch beschaffen sein mag, liefert für dieselbe Stromstärke in gleicher Zeit immer dieselbe Gasmenge. Man kann nun eine Tangentenbussole eichen, wenn man sie gleichzeitig mit einem Voltameter in eine Stromleitung einschaltet, und an jener den Ausschlag α abliest, an diesem die Stromstärke J in Ampère ermittelt. Aus der Gleichung $J = K \operatorname{tg} \alpha$, in welcher jetzt J und α bekannt sind, läßt sich alsdann leicht der „Reduktionsfaktor“ K (vgl. 243) der Tangentenbussole bestimmen, so daß sich nun auch bei alleiniger Anwendung des Instruments die Stromstärke sofort und auf bequemere Weise als mit dem Voltameter in Ampère ausgedrückt ergibt.

223. **Widerstand. Leitfähigkeit.** Wenn man ein galvanisches Element durch einen Draht schließt, so zeigt ein gleichzeitig in den Schließungskreis eingeschalteter Strommesser (z. B. eine Tangentenbussole), daß der Strom schwächer wird, wenn man den Schließungsdraht länger macht. Wir schreiben diese Schwächung des Stromes einem Widerstand zu, welchen der Draht dem Durchgang des Stromes entgegenseetzt, vergleichbar dem durch Reibung verursachten Widerstand, welchen Wasser erleidet, das in stationärer Bewegung durch eine Röhre strömt, an deren Enden verschiedener Druck herrscht (vgl. 68); wir nehmen an, daß jener galvanische Widerstand, wie dieser, bei gleichem Querschnitt in demselben Verhältnis wie die Länge der Leitung wächst.

Für Drähte aus gleichem Stoff ergibt sich, daß die Stromstärke ungeändert bleibt, wenn man ihre Längen und gleichzeitig in demselben Verhältnis ihre Querschnitte vergrößert. Bei gleichbleibender Länge ist also der Widerstand eines Leiters seinem Querschnitt umgekehrt proportional. Die Gestalt des Querschnittes ist dabei gleichgültig. Wird z. B. ein zylindrischer Draht ohne Änderung seiner Länge platt gewalzt, so ändert sich sein Widerstand nicht.

Verschiedene Stoffe zeigen bei gleichem Querschnitt und gleicher Länge verschiedenen Widerstand. Man kann z. B. einen Neusilberdraht durch einen $13\frac{1}{2}$ mal so langen Kupferdraht von gleichem Querschnitt ersetzen, ohne daß die Stromstärke sich ändert; der Widerstand dieses Kupferdrahtes ist also gleich demjenigen des Neusilberdrahtes, oder bei gleicher Länge und gleichem Querschnitt ist der spezifische Widerstand des Kupfers nur $1:13\frac{1}{2}$ von demjenigen des Neusilbers, oder seine spezifische Leitfähigkeit ist $13\frac{1}{2}$ mal so groß wie diejenige des Neusilbers.

Zusammengefaßt ergibt sich also: Der Widerstand eines linearen Leiters (z. B. Drahtes) steht im geraden Verhältnis seiner Länge, im umgekehrten Verhältnis seines Querschnittes und seiner spezifischen Leitfähigkeit.

Bezeichnet man die Länge eines Drahtes mit l , seinen Querschnitt mit q , seine spezifische Leitfähigkeit mit k , und seinen Widerstand mit r , so hat man hiernach:

$$r = \frac{l}{k q}.$$

Der spezifische Widerstand ist der reziproke Wert der spezifischen Leitfähigkeit, $= 1:k$.

Für die spezifische Leitfähigkeit der reinen festen Metalle ergeben sich, wenn man diejenige des Quecksilbers = 1 annimmt, folgende Zahlen:

Silber	59	Platin	8
Kupfer	55	Eisen	8
Gold	41	Blei	5
Zink	15	Wismut	0,8

Vergleicht man diese Zahlenreihe mit derjenigen für die Wärmeleitfähigkeit derselben Metalle (125), so findet man die von G. Wiedemann und Franz (1853) entdeckte, merkwürdige Beziehung, daß die elektrische Leitfähigkeit der Metalle mit der Wärmeleitfähigkeit proportional ist.

Die Leitfähigkeit von Legierungen liegt nicht immer zwischen denjenigen ihrer Bestandteile. Die Leitfähigkeit eines Metalls wird oft durch eine geringe Beimischung eines anderen beträchtlich geändert. Auch Änderungen des inneren Gefüges üben Einfluß auf die Leitfähigkeit; so z. B. nimmt mit dem Härteten des Stahls sein Leitvermögen zu.

Auch die zwischen den Elektroden einer Zersetzungszelle oder zwischen den Platten eines galvanischen Elements enthaltene Flüssigkeitsschicht kann als ein linearer Leiter, gleichsam als ein Flüssigkeitsdraht, angesehen werden, dessen Länge gleich dem längs der Strombahn gemessenen Abstand der Platten und dessen Querschnitt gleich der Oberfläche der Platten ist. Die Leitfähigkeit der Flüssigkeiten oder Leiter zweiter Klasse (Elektrolyte) ist weit geringer als diejenige der Metalle; so beträgt z. B. die Leitfähigkeit der verdünnten Schwefelsäure (30%) nur 71 Millionteile (0,000 071) von derjenigen des Quecksilbers, die einer konzentrierten Silbernitratlösung 0,000 020, die einer gesättigten Lösung von Kupfersulfat 0,000 004.

Da in den Elektrolyten der Transport der Elektrizität ausschließlich durch die Wanderung der Ionen bewirkt wird (210), so hängt die Leitfähigkeit der Elektrolyte von der Zahl der zwischen den Elektroden vorhandenen Ionen und von ihrer Wanderungsgeschwindigkeit ab. Mit wachsender Konzentration einer Lösung nimmt daher ihre Leitfähigkeit zu. Doch ist die Leitfähigkeit der Konzentration nicht proportional, sondern sie nimmt langsamer zu, als der Konzentrationszunahme entspricht, weil nur der dissozierte Anteil des gelösten Stoffes die Leitung vermittelt, mit wachsender Konzentration aber ein wachsender Anteil des gelösten Stoffes undissoziiert bleibt, die Zahl der Ionen also nicht entsprechend der Konzentrationszunahme wächst. Auch mit der Temperatur ändert sich der Dissoziationsgrad. Vor allem aber wächst mit steigender Temperatur die Beweglichkeit der Ionen, weil die Reibungswiderstände geringer werden. Daher kommt es, daß die Leitfähigkeit der Elektrolyte mit wachsender Temperatur rasch zunimmt, ihr Widerstand also entsprechend abnimmt; für konzentrierte Zinksulfatlösung z. B. um 3 Prozent für je 1° .

Der spezifische Widerstand der Metalle dagegen nimmt bei Erwärmung zu: die Zunahme für 1° C. oder der Temperaturkoeffizient beträgt z. B. für Quecksilber 0,00092, für die festen einfachen Metalle nahezu 0,0037 (nahezu gleich dem Ausdehnungskoeffizienten der Gase), für Neusilber nur 0,0004, noch weniger für Nickelin und Manganin. Bei Gaskohle und Graphit nimmt der Widerstand mit steigender Temperatur ab. Kristallinisches Selen leitet besser, wenn es von Licht bestrahlt wird. Der Widerstand des Wismuts wächst, wenn es von Magnetkraftlinien senkrecht zur Stromrichtung getroffen wird, proportional der Feldstärke. Vermöge dieses Verhaltens läßt sich die magnetische Feldstärke durch Widerstandsmessung bestimmen.

224. **Widerstandseinheit.** Als Einheit des Widerstandes wurde von W. Siemens derjenige eines Quecksilberfadens von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei einer Temperatur von 0° (1 Siemens) vorgeschlagen. Durch internationale Übereinkunft wurde später eine andere nach theoretischen Gesichtspunkten gewählte Widerstandseinheit, das Ohm (benannt zu Ehren G. S. Ohms, des Entdeckers der Gesetze des galvanischen Stromes, s. 226) festgesetzt. Ein Ohm ist der Widerstand eines Quecksilberfadens von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° (oder von 106,3 cm Länge und, da der Querschnitt praktisch durch Wägung bestimmt wird, von 14,4521 g Gewicht).

Auch den Angaben über den spezifischen Widerstand legt man die Ohm-Einheit zugrunde, indem man den Widerstand eines Zylinders von 1 qcm Querschnitt und 1 cm Länge, in Ohm gemessen, als spezifischen Widerstand bezeichnet. (Widerstand eines cm-Würfels in Ohm.) Diese für die Metalle kleinen Zahlen (z. B. Kupfer 0,000 0017, Platin 0,000 0108, Quecksilber 0,000 0958 bei 18°) geben mit 10^4 multipliziert den Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt in Ohm (Kupfer 0,017, Platin 0,108, Quecksilber 0,958). In demselben Maße ist der spezifische Widerstand einer gesättigten Kupfersulfat-Lösung 22 Ohm-cm-Würfel.

225. **Rheostate.** Zur Feststellung der Einheit des Widerstandes hat man das Quecksilber gewählt, weil es sich jederzeit leicht (durch Destillation) in vollkommener Reinheit darstellen lässt. Zum Gebrauche bei Messungen würde jedoch das flüssige Metall unbequem sein; man kann aber Drähte aus festem Metall so abpassen, daß ihr Widerstand der Widerstandseinheit (1 Ohm) oder einem beliebigen Vielfachen oder Bruchteil derselben gleich ist. Als Material nimmt man zweckmäßig Neusilber (54% Kupfer, 28% Zink, 18% Nickel) oder noch besser Manganin (84 Kupfer, 12 Mangan, 4 Nickel), Konstantan (60 Kupfer, 40 Nickel) oder Nickelin (54 Kupfer, 26 Nickel, 20 Zink), Legierungen, die sich durch großen spezifischen Widerstand (ungefähr 0,000 04 Ohm-cm-Würfel) und geringe Abhängigkeit desselben von der Temperatur auszeichnen.

Vorrichtungen, welche dazu dienen, in einen Schließungskreis Widerstände von bekannter Größe nach Belieben ein- oder auszuschalten, ohne den Strom zu unterbrechen, sei es, um dadurch eine gewünschte Stromstärke zu erzielen, sei es behufs Vergleichung unbekannter Widerstände mit bekannten, nennt man Rheostate.

Einen einfachen Regulierwiderstand, die neuere Gestaltung einer ursprünglich von Wheatstone angegebenen Rheostatenform zeigt

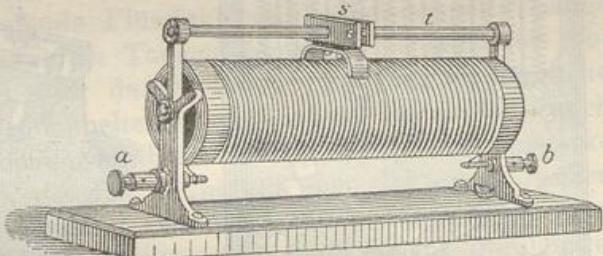


Fig. 185.
Einfacher Regulierwiderstand.

Fig. 185. Auf einen Porzellanzyylinder mit eingeschnittener Schraubenlinie ist ein Konstantan- oder Nickelindraht aufgewickelt. Sein eines Ende steht mit der Klemme *a* in Verbindung, die isoliert durch den metallenen Träger des Porzellanzyliners hindurchgeführt ist. Wird der Strom in *a* eingeleitet, so durchläuft er den Draht bis zu dem auf der Stange *t* verschiebbaren Bügel *s*, der mit kräftiger Feder auf dem aufgewickelten Drahte schleift. Dieser leitet den Strom durch den dicken Metallstab *t* zu dem metallenen Träger des Porzellanzyliners und zur Austrittsklemme *b*. Je weiter nach der Klemme *b* hin der Bügel *s* geschoben wird, um so mehr Windungen des aufgewickelten Drahtes muß der Strom durchlaufen.

Für größere Stromstärken müssen die Widerstände mit Rücksicht auf die beim Stromdurchgange stattfindende Erwärmung (vgl. 234)

aus dickeren Drähten hergestellt werden. Man spannt sie in Form enger Spiralen auf eisernen Rahmen zwischen isolierenden Schieferplatten so auf, daß die Luft zwischen den Drähten entlang streichen und da-

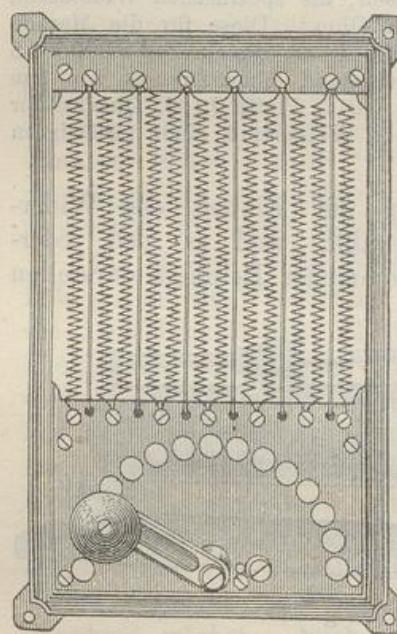


Fig. 186.
Technischer Regulierwiderstand.

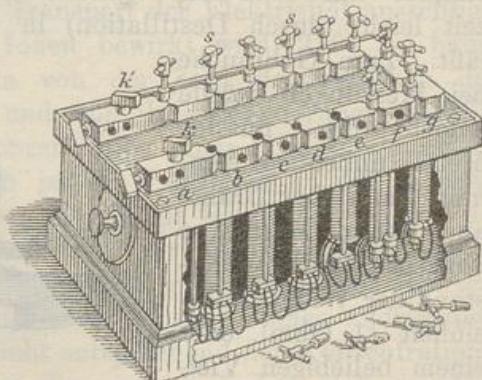


Fig. 187.
Stöpselrheostat.

durch eine abkühlende Wirkung ausüben kann. Alle Spiralen sind hintereinander geschaltet und ihre Enden außerdem mit isolierten Metallknöpfen verbunden, über die eine Metallkurbel hinwieggleitet. Letztere wird mit dem einen Ende, der Anfang der ersten Spirale mit dem anderen Ende des Leitungskreises verbunden. Durch Drehen der Kurbel in dem einen oder anderen Sinne werden dann mehr oder weniger Spiralen in den Stromkreis eingeschaltet (Fig. 186).

Für schwache Ströme, im besonderen bei der Vergleichung und Messung von Widerständen bedient man sich des Stöpselrheostaten (Fig. 187). Er besteht aus einer in einem Holzkasten aufgestellten Reihe von doppelt gewundenen Drahtspulen (265), deren Widerstände 1, 2, 3, 4, 10 usw. Ohm betragen, und demnach wie

ein Gewichtssatz jede beliebige Anzahl von Einheiten zusammenzusetzen erlauben. Über jeder Spule befindet sich auf dem aus Hartgummi hergestellten Deckel des Kastens eine dicke Messingplatte (*a, b, c . . .*); die erste *a* trägt die Klemmschraube *k*, die letzte die Klemmschraube *k'*. Das eine Drahtende jeder Spule ist an die darüber befindliche, das andere an die nächstfolgende Platte angelötet. An ihren gegenüberstehenden Seiten haben die Platten halbkreisförmige Ausschnitte, in welche messingene Stöpsel *s* eingesetzt werden können. Sind überall Stöpsel eingesetzt, so geht der Strom von *k* nach *k'* ohne merklichen Widerstand durch die dicken Metallplatten, ohne eine Drahtrolle zu durchlaufen. Zieht man aber einen oder mehrere Stöpsel aus, so geht der Strom durch die zugehörigen Spulen und erleidet den ihnen entsprechenden Widerstand.

226. Ohmsches Gesetz. Ein konstantes galvanisches Element werde durch einen Rheostaten und eine Tangentenbussole geschlossen, deren Kupferring samt Zuleitungsdrähten so dick ist, daß sein Widerstand wegen des großen Querschnittes gegenüber dem Widerstand des übrigen Stromkreises nicht in Betracht kommt. Die Magnetnadel der Tangentenbussole wird um einen bestimmten Winkel abgelenkt. Fügt man zu dem Element noch ein zweites ganz gleiches hinzu, indem man die beiden Elemente nach Art der Voltaschen Säule hintereinander schaltet, so ist die elektromotorische Kraft verdoppelt, zugleich aber auch der Widerstand innerhalb der Elemente, da jetzt die zu durchlaufende Flüssigkeitssäule die doppelte Länge hat. Man muß nun, damit die Tangentenbussole die nämliche Ablenkung wie vorhin zeige, oder damit die Stromstärke die nämliche bleibe, am Rheostaten die doppelte Drahtlänge einschalten, also auch den Widerstand des Schließungsdrähtes verdoppeln. Die Stromstärke ändert sich also nicht, wenn das Verhältnis der elektromotorischen Kraft zu dem Gesamtwiderstand des Schließungskreises ungeändert bleibt. Wenn man dagegen das ursprüngliche Element durch zwei Elemente derselben Art ersetzt, deren Platten dieselbe Größe, aber nur den halben Abstand voneinander haben, so ist hiermit die elektromotorische Kraft ebenfalls verdoppelt, der Widerstand aber nicht geändert, da die Gesamtlänge der zu durchlaufenden Flüssigkeit die nämliche geblieben ist. Die Tangentenbussole zeigt aber jetzt die doppelte Stromstärke an. Die Stromstärke ist somit der elektromotorischen Kraft proportional.

Durch ähnliche Versuche fand G. S. Ohm (1826) das nach ihm benannte wichtige Gesetz:

Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt, dem Gesamtwiderstand des Stromkreises umgekehrt proportional.

Die Einheit der elektromotorischen Kraft ist durch internationale Übereinkunft so festgesetzt, daß sie in einem Stromkreis vom Widerstand 1 Ohm einen Strom von der Stärke 1 Ampère hervorruft, und diese Einheit ist zu Ehren Volas „Volt“ genannt. Mit

Zugrundelegung dieser Einheiten kann man das Ohmsche Gesetz auch so aussprechen: Die Stromstärke (J , in Ampère) ist gleich der elektromotorischen Kraft (E , in Volt) dividiert durch den Gesamtwiderstand (R , in Ohm), oder $J = E:R$.

Die Wahl der praktischen Einheiten Ampère, Ohm, Volt ist mit Rücksicht auf das sog. absolute elektromagnetische Maßsystem erfolgt, indem 1 Ampère gleich 10^{-1} der absoluten Einheit der Stromstärke, 1 Volt gleich 10^3 der absoluten Einheit der Spannung und 1 Ohm gleich $1 \text{ Ampère}/1 \text{ Volt}$ festgesetzt worden ist (vgl. 243, 262, 274). Aber diese Einheiten beruhen auf schwierigen wissenschaftlichen Messungen. Um sie in einer für die Praxis brauchbaren, auf leicht ausführbaren Messungen beruhenden Weise zu definieren, hat man für 1 Ampère das elektrochemische Äquivalent des Silbers und für 1 Ohm Länge und Masse eines Quecksilberfadens von 0° von diesem Widerstande genau bestimmt, und Strom- und Widerstandseinheit auf Grund dieser Messungen (211, 224), die Spannungseinheit aber durch die Beziehung zu diesen Einheiten auf Grund des Ohmschen Gesetzes gesetzlich festgelegt.

Da die elektromotorische Kraft dem Spannungsunterschied an den Polen des nicht geschlossenen Elements entspricht und durch diesen gemessen wird, so kann man sie durch ein Elektrometer, z. B. das Thomsonsche Quadrantenelektrometer, ermitteln, indem man den einen Pol mit dem einen Quadrantenpaar, den anderen Pol aber und das andere Quadrantenpaar mit der Erde in Verbindung setzt, und den Ausschlag des Instruments mit demjenigen vergleicht, welchen ein konstantes Normalelement, dessen elektromotorische Kraft in Volt bekannt ist, hervorbringt. Als Normalelement verwendet man das Daniellsche (1,104 Volt), besser dasjenige von Latimer Clark (1,429 Volt), oder von Weston (1,019 Volt). Das Daniellsche Element selbst wird auch häufig als praktische Einheit der elektromotorischen Kraft (1 Daniell) gebraucht.

Wird ein galvanisches Element durch einen Draht geschlossen, so nimmt vom positiven Pol an die Spannung längs des Drahtes ab, weil ja eine Strömung der positiven Elektrizität nur von Stellen höheren Potentials zu solchen niedrigeren Potentials stattfinden kann. Die elektrometrische Untersuchung ergibt, daß die Spannung um gleichviel abnimmt, wenn man den Stromkreis entlang in der Richtung des Stromes um Strecken gleichen Widerstandes fortschreitet, oder daß die Abnahme der Spannung stets dem Widerstande des durchschrittenen Leiterstückes proportional ist. Der Quotient aus dem Spannungsunterschied der beiden Enden eines Leiterstückes und dessen Widerstand ist also in einem und demselben Stromkreis konstant, und diese Konstante ist eben die Stromstärke, von der wir ja wissen, daß sie an allen Stellen eines im stationären Zustand befindlichen Stromkreises die nämliche ist. Das Ohmsche Gesetz, „Stromstärke ist gleich Spannungsunterschied dividiert durch Widerstand“ gilt also nicht nur für den ganzen Stromkreis, sondern auch für jeden beliebigen seiner Teile besonders.

Die Spannungsdifferenz zwischen den Enden eines beliebigen Leiterstückes ergibt sich hiernach, wenn man die Stromstärke mit dem Widerstand des Leiters multipliziert. Insbesondere findet man den

Spannungsunterschied zwischen den Endpunkten des Schließungsdrähtes oder zwischen den Polklemmen einer geschlossenen Batterie, die sogenannte „Klemmenspannung“, als Produkt der Stromstärke mit dem Widerstand des Schließungsbogens. Die Klemmenspannung der geschlossenen Batterie ist sonach stets kleiner als ihre gesamte elektromotorische Kraft, welche ja dem Produkte der Stromstärke mit dem Gesamtwiderstande gleich ist, nähert sich derselben aber um so mehr, je größer der Widerstand des Schließungsbogens wird, und erreicht sie, wenn die Batterie offen, d. i. der Widerstand der Schließung unendlich groß ist.

227. Anwendung des Ohmschen Gesetzes. Das Ohmsche Gesetz gestattet bei allen praktischen Anwendungen des galvanischen Stromes zu beurteilen, auf welche Art die Batterie für einen bestimmten Zweck zusammengesetzt werden muß. Der Widerstand in jedem Schließungskreis ist nämlich zusammengesetzt aus zwei Teilen, aus dem Widerstand, den der Strom beim Durchgang durch die Flüssigkeit innerhalb der Elemente zu überwinden hat, oder dem inneren Widerstand, und dem äußeren Widerstand, den der von Pol zu Pol geführte Schließungsbogen darbietet. Verbindet man daher eine Anzahl von Elementen, z. B. zehn, nach dem Vorbild der Voltaschen Säule hintereinander, so wird nicht nur die elektromotorische Kraft, sondern auch der innere Widerstand zehnmal so groß; ist nun der äußere Widerstand so klein, daß er gegen den inneren kaum in Betracht kommt, wird z. B. die Batterie durch einen kurzen dicken Metalldraht geschlossen, so wird die Verzehnfachung der elektromotorischen Kraft durch diejenige des Widerstandes aufgehoben, und die zehnpaarige Batterie gibt keinen stärkeren Strom als ein einziges ihrer Elemente. Es ist in diesem Falle, nämlich bei sehr kleinem äußeren Widerstand, von Vorteil, nur ein einziges Element, aber mit möglichst großen Platten, zu wählen. Macht man nämlich die Platten des Elements z. B. zehnmal größer, so bleibt die elektromotorische Kraft zwar ungeändert, der innere Widerstand wird aber zehnmal geringer, weil der Querschnitt des zwischen den Platten enthaltenen flüssigen Leiters zehnmal größer geworden ist; man erreicht also mit dem zehnmal so großen Element eine zehnmal so große Wirkung. Es ergibt sich hieraus die Regel, daß bei geringem äußeren Widerstand die Anwendung vieler hintereinander geschalteter Elemente keinen Vorteil gewährt, wohl aber die Anwendung eines einzigen möglichst großen Elements. Aus den verfügbaren zehn Elementen kann man aber sofort ein einziges Element mit zehnfacher Plattenoberfläche herstellen, wenn man alle positiven (z. B. Kupfer- oder Platin-) Platten unter sich, und alle negativen (z. B. Zink-) Platten unter sich, oder wenn man die zehn Elemente nicht zu einer Säule hintereinander, sondern zu einem Element nebeneinander verbindet. Ist dagegen der äußere Widerstand sehr groß, wie z. B. derjenige eines viele Kilometer langen Telegraphendrahtes, so wird man einen um so stärkeren Strom erzielen, je mehr Elemente man

hintereinander zu einer Batterie zusammensetzt, weil die elektromotorische Kraft mit der Anzahl der Elemente wächst, der Gesamtwiderstand aber kaum geändert wird. Je größer der äußere Widerstand ist, desto weniger kommt es darauf an, ob der innere Widerstand größer oder kleiner ist, oder ob man kleine oder große Plattenpaare anwendet; mit kleinen Elementen wird man in diesem Falle dasselbe erreichen, wie mit größeren und kostspieligeren. Wenn eine Anzahl (z. B. zehn) Elemente zur Verfügung stehen, so kann man sie in verschiedener Weise zusammenstellen, nämlich zu einem Element von zehnfacher Plattengröße, oder zu einer Säule aus zwei Elementen von fünffacher Größe, oder aus fünf Elementen von doppelter Größe, oder endlich aus zehn Elementen von einfacher Größe. Auf die Frage, welche von diesen Verbindungen die größte Stromstärke liefert, gibt das Ohmsche Gesetz die Antwort: diejenige, bei welcher der innere Widerstand dem gegebenen äußeren Widerstand möglichst nahe gleichkommt. Eine Vorrichtung, welche solche Verbindungen rasch herzustellen und schnell miteinander zu vertauschen gestattet, so daß die vorteilhafteste leicht ausgewählt werden kann, heißt ein *Pachytrop*.

Auch für die vorteilhafteste Einrichtung der Galvanometer gibt das Ohmsche Gesetz die Regel, den Draht so zu wählen, daß der Widerstand der Multiplikatorwindungen demjenigen des übrigen Stromkreises möglichst gleich wird. Hat der zu messende Strom außerhalb des Galvanometers große Widerstände, z. B. Flüssigkeiten zu durchlaufen, so macht man den Multiplikator aus möglichst zahlreichen Windungen eines dünnen Drahtes; denn in diesem Falle ist die Ablenkung der Magnetnadel der Anzahl der Windungen nahezu proportional; ist jedoch der Widerstand des übrigen Stromkreises gering (wie z. B. bei der Thermosäule), so nützen zahlreiche Windungen nichts, sondern wenige Windungen eines dicken Drahtes sind vorteilhafter; denn in diesem Falle ist der Ausschlag dem Querschnitt des Multiplikatordrahtes proportional und unabhängig von seiner Windungszahl.

228. Konstanten galvanischer Elemente. Wird ein galvanisches Element durch eine Tangentenbussole mit dickem Draht, also unmerklichem Widerstand, geschlossen, so zeigt sie die Stromstärke

$$J = \frac{E}{R}$$

an, wenn E die elektromotorische Kraft, R den inneren Widerstand des Elements bedeutet. Schaltet man nun mittels eines Rheostaten noch einen bekannten Widerstand r hinzu, so wird die Stromstärke auf

$$J' = \frac{E}{R+r}$$

herabgemindert. Aus diesen beiden Gleichungen, in welchen die Stromstärken J und J' und der Widerstand r bekannt sind, lassen sich die zwei Unbekannten E und R , nämlich die elektromotorische

Kraft und der innere Widerstand des Elements leicht berechnen. Man nennt sie „die Konstanten des galvanischen Elements“. Dieses von Ohm angegebene Verfahren ist jedoch nur auf konstante Elemente anwendbar. Andere Methoden zur Bestimmung der elektromotorischen Kraft werden weiterhin zur Sprache kommen.

Die elektromotorischen Kräfte einiger galvanischer Elemente sind:

Daniell	1,104	Volt
Bunsen oder Grove . . .	1,9	"
Chromsäure-Element . . .	2,0	"
Meidinger	1,0	"
Leclanché	1,3	"
Latimer Clark	1,429	"
Weston	1,019	"
Blei-Akkumulator	1,9-2	"

Der innere Widerstand der Elemente hängt von ihren Dimensionen und der Art ihrer Zusammensetzung ab. Bei Elementen mit Tonzelle, wie Daniell und Bunsen, ist besonders die Beschaffenheit der Tonzelle von Einfluß. Für die gebräuchlichen Formen liegt der Widerstand bei den Daniell-Elementen zwischen 0,3 und 0,6 Ohm, bei den Bunsen-Elementen zwischen 0,1 und 0,2 Ohm. Bei den Akkumulatoren stehen sich die Platten in geringer Entfernung mit sehr großer Oberfläche gegenüber. Der Widerstand ist daher sehr gering. Infolgedessen muß man mit Akkumulatoren vorsichtiger umgehen als mit den gewöhnlichen Elementen, da sie bei Kurzschluß (d. h. bei direkter Verbindung der Pol ohne äußeren Widerstand) hohe Stromstärken von zerstörenden Wirkungen geben (Sicherungen, vgl. 234).

229. Stromverzweigung. Bisher betrachteten wir einen einfachen Stromkreis; jetzt nehmen wir an, daß der Schließungsdräht des Elements oder der Batterie E sich im Punkte a (Fig. 188) in zwei Teile teilt, die im Punkte b wieder zusammengehen. Da an jedem der Verzweigungspunkte, damit der stationäre Zustand erhalten bleibe, ebensoviel Elektrizität abströmen muß, als zufließt, so muß die Summe der Stromstärken in den Zweigen amb und anb der Stromstärke in dem unverzweigten Teile bEa gleich sein. Da ferner derselbe Spannungsunterschied es ist, nämlich derjenige zwischen den Punkten a und b , welcher die beiden Zweigströme in Bewegung setzt, so müssen die Spannungsverluste längs amb und längs anb , d. i. die Produkte der Stromstärken mit den zugehörigen Widerständen einander gleich sein, oder, was dasselbe heißt, die Stromstärken in den Zweigen verhalten sich umgekehrt wie deren Widerstände. Ist z. B. der Widerstand in der Abzweigung oder in dem „Nebenschluß“ (engl. Shunt) anb 99 mal so groß als in dem Stück amb , so ist die Stromstärke in amb 99 mal und die Stärke des Gesamtstromes 100 mal so groß als diejenige in anb .

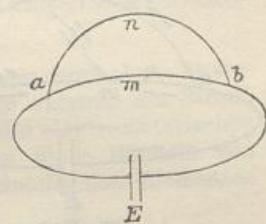


Fig. 188.
Stromverzweigung.

Man macht hiervon Gebrauch, um mittels eines Galvanometers, das nur auf schwache Ströme berechnet ist, auch starke Ströme zu messen, indem man das Galvanometer „in den Nebenschluß (a n b) legt“. Kennt man nämlich den Widerstand der Drahtwindungen des Galvanometers und den Widerstand von $a m b$, so ist die Stromstärke in $a m b$ so viel mal größer als die am Galvanometer abgelesene, als der Widerstand des Galvanometers größer ist als derjenige des Drahtstückes $a m b$. Die Stromstärke des Hauptstromes ist alsdann gleich der Summe der Stromstärken in $a m b$ und in $a n b$.

Ein Galvanometer von großem Widerstand im Nebenschluß kann auch zur Bestimmung des Spannungsunterschiedes zwischen den beiden Punkten a und b der Hauptleitung, an welche es angelegt ist, dienen. Denn dieser Spannungsunterschied ist der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstande des Galvanometerdrahtes gleich, also der Stromstärke im Galvanometer proportional. Es läßt sich daher, wenn man den Widerstand des Galvanometers in Ohm und für jeden seiner Ausschläge die Stromstärke in Ampère kennt, der Potentialunterschied zwischen den Punkten a und b (z. B. die Klemmspannung, wenn a und b die Polklemmen sind) als Produkt dieser beiden Größen in Volt angeben, oder sogar unmittelbar ablesen, wenn man das Instrument mit einer nach Volt geteilten Skala versehen hat. Solche Instrumente mit vielen Windungen eines dünnen Drahtes, welche in den Nebenschluß zu liegen kommen, heißen Spannungsmesser oder Voltmeter.

230. **Wheatstonesche Brücke.** Verbindet man die beiden Zweige $a m b$ und $a n b$ (Fig. 189) einer Stromleitung durch einen Querdraht $m n$, die sogenannte „Brücke“, so fließt in der Brücke ein Strom, dessen Richtung davon abhängt, welcher von den beiden Punkten m und n die höhere Spannung hat.

Da nun sowohl längs $a m b$ als längs $a n b$ die Spannung von dem Werte, den sie in a hat, bis zu dem Werte, den sie in b hat, abnimmt, so gibt es zu jedem Punkte m auf dem einen Draht einen Punkt n auf dem anderen Draht, in dem die Spannung den gleichen Wert wie in m hat. Verbindet man zwei solche Punkte, so fließt in der verbindenden Brücke kein Strom. Dann fließen die Ströme in den Drähten $a m b$ und $a n b$ so, als ob die Brücke gar nicht vorhanden wäre. Die Spannung sinkt dann auf den beiden Drähten von a bis b proportional dem Widerstande und die beiden Punkte m und n , in welchen auf beiden Seiten gleiche Spannung herrscht, müssen so liegen, daß sich r_1 zu r_2 verhält wie r_3 zu r_4 , wenn man die Widerstände der Leiterstücke $a m$, $m b$, $a n$, $n b$ der Reihe nach mit r_1 , r_2 , r_3 , r_4 bezeichnet.

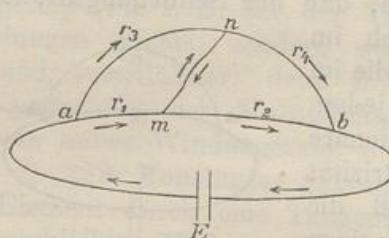


Fig. 189.
Wheatstonesche Brücke.

bindet man zwei solche Punkte, so fließt in der verbindenden Brücke kein Strom. Dann fließen die Ströme in den Drähten $a m b$ und $a n b$ so, als ob die Brücke gar nicht vorhanden wäre. Die Spannung sinkt dann auf den beiden Drähten von a bis b proportional dem Widerstande und die beiden Punkte m und n , in welchen auf beiden Seiten gleiche Spannung herrscht, müssen so liegen, daß sich r_1 zu r_2 verhält wie r_3 zu r_4 , wenn man die Widerstände der Leiterstücke $a m$, $m b$, $a n$, $n b$ der Reihe nach mit r_1 , r_2 , r_3 , r_4 bezeichnet.

Wheatstone (1843) hat diese Brückenverzweigung dazu benutzt, um Widerstände von Leitern zu messen. Schaltet man nämlich bei r_4 den Leiter, dessen Widerstand bestimmt werden soll, und bei r_3 einen Rheostaten ein, und verändert den Widerstand des letzteren so lange, bis ein in die Brücke geschaltetes Galvanometer auf Null einspielt, so verhält sich der gesuchte Widerstand zu demjenigen des Rheostaten wie die bekannten Widerstände r_2 und r_1 ; hat man letztere einander gleich gemacht, so ist der gesuchte Widerstand gleich demjenigen des Rheostaten. Die Galvanometernadel verhält sich dann gleichsam wie die Zunge einer Wage, welche durch ihr Einspielen anzeigt, daß die Zweige r_4 und r_3 mit Widerstand gleich belastet sind.

Man kann das Brückenverfahren auch so ausführen, daß man zwischen a und b einen Draht, den Meßdraht, längs einem in Millimeter geteilten Maßstab ausspannt, und auf ihm das mit Kontaktsschlitten versehene Ende m des Brückendrahtes so lange verschiebt, bis das Galvanometer in der Brücke auf Null zeigt. Dann steht der gesuchte Widerstand r_4 zu dem bekannten Widerstand r_3 in demselben Verhältnis wie die Strecke mb des Meßdrahtes zur Strecke am .

Das Bolometer (Strahlungsmesser) von Langley (1881) besteht aus einer Wheatstoneschen Brücke, in deren beide Zweige je eine Anzahl dünner Drähte aus Stahl oder Platin, welche bei gleicher Temperatur gleichen Widerstand haben, eingeschaltet sind. Wird nun die eine Partie Drähte von Wärmestrahlen getroffen, so erwärmt sie sich und vermehrt folglich ihren Leitungswiderstand. Das in die Brücke eingeschaltete Galvanometer, welches bei gleicher Temperatur der beiden Drahtpartien in Ruhe war, wird nun infolge des in der Brücke auftretenden Stromes ausschlagen. Das Instrument vermag auf diese Weise äußerst geringe Temperaturveränderungen anzuzeigen.

231. Kompensationsverfahren. Wirken in einem einfachen Stromkreis zwei elektromotorische Kräfte einander entgegen, so entsteht ein Strom, der ihrer Differenz entspricht, und gar kein Strom, wenn die elektromotorischen Kräfte einander gleich sind. Man findet z. B., daß man einer Batterie von 10 Bunsenschen Elementen eine solche von 17 bis 18 Daniellschen Elementen entgegenschalten muß, damit ein in den Stromkreis eingefügtes Galvanometer auf Null einspielt. Daraus folgt, daß die elektromotorische Kraft eines Bunsenelements 1,7 bis 1,8 Daniell beträgt. Es lassen sich also auf diese Weise die elektromotorischen Kräfte verschiedener Elemente angenähert miteinander vergleichen.

Eine genauere Vergleichung erreicht man durch die folgende Stromverzweigung (Poggendorff, 1841). An die Punkte m und n (Fig. 190) des Stromkreises, in welchen bei E und e die zu vergleichenden Elemente in entgegengesetzter Stellung, d. i. mit gleichnamigen Polen verbunden, eingeschaltet sind, wird ein Querdraht mn angelegt, der einen Rheostat enthält. In dem Teil des Stromkreises, der das Element mit der kleineren elektromotorischen Kraft e enthält, befindet sich ein Galvanometer G . Man ändert nun den Widerstand des

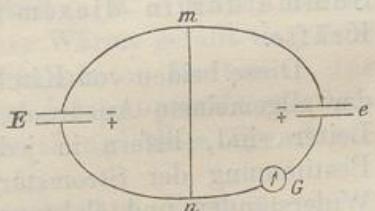


Fig. 190.
Kompensation.

Rheostaten so lange, bis das Galvanometer auf Null einspielt. Dann ist in dem Zweige $m \rightarrow G \rightarrow n$ gar kein Strom, und die Strömung in dem geschlossenen Kreise $E \rightarrow m \rightarrow n \rightarrow E$ muß sich so herstellen, als ob der Zweig $m \rightarrow G \rightarrow n$ gar nicht vorhanden wäre. Ist R der Widerstand des Zweiges $m \rightarrow E \rightarrow n$ (also hauptsächlich der innere Widerstand des Elements E), r derjenige des Querdrahtes samt Rheostat, so ist nach dem Ohmschen Gesetz die Stromstärke in diesem Kreise $J = E / (R + r)$. Damit gleichzeitig in dem Zweige $m \rightarrow G \rightarrow n$ die Stromstärke Null sein könne, muß die Spannungsdifferenz an seinen Endpunkten m und n , welche durch das Produkt aus der Stromstärke J mit dem Widerstand r des Querdrahtes ausgedrückt wird, der entgegenwirkenden elektromotorischen Kraft e gleich sein, d. h. man hat $Jr = e$. Daraus aber folgt, daß sich die elektromotorischen Kräfte E und e zueinander verhalten wie die bekannten Widerstände $R + r$ und r . Ist der innere Widerstand R des Elements E nicht bekannt, so schaltet man in den Zweig $m \rightarrow E \rightarrow n$ noch einen Widerstand R' hinzu: alsdann muß der Widerstand von $m \rightarrow n$ in R' abgeändert werden, damit das Galvanometer einspielt, und man hat außer der Gleichung $Er = e(R + r)$ noch die zweite $Er' = e(R + R' + r')$, aus welchen vereint außer dem Verhältnis der elektromotorischen Kräfte auch noch der innere Widerstand $R = R' r / (r' - r)$ gefunden wird.

232. **Kirchhoffsche Sätze.** Nach denselben Grundsätzen, wie in diesen besonderen Beispielen, läßt sich die Aufgabe der Stromverzweigung ganz allgemein behandeln.

An jedem Verzweigungspunkt muß in jedem Augenblick ebensoviel Elektrizität abfließen als zuströmen. Rechnet man die zufließenden Stromstärken positiv, die abströmenden negativ, so lautet dieser Satz:

1. In jedem Verzweigungspunkt ist die Summe aller Stromstärken gleich Null.

Jeder verzweigte Stromkreis kann in eine Anzahl in sich geschlossener einfacher Stromkreise zerlegt werden. In der Fig. 189 z. B. kann man die folgenden geschlossenen Bahnen verfolgen: $E \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow E$, $E \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow E$, $a \rightarrow b \rightarrow m \rightarrow a$, $a \rightarrow m \rightarrow a$, $m \rightarrow b \rightarrow m$. In jedem dieser Stromringe nun muß die Summe aller Spannungsverluste gleich der Summe der im Ringe wirkenden elektromotorischen Kräfte sein, also gleich Null, wenn der betreffende Ring, wie z. B. die drei letztgenannten, elektromotorische Kräfte gar nicht enthält. Es ergibt sich also noch der zweite Satz:

2. In jedem einfach in sich geschlossenen Teil eines verzweigten Stromkreises ist die Summe der Produkte aus Stromstärken und zugehörigen Widerständen gleich der Summe der in diesem Teile wirkenden elektromotorischen Kräfte.

Diese beiden von Kirchhoff (1847) ausgesprochenen Sätze, welche der allgemeinste Ausdruck des Ohmschen Gesetzes für linienförmige Leiter sind, liefern in jedem Falle so viele Gleichungen, als zur Bestimmung der Stromstärken der einzelnen Zweige bei gegebenen Widerständen und elektromotorischen Kräften erforderlich sind.

233. **Strömung in körperlichen Leitern.** Wie in den bisher allein betrachteten linien- und drahtförmigen Leitern bildet sich auch in leitenden Flächen (z. B. Metallplatten) und in leitenden Körpern, welche man in den Stromkreis einer Batterie einschaltet, ein stationärer Stromzustand aus, indem die Elektrizität von Stellen höherer Spannung zu solchen von niedrigerer Spannung übergeht. Zwischen Punkten gleicher Spannung dagegen kann keine Strömung stattfinden. Berührt man zwei Punkte einer vom Strom durchflossenen

Metallplatte mit den Drahtenden eines Galvanometers, so gibt dieses einen Ausschlag, wenn in den berührten Punkten verschiedene Spannung herrscht. Man kann aber leicht, indem man das eine Drahtende verschiebt, eine Reihe von Punkten finden, für die das Galvanometer in Ruhe bleibt. In diesen Punkten ist die Spannung die nämliche, wie in dem vom ersten Drahtende berührten Punkte; sie bilden in ihrer Gesamtheit eine durch letzteren Punkt gehende Linie gleicher Spannung oder gleichen Potentials. Ebenso findet man in körperlichen Leitern Flächen gleicher Spannung, äquipotentielle Flächen oder Niveaumassen. Von einer Niveaumasse stationären Potentials zur nächst niedrigen geht die elektrische Strömung in Linien (Stromlinien), welche auf jeder dieser Flächen senkrecht stehen, entsprechend den Kraftlinien beim elektrostatischen Potential, und es gilt für jeden von solchen Stromlinien begrenzten „Stromfaden“ das Ohmsche Gesetz.

Auf einer rechteckigen Metallplatte z. B., an deren gegenüberstehende Seiten $a b$ und $c d$ (Fig. 191) die Poldrähte einer galvanischen Batterie angelötet sind, verlaufen die Linien gleicher Spannung parallel zu diesen Seiten, die Stromlinien parallel zum anderen Seitenpaar. Legt man die Zuleitungsdrähte

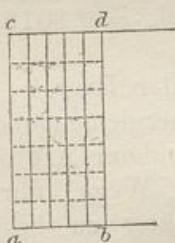


Fig. 191.
Stromlinien.

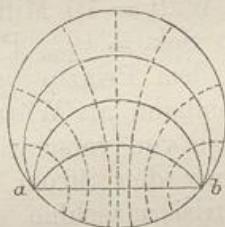


Fig. 192.
Stromlinien.

der Batterie an zwei Punkten a und b (Fig. 192) des Umfanges einer Kreisscheibe, so sind die äquipotentiellen Linien Kreise, deren Mittelpunkte auf der Verbindungslinie $a b$ des Ein- und Ausströmungspunktes zu diesen harmonisch liegen, und die zu ihnen senkrechten Stromlinien sind Kreise, welche durch diese Punkte a und b hindurchgehen.

234. Stromwärme. Joulesches Gesetz. Bald nach Erfindung der Voltaschen Säule bemerkte man, daß die vom Strome durchflossenen Leiter sich erwärmen, und daß bei hinreichender Stromstärke Drähte sogar zum Glühen und Schmelzen gebracht werden.

Indem Joule (1841) spiralförmig gewundene durchströmte Drähte in ein Kalorimeter tauchen ließ, das zur Vermeidung von Nebenschlüssen mit einer nichtleitenden Flüssigkeit (z. B. Alkohol, Benzin, Terpentinöl usw.) von bekannter spezifischer Wärme gefüllt war, fand er das nach ihm benannte Gesetz: Die in einem Leiter in der Zeiteinheit entwickelte Wärmemenge ist proportional dem Widerstande des Leiters und proportional dem Quadrate der Stromstärke.

Man hätte das Joulesche Gesetz auch ohne Versuche durch folgende auf das Prinzip der Erhaltung der Energie gestützte Überlegung finden können. Wenn die in der Zeiteinheit den Draht durchfließende Elektrizitätsmenge, d. i. die Stromstärke J , von dem höheren Potential am einen Ende des Drahtes bis zu dem niedrigeren am anderen Ende herabsinkt, so leistet sie Arbeit, welche gleich ist dem Produkt aus dieser Elektrizitätsmenge und dem Potential-

unterschied an den Drahtenden. Nach dem Ohmschen Gesetze aber ist dieser Potentialunterschied E oder Spannungsverlust gleich dem Produkte aus Stromstärke J und Widerstand R des Drahtstückes, also $= JR$. Die von dem Strom in dem Drahtstück geleistete Arbeit ist demnach JJR oder J^2R . Diese Arbeit wird in dem Drahte in die ihr äquivalente Wärmemenge W umgewandelt. Man hat daher, wenn man als Einheit der Wärmemenge die der Arbeitseinheit (Erg) äquivalente Wärmemenge wählt, das Joulesche Gesetz: $W = J^2R$ oder, weil $JR = E$ ist, auch $W = JE$. Die in 1 Sekunde in einem Leiterstück entwickelte Wärme oder die ihr entsprechende Arbeit pro Sekunde, oder der „Effekt“ des Stromes, wird demnach gemessen durch das Produkt aus der Potentialdifferenz (E) des Stückes in Volt mit der Stromstärke in Ampère, und erscheint dann ausgedrückt in einer Einheit, die man 1 „Voltampère“ oder auch 1 „Watt“ nennt. 1 Watt = 10 Millionen Erg pro Sek. = 0,1019 Meterkilogramm pro Sek. = $1/736$ Pferdekraft (vgl. 17).

Nach dem Prinzip von der Erhaltung der Energie muß dieser in der Strombahn als Wärme auftretenden Energiemenge eine gleichgroße Menge von verschwindender Energie anderer Art entsprechen. Erzeugen wir den Strom auf mechanischem Wege, durch Drehen einer Elektrisiermaschine oder einer der später zu besprechenden Dynamomaschinen, so ist die aufgewandte mechanische Arbeit die Quelle der Stromenergie. Erzeugen wir den Strom auf chemischem Wege mittels galvanischer Elemente, so ist der Energieumsatz der in der Kette vor sich gehenden chemischen Prozesse die Quelle der elektrischen Energie. Löst man Zink in Schwefelsäure auf, so bemerkt man dabei eine beträchtliche Wärmeentwicklung. Löst sich dagegen das Zink als Träger eines elektrischen Stromes in einem galvanischen Elemente auf, so entsteht aus der verschwindenden chemischen Energie zunächst elektrische Energie, die sich dann erst im Schließungskreis in Wärme verwandelt.

Im Daniellschen Element ist die elektrische Energie, die das Element mit einem bestimmten chemischen Umsatz zu liefern vermag, gerade so groß wie die Energie, die als Wärme von dem gleichen chemischen Umsatz direkt geliefert werden kann. Doch ist diese Gleichheit keine notwendige. Bei der Mehrzahl der galvanischen Elemente ist vielmehr die elektrische Energie kleiner als die Wärme, die dem chemischen Prozeß im Elemente entspricht. Während der Stromlieferung wird daher nur ein Teil der verschwindenden chemischen Energie in elektrische Energie verwandelt; der Rest tritt auch hier als Wärme auf und hat zur Folge, daß sich das Element bei der Stromlieferung erwärmt. Es kommt aber auch der umgekehrte Fall vor, daß ein Element mehr elektrische Energie zu liefern vermag, als der „Wärmetönung“ seines chemischen Umsatzes entspricht. Dieser Überschuß wird auf Kosten des Wärmeinhaltes der das Element zusammensetzenden Stoffe geliefert. Daher tritt in diesem Falle bei Stromdurchgang Abkühlung im Elemente ein.

Aus dem Jouleschen Gesetze erklärt es sich, daß Metalldrähte durch den Strom um so höher erwärmt werden, je dünner sie sind und je geringer das Leitungsvermögen des Metalls ist. Läßt man z. B. den Strom durch eine Kette aus gleichdicken abwechselnden Silber- und Platindrähten gehen, so erhitzen sich die Platindrähte stärker als die weit besser leitenden Silberdrähte, und können zum Glühen kommen, während diese dunkel bleiben (Children, 1815).

Man benutzt das Erglühen von Drähten zum Sprengen von Minen mittels Patronen, in welchen ein dünner Platindräht angebracht ist, dem durch isolierte dicke Kupferdrähte der Strom einer Batterie zugeführt wird. In der Heilkunde bedient man sich galvanisch glühender Platindrähte, um Geschwüre u. dgl., um welche der Draht wie eine Schlinge gelegt wird, wegzuätzen (Galvanokaustik).

Auch hat man Instrumente zum Messen der Stromstärke gebaut, bei denen die durch die Stromwärme erzeugte Verlängerung eines Drahtes die Drehung eines Zeigers veranlaßt, der die Stromstärke auf einer Skala direkt abzulesen gestattet. Solche Instrumente nennt man *Hitzdrahtinstrumente*.

Andererseits muß man bei Versuchen oder elektrischen Anlagen die Kupferdrähte, die man zur Stromleitung benutzt, so dick wählen, daß die in ihnen stattfindende Erwärmung ein gewisses ungefährliches Maß nicht überschreitet. Für mittlere Stromstärken rechnet man für je 3 Ampère 1 qmm Querschnitt, so daß also ein Leitungsdraht, durch den 30 Ampère fließen sollen, einen Querschnitt von 10 qmm haben müßte. Um aber solche Leitungen, oder um Apparate vor zu hohen Stromstärken und den dadurch hervorgerufenen zerstörenden Wirkungen zu schützen, macht man abermals von der Stromwärme Gebrauch, indem man in den Stromkreis sogenannte „Sicherungen“ einschaltet. Das sind kurze Enden von Draht oder Blech aus Blei oder leicht schmelzbaren Metallkompositionen, die, sobald der Strom im Leitungskreise eine gewisse, durch den Querschnitt der Sicherung bestimmte Stärke erreicht, durchschmelzen und den Strom auf diese Weise unterbrechen.

235. Glühlampen. Die ausgedehnteste Anwendung macht man von der Stromwärme in der elektrischen Beleuchtung. Doch kann man hierfür nicht die gebräuchlichen Metalle verwenden, weil sie bei höheren Glühtemperaturen schmelzen, sondern muß sich der unschmelzbaren Kohle bedienen. Edison war der erste (1879), der aus Bambusfasern dünne Kohlefäden herstellte, die durch den elektrischen Strom zu heller Weißglut erhitzt werden konnten. Da sie aber an der Luft verbrennen würden, so müssen sie in eine luftleer gemachte Glashülle eingeschlossen werden. Fig. 193 zeigt eine derartige Glühlampe. Der dünne Kohlefaden, der heutzutage aus reiner Zellulose hergestellt wird, ist mit seinen Enden an zwei Platindrähte angesetzt, die in die Glashülle eingeschmolzen sind und von denen der eine außerhalb mit dem messingenen Schraubengewinde *a*, der andere mit der von jenem isolierten Metallplatte *b*

in Verbindung steht. Mit dem Schraubengewinde wird die Lampe in die „Fassung“ eingeschraubt, deren Mutter mit dem einen Pol der Stromquelle in Verbindung steht, während mit dem anderen Pol ein kleiner, isoliert in der Fassung sitzender Hebel verbunden ist, durch dessen Umlegung der Kontakt zwischen dem zweiten Pole und der Platte *b* hergestellt und die Lampe zum Leuchten gebracht wird. Der Widerstand der Kohlefäden ist ein sehr hoher, so daß auch bei höheren Spannungen nur schwache Ströme durch diese Lampen hindurchgehen. Durch verschiedene Bemessung von Länge und Dicke des Kohlefadens kann man Lampen von verschiedener Helligkeit für gegebene Spannungen herstellen. Um eine Helligkeit zu erzielen, die gleich derjenigen einer Normalkerze ist (319), ist durchschnittlich ein Aufwand von 3 Watt erforderlich. Die ge-

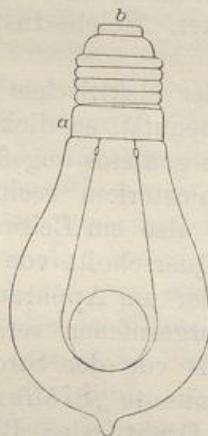


Fig. 193.
Glühlampe.

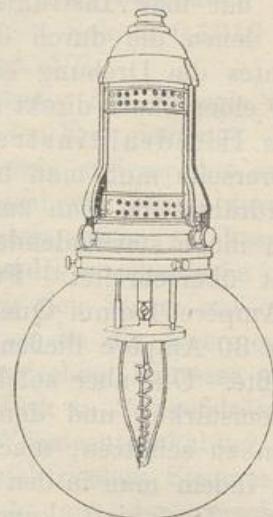


Fig. 194.
Nernstlampe.

bräuchlichsten Lampen haben eine Helligkeit von 16 Normalkerzen, erfordern also ca. 50 Watt. Bei einer Spannung von 110 Volt, wie sie bei elektrischen Zentralen vielfach angewandt wird, muß also ein Strom von $\frac{50}{110} = 0,45$ Amp. durch die Lampe hindurchgehen, oder die Lampe muß in heißem Zustande einen Widerstand von $\frac{110}{0,45} = 242$ Ohm haben; im kalten Zustande ist der Widerstand erheblich größer (223).

Bei normalem Brennen leuchten die Kohlefäden in heller Gelbglut. Durch eine mäßige Steigerung der Stromstärke kann man sie zu intensiver Weißglut bringen; aber die Kohlefäden vertragen eine solche höhere Beanspruchung nicht. Sie zerstäuben und brennen bald durch, während eine Glühlampe bei normaler Beanspruchung ca. 600 Brennstunden aushält. Einen Fortschritt in dieser Beziehung stellt die von Nernst erfundene Glühlampe dar. Bei ihr besteht der Glühkörper aus einer feuerbeständigen Masse nach der Art derjenigen, die in den Glühstrümpfen des Gasglühlichtes Verwendung

findet. Da dieser Glühkörper an der Luft nicht verbrennt, braucht er auch nicht in eine luftleere Hülle eingeschlossen zu werden, sondern wird nur mit einer Glasglocke als Schutzhülle umgeben. Aber das Material dieser Glühstäbchen hat die unbequeme Eigenschaft, daß es im kalten Zustande ein Isolator ist, und nur in heißem Zustande den Strom durchläßt. Die Lampen bedürfen daher, damit sie anbrennen, eines Vorwärmers. Bei der in Fig. 194 abgebildeten Form der Nernstlampe geht der Strom zunächst durch die mit feinem Draht umwickelte Spirale; diese erglüht und erwärmt das in ihrer Mitte angebrachte eigentliche Glühstäbchen, das nach kurzer Zeit (20 Sekunden) glühend und dadurch leitend wird und nun vom Strom zu heller Weißglut erhitzt wird. Im Oberteil der Lampe ist eine Vorrichtung nach Art eines Relais (248) angebracht, die den Strom in der Erwärmungsspirale in dem Augenblicke ausschaltet, in dem der Glühkörper leitend wird. Bei der abgebildeten Form der Nernstlampe geht bei 110 Volt ein Strom von 0,9 Ampère durch das Glühstäbchen und erzeugt eine Helligkeit von 65 Normalkerzen. Der für Erzeugung der Helligkeitseinheit erforderliche Wattverbrauch ist daher für die Nernstlampe nur halb so groß (1,6 Watt für die Normalkerze) wie für die Glühlampe mit Kohlefaden.

In jüngster Zeit hat man den Kohlefaden der gewöhnlichen Glühlampe durch dünne Fäden aus schwer schmelzbaren Metallen, Osmium oder Tantal ersetzt und dadurch ebenfalls Lampen gewonnen, die ein helleres, weißeres Licht als der Kohlefaden bei geringerem Wattverbrauch für die Lichteinheit besitzen.

236. **Davys Flammenbogen.** Als Davy (1821) Kohlenstäbchen, welche er mit den Polen einer starken Batterie verbunden hatte, zuerst in Berührung brachte und dann ein wenig voneinander entfernte, sah er sie mit blendend weißem Lichte erglänzen und zwischen ihnen gleich einer Flamme einen weniger hellen Lichtstrom übergehen. Dieser nimmt, wenn die Verbindungsleitung der Kohlenpole horizontal liegt, die Form eines nach oben gewölbten Bogens an und wird daher „Voltascher Bogen“ genannt. Der Flammenbogen, welcher eine leitende Brücke zwischen den bis zur Weißglut erhitzten Kohlenspitzen herstellt und sich wie ein beweglicher Stromleiter verhält, wird durch Dämpfe der Kohle und der in ihr enthaltenen Metalle gebildet; er enthält außerdem glühende Kohlenteilchen, die sich von beiden Polen, vorzugsweise aber von dem stärker erhitzten positiven Pol, losreißen; die Folge davon ist, daß die positive Kohle sich abstumpft und sogar aushöhlt, während die negative ihre zugespitzte Form behält (Fig. 195). Da außerdem beide Kohlen an ihren glühenden Enden verbrennen, so werden sie nach und nach aufgezehrt, die positive Kohle jedoch schneller als die negative und zwar erfahrungsgemäß etwa doppelt so rasch wie diese. Der Flammenbogen setzt dem Durchgang des Stromes einen Widerstand entgegen, der um so beträchtlicher wird, je mehr sich der Abstand der Kohlenspitzen infolge ihrer Aufzehrung vergrößert; der Strom nimmt daher an

Stärke ab, bis er nicht mehr imstande ist, den Flammenbogen zu bilden; dann wird der Strom unterbrochen und das Licht erlischt.

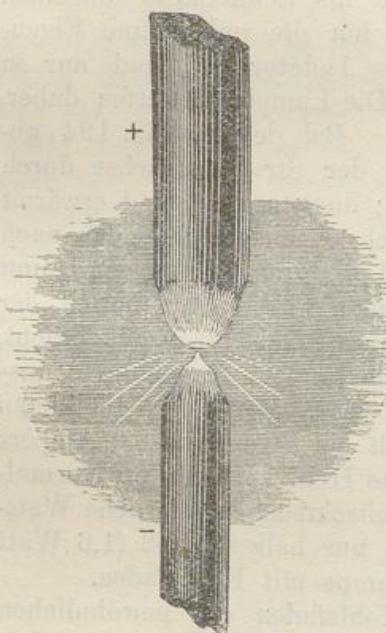


Fig. 195.
Flammenbogen.

effekt“ der Bogenlampen ist also bedeutend höher, als der der Glühlampen. Aber sie haben den Nachteil, daß sich kleine Lichtmengen mit ihnen gar nicht herstellen lassen.

237. **Thermoelektrizität.** Im Jahre 1821 entdeckte Seebeck d. Alt., daß durch Wärme ein elektrischer Strom erzeugt werden

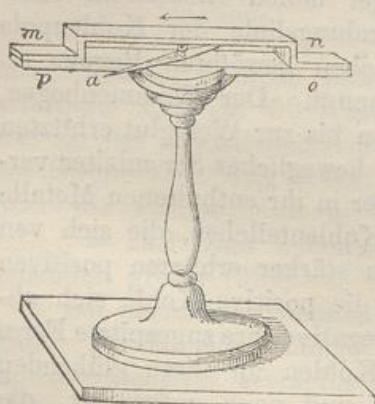


Fig. 196.
Geschlossenes thermoelektrisches Element.

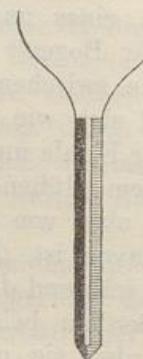


Fig. 197.
Offenes Thermoelement.

Will man daher das elektrische Kohlenlicht oder „Bogenlicht“ zur Beleuchtung verwenden, so muß man dafür sorgen, daß die Kohlenspitzen selbsttätig stets in der richtigen Entfernung voneinander erhalten werden. Vorrichtungen, welche diesen Zweck erfüllen, nennt man Bogenlicht-Regulatoren oder Bogenlampen. Von ihrer Einrichtung kann erst späterhin die Rede sein.

Um den Lichtbogen zu unterhalten, ist eine Spannung erforderlich, die nicht unter 40 Volt betragen darf. Die gewöhnlichen Bogenlampen brennen mit 6—8 Ampère; sie bedürfen dazu einer Spannung von etwa 44 Volt und geben eine Lichtstärke von 700—950 Normalkerzen. Danach würde man zur Erzeugung der Helligkeitseinheit bei den Bogenlampen nur eines Aufwandes von ca. 0,4 Watt bedürfen. Der „Nutz-

kann. Lötet man nämlich einen Bügel *m n* (Fig. 196) von Kupfer an einen Wismutstab *o p* und erwärmt die eine Lötstelle *o* oder kühlst die andere *p* ab, so zeigt eine innerhalb des so gebildeten Vierecks auf einer Spitze schwebende Magnetnadel *a* durch ihre Ablenkung an, daß ein elektrischer Strom entstanden ist, welcher das Viereck umkreist und an der

wärmeren Lötstelle vom Wismut zum Kupfer, an der kälteren vom Kupfer zum Wismut übergeht. Man nennt diesen durch Wärme

erzeugten Strom einen thermoelektrischen oder Thermostrom. Wird der Wismutstab durch einen Antimonstab ersetzt, so geht der thermoelektrische Strom an der wärmeren Lötstelle vom Kupfer zum Antimon. Prüft man in dieser Weise die verschiedenen Metalle, so findet man, daß sie sich in eine Reihe, die thermoelektrische Spannungsreihe, derart ordnen lassen, daß an der wärmeren Berührungsstelle der thermoelektrische Strom von dem in der Reihe höher stehenden Metall zu dem tiefer stehenden übergeht; diese Reihe ist: Wismut, Nickel, Quecksilber, Blei, Kupfer, Platin, Gold, Silber, Zink, Eisen, Antimon. Bei gleichem Temperaturunterschied der Lötstellen ist der dadurch hervorgerufene Spannungsunterschied um so größer, je weiter die beiden Metalle in der Spannungsreihe von einander abstehen.

Für kleinere Temperaturdifferenzen ist die elektromotorische Kraft diesen Differenzen proportional. Bei größeren Temperaturunterschieden dagegen zeigt sich die thermoelektromotorische Kraft von der absoluten Temperatur abhängig. Steigert man nämlich, während die eine Lötstelle auf unveränderlicher Temperatur gehalten wird, die Temperaturdifferenz der Lötstellen mehr und mehr, so nimmt die thermoelektrische Kraft nur zu bis zu einem Maximum, das je nach den untersuchten Metallen bei höherer oder bei tieferer Temperatur liegen kann (neutraler Punkt). Dariüber hinaus nimmt sie wieder ab, wird bei einer Temperaturdifferenz, die doppelt so groß ist wie diejenige für das Maximum, gleich Null und wechselt bei noch größeren Temperaturdifferenzen ihr Vorzeichen.

Zwei Stäbchen aus verschiedenen Metallen, z. B. Wismut und Antimon, welche an einem Ende zusammengelötet sind, während die freien Enden Leitungsdrähte tragen, bilden ein Thermoelement, Fig. 197. Schließt man es mit den Leitungsdrähten an ein Galvanometer an, so zeigt dieses keinen Strom an, so lange die Temperatur aller Lötstellen die gleiche ist (200). Wird aber die Lötstelle Antimon-Wismut erwärmt oder abgekühlt, während die Lötstellen des Elements mit den Leitungsdrähten auf unveränderter gleicher Temperatur erhalten werden, so zeigt das Galvanometer einen Strom an, und dieser entspricht der thermoelektrischen Kraft Wismut-Antimon; denn nach dem Gesetz der Voltaschen Spannungsreihe (200) kann es keinen Einfluß auf die wirksame Spannungsdifferenz haben, ob die gleich temperierten freien Enden des Wismuts und des Antimons sich direkt berühren oder durch den Kupferdraht verbunden sind. Die elektromotorische Kraft solcher Elemente ist aber nur sehr gering; sie beträgt z. B. für Wismut-Antimon für 1° Temperaturdifferenz bei Zimmertemperatur nur 0,0001 Volt, für Eisen-Konstantan 0,000053 Volt. Da sie aber mit empfindlichen Galvanometern sehr genau gemessen werden kann, so bedient man sich der Thermoelemente vielfach zur Temperaturmessung, sei es daß es sich um die Messung sehr kleiner Temperaturdifferenzen handelt, oder um die Messung von Temperaturen unter Umständen, unter denen sich die gewöhnlichen Thermometer nicht verwenden lassen. So wird ein aus Platin und einer Legierung von Platin mit 10 Proz.

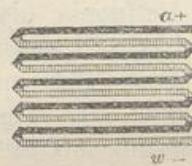


Fig. 198.
Zur Thermosäule.

Rhodium bestehendes Thermoelement, dessen Angaben mit denen eines Luftthermometers genau verglichen sind, zur Messung hoher Temperaturen (bis gegen 1700°) benutzt (thermoelektrisches Pyrometer).

Die schwache Spannung der Thermoelemente läßt sich vervielfachen, indem man mehrere Elemente nach Art der Voltaschen Säule zu einer thermoelektrischen Säule oder Thermosäule (Nobili,

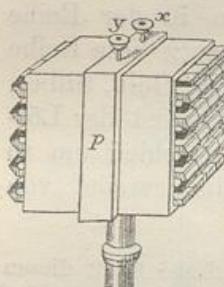


Fig. 199.
Thermosäule.

1831) Fig. 198, verbindet; mehrere Stäbchen, deren Zwischenräume mit einer nichtleitenden Masse ausgefüllt sind, werden, zu einem Bündel vereinigt, in eine Fassung *P* (Fig. 199) gebracht, so daß ihre Endstäbchen mit den Klemmen *x* und *y* leitend verbunden sind. Eine solche Thermosäule in Verbindung mit dem Multiplikatordraht eines Galvanometers (Thermomultiplikator, Melloni, 1841) bildet ein empfindliches Mittel zum Nachweis und zur Messung geringer Wärmewirkungen, besonders

für strahlende Wärme. Bei größeren Thermosäulen,

die galvanische Batterien ersetzen sollen, wird die eine Reihe der Lötstellen durch Gasflammen erwärmt, die andere Reihe durch Wasser oder Eis oder auch durch bloße Ausstrahlung abgekühlt (Marcus, 1864; Noë, 1870; Clamond, Gölcher).

238. Peltiersche Wirkung. Peltier hat 1834 gefunden, daß ein galvanischer Strom, welcher durch ein Thermoelement geleitet wird, an der Lötstelle eine Temperaturveränderung hervorbringt, welche derjenigen entgegengesetzt ist, die einen Thermostrom von gleicher Richtung erzeugen würde. Geht z. B. der galvanische Strom von Wismut zu Antimon, so kühlt sich die Lötstelle ab; sie erwärmt sich dagegen, wenn der Strom von Antimon zu Wismut übergeht. Man nennt diese nur an der Lötstelle auftretende, im ersten Falle

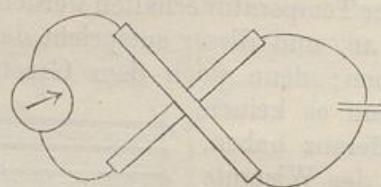


Fig. 200.
Peltiers Kreuz.

verbrauchte, im letzteren erzeugte Wärme die Peltiersche Wärme, zum Unterschied von der gewöhnlichen Stromwärme, die überall im Stromkreis auftritt, und, weil sie dem Jouleschen Gesetze gehorcht, auch „Joulesche Wärme“ genannt wird. Während die Joulesche Wärme dem Quadrate der Stromstärke proportional ist, ist die Peltiersche Wärme einfach der Stromstärke proportional; während jene von der Richtung des Stromes nicht abhängt, ist diese positiv (Erwärmung) oder negativ (Abkühlung), je nachdem der Strom in der einen oder in der entgegengesetzten Richtung fließt.

ist, ist die Peltiersche Wärme einfach der Stromstärke proportional; während jene von der Richtung des Stromes nicht abhängt, ist diese positiv (Erwärmung) oder negativ (Abkühlung), je nachdem der Strom in der einen oder in der entgegengesetzten Richtung fließt.

Man kann die Peltiersche Wirkung durch folgenden Versuch direkt nachweisen. Ein Metallstab, bestehend aus einem Antimonstäbchen, an das zu beiden Seiten Wismutstäbchen angelötet sind, ist durch zwei Glaskugeln so hindurchgeführt, daß sich je eine Lötstelle in der Mitte einer Kugel befindet. Die beiden Kugeln, die

von Luft erfüllt und luftdicht verschlossen sind, stehen jede mit dem einen Arm eines eine leichte Flüssigkeit enthaltenden Manometers in Verbindung. Sendet man einen Strom durch den Metallstab, so wird die in beiden Kugeln in gleicher Weise entwickelte Joulesche Wärme durch die Peltiersche Wirkung in der einen Kugel vermehrt, in der anderen vermindert, und die Flüssigkeit im Manometer muß auf jener Seite sinken, auf dieser um ebensoviel steigen. Einen indirekten Nachweis liefert das Peltiersche Kreuz (Fig. 200), ein Wismut- und ein Antimonstab, die mit ihren Mitten kreuzweise aufeinander gelötet sind. Leitet man den Strom eines galvanischen Elements durch das eine Paar der Kreuzesarme von Wismut zu Antimon, so zeigt nach Ausschaltung des Elements ein mit den beiden anderen Armen verbundenes Galvanometer einen Thermostrom an, der vom Antimon zum Wismut geht, also einer Abkühlung der Lötstelle entspricht.

Jeder durch ein Thermoelement gehende Strom, also auch der Thermostrom selbst, ruft hiernach, indem er die wärmere Lötstelle abkühlt und die kältere erwärmt, eine Gegenwirkung gegen die ihn erzeugende Wirkung hervor, die den ursprünglichen Strom schwächt, ähnlich wie die chemische Wirkung in einem galvanischen Element die Gegenkraft der Polarisation hervorruft. Es wird hierbei fortwährend Wärme von der wärmeren zur kälteren Lötstelle übergeführt, und damit ein Thermostrom in gleichmäßiger Stärke fortduere, muß die eine Lötstelle durch Zufuhr von Wärme auf einer konstanten höheren, die andere Lötstelle durch Entziehung von Wärme auf einer konstanten niedrigeren Temperatur erhalten werden. Der Unterschied dieser Wärmemengen verwandelt sich in Stromarbeit und erscheint im gesamten Stromkreis als Joulesche Wärme. Es bestätigt sich also auch hier der Satz, daß, wenn Wärme in Arbeit verwandelt werden soll, eine entsprechende Wärmemenge von einem wärmeren auf einen kälteren Körper übergehen muß (130).

239. Magnetfeld um einen geradlinigen Strom. Biot-Savartsches Gesetz. Jeder Strom erzeugt um sich ein eigenständiges Magnetfeld. Ein senkrecht zur Ebene der Zeichnung Fig. 201 aus ihrer Mitte aufsteigender langer geradliniger Strom stellt nach der Ampèreschen Regel eine kleine drehbare, dem Einfluß des Erdmagnetismus entzogene Magnetnadel überall senkrecht zu der durch den Stromleiter und die Mitte der Nadel gelegten Ebene, und zwar so, daß der Nordpol der Nadel nach der Linken des mit dem Strome schwimmenden Beschauers weist. Eine große Anzahl sehr kleiner Magnetnadeln, die gleichweit vom Stromleiter entfernt sind, müssen sich daher um den Stromleiter längs einer Kreislinie ordnen, welche eine Kraftlinie des durch den Strom geschaffenen Magnetfeldes ist. Die den Stromleiter ringförmig umschließenden Kraftlinien werden sichtbar, wenn man auf ein Kartenblatt, durch welches der Draht senkrecht hindurchgesteckt ist, feine Eisenfeilspäne siebt; die Eisenspäne werden unter dem Einfluß des Stromes kleine Magnete und

bilden rings um den Draht zusammenhängende Ringe (Fig. 202). Infolge dieser Wirkung bedeckt sich der kupferne Schließungsdraht einer galvanischen Batterie, wenn er in Eisenfeilspäne getaucht wird, ringsum mit ihnen, läßt sie aber sofort wieder fallen, wenn der Strom unterbrochen wird. Als Niveaumächen gehören zu diesen kreisförmigen Kraftlinien die durch den geradlinigen Stromleiter gelegten Ebenen.

Die Kraft, mit welcher ein geradliniger Stromleiter auf einen Magnetpol senkrecht zu der durch Strom und Magnetpol gelegten Ebene wirkt, nimmt selbstverständlich mit der Entfernung des Pols von dem Stromleiter ab. Wir betrachten nun einen vertikal aufsteigenden sehr langen geradlinigen Strom, der die horizontal gedachte Zeichnungsebene (Fig. 203) im Punkte *A* durchsetzt, und eine in dieser Horizontalebene liegende, nach *A* gerichtete Magnetnadel *ns*, welche an einem um *A* drehbaren Hebelarm *An* befestigt ist. Der Strom wirkt auf die Pole *n* und *s* mit den Kräften *f* und *f'*, welche den Hebel nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen streben. Da nun, wie leicht auch der Hebel drehbar sei und wie groß auch die Stromstärke gewählt werde, eine Drehung nicht eintritt, so müssen die Drehungsmomente der beiden Kräfte einander gleich sein; es

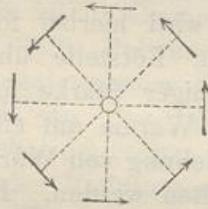


Fig. 201.

Magnetnadel um einen Strom.

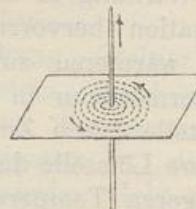


Fig. 202.

Magnetische Kraftlinien um einen geradlinigen Strom.

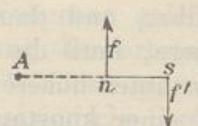


Fig. 203.

Biot-Savartsches Gesetz.

muß also, wenn man die Entfernung der gleichstarken Pole von dem Stromleiter, d. i. die Hebelarme *An* und *As*, beziehungsweise mit *r* und *r'* bezeichnet, $fr = f'r'$ sein, oder, was dasselbe ist, es verhält sich $f:f' = r':r$, d. h. die Kraft, welche ein sehr langer, geradliniger Strom auf einen Magnetpol ausübt, ist der Entfernung des letzteren von dem Stromleiter umgekehrt proportional.

Dieses von Biot und Savart (1820) entdeckte Gesetz wurde von ihnen noch weiter durch Versuche bestätigt, indem sie kurze, dem Erdmagnetismus entzogene horizontale Magnetnadeln unter dem Einfluß eines langen vertikalen Stromes pendelartige Schwingungen ausführen ließen, wobei sich ergab, daß die Quadrate der Schwingungszahlen und folglich die beschleunigenden Kräfte den Entfernungen vom Stromleiter umgekehrt proportional sind. Es ergab sich dabei ferner, daß die Kraft der Stromstärke und der Stärke des Magnetpols direkt proportional ist.

Die äquipotentialen Linien (233) einer vom Strom durchflossenen Platte sind zugleich die zur Strömung gehörigen Magnetkraftlinien. Man kann daher

die Äquipotentiallinien sichtbar machen, indem man Eisenfeile auf die Platte siebt (Lommel, 1892).

240. Elektromagnetische Drehung. Betrachtet man die Wirkung eines geradlinigen Stromes auf einen einzigen Magnetpol, so müßte dieser den Stromleiter längs einer Kraftlinie umkreisen, für den mit dem Strom schwimmenden, nach dem Pole hinblickenden Beobachter rechtsherum oder linksherum, je nachdem der Magnetpol ein Süd- oder ein Nordpol ist. Diese Erscheinung läßt sich nach dem Vorhergehenden nur verwirklichen, wenn man die Wirkung des Stromes auf den anderen Pol auszuschließen oder herabzusetzen vermag. Dies gelang Faraday mittels des Apparats Fig. 204. Zwei parallele lotrechte Magnete n_s und $n_1 s_1$, mit gleichnamigen Polen nach oben, sind durch Querstäbchen an einem Messingstück d befestigt, das, oben mittels eines Fadens leicht drehbar aufgehängt, unten mit einer Platinspitze in ein mit Quecksilber gefülltes Näßchen b taucht. Das Näßchen wird von einem Metallstäbchen ab getragen, das den Strom von e her zuführt; ein horizontaler Draht c mit abwärts gebogener Platinspitze, der an dem messingenen Mittelstück befestigt ist, führt den Strom weiter in eine kreisförmige mit Quecksilber gefüllte Holzrinne, von wo er durch einen Draht h zum anderen Pole g der Stromquelle zurückkehrt. Der in dem Metallsäulchen fließende Strom, der fast nur auf die unteren näheren Magnetpole wirkt, versetzt die Magnete in dauernde Rotation, deren Richtung mit derjenigen des Stromes sich umkehrt.

241. Magnetfeld einer Stromschleife. Kreisstrom. Läßt man den Strom, der einen geradlinigen Draht durchfließt, durch einen diesem Draht parallel gestellten zweiten Draht zurückfließen, so laufen

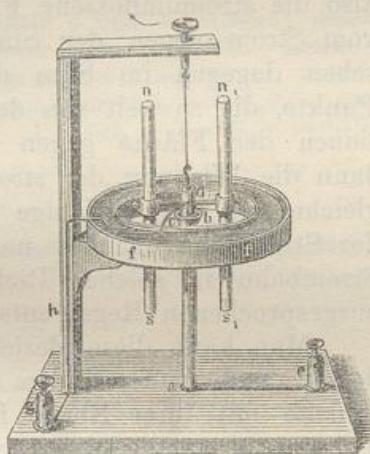


Fig. 204.

Drehung von Magneten um einen Strom.

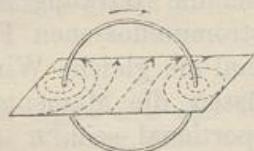


Fig. 205.

Kraftlinien um einen Kreisstrom.

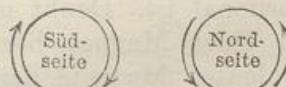


Fig. 206.

Magnetische Wirkung eines Kreisstromes.

die Kraftlinien der beiden Ströme zwischen den Drähten in gleicher Richtung und verstärken sich; außerhalb dagegen laufen sie gegeneinander und schwächen sich. Dasselbe findet statt, wenn man die Strombahn zu einer beliebigen in sich zurücklaufenden Kurve, einer Stromschleife zusammenbiegt. Innerhalb der Schleife wirken die

Kraftlinien aller Teile der Strombahn zusammen und erzeugen ein verstärktes Feld. Durch die Schleife hindurch laufen alle Kraftlinien in gleichem Sinne; sie erweitern sich nach außen hin, biegen sich nach rückwärts und laufen in sich zurück, indem sie alle die Strombahn einmal umwinden. Fig. 205 stellt diesen Verlauf der Kraftlinien für eine kreisförmig gestaltete Strombahn dar. Denkt man sich durch die Strombahn eine Fläche gelegt, die von ihr begrenzt wird, so ist das Magnetfeld des Stromes gerade so beschaffen, als wenn diese Fläche auf der einen Seite südmagnetisch, auf der anderen nordmagnetisch wäre (magnetische Doppelfläche), und zwar würde nach der Ampèreschen Regel die mit dem Strom schwimmende und nach der Fläche blickende Figur die nordmagnetische Seite zur Linken, die südmagnetische zur Rechten haben. Betrachtet man also die stromumflossene Fläche von der Nordseite her, so wird sie vom Strom gegen den Sinn des Uhrzeigers, von der Südseite gesehen dagegen im Sinn des Uhrzeigers umkreist (Fig. 206). Für Punkte, die so weit von dem Strom entfernt liegen, daß die Dimensionen der Fläche gegen diese Entfernung sehr klein sind, muß dann die Wirkung der stromumflossenen Fläche offenbar genau die gleiche sein, wie diejenige eines kleinen Magnets, der sich am Ort der Strombahn befindet und mit seiner Achse auf der Fläche der Strombahn in solcher Richtung senkrecht steht, wie es der eben ausgesprochenen Regel entspricht.

Man kann diese Beziehung zwischen Strom und Magnet durch den Versuch prüfen, indem man eine kleine stromdurchflossene Drahtschleife mit ihrer Ebene in den magnetischen Meridian stellt und auf eine Magnetnadel wirken läßt, die östlich oder westlich davon auf der in der Mitte der Stromschleife errichteten Senkrechten in einem größeren Abstande r liegt, also durch eine Versuchsanordnung, die vollständig der früher besprochenen für die Wirkung zweier Magnete aufeinander (140) entspricht. Für größere Werte von r ergibt der Versuch, daß die Wirkung der Stromschleife auf die Nadel der 3. Potenz der Entfernung r umgekehrt proportional ist. Verändert man bei gleichbleibendem Abstand die Stromstärke i oder die umflossene Fläche F , so findet man, daß die Wirkung sowohl der Stromstärke, als auch der Größe der stromumflossenen Fläche proportional ist. Denkt man sich also jedesmal die gleiche Wirkung durch einen Magnet hervorgebracht, so müssen die Momente der äquivalenten Magnete dem Produkt $i \cdot F$ proportional sein.

242. Berechnung der magnetischen Wirkung von Strömen auf Grund eines Elementargesetzes. Man kann sich einen linienförmigen Stromleiter in unzählig viele kleine Stückchen oder „Stromelemente“ geteilt denken, und sich vorstellen, daß seine Wirkung auf einen Magnetpol sich zusammensetze aus den Wirkungen aller dieser Stromelemente. Damit sich so bei einem sehr langen geradlinigen Stromleiter das Biot-Savartsche Gesetz ergebe, muß man annehmen, daß die Kraft, welche ein Stromelement von der Länge σ bei der Stromstärke i auf einen Magnetpol von der Stärke μ ausübt, dem Ausdruck (Laplace)

$$\frac{\mu \sigma i \sin \alpha}{r^2}$$

proportional sei, wenn r die Länge der Verbindungsleitung des Stromelements mit dem Pol und α den Winkel des Stromelements mit dieser Linie bedeutet.

Die Fig. 207 stelle in perspektivischer Ansicht einen kreisförmigen Strom vom Radius R und der Stromstärke i dar, der auf einen Magnetpol von der Stärke μ wirkt, welcher auf der im Mittelpunkt der Kreisfläche auf ihr errichteten Senkrechten (der Achse des Kreisstromes) um q von diesem Mittelpunkt, um r von dem Elemente σ des Kreisstromes entfernt liegt. Die Kraft f , welche das Stromelement σ auf μ ausübt, steht senkrecht auf der durch σ und μ gelegten Ebene, also auch senkrecht auf r , und hat (da auch σ auf r senkrecht steht, und demnach $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$ ist) die Größe:

$$f = C \frac{\mu \sigma i}{r^2},$$

wenn C die Proportionalitätskonstante bedeutet.

Die Kraft f lässt sich in zwei Komponenten g und h zerlegen, deren erstere in die Linie q fällt, die letztere zu dieser senkrecht steht. Letztere wird durch eine gleiche aber entgegengesetzte gerichtete Komponente, welche von dem diametral gegenüberliegenden Stromelement herrührt, aufgehoben, und es bleibt nur noch die Komponente g wirksam. Da sich $g:f = R:r$ verhält, so ist

$$g = f \cdot \frac{R}{r} = C \frac{\mu \sigma i R}{r^3}.$$

Die gesamte Kraft K , welche der ganze Kreisstrom auf μ in der Richtung nach g ausübt, ist die Summe aller von sämtlichen Elementen des Kreisumfangs herrührenden Komponenten g , und ergibt sich, wenn man in dem Ausdruck für g den ganzen Kreisumfang $2\pi R$ statt σ einsetzt:

$$K = C \frac{2 \mu \pi i R^2}{r^3},$$

oder, da $\pi R^2 = F$ der Flächeninhalt des Kreises ist:

$$K = C \frac{2 \mu i F}{r^3}.$$

Nun hatten wir früher (140) gefunden, daß die Kraft K , welche ein kurzer Magnetstab, dessen Moment M ist, auf einen in seiner Verlängerung in der verhältnismäßig großen Entfernung r liegenden Magnetpol μ ausübt,

$$K = \frac{2 \mu M}{r^3}$$

ist. Es ergibt sich also aus der Vergleichung der beiden letzten Ausdrücke, daß die Wirkung eines Kreisstromes auf einen Magnetpol ersetzt werden kann durch die Wirkung eines kurzen Magnetstabes, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises hindurchgesteckt ist, und dessen magnetisches Moment dem Produkte der Stromstärke mit der Größe der umströmten Fläche proportional ist: $M = C \cdot i \cdot F$. Wird M in absolutem magnetischen Maße gemessen, F in cm^2 , so hängt die Größe der Konstante C nur von der Einheit ab, in der man die Stromstärke ausdrückt.

243. Die elektrostatische und die elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Wir haben oben (204) als Einheit der Stromstärke diejenige Elektrizitätsmenge festgesetzt, die in der Zeiteinheit,

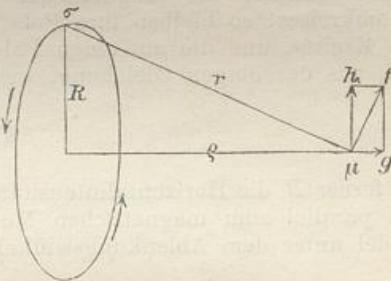


Fig. 207.
Wirkung eines Kreisstromes auf einen Magnetpol.

in 1 Sekunde, durch den Querschnitt des Schließungsdrähtes hindurchströmt. Da man sich dabei die Elektrizitätsmengen im absoluten elektrostatischen Maße (162) gemessen zu denken hat, so nennt man diese Einheit die elektrostatische Einheit der Stromstärke. Da nun die magnetischen Wirkungen der Ströme den Stromstärken proportional sind, so hat man in ihnen ein sehr viel einfacheres und bequemeres Hilfsmittel, um Stromstärken miteinander zu vergleichen. Mit Rücksicht hierauf hat W. Weber (1842) eine andere Einheit der Stromstärke vorgeschlagen, nämlich denjenigen Strom, welcher die Flächeneinheit (1 cm^2) umfließend die Einheit des magnetischen Moments erzeugt. Diese Einheit ist also so gewählt, daß die Proportionalitätskonstante C des Elementargesetzes (242) = 1 wird. Man bezeichnet diese Einheit als die elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Wird der Strom i in dieser Einheit ausgedrückt, so ist das magnetische Moment M der von ihm umflossenen Fläche F : $M = i F$, und fließt der Strom in einem geradlinigen Draht, so ist die magnetische Feldstärke im Abstand r von der Drahtmitte

$$= \frac{2i}{r}.$$

Zur Messung von Strömen in diesem elektromagnetischen Maß bedient man sich der Tangentenbussole (222). Ist nämlich, wie es bei diesem Instrumente zutrifft, die Magnetnadel sehr klein im Verhältnis zum Radius des Stromkreises, so bleiben ihre Pole bei jeder Ablenkung nahezu im Mittelpunkt des Kreises, und die auf einen Pol von dem Kreisstrom ausgeübte Kraft ergibt sich aus der obigen Gleichung, wenn man $r = R$ und $C = 1$ setzt, zu

$$K = \frac{2\pi\mu i}{R};$$

ist ferner H die Horizontalintensität des Erdmagnetismus, so ist die am Magnetpol parallel zum magnetischen Meridian wirkende Kraft $H\mu$. Stellt sich die Nadel unter dem Ablenkungswinkel α ins Gleichgewicht, so ist

$$\frac{2\pi\mu i}{R} \cos \alpha = H\mu \sin \alpha, \text{ oder } i = \frac{HR}{2\pi} \operatorname{tg} \alpha.$$

Der Reduktionsfaktor der Tangentenbussole für absolutes elektromagnetisches Maß ist demnach:

$$\frac{HR}{2\pi};$$

um ihn zu kennen, muß man also die Horizontalintensität des Erdmagnetismus (in absolutem Maße) am Beobachtungsort und den Radius des Kreises (in Zentimeter) messen.

Man hat für die meisten Anwendungen die absolute elektromagnetische Stromeinheit für zu groß gehalten und hat daher auf dem elektrischen Kongreß zu Paris im Jahre 1881 den zehnten Teil dieser Einheit als praktisches Strommaß festgesetzt und „Ampère“ genannt. Um mit einer Tangentenbussole die Stromstärke in dieser Einheit zu messen, hat man den Reduktionsfaktor zehnmal größer zu nehmen, also $= \frac{5HR}{\pi}$. Für diese so definierte Stromeinheit

hat man durch genauen Vergleich einer Tangentenbussole mit einem Silbervoltameter das elektrochemische Äquivalent des Silbers bestimmt und die oben (211) dafür angegebene Zahl 1,118 mg erhalten. Diesen Wert hat man dann der gesetzlichen Festlegung der Ampère-Stromeinheit zugrunde gelegt.

Es entsteht nun die Frage, welches das Verhältnis der beiden Einheiten für die Stromstärke ist, oder wie groß die Konstante C des Elementargesetzes genommen werden muß, wenn die Stromstärke in elektrostatischen Einheiten ausgedrückt wird. Dieses Verhältnis kann dadurch ermittelt werden, daß man eine Elektrizitätsmenge, z. B. die auf einem Kondensator bei gegebener Spannung aufgesammelte, einmal elektrostatisch aus der Spannung und der Kapazität des Kondensators ermittelt und dann ihre magnetische Wirkung beobachtet, indem man sie durch ein Galvanometer entladet. Dabei fließt allerdings kein dauernder Strom durch das Instrument, sondern nur ein kurzer „Stromstoß“, der der Nadel nur einen einmaligen Antrieb erteilt. Wenn man aber weiß, wie groß der dauernde Nadelausschlag für einen bestimmten elektromagnetisch gemessenen konstanten Strom ist und wenn man die Schwingungsdauer der Nadel kennt, so läßt sich auch aus dem einmaligen Ausschlag, den die hindurchgegangene Elektrizitätsmenge der Nadel erteilt, diese Menge in elektromagnetischen Maße ausdrücken. (W. Weber und R. Kohlrausch, 1856.) Versuche dieser Art haben ergeben, daß $C = 3 \times 10^{10}$ zu setzen ist. In einem Strom von der elektromagnetisch gemessenen Stärke 1 fließen also 30 000 Millionen elektrostatische Elektrizitätseinheiten in jeder Sekunde durch den Querschnitt; die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb ist gleich 3000 Millionen elektrostatischen Einheiten.

Die Größe C ist übrigens keine einfache Zahlenkonstante, sondern hat die Bedeutung einer Geschwindigkeit (s. darüber 280).

244. **Solenoid.** Die Wirkung auf die Magnetnadel wird verstärkt, wenn man eine Anzahl von Kreisströmen, die in gleichem Sinne fließen, mit ihren Mittelpunkten längs einer gemeinschaftlichen Achse aufreihet. Eine solche Anordnung, welche Ampère „Solenoid“ (von *σωλήνη*, Röhre) nannte, entspricht in ihrer Wirkung einer Reihe von kleinen Magneten, welche ihre gleichnamigen Pole alle nach derselben Seite kehren, und verhält sich daher wie ein Magnet, der seinen Südpol an dem in der Richtung des Uhrzeigers umströmten Ende hat (Fig. 208).

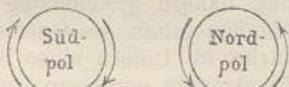


Fig. 208.
Stromrichtung an den Polen.

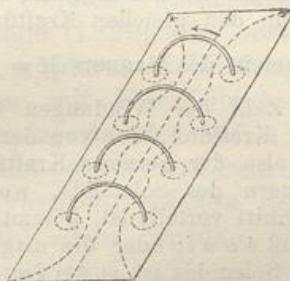


Fig. 209.
Kraftlinien um ein Solenoid.

Ein Solenoid wird sehr nahe verwirklicht durch einen einzigen spiralförmig gewundenen oder auf eine Spule gewickelten Draht (Fig. 210).

Den Kraftlinienverlauf im Innern eines Solenoids stellt Fig. 209 dar. Man sieht, wie die Kraftlinien jedes einzelnen Kreisstromes durch die benachbarten Kreise nicht bloß verstärkt, sondern ge-

wissermaßen aufgenommen und weitergeführt werden, so daß bei hinreichend enger Aneinanderfügung der Ringe und genügender Länge der ganzen Röhre im Innern ein kräftiges, nahezu homogenes Magnetfeld entsteht. Die Kraftlinien treten aus dem Nordende der Röhre heraus, laufen außen um die Röhre herum und treten durch das Südende wieder in die Röhre ein. Sie verhalten sich also ganz so, wie die Kraftlinien eines Magnets, die auch vom Nordpol ausgehen und in das Südende einmünden. Nur sind beim Stahlmagnet die Kraftlinien durch die Materie des Magnets geschlossen. Beim Solenoid dagegen bilden sie, wie diejenigen eines einzelnen Kreisstromes oder eines geraden Drahtes, in sich geschlossene Kurven, indem sie durch den freien Innenraum des Solenoids in sich zurückkehren. Alle Kraftlinien, die das Solenoid durch den Außenraum von seinem einen zu seinem anderen Ende schickt, drängen sich im Innenraum des Solenoids zusammen. Hier ist daher das magnetische Feld, das der die Drahtwindungen durchfließende Strom erzeugt, am stärksten. Dieses Feld im Innern eines Solenoids ist um so stärker, je größer die Stromstärke und je größer die Zahl der Windungen ist, die auf dem Zentimeter der Spulenlänge enthalten sind. Man sagt, indem man die Stromstärke in Ampère ausgedrückt denkt, das magnetische Feld im Innern der Solenoids ist durch die Zahl der Ampère-Windungen pro Zentimeter der Spulenlänge gegeben.

Ein einzelner Kreisstrom von der elektromagnetisch gemessenen Stärke i und der Fläche F wirkt auf einen sehr entfernten Magnetpol wie ein Magnet von dem Moment $M = i \cdot F$ (243). Sind N gleiche Kreisströme zu einem Solenoid aneinander gereiht, so ist ihre Wirkung auf einen entfernten Pol wie die eines Magnets vom Moment $M = i \cdot F \cdot N$. Andererseits verhält sich ein solches Solenoid wie ein Magnet von der gleichen Länge, von dessen Endflächen der gleiche Kraftfluß ausgeht. Ist L die Länge des Solenoids, und müßte auf den Endflächen des Magnets die Magnetismusmenge (Polstärke, 137) μ verteilt sein, um den gleichen Kraftfluß wie den des Solenoids zu ergeben, so wäre

das Moment des Magnets $M = \mu L$. Also muß $\mu = i F \cdot \frac{N}{L} = i \cdot F \cdot n$ sein, wenn

n die Zahl der Windungen des Solenoids auf der Längeneinheit bedeutet. Da der Kraftfluß, der von der Magnetismusmenge μ ausgeht $= 4\pi\mu$ ist (138), so ist also der gesamte Kraftfluß, der von dem Solenoid ausgeht $= 4\pi i n F$. Im Innern des Solenoids, wo dieser Kraftfluß nahezu gleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist, kommt also auf die Flächeneinheit des Querschnitts der Kraftfluß $4\pi n i$; oder die magnetische Feldstärke im Innern eines hinreichend langen Solenoids ist $= 4\pi i n$. Wird also i in Ampère gemessen, so muß die Ampère-Windungszahl $i \cdot n$ mit $\frac{4\pi}{10}$ multipliziert werden, um die Feldstärke im Innern im absoluten magnetischen Maß zu ergeben.

Ein frei beweglicher Magnetstab wird von einem Solenoidpol abgestoßen oder angezogen, je nachdem der nähere Magnetpol mit jenem gleichnamig oder ungleichnamig ist; im letzteren Falle wird der Magnet in die Spirale hineingezogen, bis seine Mitte mit derjenigen des Solenoids zusammenfällt, mit einer Kraft, die einerseits der Stärke des Magnetismus, andererseits der Stromstärke proportional ist.

Macht man den Magnet fest und den Stromleiter beweglich, so wird der letztere, wegen der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung, in Bewegung gesetzt. Unter dem Einfluß der Erde stellt sich ein drehbar aufgehängter Kreisstrom oder Schraubendraht mit seiner Achse in den magnetischen Meridian ein, die rechtsherum umströmte Seite gegen Süden gekehrt, und verhält sich einem genäherten Magnet gegenüber ganz so, als wäre er selbst ein Magnet.

Um Stromleiter drehbar aufzuhängen, bedient man sich des Ampèreschen Gestells (Fig. 211). Die beiden auf dem Brettchen *A* stehenden Messingsäulen *v* und *t*, welche oben rechtwinklig

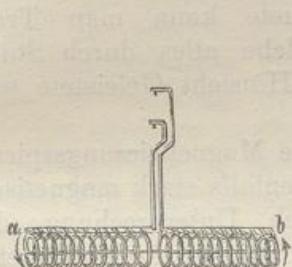


Fig. 210.
Solenoid.

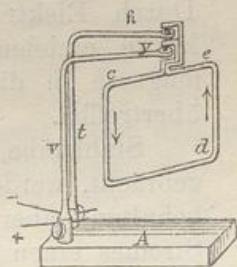


Fig. 211.
Ampèresches Gestell.



Fig. 212.
Kreisförmiger Stromleiter.

umgebogen sind, tragen an ihren Enden stählerne, mit Quecksilber gefüllte Näpfchen *y* und *y'*, von denen das erstere gerade unter dem letzteren liegt. Der Stromleiter, z. B. der zu einem Rechteck gebogene Draht *cde* (oder der Kreisstrom, Fig. 212, oder das Solenoid, Fig. 210) aus Kupfer oder besser aus dem leichteren Aluminium wird mittels Stahlspitzen, die an seinen Enden angelötet sind, in die Quecksilbernäpfchen eingehängt, so daß er sich um die von den beiden Spitzen gebildete Achse mit Leichtigkeit drehen kann.

245. Elektromagnete. Bald nach Oersteds Entdeckung der Ablenkung der Magnetnadel machte Arago (1820) die oben (239) bereits erwähnte Beobachtung, daß der kupferne Schließungsdrat einer galvanischen Batterie sich ringsum mit Eisenfeilspänen bedeckte, wenn er in dieselben getaucht wurde, sie aber sofort wieder fallen ließ, wenn der Strom unterbrochen wurde. Eisenstäbchen wurden in der Nähe eines Stromes magnetisch, solange der quer über sie geleitete Strom dauerte, Stahlnadeln wurden bleibend magnetisch. Eine weit kräftigere Wirkung wird erzielt, wenn der mit Seide oder Wolle umspinnene oder sonstwie isolierte Kupferdraht um einen Stab aus weichem Eisen vielfach herumgewunden (Sturgeon, 1825) und nun der Strom durch die Drahtwindungen geleitet wird; der Eisenstab wird sofort zu einem starken Magnet und vermag nun Eisen anzuziehen und festzuhalten; er verliert aber seine magnetischen Eigenschaften fast vollständig und läßt das angezogene Eisen wieder los, wenn man den Strom unterbricht. Ein solcher mit Drahtwindungen umgebener Eisenkern, den man durch Schließen und Öffnen des Stromes nach Belieben magnetisch und wieder un-

magnetisch machen kann, heißt ein Elektromagnet. Statt den Draht unmittelbar auf den Eisenkern zu wickeln, erscheint es zweckmäßiger, ihn auf eine Spule, Magnetisierungsspirale aufzuwinden, in deren Höhlung man den Eisenstab hineinschiebt. Damit die beiden Pole nebeneinander zu liegen kommen und sich in ihrer Wirkung gegenseitig unterstützen (149), gibt man dem Elektromagnet die Gestalt eines Hufeisens (*abc*, Fig. 213), auf dessen Schenkel die Drahtspulen *a* und *c* aufgeschoben sind; an dem eisernen Anker *de*, der die Pole verbindet und den Elektromagnet „schließt“, ist behufs Erprobung der Tragkraft eine zur Aufnahme der Gewichte bestimmte Wagschale angehängt. Durch Elektromagnete kann man Tragkräfte erzielen, welche alles durch Stahlmagnete in dieser Hinsicht Geleistete weit übertreffen.

Stahlstäbe, in die Magnetisierungsspirale gebracht, werden ebenfalls stark magnetisch, behalten aber nach Unterbrechung des Stromes einen beträchtlichen Anteil dauernd.

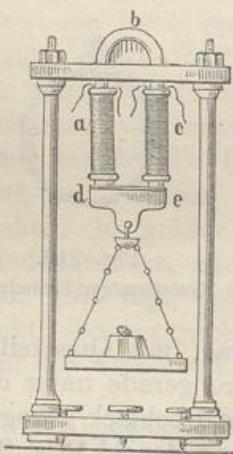


Fig. 213.
Elektromagnet in Hufeisenform.

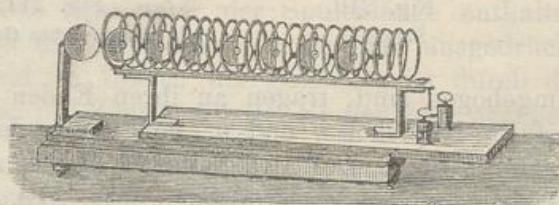


Fig. 214.
Modell der Molekularmagnete.

den Magnetismus. Man kann also auf diese Weise permanente Stahlmagnete herstellen. Das beste Verfahren zur Herstellung starker Stahlmagnete besteht jedoch darin, daß man mit der einen Hälfte des Stahlstabes von der Mitte angefangen 10—20 mal über den Nordpol, mit der anderen Hälfte ebensooft über den Südpol eines kräftigen Elektromagnets streicht, wodurch an jenem Ende ein Südpol, an diesem ein Nordpol entsteht.

Die Magnetisierung des Eisens durch den Strom ist der gleiche Vorgang der magnetischen Influenz oder Induktion, den wir bereits früher (134) kennen gelernt haben, und wir können ihn, wie dort, durch die Anschauung erklären, daß die kleinen Teilchen auch des unmagnetischen Eisens und Stahls um ihren Schwerpunkt drehbare Magnetchen sind, die jedoch, ganz regellos gelagert, nach außen keine Wirkung üben können. Durch das magnetische Feld des Stromes werden die Magnetchen nach der Ampèreschen Regel so gedreht, daß sich ihre Achsen senkrecht zur Ebene der Drahtwindungen, also parallel zur Achse des Eisenstabes richten, derart, daß ihre Nordpole zur Linken der mit dem Strome schwimmenden und gegen den Eisenkern blickenden Figur liegen. Dadurch, daß

die Molekularmagnetchen jetzt sämtlich oder wenigstens zum Teil in dieser Weise geordnet sind, ist der Stab zu einem Magnet geworden, dessen Nordpol zur Linken des Ampèreschen Schwimmers liegt, oder, was dasselbe ist, der seinen Südpol an jenem Ende hat, von wo aus gesehen der Strom in der Richtung des Uhrzeigers kreist (Fig. 208). — Man kann diesen Vorgang versinnlichen durch eine Reihe kleiner um ihre Mitte drehbarer Magnete, welche zur Hälfte (dem Nordpol entsprechend) schwarz gefärbte Papierscheiben tragen, und durch die Windungen des sie umgebenden Schraubendrahtes hindurch weithin sichtbar sind (Fig. 214). Anfangs ungeordnet, richten sie sich, wenn ein Strom durch die Spirale geschickt wird, mit ihren schwarzen Hälften nach der einen Seite, und kehren ihre Lage um, wenn der Strom umgekehrt wird.

Da ein Stab weichen Eisens unter dem Einfluß einer genäherten stromdurchflossenen Spirale zu einem Elektromagnet wird, dessen näherer Pol ungleichnamig ist, so wird er stets in die Spirale hineingezogen. Die Kraft, mit der dies geschieht, ist dem Quadrat der Stromstärke proportional, weil sie zunächst dem Produkt der Stromstärke und des Magnetismus des Stabes, dieser aber selbst wieder (für schwächere Ströme) der Stromstärke proportional ist.

246. Die magnetischen Eigenschaften des Eisens. Da man mit Hilfe von Solenoiden magnetische Felder von beliebiger Stärke herstellen kann, so läßt sich die Abhängigkeit der induzierten Magnetisierung des Eisens von der Stärke des induzierenden Feldes unter Anwendung elektrischer Ströme genau untersuchen. Wird z. B. ein Eisenstab in einer Magnetisierungsspirale magnetisch, so kann man sein induziertes Moment durch seine Wirkung auf eine Magnetnadel genau so wie für einen permanenten Magnet bestimmen (140), wenn man die gleichzeitige Wirkung der stromdurchflossenen Spule auf die Magnetnadel durch eine passend aufgestellte zweite, von demselben Strom durchflossene Spule aufhebt. Man beobachtet dann, daß bei allmählich zunehmender Stromstärke der Magnetismus anfangs nahezu proportional der Stromstärke wächst, später aber immer langsamer. Das Eisen nähert sich seiner Sättigung (134); ist diese erreicht, so vermag auch eine noch so große Stromstärke die Magnetisierung nicht mehr höher zu steigern.

Die Polstärke (Magnetismusmenge), welche auf jeder Endfläche eines Stabes pro Flächeneinheit hervorgerufen wird, kann man zunächst der Stärke \mathfrak{H} des Magnetfeldes proportional setzen, also gleich $\alpha \mathfrak{H}$, wenn α einen für die Substanz des Stabes charakteristischen Zahlenwert, die Magnetisierungszahl, bedeutet. Ist q der Querschnitt, l die Länge, $v = lq$ das Volumen des Stabes, so erlangt er unter dem Einfluß des Magnetfeldes \mathfrak{H} die Polstärke $m = \alpha q \mathfrak{H}$ und das Moment $M = \alpha l q \mathfrak{H} = \alpha v \mathfrak{H}$. Die Zahl α , welche das Verhältnis des an einer Stelle des Magnetfeldes in der Volumeneinheit induzierten magnetischen Moments zu der dort herrschenden Feldstärke ausdrückt, ist das Maß für die magnetische Empfänglichkeit (Suszeptibilität) der magnetisierbaren Substanz. Für weiches Eisen liegt α zwischen 100 und 200.

Da ein Pol von der Stärke $m 4\pi m$ Kraftlinien aussendet, so geht von der Flächeneinheit der Endfläche des Eisens ein Kraftfluß von der Stärke $4\pi \alpha \mathfrak{H}$

aus. Dieser Kraftfluß addiert sich zu dem des induzierenden Feldes, der $= \Phi$ ist. Folglich ist der gesamte Kraftfluß, der das Eisen durchsetzt, $(1 + 4\pi\mu)\Phi$. Diesen gesamten Kraftfluß im Eisen nennt man die Induktion \mathfrak{B} ; es ist also $\mathfrak{B} = (1 + 4\pi\mu)\Phi$. Man pflegt das Verhältnis der Induktion zur Feldstärke mit μ zu bezeichnen, und die Permeabilität des Materials zu nennen. Die Permeabilität steht zu der Suszeptibilität in der Beziehung $\mu = 1 + 4\pi\chi$.

Nach den obigen Werten für χ würde die Permeabilität des betreffenden Eisens zwischen 2200 und 2500 liegen. Doch sind, wie die oben besprochenen Versuche lehren, die Werte von χ und μ beim Eisen nicht konstant, sondern ändern sich mit der Stärke des magnetisierenden Feldes. Da der induzierte Magnetismus zu einem Maximum ansteigt, so nimmt μ für höhere Feldstärken mehr und mehr ab.

Das Eisen zeigt für das magnetische Feld ein Verhalten, wie es ein Isolator von sehr hoher Dielektrizitätskonstante im elektrischen Felde zeigen würde. Wie bei dem dielektrischen Körper muß auch bei den magnetisierbaren Substanzen zwischen dem magnetischen Induktionsfluß und dem magnetisierenden Kraftfluß unterschieden werden. Das Verhältnis beider ist die Permeabilität, die also dieselbe Rolle im magnetischen Felde spielt, wie die Dielektrizitätskonstante im elektrischen Felde (184).

Wenn man einen Eisenkern in einer Magnetisierungsspule durch einen allmählich ansteigenden Strom magnetisiert und dann durch langsame Schwächung des Stromes wieder entmagnetisiert, so findet man, daß den gleichen Stromstärken bei der Entmagnetisierung eine höhere Magnetisierung des Eisenstabes entspricht, als bei der Magnetisierung. Ist der Strom wieder auf Null gesunken, so ist der Kern noch etwas magnetisch, und man muß, um ihn ganz zu entmagnetisieren, einen Strom von gewisser Stärke in umgekehrter Richtung durch die Spule schicken. Dieses Zurückbleiben des Magnetismus bei auf- und absteigender Magnetisierung bezeichnet man als „Hysteresis“. Sie ist eine Erscheinungsform der Koerzitivkraft, die auch im weichen Eisen, wenn auch nur in geringem Grade, vorhanden ist.

Im Augenblicke der Magnetisierung erleidet ein Eisenstab eine kleine Verlängerung und läßt dabei einen Ton vernehmen. Sein Volumen aber bleibt unverändert.

Beim Magnetisieren und Entmagnetisieren, namentlich bei rasch hintereinander folgenden Wiederholungen dieses Vorganges erwärmt sich der Stab, indem die Koerzitivkraft wie eine Art innerer Reibung wirkt.

247. Para- und Diamagnetismus. Mit Hilfe von Elektromagneten kann man sehr viel stärkere magnetische Felder erzeugen, als mit Stahlmagneten. Durch Anwendung dieser kräftigen Wirkungen gelang es Faraday (1845) nachzuweisen, daß nicht bloß Eisen, Kobalt und Nickel, sondern — allerdings in außerordentlich verschiedenem Grade — auch alle übrigen Stoffe von einem Magneten beeinflußt werden. Dabei fand er, daß sich alle Stoffe in zwei Klassen teilen lassen.

Bringt man ein Stäbchen von Wismut, das, an einem Kokonfaden aufgehängt, wagrecht schwebt, zwischen die Pole eines sehr kräftigen Elektromagnets (Fig. 215, von oben gesehen), so wird es von beiden Polen abgestoßen und stellt sich rechtwinklig zur Verbindungslinie NS der beiden Pole, während ein Eisenstäbchen sich in die Verbindungslinie NS der Magnetpole einstellt. Die Verbindungslinie der Pole eines Magnets wird bekanntlich seine Achse,

eine in der Mitte der Achse zu ihr senkrecht gelegte Ebene sein Äquator genannt; man nennt daher die Stellung *ab* die äquatoriale, die Stellung *NS* die axiale. In bezug auf ihre Einstellung zwischen den Magnetpolen lassen sich alle Körper in zwei Gruppen teilen: die magnetischen werden vom Magnet angezogen und stellen sich axial, die übrigen abgestoßen und stellen sich äquatorial; erstere wurden von Faraday paramagnetisch, letztere diamagnetisch genannt. Außer Eisen, Nickel und Kobalt, deren magnetische Eigenschaften schon längst bekannt waren, erwiesen sich noch Mangan, Chrom, Cer, Titan, Osmium, Palladium, Platin und andere diesen verwandte Elemente, sowie fast alle Eisenverbindungen als paramagnetisch, als diamagnetisch dagegen vorzüglich Wismut, sodann Antimon, Zink, Blei, Silber, Kupfer, Gold und die meisten übrigen Körper. Aber die Magnetisierbarkeit aller dieser Körper ist so schwach gegenüber der hohen Magnetisierbarkeit von Eisen, Kobalt und Nickel, daß man diese letzteren drei Körper als besondere Gruppe der ferromagnetischen Körper den para- und diamagnetischen gegenüber zu stellen pflegt.

Dieses Verhalten erklärt sich durch die Annahme, daß alle Körper im Magnetfeld magnetisch werden, die diamagnetischen jedoch schwächer, als das umgebende Mittel, z. B. die Luft oder der leere Raum (Äther). Eine in eine Glasröhre eingeschlossene verdünnte Lösung von Eisenchlorid, die von Luft umgeben sich axial richtet, stellt sich, in eine stärkere Eisenchloridlösung getaucht, äquatorial, weil die stärkere Lösung mit größerer Kraft die axiale Lage einzunehmen strebt und die schwächere daraus verdrängt (nach Analogie des Archimedischen Prinzips). Die diamagnetischen Körper haben negative Magnetisierungszahlen, z. B. Wismut — 0,000 014, Wasser — 0,000 000 8; ihre Permeabilität ist geringer als die der Luft, sie sammeln die Kraftlinien nicht, sondern zerstören sie.

Auch Gase lassen Para- oder Diamagnetismus erkennen. Sauerstoff ist deutlich paramagnetisch; eine Kerzenflamme dagegen wird zwischen den Polen flach gedrückt und aus dem Felde herausgedrängt, weil die Flammengase diamagnetisch sind gegen die umgebende Luft.

248. Elektromagnetische Telegraphie. Die magnetischen Wirkungen des galvanischen Stromes, sowohl die Ablenkung der Magnetnadel als auch die Magnetisierung weichen Eisens, finden eine wichtige Anwendung zur schnellen Übermittelung von Signalen und Schriftzeichen in die Ferne (Telegraphie).

Auf der Ablenkung der Magnetnadel beruhen die Nadeltelegraphen; indem man nämlich durch eine Drahtleitung nach einer entfernten Station einen Strom schickt, woselbst er eine drehbar aufgestellte Magnetnadel in vielfachen Drahtwindungen umkreist,

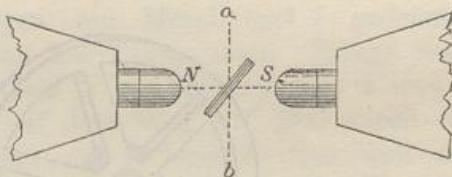


Fig. 215.
Diamagnetismus.

kann man je nach der Richtung, die man dem Strom gibt, die Nadel beliebig nach rechts oder nach links ablenken; aus den zwei Zeichen „rechts“ und „links“ lassen sich aber nach Übereinkunft alle Buchstaben und sonstigen Schriftzeichen zusammensetzen. Den ersten elektromagnetischen Telegraphen dieser Art haben Gauß und Weber 1838 zwischen der Sternwarte und dem physikalischen Institut zu Göttingen eingerichtet. Auch in der unterseeischen Kabeltelegraphie erfolgt die Zeichengebung durch die Ablenkung des innerhalb einer

Drahtrolle aufgehängten Magnetchens eines sehr empfindlichen Spiegelgalvanometers.

Andere elektromagnetische Telegraphen gründen sich auf die Anwendung von Elektromagneten; als Beispiel diene der noch gegenwärtig auf den meisten Telegraphenlinien in Gebrauch befindliche Zeichendrucktelegraph oder Stiftschreiber von Morse (1837). In Fig. 216 sind *AA* die beiden Schenkel eines Elektromagnets, über dessen Polen, von dem Messinghebel *cc* getragen, der eiserne Anker *a* schwebt; das andere Ende des Hebels trägt den stählernen Stift *d*, welcher, sobald der Anker von dem Elektromagnet angezogen wird, gegen den von der Rolle *B* sich abwickelnden Papierstreifen *bb* drückt, den ein Uhrwerk mit gleichförmiger Geschwindigkeit zwischen zwei Walzen hindurchzieht. Damit das Papier von dem Stift

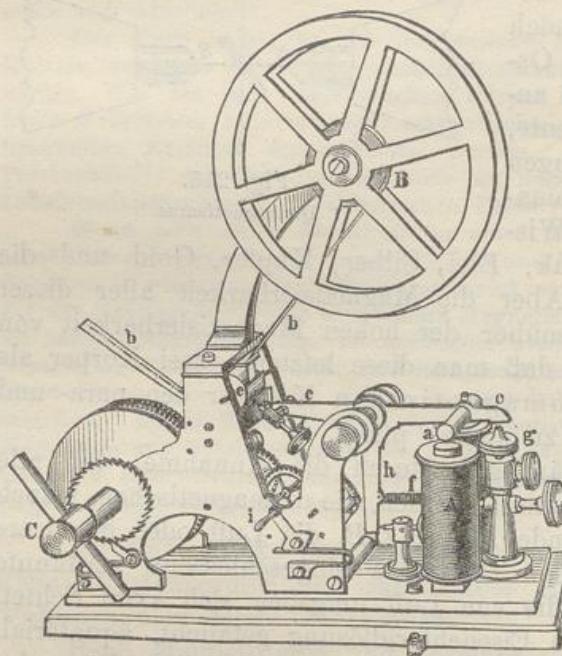


Fig. 216.
Stiftschreiber des Morseschen Telegraphen.

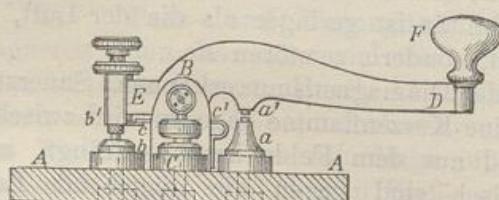


Fig. 217.
Schlüssel des Morseschen Telegraphen.

Eindrücke empfange, ist die obere Walze *e* ringsum mit einer seichten Rinne versehen. Beim Herabgehen stößt das rechte Ende des Hebels gegen eine Schraube *g*, welche verhindert, daß der Anker mit den Polen des Elektromagnets in Berührung komme und daran hafte. Erlöscht nach Unterbrechung des Stromes der Magnetismus wieder, so zieht die Abziehfeder *f*, welche an dem Seitenarm *h* des Hebels *cc*

wirkt den Stift *d* wieder herab. Der Handgriff *C* dient zum Aufziehen des Uhrwerks, die Kurbel *i* zum Auslösen und Hemmen desselben. Zum Schließen und Öffnen des Stromes dient der Taster oder Schlüssel (Fig. 217), ein messingener Hebel *D E*, welcher in dem auf das Holzbrettchen *AA* geschraubten Messinglager *BC* drehbar ist. Dieses Lager steht mit der nach der nächsten Station führenden Telegraphenleitung in Verbindung, die Metallwarze *a* dagegen mit dem einen Pol der Batterie. Im Ruhezustand wird die Spitze *b'* durch die Feder *cc'* gegen den Metallkegel *b* gedrückt, und zwischen *a* und *a'* findet keine Berührung statt. Bringt man aber durch einen Druck auf den Griff *F* die Metallwarzen *a* und *a'* in Berührung, so geht der Strom auf dem Weg *a a' BC* durch die Drahtleitung um den Elektromagnet der anderen Station und der emporgehobene Stift desselben prägt auf den durch das Uhrwerk vorübergeführten Papierstreifen einen vertieften Punkt oder Strich, je nachdem der Taster nur einen Augenblick oder etwas länger niedergedrückt wird. Aus Punkten und Strichen läßt sich das ganze Alphabet zusammensetzen.

Die neueren Apparate haben statt des Stiftes *d* ein drehbares Rädchen, das mit seinem Rande in eine Farblösung taucht und beim Druck gegen den Papierstreifen farbige Striche und Punkte zeichnet (Farbschreiber).

Bei den frühesten Telegraphenanlagen waren für den Betrieb eines Zeichengebers stets zwei Drähte nötig, um den Strom nach der entfernten Station hin und wieder zurückzuführen; 1838 aber machte Steinheil die Entdeckung, daß der zweite Draht erspart werden könne, indem man Kupferplatten an die Enden der Leitung lötet und in die Erde versenkt (Bodenleitung). Ist eine galvanische Batterie in die Leitung geschaltet, so fließen von ihren Polen die entgegengesetzten Elektrizitäten durch die Kupferplatten in die Erde, um in ihr wie in einem großen Behälter zu verschwinden, und in dem Draht kommt der Strom ganz ebenso zustande, als wenn die Leitung geschlossen wäre und die Erde den fehlenden Teil des Schließungskreises bildete.

Damit zwischen zwei Stationen die Korrespondenz nach beiden Richtungen möglich sei, muß jede derselben sowohl mit einem Zeichengeber (Schlüssel) als auch mit einem Zeichenempfänger (z. B. Stiftschreiber) ausgerüstet sein. Der Stromlauf zwischen zwei Morsestationen ist in Fig. 218 angedeutet. Wird der Schlüssel *c* der absendenden Station niedergedrückt, so geht der Strom von der Batterie *b* aus über *c* in die Leitung, durch den ruhenden Schlüssel *c'* der Empfangsstation um den Elektromagnet *a'* des dortigen Schreibapparats, sodann in die Erde nach der Bodenplatte *d'* und von der Bodenplatte *d* um den diesseitigen Elektromagnet *a* zum anderen Pol der Batterie zurück. Einer besonderen Alarmvorrichtung bedarf der Morseapparat nicht; das Klapbern des Ankers genügt, um den Telegraphisten der Empfangsstation aufmerksam zu machen und zum Auslösen des Uhrwerks zu veranlassen.

In Wirklichkeit hat man sich indes unter den Elektromagneten der Fig. 218 nicht diejenigen der Schreibapparate selbst, sondern diejenigen der „Übertrager“ vorzustellen. Durch den großen Widerstand der langen Leitung wird nämlich der von der Abgangsstation kommende „Linienstrom“ zu sehr geschwächt, um den Schreibhebel mit der erforderlichen Kraft zu bewegen; der Linienstrom wird daher

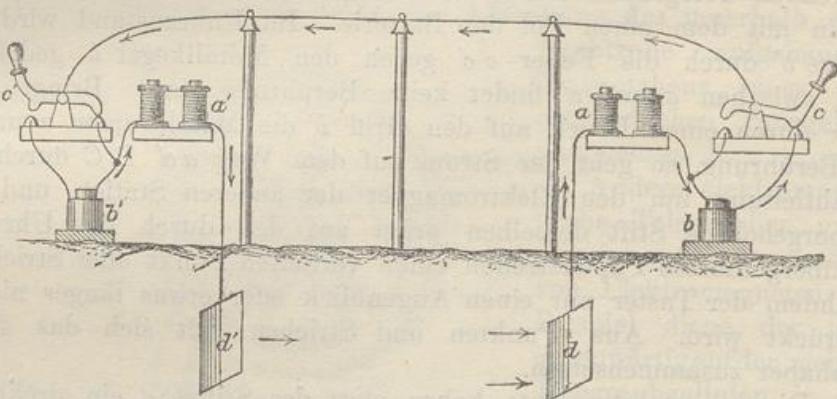


Fig. 218.
Stromlauf zwischen zwei Morsestationen.

nur dazu benutzt, um einen Elektromagnet *C* (Fig. 219) mit sehr leicht beweglichem Anker *a* zu erregen; indem der angezogene Anker den Hebelarm *b c* gegen die Schraube *d* drückt, schließt er die an der Empfangsstation aufgestellte Ortsbatterie (Lokalbatterie) *A* und sendet deren kräftigen Strom durch die Windungen des die Zeichen wiedergebenden Elektromagnets *B*. Diese von Wheatstone 1839 angegebene Einrichtung wird Übertrager oder Relais (Vorspann) genannt.

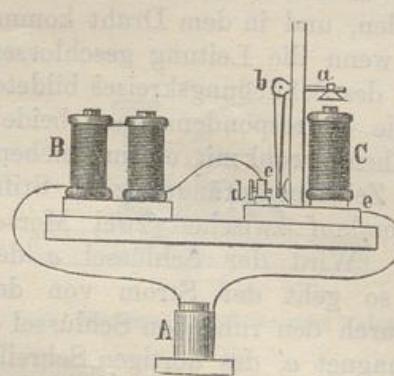


Fig. 219.
Relais.

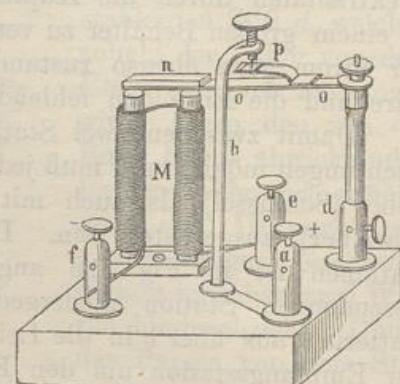


Fig. 220.
Magnetischer Hammer.

249. **Wagnerscher Hammer. Elektrische Klingel.** Der magnetische Hammer (Wagner, 1839), eine Vorrichtung zur selbsttätigen Unterbrechung und Wiederschließung des Stromes, ist in Fig. 220

dargestellt. Der Strom geht von der galvanischen Batterie zur Klemmschraube *a*, durch einen Metallstreifen zur Messingsäule *b*, durch eine Platinspitze auf ein kleines Platinblech, welches auf die Messingfeder *p* gelötet ist, von hier in die Messingsäule *d*, von da durch die zwischen *d* und *e* eingeschaltete Leitung, in der die Stromunterbrechungen erfolgen sollen, umkreist sodann die Drahtwindungen des Elektromagnets *M* und fließt über *f* nach dem negativen Pole der Batterie zurück. Sobald der Strom durch die Windungen des Elektromagnets geht, wird dieser magnetisch, zieht den auf der Messingfeder *oo* befestigten eisernen Anker *n* an und bewirkt durch Herabbiegen dieser Feder eine Unterbrechung des Stromes bei der Platinspitze. Infolgedessen erlischt der Magnetismus der Eisenkerne des Elektromagnets, die Feder schnellt zurück, stellt die Schließung bei *p* wieder her, worauf sich das nämliche Spiel unter raschen Schwingungen der Feder wiederholt.

Die elektrische Klingel besteht aus einem magnetischen Hammer, dessen Feder an ihrem freien Ende einen Klöppel trägt, der in raschen Schwingungen an eine Glocke schlägt, sobald und solange durch Drücken auf eine Taste ein Strom durch die Drahtleitung gesendet wird. In Fig. 221 ist die Anordnung der Leitung für einen elektrischen Klingelzug angedeutet. Vom Pol *C* der Batterie *A C* geht der Leitungsdraht nach dem Läutwerk *B* und setzt sich, aus demselben heraustretend, durch alle jene Räume fort, in welchen Drücker zum Klingeln angebracht werden sollen; ein vom anderen Pol *A* kommender Draht läuft parallel und isoliert neben jenem her. Von jedem dieser beiden parallelen Drähten geht ein Ausläufer zu jedem Drücker, so daß von allen diesen Stellen aus der Strom geschlossen und somit das Läutwerk in Tätigkeit gesetzt werden kann.

250. **Elektrische Uhren** sind Zeigerwerke, welches mittels eines elektrischen Stromes von einer Richtuhr (Normaluhr) aus mit dieser übereinstimmend in Gang gesetzt werden. Das Zeigerwerk besteht aus einem Rad mit 60 Zähnen, in welche ein am Anker eines Elektromagnets befestigter stählerner Stößer eingreift und das Rad jedesmal um einen Zahn fortschiebt, sobald der Anker von dem Elektromagnet angezogen wird. Dieser Elektromagnet ist in eine Stromleitung eingeschaltet, welche durch eine in der Normaluhr angebrachte Schlußvorrichtung nach Ablauf einer jeden Minute geschlossen wird. Der auf die Achse jenes Rades aufgesetzte Minutenanzeiger springt daher nach jeder Minute um $\frac{1}{60}$ des Umfangs des Zifferblattes weiter. Solche elektrische Uhren können in beliebiger Anzahl und in be-

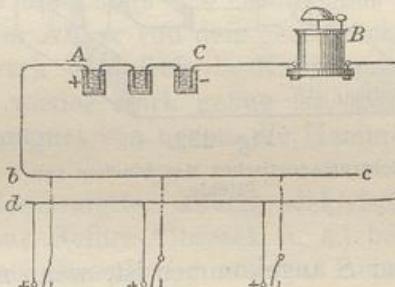


Fig. 221.
Elektrisches Läutwerk.

liebigen Entfernungen in dieselbe Leitung eingeschaltet und durch eine einzige Normaluhr mit dieser und unter sich übereinstimmend betrieben werden.

251. **Elektromagnetische Motoren.** Die kräftigen Wirkungen der Elektromagnete legten den Gedanken nahe, den Elektromagnetismus als bewegende Kraft zum Betriebe von Arbeitsmaschinen anzuwenden. Die Fig. 222 zeigt einen kleinen, von Ritchie (1833) angegebenen elektromagnetischen Motor.

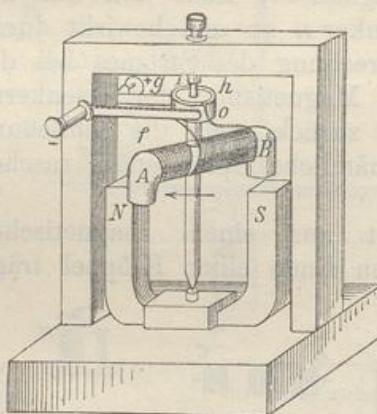


Fig. 222.
Elektromagnetisches Maschinchen von
Ritchie.

Über S angekommen ist, wenn nicht dafür gesorgt wäre, daß in diesem Augenblick die Stromrichtung in den Drahtwindungen umgekehrt und sonach A zu einem Nordpol und B zu einem Südpol gemacht wird; da alsdann A von N , B von S abgestoßen wird, so setzt sich die Drehung in dem einmal begonnenen Sinne fort. Die Umkehrung des Stromes im geeigneten Augenblick wird durch den Stromwechsler oder Kommutator hi selbsttätig bewirkt. Derselbe besteht aus einem auf der Drehachsachse isoliert sitzenden Metallring, welcher an zwei gegenüberliegenden Stellen durch isolierende Zwischenräume in zwei getrennte Hälften zerlegt ist, deren eine h mit dem einen Ende o , die andere i mit dem anderen Ende der Drahtwindungen verbunden ist. Auf dem Umfang des Metallrings schleifen zwei Messingfedern g und f , deren äußere Enden Klemmschrauben (+ und -) zur Aufnahme der Poldrähte der Batterie tragen. In der in der Figur dargestellten Lage geht der Strom durch die Feder g zum Halbring h und durch das Drahtende o in die Windungen, tritt aus diesem auf den Halbring i über, um durch die Feder f nach dem negativen Pol der Batterie zu gelangen. In dem Augenblick aber, in welchem A über N und B über S weggeht, gehen die isolierenden Zwischenräume zwischen h und i unter den Federn weg, die positive Feder g kommt auf i , die negative f auf h zu liegen, der Strom durchfließt die Drahtwindungen in um-

gekehrter Richtung und die Pole des Elektromagneten kehren sich um. Der Stahlmagnet *NS* kann durch einen feststehenden Elektromagnet ersetzt werden, dessen Windungen von dem nämlichen Strom wie diejenigen des beweglichen durchflossen werden. Die technisch verwendbaren elektromagnetischen Motoren (Elektromotoren) können erst später zur Sprache kommen.

252. Elektrische Bogenlampen. Soll das elektrische Bogenlicht (236) zu Beleuchtungszwecken verwendbar sein, so muß dafür gesorgt werden, daß die Kohlenstäbe nach Maßgabe ihres Abbrennens selbsttätig nachgeschoben werden, so daß der Flammenbogen stets dieselbe Länge und daher auch den nämlichen Widerstand behält. Dieser Zweck wird durch die Kohlenlicht-Regulatoren oder elektrischen Bogenlampen erreicht. Man läßt den Strom, welcher den Flammenbogen erzeugt, zugleich um einen Elektromagnet gehen, welcher, so lange die Kohlenspitzen die richtige Entfernung und der Strom die richtige Stärke hat, durch Anziehen eines Ankers ein Uhrwerk hemmt, welches die Kohlen gegeneinander zu schieben bestrebt ist; sobald jedoch infolge Abnutzung der Kohlen die Länge des Lichtbogens zunimmt und die Stromstärke abnimmt, wird der Anker von dem geschwächten Elektromagnet losgelassen, das Uhrwerk wird frei, die Kohlenspitzen nähern sich einander, bis der Strom wieder stark genug ist, worauf der ebenfalls wieder erstarkte Elektromagnet von neuem die Hemmung bewirkt.

Die nach diesen Grundsätzen konstruierten älteren elektrischen Lampen (von Foucault-Dubosq, Serrin, Hefner-Alteneck u. a.) beanspruchen jede für sich ihren eigenen Stromkreis; werden mehrere solcher Lampen in denselben Stromkreis gelegt, so versagen sie den Dienst, weil jetzt das Spiel einer jeden nicht mehr von dem Widerstande ihres eigenen Lichtbogens, sondern von der Summe der Widerstände sämtlicher Lichtbogen bedingt wird. Daher sind diese Lampen nur zu Demonstrationszwecken, zu Projektionen u. dergl. in Gebrauch gekommen. Für praktische Beleuchtungsanlagen ist es dagegen erforderlich, mehrere Lampen ohne gegenseitige Störung hintereinander schalten zu können; denn die bei großen elektrischen Anlagen üblichen Spannungen sind viel größer (2—5 mal) als diejenige Spannung, die eine einzelne Bogenlampe für sich beansprucht. Für solche Zwecke werden die Bogenlampen mit Regulatoren versehen, die auch auf elektromagnetischer Wirkung, aber ohne Anwendung eines Uhrwerkes beruhen. Die gebräuchlichste Anordnung ist diejenige der Differentiallampen von Hefner-Alteneck, welche in Fig. 223 schematisch dargestellt ist. An dem einen Arm *a* eines um *c* drehbaren Hebels ist die obere Kohle *K*₁, an dem anderen Arm *b* ein lotrechter Eisenstab *S* befestigt, dessen unteres Ende in eine mit dickem Draht bewickelte Spule (Solenoid) *R*₁, dessen oberes Ende dagegen in eine Spule aus dünnem Draht *R*₂ hineinragt; letzteres Solenoid ist bei *d* und *e* als Nebenschließung von großem Widerstand dem Hauptschließungskreis *L*₁ *dR*₁ *caK*₁ *K*₂ *eL*₂ angefügt. Fände

nun z. B. der eintretende Strom die Kohlenstäbe K_1 und K_2 weit getrennt, so geht er ganz durch die dünndrähtige Spule, da der Weg über die dickdrähtige Spule an der Trennungsstelle der Kohlenstäbe unterbrochen ist. Das Solenoid R_2 zieht daher den Stab S in sich hinein (245), der Arm b des Hebels steigt, der Arm a lässt die obere Kohle herabsinken, bis die Kohlenspitzen sich treffen. In diesem Augenblick wird die Nebenschließung, in welcher sich die Spule R_2 befindet, wegen ihres großen Widerstandes fast stromlos, während in der Spule R_1 , deren Widerstand gering ist, jetzt ein kräftiger Strom fließt; diese zieht den Eisenstab wieder herab, hebt dadurch die obere Kohle und der Lichtbogen stellt sich her. Infolge des Widerstandes des Flammenbogens wird der Strom in R_1 wieder schwächer und wächst dafür in R_2 , bis bei einem bestimmten Widerstand, d. h. bei einer bestimmten Länge des Bogens, die von R_1 und R_2 auf den Stab S ausgeübten Anziehungen sich das Gleichgewicht halten.

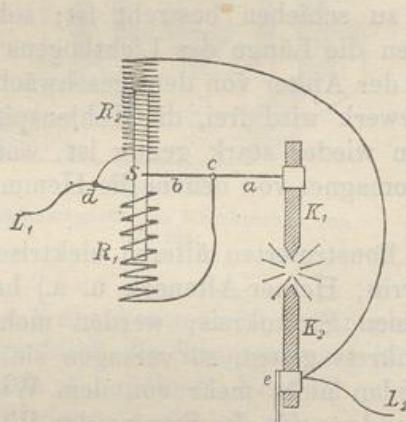


Fig. 223.
Elektrische Differentiallampe.

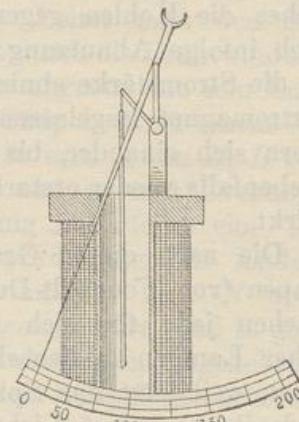


Fig. 224.
Ampèremeter.

253. Strom- und Spannungsmesser für technische Zwecke.
Zur Messung der starken Ströme, welche in der Elektrotechnik z. B. zur elektrischen Beleuchtung, angewendet werden, benutzt man ebenfalls die Anziehung, welche ein Solenoid auf einen beweglichen Eisenkern ausübt. Der sehr gebräuchliche Strommesser (Ampèremeter), dessen Einrichtung Fig. 224 zeigt, enthält in einem Gehäuse eine mit dickem Draht bewickelte Spule; ein dünner und leichter Eisenkern, der an einem Arme eines Winkelhebels hängt, wird um so tiefer in die Spule hineingezogen, ein je stärkerer Strom sie durchfließt, und die Drehung des Hebels wird durch einen auf seiner Achse sitzenden, längs einer Skala spielenden Zeiger angegeben.

Bei den Strommessern nach F. Kohlrausch ist der Eisenkern, auf den die Drahtspule wirkt, an einer Spiralfeder aufgehängt, und ein am Eisenkern befestigter Zeiger lässt an einer vertikalen Skala dessen Stellung erkennen.

Bei einer anderen sehr gebräuchlichen Konstruktion liegt die Spule horizontal. An einer horizontalen Drehungsachse, die exzentrisch in der Spule sitzt, ist ein gebogenes Eisenblech befestigt. Bei Durchgang des Stromes sucht sich das Eisenblech an den Spulenrand anzulegen, weil in der unmittelbaren Nähe der Drahtwindungen das magnetische Feld am stärksten ist. Die Schwerkraft eines Hebelarmes oder die Kraft einer Spiralfeder wirken der Drehung des Bleches entgegen und bedingen für jede Stromstärke einen Ausschlag von bestimmter Größe.

Die Eichung dieser Apparate, d. h. die Einteilung ihrer Skalen in Ampère, wird bewirkt, indem man Ströme von (z. B. durch ein Knallgas-Voltameter) gemessener Stärke durch sie direkt oder im Nebenschluß hindurchgehen läßt.

In ganz gleicher Weise werden Spannungsmesser oder Voltameter konstruiert, nur daß ihre Spule aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes besteht und in den Nebenschluß zu liegen kommt (229).

254. Wirkung eines Magnetfeldes auf einen Stromleiter. Wie ein Strom auf einen Magnetpol eine Kraft ausübt (239, 240), so übt auch umgekehrt ein Magnetpol auf einen stromführenden

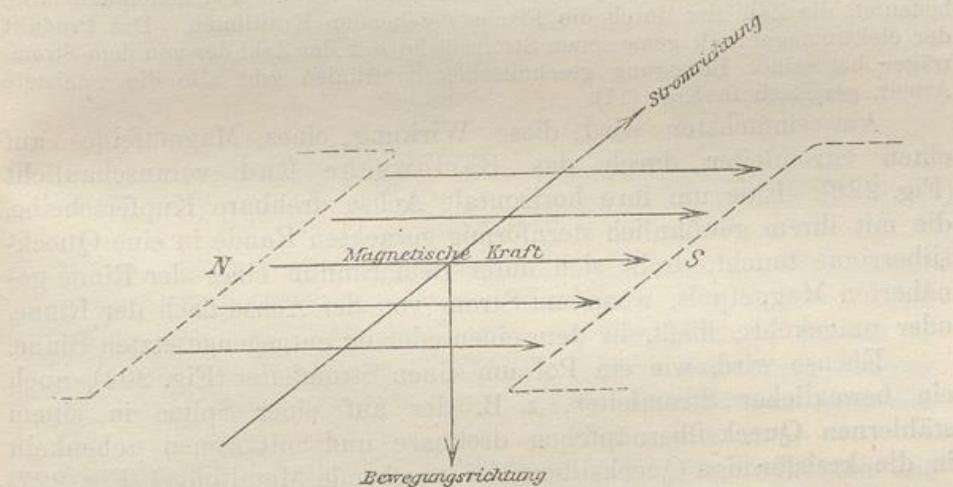


Fig. 225.
Bewegung eines Stromes in einem Magnetfeld.

Draht eine Kraft aus. Bringen wir z. B. einen biegsamen Draht zwischen die Pole eines Hufeisenmagnets, oder noch besser eines kräftigen Elektromagnets, so daß er senkrecht zu der Richtung der magnetischen Kraft durch das Feld hindurchgeht, und schicken wir nun einen Strom durch diesen Draht hindurch, so beobachten wir, daß der Draht aus dem Raum zwischen den Polen herausgebogen wird. Es wirkt also auf den stromführenden Draht im Magnetfelde eine Kraft, die auf dem Drahte senkrecht steht und ihn senkrecht zu den Kraftlinien des Feldes in Bewegung zu setzen sucht. Die Richtung dieser Kraft kehrt sich um, wenn der Strom im Drahte

umgekehrt wird, ebenso wenn der Elektromagnet im entgegengesetzten Sinne magnetisiert wird. Den Zusammenhang dieser drei Richtungen kann man sich mittels der Flemingschen sog. „Linken-Hand-Regel“ merken:

Halten wir den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der Kraftlinien des Magnetfeldes, den Mittelfinger in die des Stromes, so wird der Stromträger in der Richtung des Daumens derselben Hand quer zur Kraftlinienrichtung vorwärts bewegt (Fig. 225). Die Größe der Kraft ist der Stärke des magnetischen Feldes, der Stärke des Stromes und der Länge des Stromleiters im Felde proportional. Bildet der Draht nicht einen rechten, sondern einen spitzen Winkel mit den Kraftlinien des Feldes, so ist die Kraft kleiner (im Verhältnis des Sinus des Winkels) und wird gleich Null, wenn der Draht in die Richtung der Kraftlinien fällt.

Ist i die Stromstärke in elektromagnetischem Maße (243), \mathfrak{H} die Stärke des magnetischen Feldes, und liegt der Leiter senkrecht zu den Kraftlinien, so ist für die Strecke l des Leiters die Kraft, die ihn senkrecht zu den Kraftlinien in Bewegung zu setzen sucht: $\mathfrak{H} \cdot i \cdot l$ Dynen. Bewegt sich der Leiter in Richtung dieser Kraft um die Strecke z , so leistet die Kraft die Arbeit $\mathfrak{H} \cdot i \cdot l \cdot z$. Dabei ist $l \cdot z = f$ die Fläche, die der Leiter bei seiner Bewegung beschreibt; $\mathfrak{H} \cdot f$ aber ist, da \mathfrak{H} die Kraftlinienzahl für die Flächeneinheit (138) bedeutet, die Zahl der durch die Fläche f gehenden Kraftlinien. Das Produkt der elektromagnetisch gemessenen Stromstärke mit der Zahl der von dem Stromträger bei seiner Bewegung geschnittenen Kraftlinien gibt also die geleistete Arbeit, gemessen in Ergs (17).

Am einfachsten wird diese Wirkung eines Magnetfeldes auf einen Stromleiter durch das Barlowsche Rad veranschaulicht (Fig. 226). Eine um ihre horizontale Achse drehbare Kupferscheibe, die mit ihrem gewöhnlich sternförmig gezackten Rande in eine Quecksilberrinne taucht, dreht sich unter dem Einfluß eines der Rinne genäherten Magnetpols, wenn ein Strom von der Achse nach der Rinne, oder umgekehrt, fließt, in dem einen oder im entgegengesetzten Sinne.

Ebenso wird, wie ein Pol um einen Stromleiter (Fig. 204), auch ein beweglicher Stromleiter, z. B. der auf einer Spitz in einem stählernen Quecksilbernäpfchen drehbare und mit seinen Schenkeln in die kreisförmige Quecksilberrinne tauchende Metallbügel (Fig. 227) um einen feststehenden Magnet rotieren, wenn das Näpfchen durch den Magnet hindurch mit dem einen, die Rinne mit dem anderen Pol einer Stromquelle verbunden ist.

Ein neben einem vertikalen Maßstab schlaff herabhängendes biegsames Metallseil oder Metallband beginnt, wenn man einen Strom durch dasselbe sendet, zu rotieren, undwickelt sich spiraling um den Magnet; wird der Strom umgekehrt, sowickelt es sich ab und in entgegengesetzter Richtung wieder auf.

Ist der Stromleiter, auf den das Magnetfeld wirkt, nicht geradlinig, sondern umschließt er eine Fläche, etwa ein Viereck, das mit zweien seiner Seiten den Kraftlinien parallel, mit den beiden anderen aber senkrecht zu ihnen verläuft, so wirkt das Magnetfeld nur auf die beiden letzteren und zwar ist die Kraft, die an der einen Seite

angreift, der an der anderen Seite wirkenden entgegenseetzt. Die Kräfte setzen sich daher zu einem Kräftepaar zusammen, das die Stromfläche so zu drehen sucht, daß der Strom die Fläche in demselben Sinne umkreist, in dem die das wirkende Magnetfeld erzeugenden Ströme verlaufen würden (vgl. Fig. 206).

Wie man bei den gewöhnlichen Galvanometern (216) die Stromstärke mißt durch die ablenkende Wirkung einer Spule auf einen Magneten, so benutzt man neuerdings auch die ablenkende Wirkung eines Magneten auf eine Spule zur Strommessung. Beim Deprez-Galvanometer schwebt eine drehbar aufgehängte Drahtrolle, durch

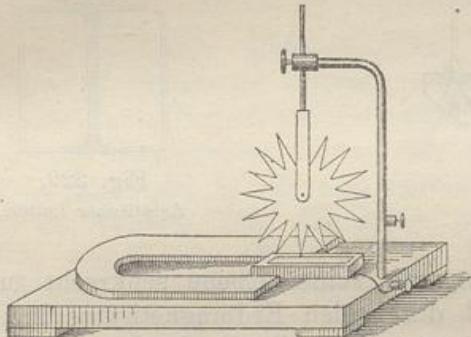


Fig. 226.
Barlow'sches Rad.

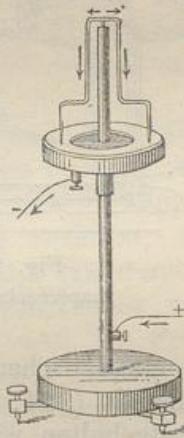


Fig. 227.
Drehung eines Stromes um einen Magnet.

welche man den zu messenden Strom leitet, zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten. Diese Instrumente haben den Vorteil, daß Änderungen des Erdmagnetismus, bewegte Eisenmassen, Ströme in der Erde oder in benachbarten Leitungen keinen merklichen Einfluß auf das starke Magnetfeld und damit auf die Ablenkungen der Spule ausüben.

255. Elektrodynamische Wirkungen. Da ein Magnetfeld auf einen Stromleiter eine bewegende Wirkung ausübt, und da ferner jeder Strom um sich herum ein Magnetfeld erzeugt, so üben auch Ströme aufeinander bewegende Kräfte aus. Dies hat Ampère 1823 durch Versuche nachgewiesen. Nähert man dem im Ampèreschen Gestell (Fig. 211) beweglich aufgehängten rechteckig gebogenen Stromleiter (aus Kupfer- oder Aluminiumdraht) *cde* (Fig. 228) den auf dem Brettchen *B* befestigten ebenfalls rechteckig gebogenen Kupferdraht *ab*, durch welchen mittels der Zuleitungsdrähte *f* und *g* ein Strom gesendet wird, so wird der Stromteil *de* von dem ihm parallelen Stromteil *ba* angezogen, wenn in beiden die Ströme gleiche Richtung haben, und der bewegliche Stromleiter stellt sich dem festen gegenüber in eine stabile Gleichgewichtslage, in welcher er, wenn er aus ihr herausgedreht wird, nach einer Reihe von Schwingungen wieder

zurückkehrt. Gibt man aber dem Strom in ab mittels eines in den Schließungskreis fg eingeschalteten Stromwenders die entgegengesetzte Richtung wie in de , so stoßen diese Stromteile sich gegenseitig ab, und der bewegliche Leiter dreht sich um 180° aus seiner anfänglichen labilen Gleichgewichtslage in die stabile, indem seine gegenüberliegende Seite, in welcher der Strom die gleiche Richtung wie im Stromteile ba hat, diesem gegenüber sich einstellt.

Bei Anstellung dieser Versuche kann der Erdmagnetismus störend wirken, da ja ein beweglicher Stromkreis wie ced mit seiner Achse

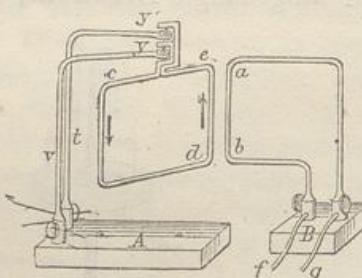


Fig. 228.
Ampèresches Gestell.

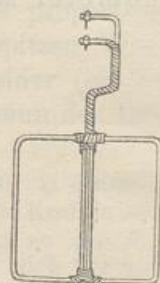


Fig. 229.
Astaticischer Leiter.

in den magnetischen Meridian, mit seiner Ebene senkrecht zu ihm sich einstellt (244, 254) und durch den Erdmagnetismus in dieser Lage festgehalten wird. Biegt man aber den Draht des beweglichen Leiters so, wie aus Fig. 229 ersichtlich ist, so ist der Leiter dem

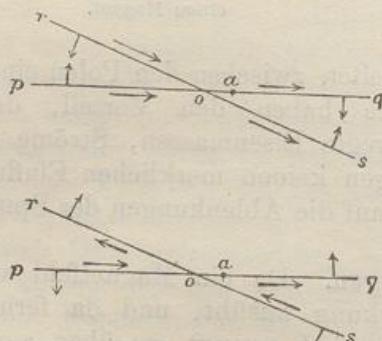


Fig. 230.
Gekreuzte Ströme.

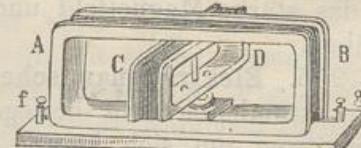


Fig. 231.
Elektrodynamischer Rotationsapparat.

Einfluß des Erdmagnetismus entzogen, er ist „astatisch“; denn er muß sich jetzt verhalten, wie zwei fest miteinander verbundene gleichstarke Magnete, deren Pole entgegengesetzt liegen (wie ein astatisches Nadelpaar).

Wenn der Stromleiter rs (Fig. 230) über oder unter einem um a drehbaren Stromleiter pq weggeht, z. B. unter dem wagrechten Teil d des am Ampèreschen Gestell aufgehängten Rechtecks (Fig. 228), so daß die Leiter sich kreuzen, so sind die Ströme bestrebt, sich

parallel und gleichgerichtet zu stellen; man kann auch sagen, es finde Anziehung statt zwischen denjenigen Teilen der beiden Leiter, in welchen sich beide Ströme nach dem Kreuzungspunkte *o* hin- oder von ihm fortbewegen, Abstoßung aber zwischen je zwei Teilen der beiden Leiter, in deren einem der Strom nach der Kreuzungsstelle hin, in dem anderen von ihr wegfließt.

Aus diesen Versuchen ergibt sich also zusammengefaßt, daß parallele Stromteile bei gleicher Richtung sich anziehen, bei entgegengesetzter Richtung sich abstoßen, und gekreuzte Stromteile das Bestreben zeigen, sich parallel und gleichgerichtet zu stellen. Diese Wirkungen, welche Ampère als elektrodynamische bezeichnete, erklären sich unmittelbar aus der Wirkung, die das Magnetfeld des einen Stromes nach der Linken-Hand-Regel auf den anderen Strom ausübt (254).

Da parallele gleichgerichtete Ströme anziehend aufeinander wirken, so müssen die Windungen einer schlaffen Drahtspirale, welche an einem metallischen Ständer aufgehängt mit einer unten angebrachten Spalte in Quecksilber taucht, sich gegenseitig anziehen, sobald ein Strom durch die Spirale zum Quecksilber geht. Hierdurch verkürzt sich die Spirale, hebt die Spalte aus dem Quecksilber und unterbricht den Strom; die Anziehung hört jetzt auf, die Spirale verlängert sich durch ihr eigenes Gewicht und stellt den Strom wieder her. Indem sich so der Spiraldraht abwechselnd zusammenzieht und wieder ausstreckt, gerät er in eine auf- und abhüpfe Schwingungsbewegung (Roget, Petrina).

Da es für die Wirkung eines Magnetfeldes ganz gleichgültig ist, ob es von einem Magnet oder einem Solenoide herrührt, so können in all den beschriebenen Apparaten die Magnete durch Solenoide ersetzt werden, z. B. in dem Rotationsapparat Fig. 227. Auch ein dem Ritchieschen entsprechendes Maschinchen kann man aus zwei Drahtspulen, aus einer festen und einer in ihr drehbaren und mit Kommutator versehenen Spule herstellen (Garthe. Fig. 231).

256. Das Elektrodynamometer (W. Weber, 1846) ist ein Galvanometer, dessen Magnet durch ein Solenoid ersetzt ist, das an den zwei dünnen Zuleitungsdrähten innerhalb eines feststehenden Multiplikators bifilar (33) aufgehängt ist. Die Kraft, mit welcher die bewegliche Rolle abgelenkt wird, ist dem Produkte der Stromstärken in den beiden Rollen, oder wenn derselbe Strom durch beide Rollen fließt, dem Quadrat der Stromstärke proportional. Das Elektrodynamometer von Siemens & Halske (1880), zur Messung der starken in der Elektrotechnik gebrauchten Ströme bestimmt, besteht aus einer inneren festen und einer äußeren beweglichen Rolle; die letztere aber hat nur eine einzige Windung, und ist deshalb von der Einwirkung des Erdmagnetismus fast unabhängig. Die Stromzuführung zu dem beweglichen Draht geschieht durch zwei in der Drehungssachse übereinander liegende Quecksilberäpfchen; er ist an einer spiralförmig gewundenen Feder (Torsionsfeder) aufgehängt, durch deren Drehung mittels des oben auf dem Instrument angebrachten Torsionskopfes der abgelenkte Draht wieder in die Ruhelage zurückgeführt wird. Der Torsionskopf trägt einen Zeiger, der auf einem Teilkreis den Drehungswinkel angibt, welcher ein Maß für die ablenkende Kraft ist. Auf demselben Prinzip beruhen die Wattmeter, die dazu dienen, den elektrischen Effekt bei Entnahme

eines Stromes J aus einer Stromquelle von der Spannung E direkt zu messen. Bei ihnen wird der Strom J durch die eine Spule des Elektrodynamometers (eine Spule von geringem Widerstande) geleitet. Die andere Spule dagegen (von hohem Widerstande) wird, wie im Voltmeter, im Nebenschluß zum Hauptstrom an die Spannung angelegt. Dann ist der in der zweiten Spule fließende Strom der Spannung E , und daher der Ausschlag dem Produkt $E \times J$ oder dem elektrischen Effekte direkt proportional.

257. Einfluß der Permeabilität des Zwischenmittels auf die magnetischen und elektrodynamischen Wirkungen. Die Versuche über die Kräfte, die Magnete aufeinander, oder Ströme auf Magnete, oder Ströme auf Ströme ausüben, werden in Luft ausgeführt und die gefundenen Werte dieser Kräfte gelten entsprechend nur für dieses Mittel. Man kann sich aber die Luft durch ein Mittel von höherer Permeabilität (246) ersetzt denken; dann würde man unter sonst gleichen Bedingungen andere Werte für die wirkenden Kräfte erhalten, gerade so wie die elektrischen Kräfte durch die Dielektrizitätskonstante des Isolators, der das elektrische Feld erfüllt, beeinflußt werden (184).

Würde man z. B. zwei Stahlmagnete von konstanten Polstärken einmal in Luft, dann in einem Mittel von der Permeabilität μ aufeinander wirken lassen, so würde man die Kräfte in letzterem Falle im Verhältnis $1/\mu$ vermindert finden. Dem Coulombschen Gesetz, das wir für zwei Pole m_1 und m_2 in der Form

$$F = \pm \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ausgesprochen hatten (137), muß man für ein beliebiges Mittel die allgemeinere Form

$$F = \pm \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

geben, ebenso wie für konstante Elektrizitätsmengen das Coulombsche Gesetz im allgemeinen lautet:

$$F = \pm \frac{1}{k} \cdot \frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

Mißt man dagegen die Wirkungen, die zwei von konstanten Strömen durchflossene Spulen aufeinander ausüben, so würden diese in einem Mittel von der Permeabilität μ nicht μ mal kleiner, sondern μ mal größer sein, als in Luft. Zwei solche von konstanten Strömen durchflossene Spulen verhalten sich wie zwei elektrisierte Körper, die nicht konstante Elektrizitätsmengen enthalten, sondern die durch eine passende Elektrizitätsquelle auf konstanter Potentialdifferenz gehalten werden (184). Man drückt dies Verhalten auch so aus: Einer Spule mit konstanter Stromstärke kommt eine konstante magnetomotorische Kraft zu, die einen um so größeren Induktionsfluß in dem umgebenden Feld erzeugt, je höher die Permeabilität des das Feld erfüllenden Mittels ist. Aus dieser Gegensätzlichkeit von permanenten Magneten und Strömen folgt weiter, daß die Wirkung, die ein konstanter Strom auf einen Stahlmagneten ausübt, von der Permeabilität des Zwischenmittels unabhängig ist.

Die Permeabilität der meisten Stoffe ist zu wenig von der der Luft verschieden, als daß sich der eben besprochene Einfluß der Permeabilität mit ihrer Hilfe nachweisen ließe. Aber die ferromagnetischen Körper (247) lassen diesen Einfluß in sehr auffälliger Weise erkennen. So wird z. B. die abstoßende oder anziehende Wirkung, die zwei stromdurchflossene Spulen aufeinander ausüben, beträchtlich vermehrt, wenn man einen Eisenkern in die Spulen einführt.

258. Ampères Theorie des Magnetismus. Da sich die Erscheinungen des Magnetismus ohne Anwendung von Stahl oder Eisen durch die elektrodynamische Wechselwirkung galvanischer Ströme nachahmen lassen, so versuchte Ampère, den Magnetismus des Eisens und Stahls auf das Dasein elektrischer Ströme in diesen Stoffen zurückzuführen. Er nahm an, daß jedes Eisenmolekül von einem

kleinen Kreisstrom umflossen werde, der ohne elektromotorische Kraft dauernd fließt, weil er auf seinem Wege um das Molekül keinen Widerstand zu überwinden hat. In einem unmagnetischen Eisenstab haben die Ebenen dieser molekularen Kreisströme die verschiedensten Lagen; ihre Wirkungen heben sich deswegen nach außen gegenseitig auf. Führt man nun einen elektrischen Strom um den Eisenstab, so sucht er die Molekularströme gleichlaufend mit sich und folglich ihre Achsen parallel zur Achse des Eisenstabes zu richten; die Strömchen, welche die inneren Moleküle des Stabes umkreisen, können nach außen keine Wirkung ausüben, weil in bezug auf jedes von diesen Kreisströmchen die benachbarten Strömchen so laufen, daß sie seine Wirkung aufheben; dagegen werden diejenigen Strömchen, welche die am Umfang des Stabes gelegenen Moleküle umkreisen, in dem nach auswärts gewendeten Teile ihrer Bahn durch Nachbarströme nicht aufgehoben; diese Teile sind daher in ihrer Gesamtwirkung der Wirkung von geschlossenen, den ganzen Stab umkreisenden Strömen gleichwertig. Der Stab muß sich daher verhalten, wie ein von einem

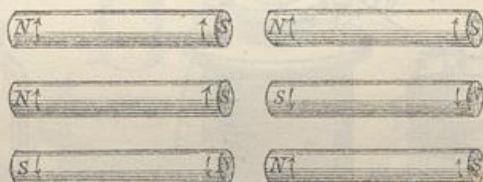


Fig. 232.
Erklärung des Magnetismus nach Ampère.

Strom durchlaufener Schraubendraht (wie ein Solenoid); er zeigt jetzt die einem solchen eigentümlichen Anziehungs- und Abstoßungserscheinungen, welche man magnetisch nennt, oder er ist zu einem „Elektromagnet“ geworden, dessen Südpol nach der Seite gewendet ist, von welcher aus gesehen sowohl der magnetisierende Strom als auch die Molekularströme des Eisens in der Richtung des Uhrzeigers kreisen. Während die Molekularströme des weichen Eisens, um die Schwerpunkte ihrer Moleküle leicht drehbar, nach Aufhören der magnetisierenden Ursache in ihre früheren ungeordneten Lagen zurückkehren, behaupten die schwieriger drehbaren des Stahls (Koerzitivkraft) dauernd die ihnen gegebene Anordnung. Ein Stahlmagnet verhält sich sonach wie eine von elektrischen Strömen ununterbrochen umkreiste Drahtspirale. Das Gesetz der Abstoßung gleichnamiger, der Anziehung ungleichnamiger Pole erklärt sich jetzt, wie ein Blick auf die Fig. 232 lehrt, aus dem Bestreben der Ströme in den beiden aufeinander wirkenden Magneten, sich parallel und gleich zu richten. Eine Magnetnadel wird durch den elektrischen Strom abgelenkt, weil die sie umkreisenden Ampèreschen Ströme sich mit jenem Strome parallel und gleichgerichtet zu stellen suchen. Auch der Erdmagnetismus ist nach dieser Anschauung nichts anderes als

die Wirkung von elektrischen Strömen, welche die Erde unaufhörlich von Osten nach Westen umkreisen.

259. **Induktion.** Im Jahre 1831 entdeckte Faraday, daß in einem in sich geschlossenen ursprünglich stromlosen Leiter, wenn in seiner Nähe ein vom elektrischen Strom durchflossener Leiter oder ein Magnet bewegt wird, elektrische Ströme entstehen, welche nur so lange dauern, als der Stromleiter oder der Magnet in Bewegung ist. Er nannte diesen Vorgang „Induktion“, und zwar im ersten Falle „Volta-induktion“, im letzteren Falle „Magnet-induktion“, und die so erregten Ströme „induzierte“ oder „Induktionsströme“.

Ein auf die Spule *A* (Fig. 233) gewickelter, mit Seide umspinnener Draht, dessen Enden in den Klemmschrauben *a* und *b* münden, ist mit den Windungen eines Galvanometers *G* verbunden und dadurch in sich geschlossen. In den Hohlraum der Spule *A*

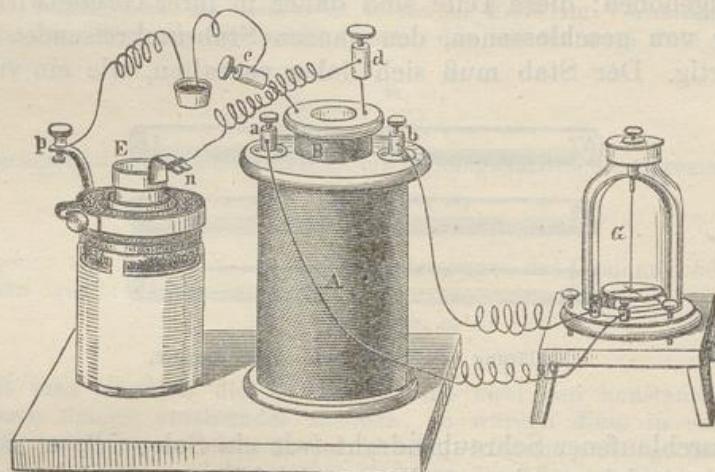


Fig. 233.
Volta-induktion.

kann eine zweite Spule *B* eingeschoben werden, deren Drahtenden mittels der Klemmschrauben *c* und *d* mit den Polen *n* und *p* eines galvanischen Elements *E* in Verbindung stehen, so daß ein Strom die Drahtwindungen *B* durchläuft. Schiebt man nun diese vom Strom umflossene Spule *B* rasch in die Höhlung der Spule *A*, so erkennt man an der Ablenkung der Magnetenadel des Galvanometers, daß in dem Drahte *A* ein Strom entstanden ist, welcher die entgegengesetzte Richtung hat wie der in *B* vorhandene; dieser Strom, welcher durch Annäherung der Drahtwindungen *B* an die Drahtwindungen *A* in letzteren erregt oder „induziert“ wurde, dauert aber nur während der kurzen Zeit der Annäherung; er hört sogleich wieder auf, sobald die Rolle *B* in Ruhe gekommen ist und nun ruhig innerhalb *A* verweilt; denn die Nadel des Galvanometers kehrt sofort, nachdem das Einschieben vollendet ist, wieder in ihre Gleichgewichtslage zurück. zieht man aber jetzt die Rolle *B* rasch wieder heraus, oder entfernt man ihre Windungen von denjenigen der

Rolle A , so zeigt die Magnetnadel, indem sie nach der entgegengesetzten Seite wie vorhin ausweicht und sogleich wieder in die Ruhelage zurückkehrt, an, daß in der Drahtrolle A ein kurzdauerner elektrischer Strom erregt wurde, welcher mit dem erregenden Strom gleichgerichtet ist.

Statt die „primäre“ oder „Hauptspirale“ B der „sekundären“ oder „Nebenspirale“ A zu nähern oder von ihr zu entfernen, oder statt sie in letztere hineinzuschieben und wieder herauszuziehen, kann man auch bequemer die Hauptspirale ein für allemal in der Nebenspirale stecken lassen, und nun den Hauptstrom abwechselnd schließen und unterbrechen (öffnen). Das Schließen des Hauptstromes wirkt ja gerade so, als hätte man ihn aus unendlicher Entfernung mit

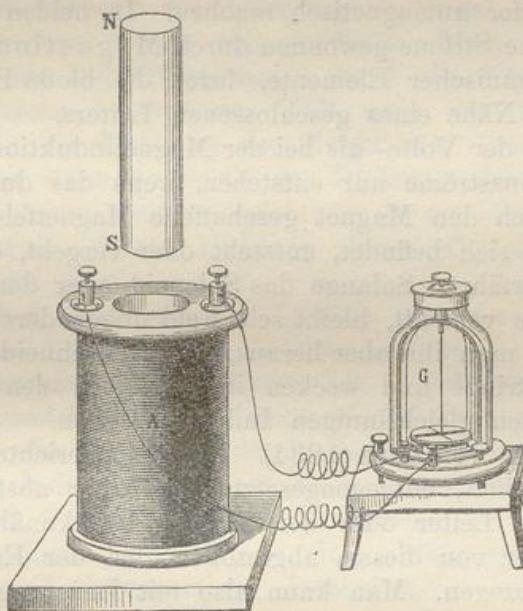


Fig. 234.
Magnetinduktion.

Blitzesschnelle in die sekundäre Rolle hineingeschoben, und das Öffnen, als hätte man ihn plötzlich wieder in wirkungslose Ferne versetzt. Beim Schließen des Hauptstromes entsteht daher in der Nebenrolle der dem Hauptstrom entgegengesetzte Schließungsstrom, beim Öffnen der ihm gleichgerichtete Öffnungsstrom.

Das Schließen und Öffnen des Hauptstromes kann, wie in Fig. 233, durch ein Quecksilberäpfchen bewirkt werden, welches mit dem einen Ende (c) des Hauptdrahtes verbunden ist, indem man den vom einen Pol p des galvanischen Elements kommenden Draht in dasselbe einträgt und wieder herauszieht, während der zweite Poldraht mit dem anderen Ende (d) der Hauptrolle verbunden bleibt. Um in der Nebenrolle eine rasche Aufeinanderfolge abwechselnd entgegengesetzt gerichteter Induktionsströme oder einen „Wechselstrom“ hervorzurufen, schaltet man in den Hauptstrom besondere Unterbrechungs-

vorrichtungen ein, am besten einen selbsttätigen Unterbrecher, wie den Wagnerschen Hammer (249).

Da ein Magnet (*NS*, Fig. 234) sich verhält wie eine vom Strom durchflossene Drahtspule (258), so muß er in der Drahtspule *A*, welche durch das Galvanometer *G*¹⁾ geschlossen ist, beim Hineinschieben und Herausziehen ebenfalls Ströme induzieren, welche bei der Annäherung entgegengesetzt, bei der Entfernung gleichgerichtet verlaufen, wie die Ströme, von welchen man den Magnet nach Ampères Theorie umkreist denken kann. Statt einen Magnet einzuschieben, und herauszuziehen, kann man auch einen weichen Eisenstab ein für allemal in die Höhlung der Spule bringen, und ihn durch Annähern und Entfernen eines Magnetpols abwechselnd magnetisch und wieder unmagnetisch machen. In beiden Fällen werden sonach elektrische Ströme gewonnen durch Magnetinduktion, ohne Anwendung galvanischer Elemente, durch die bloße Bewegung eines Magnets in der Nähe eines geschlossenen Leiters.

Sowohl bei der Volta- als bei der Magnetinduktion erkennt man, daß die Induktionsströme nur entstehen, wenn das durch die Hauptspirale oder durch den Magnet geschaffene Magnetfeld, in welchem die Nebenspirale sich befindet, entsteht oder vergeht, oder überhaupt eine Änderung erfährt. Solange das Solenoid oder der Magnet ruhig in der Drahtrolle verweilt, bleibt sein Feld ungeändert und der Draht stromlos. zieht man ihn aber heraus, so durchschneiden seine Kraftlinien die Drahtringe und wecken in denselben den mit den Ampèreschen Strömen gleichsinnigen Induktionsstrom.

260. **Gesetz von Lenz** (1834). Da gleichgerichtete Ströme sich gegenseitig anziehen, entgegengesetzte sich aber abstoßen, so wird der durchströmte Leiter oder der Magnet bei Annäherung an den induzierten Leiter von diesem abgestoßen, bei der Entfernung aber zu ihm zurückgezogen. Man kann also mit Lenz sagen, daß durch Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters oder eines Magnets gegen einen anderen Leiter in letzterem stets eine Strömung von solcher Richtung hervorgerufen (induziert) wird, daß sie vermöge ihrer elektrodynamischen Wirkung die entgegengesetzte Bewegung hervorzubringen und sonach jene Bewegung zu hemmen strebt. Dabei ist Schließung oder Verstärkung des Hauptstromes einer Annäherung, Unterbrechung oder Schwächung einer Entfernung gleich zu achten.

Infolge des Lenzschen Gesetzes ist es ersichtlich, daß alle früher beschriebenen Versuchsanordnungen, die dazu dienen, durch die Wechselwirkung von Strömen und Magneten oder Strömen und Strömen Rotationen hervorzubringen, auch umgekehrt dazu dienen können, Induktionsströme durch Rotation zu erzeugen. Wird z. B. in dem Apparate Fig. 204 das Magnetsystem, oder in dem Apparate Fig. 227 der Bügel in Rotation versetzt, während die Klemmen des

¹⁾ Das Galvanometer muß in solcher Entfernung aufgestellt sein, daß der Magnet *NS* auf dessen Nadel nicht direkt einwirken kann.

Apparates durch einen einfachen Draht, ohne stromerzeugendes Element geschlossen sind, so fließt durch diesen Draht, solange die Rotation andauert, ein Strom von der entgegengesetzten Richtung desjenigen Stromes, der jene Rotation hervorrufen würde. Man bezeichnet diese Umkehrungen der elektromagnetischen Rotationswirkung als Unipolar-Induktion, weil gewissermaßen der einzelne Pol dabei induzierend wirkt.

Auch der in Fig. 225 schematisch angedeutete Versuch (254) läßt sich ohne weiteres umkehren. Wird der biegsame Draht senkrecht zu den Kraftlinien des Magnetfeldes nach abwärts bewegt, während er außerhalb des Feldes zu einem einfachen Stromkreise ohne Element zusammengefügt ist, so entsteht in dem ursprünglich stromlosen Draht während der Bewegung ein Strom, der dem in der Fig. 225 angedeuteten Strom entgegenfließt. Man kann demnach die Richtung eines Induktionsstromes durch die folgende Rechte-Hand-Regel leicht bestimmen: Hält man den Zeigefinger der rechten Hand in die Richtung der Kraftlinien eines Magnetfeldes, und bewegt man einen Leiter in der Richtung des Daumens derselben Hand quer zur Kraftlinienrichtung, so entsteht in dem Leiter ein Induktionsstrom, dessen Richtung durch diejenige des Mittelfingers gegeben ist.

Auch in dem Gegensatz der Linken- und der Rechten-Hand-Regel kommt das Lenzsche Gesetz zum Ausdruck.

261. **Elektromotorische Kraft des Induktionsstromes.** Bei gleicher induzierender Wirkung hängt die Stärke des erzeugten Induktionsstromes von dem Widerstände des ganzen Schließungskreises ab, in dem der Induktionsstrom verläuft. Vergrößert man bei den in Fig. 233 und 234 abgebildeten Versuchen den Widerstand im induzierten Stromkreise, indem man einen Rheostaten zwischen induzierter Spule und Galvanometer einschaltet, so nehmen die kurz dauernden Ausschläge der Galvanometernadel mit wachsendem Widerstand in derselben Weise ab, wie es die von einem Element hervorgebrachten dauernden Ausschläge tun würden. Die Induktionswirkung besteht also offenbar zunächst darin, daß in der induzierten Spule eine elektromotorische Kraft erregt wird, die nun ihrerseits den Induktionsstrom nach Maßgabe des Widerstandes im Stromkreise, also nach dem Ohmschen Gesetze, erzeugt. Das Maß der Induktionswirkung ist also nicht der Induktionsstrom, sondern die induzierte elektromotorische Kraft. Ihre Größe ist proportional der Geschwindigkeit, mit welcher das Magnetfeld, in dem sich der sekundäre Leiter befindet, geändert wird, oder umgekehrt proportional der Zeit, innerhalb welcher diese Änderung erfolgt.

Da das magnetische Feld einer Spule sehr viel stärker ist, wenn die Spule einen Eisenkern enthält, so werden auch die Induktionswirkungen, die Spulen aufeinander durch Lagenänderungen oder Stromschwankungen ausüben, durch Eisenkerne in den Spulen außerordentlich verstärkt.

Die Gesetze der Induktionswirkung lassen sich aus dem Prinzip der Erhaltung der Energie herleiten (Helmholtz, 1847). Nach dem Lenzschen Gesetz setzt der Induktionsstrom der jeweiligen Bewegung des induzierenden Körpers einen Widerstand entgegen, zu dessen Überwindung eine bestimmte Arbeit aufgewendet werden muß. Nimmt man an, daß diese als Energie des erzeugten Induktionsstromes wieder erscheint, daß also durch den Vorgang der Induktion Arbeit in eine gleichgroße Menge Stromenergie verwandelt wird, so erhält man für die elektromotorische Kraft der Induktion folgenden Ansatz:

Werden zwei Stromkreise aus wirkungsloser (unendlicher) Ferne in ihre gegenwärtige Lage zueinander gebracht, so ist hierzu vermöge ihrer elektrodynamischen Wirkung ein gewisser Arbeitsaufwand nötig. Bezeichnet man mit M diese Arbeit für den Fall, daß in beiden Leitern die Stromstärke 1 herrscht, so beträgt die Arbeit JM , wenn der Strom in dem einen (dem primären) Leiter die Stromstärke J , in dem anderen (dem sekundären) die Stärke 1 hat. Man nennt diese Arbeit JM das „elektrodynamische Potential“ der beiden Stromkreise aufeinander. Bringt man jetzt die beiden Stromkreise in eine neue Lage zueinander und verändert zugleich in dem primären die Stromstärke, so ändert sich dabei das Potential in $J'M'$, und die hierzu erforderliche Arbeit ist gleich der Differenz der Potentiale $J'M' - JM$, oder, wenn in dem sekundären Leiter nicht die Stromstärke 1, sondern die Stärke i des in ihm erregten Induktionsstromes herrscht:

$$i(J'M' - JM).$$

Bezeichnet man mit τ die kurze Zeit, während welcher jene Änderung des Potentials vor sich ging, und mit e die elektromotorische Kraft (oder Spannung) des Induktionsstromes, so ist $e i \tau$ die im sekundären Leiter in der Zeit τ entwickelte Stromenergie (234). Diese muß aber der aufgewendeten Arbeit gleichkommen, d. h. es muß

$$e i \tau = i(J'M' - JM)$$

sein. Hieraus ergibt sich die elektromotorische Kraft der Induktion

$$e = \frac{J'M' - JM}{\tau};$$

die elektromotorische Kraft der Induktion ist proportional der Änderung des Potentials der beiden Stromkreise aufeinander (der Änderung des Magnetfeldes) und umgekehrt proportional der Zeitspanne dieser Änderung.

Bleibt die Stromstärke des induzierenden Stromes während der gegenseitigen Bewegung unverändert ($J' = J$), so ist die elektromotorische Kraft

$$e = J \cdot \frac{M' - M}{\tau}$$

proportional dieser Stromstärke, und der Geschwindigkeit, mit welcher sich die gegenseitige Lage ändert.

Ändert sich dagegen die Stromstärke im primären Leiter, während der selbe in bezug auf den sekundären Leiter in Ruhe bleibt ($M' = M$), so ist die elektromotorische Kraft

$$e = M \cdot \frac{J' - J}{\tau}$$

proportional der Geschwindigkeit, mit welcher die Stromstärke sich ändert.

Die Größe M heißt der (gegenseitige) Induktionskoeffizient. Er hängt von der Gestalt und Lage der Leiter ab, außerdem aber auch, wie die verstärkende Wirkung der Eisenkerne lehrt, von der Magnetisierbarkeit derjenigen Stoffe, die sich in dem magnetischen Felde der Leiter befinden. Da der Induktionskoeffizient gleich dem Verhältnis der induzierten elektromotorischen Kraft zu der Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke ist, so hat in dem in der Praxis üblichen Maße dasjenige System von Spulen den Induktionskoeffizient 1, in dem eine Änderung der Stromstärke der einen Spule um 1 Ampère in 1 Sekunde, in der anderen Spule eine elektromotorische Kraft von 1 Volt hervorruft. Diese Einheit des Induktionskoeffizienten hat man 1 Henry genannt.

262. **Absolute elektromagnetische Einheit der elektromotorischen Kraft.** Die Beziehung zwischen der induzierenden Wirkung und der induzierten elektromotorischen Kraft läßt sich am einfachsten in dem bei der Aufstellung der Rechten-Hand-Regel behandelten Falle ausdrücken. Befindet sich ein Draht von der Länge l in einem Magnetfelde von der Stärke \mathfrak{H} und wird er mit der Geschwindigkeit v senkrecht zu den Kraftlinien bewegt, so entsteht in ihm eine elektromotorische Kraft, die um so größer ist, je größer die Länge und die Geschwindigkeit des Drahtes und je stärker das Feld ist. Darauf gründet sich die von W. Weber vorgeschlagene absolute Einheit der elektromotorischen Kraft. Das ist diejenige, welche in einem geradlinigen Leiter von der Länge 1 ($l = 1$ cm) entsteht, wenn derselbe in einem Magnetfeld von der Stärke 1 ($\mathfrak{H} = 1$) mit der Geschwindigkeit 1 ($v = 1$ cm/sec) senkrecht zu sich selbst und zu den Kraftlinien bewegt wird. Die uns bereits bekannte praktische Einheit der elektromotorischen Kraft, das Volt, ist das hundertmillionenfache (10^8 fache) dieser absoluten Einheit.

Denkt man sich die Stärke des Magnetfeldes durch die Zahl der Kraftlinien ausgedrückt, die auf die Flächeneinheit fallen (138), und beachtet man, daß lv die von dem Draht in einer Sekunde bestrichene Fläche bedeutet, so ist $lv\mathfrak{H}$ die Anzahl der Kraftlinien, die der Draht bei seiner Bewegung in der Sekunde durchschneidet. Man kann also auch sagen: Die in dem Leiter induzierte elektromotorische Kraft ist gleich der Zahl der von ihm in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien. Bildet der Leiter mit den Kraftlinien nicht einen rechten, sondern den Winkel φ , so vermindert sich die von ihm geschnittene Kraftlinienzahl im Verhältnis von $1 : \sin \varphi$; die elektromotorische Kraft ist demnach Null, wenn der Leiter den Kraftlinien parallel ($\varphi = 0$) ist. Obiger Ausdrucksweise entsprechend ist die in einer Spule induzierte elektromotorische Kraft gleich der Zahl der Kraftlinien, die in der Zeiteinheit in die Spulenfläche eintreten oder aus ihr austreten (s. a. 268). Der gegenseitige Induktionskoeffizient M zweier Spulen ist gleich der Anzahl Kraftlinien, die die eine Spule bei der Stromstärke 1 durch die Fläche der anderen Spule hindurchschickt. Hat das die Spule umgebende Mittel die Permeabilität μ , so ist die induzierte elektromotorische Kraft unter sonst gleichen Umständen μ mal größer. An die Stelle des Kraftflusses \mathfrak{H} des induzierenden Feldes tritt also im allgemeinen Falle der Induktionsfluß $\mu \mathfrak{H}$.

Wird die induzierte elektromotorische Kraft in der hier angegebenen absoluten elektromagnetischen Einheit gemessen, und ebenso die Stromstärke in absoluter elektromagnetischer Einheit (243), so erhält man eine andere Einheit des Induktionskoeffizienten, die 10^9 mal kleiner ist als 1 Henry. Eine Untersuchung der Dimensionen (9) dieser Größe ergibt, daß M die Dimension einer Länge hat. Die absolute elektromagnetische Einheit des Induktionskoeffizienten ist daher 1 cm; 1 Henry aber hat den Betrag von 10^9 cm oder entspricht einer Länge, die dem Erdquadranten gleich ist.

263. **Extraströme. Selbstinduktion.** Ist, wie wir bisher angenommen haben, der Hauptdraht auf eine Spule gewickelt, so wirkt bei jeder Änderung der Stromstärke jede Windung des Hauptdrahtes auf die benachbarten Windungen desselben induzierend, und erregt beim Schließen oder bei jedem Anwachsen des Hauptstromes einen diesem entgegengesetzten, beim Öffnen oder bei jeder Abnahme einen ihm gleichgerichteten Induktionsstrom. Faraday nannte diese im

Hauptdraht selbst verlaufenden Induktionsströme „Extraströme“; sie wirken, wie man erkennt, stets den Änderungen des ursprünglichen Stromes entgegen.

Diese sogenannte „Selbstinduktion“ wirkt nicht nur in einem zur Rolle gewickelten, sondern auch in jedem gerade gestreckten Draht; denn man kann sich denselben in Längsfasern zerteilt denken, deren jede auf die benachbarten induzierend wirkt. Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ist proportional der Geschwindigkeit, mit welcher sich die Stärke des Hauptstromes ändert. Wie die Induktion einer Spule auf eine andere, so wird auch die Selbstinduktion einer Spule außerordentlich verstärkt, wenn ein Eisenkern in die Spule geschoben wird.

Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ist

$$e = L \cdot \frac{J' - J}{\tau},$$

wenn mit L eine nur von der Gestalt des Leiters und der Magnetisierbarkeit des umgebenden Mittels abhängige Größe bezeichnet wird, welche dem gegenseitigen Induktionskoeffizienten M analog ist und Selbstinduktionskoeffizient genannt wird; er wird wie jener nach Henrys (261) gemessen. Entsprechend den obigen Ausführungen (262) kann man auch sagen: Der Selbstinduktionskoeffizient L ist gleich der Zahl der Kraftlinien, die die Spulenfläche durchsetzen, wenn in der Spule der Strom 1 fließt. Für ein langgestrecktes Solenoid, das aus N hintereinander aufgereihten Kreisströmen von der Fläche F besteht, ist die ganze Windungsfläche $= NF$. Der Kraftfluß im Innern einer solchen Spule ist $= 4\pi i \frac{N}{l}$ (244), für den Strom 1 also $= 4\pi \frac{N}{l}$, wenn l die Länge des Solenoids bedeutet. Also ist der Selbstinduktionskoeffizient $L = 4\pi N^2 \frac{F}{l}$.

264. Unterschied zwischen Schließungs- und Öffnungsstrom. Die Selbstinduktion kommt zum Ausdruck in dem zeitlichen Verlauf des Ansteigens oder Abfallens des Stromes bei jeder Veränderung der Stromstärke in einem Leiter, vor allem beim Schließen oder Öffnen des Stromes. Da die beim Schließen induzierte elektromotorische Kraft der Selbstinduktion dem Strome entgegengerichtet ist, so bewirkt sie, daß der Strom nicht plötzlich seine volle Stärke erreicht, sondern allmählich innerhalb einer gewissen, allerdings in der Regel sehr kleinen Zeit bis zu seinem Endwerte ansteigt. Umgekehrt wirkt die beim Sinken der Stromstärke induzierte elektromotorische Kraft der Selbstinduktion in der Richtung des Stromes. Wird der Strom plötzlich durch Auseinanderreißen eines Kontaktes unterbrochen, so entsteht entsprechend der Geschwindigkeit der Stromänderung eine beträchtliche elektromotorische Kraft in dem Leiter, die zu einem Funken an der Unterbrechungsstelle, dem sog. Öffnungsfunken, Veranlassung gibt. Bei einem gerade gestreckten Schließungsdraht einer galvanischen Batterie ist der Funke nur schwach; erhöht man die Selbstinduktion, indem man den Draht zu einer Spirale aufwickelt, so ist der Funke stärker und wird noch

kräftiger, wenn man einen Eisenkern in die Spule steckt. Dieser Funke bildet bei der Stromunterbrechung noch auf kurze Zeit eine leitende Brücke. Daher verschwindet auch bei der Unterbrechung der Strom nicht plötzlich, sondern braucht eine kleine Zeit, um von seiner vollen Stärke bis auf Null harabzusinken, die jedoch von weit kürzerer Dauer ist, als die Zeit, die er braucht, um bei der Schließung von Null auf seine volle Stärke anzusteigen, weil in dem großen Widerstände des Öffnungsfunkens die Energie des Öffnungsstromes schnell verzehrt wird.

Da nun die in einer Nebenrolle induzierten elektromotorischen Kräfte bei gleicher Änderung des Stromes in der Hauptrolle sich umgekehrt verhalten wie die dazu erforderlichen Zeiten, so muß der beim Öffnen der Hauptspirale in der Nebenspirale entstehende Öffnungsstrom eine größere elektromotorische Kraft oder Spannung und deshalb auch eine größere augenblickliche Stromstärke besitzen als der Schließungsstrom. Dagegen ist die in beiden Strömen sich entladende Elektrizitätsmenge (d. i. das Produkt aus Stromstärke und Zeitdauer) die nämliche. Dies erhellt schon daraus, daß die Wechselströme der Nebenspirale, mittels Platinelektroden durch eine Lösung von Kupfersulfat geleitet, auf keiner der Elektroden einen Kupferniederschlag erzeugen, was doch geschehen müßte, wenn der eine Strom in der einen Richtung eine größere Elektrizitätsmenge überführte als der andere in der entgegengesetzten Richtung. Auch ein Galvanometer gibt für jeden einzelnen Öffnungs- oder Schließungsstrom gleiche entgegengesetzte Ausschläge; denn da die Dauer beider Induktionsströme weit kürzer ist als die Schwingungsdauer der Magnetnadel, so kommt in beiden Fällen die ganze in jedem Strome sich entladende Elektrizitätsmenge stoßweise zur Wirkung (ballistisches Galvanometer). Bei rascher Aufeinanderfolge der Unterbrechungen bleibt die Nadel in Ruhe, weil die entgegengesetzten Antriebe sich aufheben.

Öffnungs- und Schließungsstrom in der Nebenrolle unterscheiden sich also dadurch voneinander, daß die Entladung derselben Elektrizitätsmenge bei jenem auf eine äußerst kurze Zeit zusammengedrängt bei diesem dagegen auf eine vergleichsweise längere Dauer ausge dehnt ist.

Bezeichnen wir mit E die elektromotorische Kraft einer galvanischen Batterie, mit W den gesamten Widerstand des Schließungskreises, so ist der Endwert, den der Strom nach Schluß des Stromkreises erreicht, $J = E / W$. Die im Stromkreis in der Zeiteinheit entwickelte Wärme ist dann $J^2 W$ und ist gleich der von der Batterie in der Zeiteinheit geleisteten elektrischen Arbeit $E \cdot J$. Solange der Strom den Endwert noch nicht erreicht hat, sondern noch einen kleineren Wert i besitzt, ist die in der kleinen Zeit τ geleistete elektrische Arbeit der Batterie, $Ei\tau$, größer als die in derselben Zeit von dem Strom i entwickelte Joulesche Wärme: $i^2 W\tau$; denn es ist $Ei\tau - i^2 W\tau = (J - i) i W\tau$. Dieser Mehrbetrag an Energie, den die Batterie während des Ansteigens des Stromes liefert, und der nicht in Wärme verwandelt wird, erscheint als potentielle Energie im magnetischen Felde, das der Strom erzeugt und unterhält, gewissermaßen aufgespeichert. Er ist von der Selbstinduktion der Spule für

die Magnetisierung beansprucht, bleibt so lange erhalten, wie das magnetische Feld besteht, und tritt, wenn der Strom unterbrochen wird, und mit ihm das Feld verschwindet, als Öffnungsextrastrom in den Stromleiter zurück, um nun erst in ihm in Wärme verwandelt zu werden.

265. Messung des galvanischen Widerstandes in Elektrolyten. Wie soeben erwähnt wurde, bewirken die rasch aufeinanderfolgenden Wechselströme einer Induktionsrolle beim Durchgang durch eine Flüssigkeit keine chemische Zersetzung und deshalb auch keine Polarisation. Wollte man nach dem früher (230) beschriebenen Brückenverfahren unter Anwendung eines gewöhnlichen galvanischen Stromes (eines „Gleichstromes“) den Widerstand einer Flüssigkeit bestimmen, so würde die Stromstärke nicht nur durch den Widerstand der Flüssigkeit selbst, sondern auch noch durch die Gegenkraft der Polarisation geschwächt und der gesuchte Widerstand zu groß gefunden werden. Dieser störende Einfluß der Polarisation wird vermieden, wenn man statt des Gleichstromes die alternierenden Induktionsströme (F. Kohlrausch, 1868) benutzt. Dann muß aber in die Brücke statt eines Galvanometers, welches ja bei Wechselströmen keinen Ausschlag gibt, ein Elektrodynamometer (256) eingeschaltet werden; da nämlich im Solenoid und im Multiplikator die Ströme sich gleichzeitig umkehren, so erfolgt die Ablenkung stets nach derselben Richtung (s. u. 277).

Bei dieser Anwendung der Wechselströme erhebt sich jedoch eine neue Schwierigkeit. In den Drahtrollen der zur Messung verwendeten Widerstandsätze (225) wirkt nämlich die elektromotorische Kraft des Extrastromes der ursprünglich vorhandenen elektromotorischen Kraft entgegen; die Stromstärke wird dadurch verringert und der Widerstand der Rolle scheinbar vergrößert. Um diese störende Wirkung der Selbstinduktion zu vermeiden, windet man den Draht so auf, daß je zwei benachbarte Windungen in entgegengesetzter Richtung laufen, indem man den Draht in der Mitte umbiegt und doppelt aufwickelt. Dadurch ist die magnetische Wirkung der Rolle natürlich aufgehoben. Ebenso heben sich die Extrastrome in je zwei benachbarten Windungen gegenseitig auf. Man sagt, die Rolle sei bifilar oder induktionsfrei gewickelt.

266. Physiologische Wirkung der Induktionsströme. Zum Nachweis der Induktionsströme bedarf man des Galvanometers nicht; wir sind imstande, sie vermöge ihrer starken Wirkung auf unsere Nerven unmittelbar zu empfinden.

Faßt man die beiden Pole einer galvanischen Batterie von nicht zu kleiner elektromotorischer Kraft je mit einer Hand an, um den Strom durch den eigenen Körper zu leiten, so empfindet man eine Zuckung im Augenblick der Schließung des Stromes; der nunmehr mit unveränderter Stärke durch unseren Körper fließende Strom bringt im allgemeinen nur eine geringfügige Empfindung hervor; eine erneute Zuckung tritt aber ein, sobald man den einen oder beide Poldrähte losläßt und dadurch den Strom unterbricht. Auf unsere Nerven wirkt also in erster Linie nicht der unveränderte Strom erregend ein, sondern sein Beginnen oder Aufhören, oder überhaupt die Veränderung der Stromstärke ist es, worauf die Bewegungsnerven mit Zuckung antworten, und zwar ist die Wirkung um so beträchtlicher, je jüher diese Veränderung eintritt. Hieraus erklärt es sich, warum der Entladungsschlag einer Leidener Flasche so heftig empfunden wird; die an sich sehr geringe in der Flasche zu hoher Spannung angesammelte Elektrizitätsmenge entlädt sich nämlich in äußerst kurzer Zeit und stellt sonach einen elektrischen Strom dar, welcher mit großer

Schnelligkeit zu seiner vollen Stärke anwächst und ebensoschnell wieder auf Null zurück sinkt. Da die Induktionsströme ebenfalls von kurzer Dauer sind und innerhalb dieser kurzen Zeit rasch anwachsen und rasch wieder abfallen, so bringen sie ungeachtet der geringen durch sie in Bewegung gesetzten Elektrizitätsmengen eine sehr starke Erregung der Nerven des tierischen Körpers oder eine beträchtliche „physiologische Wirkung“ hervor, welche noch höher gesteigert wird, wenn die Öffnungs- und Schließungsströme durch das rastlose Spiel des Unterbrechers in rascher Aufeinanderfolge durch den Körper gesendet werden. Dabei bringt der höher gespannte und schneller verlaufende Öffnungsstrom eine weit stärkere Wirkung hervor als der Schließungsstrom. Um die Induktionsströme durch den menschlichen Körper zu leiten, verbindet man gewöhnlich messingene zylindrische Handhaben durch metallische Schnüre mit den Enden der Nebenrolle und nimmt sie in die etwas befeuchteten Hände; bei schwachen Strömen empfindet man ein stechendes Prickeln, bei stärkeren Strömen treten krampfartige Muskelzusammenziehungen ein. Ihrer Einwirkung auf die Nerven wegen werden die Induktionsströme zu diagnostischen und Heilzwecken verwendet; man pflegt sie in der Medizin nach Faraday, dem Entdecker der Induktion, als „Faradische Ströme“ und die Behandlung des menschlichen Körpers durch dieselben als „Faradisierung“ zu bezeichnen.

Auch konstante Ströme rufen, wenn ihre Stärke einige Milliampère übersteigt, Empfindungen im Körper und vor allem starken Hautreiz an den Berührungsstellen der Elektroden hervor; es treten starke, länger anhaltende Rötungen der Haut, bei größeren Stromstärken Verbrennungserscheinungen auf. Auch die konstanten Ströme werden zu Heilzwecken verwandt. Man bezeichnet die Behandlung mit ihnen, im Gegensatz zur Faradisierung, als „Galvanisierung“. — Da der Widerstand des menschlichen Körpers, besonders der Haut, im allgemeinen groß ist, so sind die bei Berührung der Pole einer Batterie von mittlerer Spannung entstehenden Ströme in der Regel nur schwach und ungefährlich. Stärkere Spannungen bedingen Schädigungen bis zur ausgesprochenen Lebensgefahr. Eine untere Grenze der tödlich wirkenden Spannung läßt sich nicht angeben, weil die Stärke der Wirkung von verschiedenen Umständen, vor allem dem sehr verschiedenen Widerstande des Körpers abhängt.

267. Induktionsapparate. Funkeninduktoren. Um Induktionsströme von hoher Spannung (elektromotorischer Kraft) zu erzielen, macht man die Haupt- oder primäre Rolle aus einem dicken Draht von wenigen Windungen, damit ihr Widerstand gering und folglich die Stärke des Hauptstromes möglichst groß sei; der Neben- oder sekundären Rolle dagegen gibt man sehr viele Windungen eines dünnen Drahtes, weil die elektromotorische Kraft mit der Windungszahl zunimmt. Ein für ärztliche Zwecke vorzüglich geeigneter Induktionsapparat ist der Schlittenapparat von Du Bois-Reymond (Fig. 235). Die Nebenspule N , deren Drahtenden in den Klem-

schrauben *a* und *b* (zur Aufnahme der Drähte mit den Handhaben) münden, ist auf dem Brettchen *S* befestigt, welches wie ein Schlitten in den Nuten des Gestells gleitet; sie kann daher nach Belieben ganz oder nur teilweise über die Hauptspule *H*, welche an dem vertikalen Brettchen *B* wagrecht befestigt ist, geschoben werden, wodurch die Stärke der Induktionsströme nach Bedürfnis abgeändert wird.

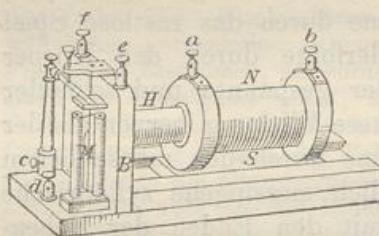


Fig. 235.
Schlittenapparat.

bei jeder Unterbrechung des Hauptstromes durch die zwischen *e* und *f* eingeschaltete Nebenschließung entlädt.

Die induzierende Wirkung der Hauptrolle wird, wie bereits oben auseinandergesetzt wurde, bedeutend verstärkt, wenn man in ihre Höhlung einen Stab von weichem Eisen einschiebt. Dieser nützliche Einfluß des Eisenkerns wird aber durch eine andere von ihm ausgehende schädliche Wirkung zum Teil wieder aufgehoben. Wie in jeder zusammenhängenden Metallmasse, welche man etwa in die Hauptrolle einschieben würde, werden auch in dem Eisenstab beim Entstehen und Verschwinden des Hauptstromes Ströme induziert, welche, von Molekül zu Molekül übergehend, den Umfang des Stabes umfließen, das Anwachsen und Abfallen sowohl des Hauptstromes selbst als auch des Magnetismus verzögern und sonach die Dauer der in der Nebenrolle entstehenden Induktionsströme verlängern, wodurch zwar nicht die Menge der in Bewegung gesetzten Elektrizität, wohl aber ihre Spannung vermindert wird. Das Zustandekommen jener schädlichen (Foucaultschen) Ströme (vgl. 275) kann man dadurch vermeiden, daß man statt eines dicken Eisenstabes ein Bündel dünner Eisendrähte, welche durch einen Firnisüberzug voneinander isoliert sind, in die Hauptspule bringt; jene verzögernd wirkenden Ströme rings um den Eisenkern kommen nun nicht zustande, die Induktionsströme in der Nebenrolle nehmen alsdann den gewünschten raschen Verlauf und wirken viel stärker auf die Nerven als bei Anwendung eines massiven Eisenkerns.

Werden die Enden der Induktionsrolle nicht miteinander leitend verbunden, so stauen sich hier die im Nebendraht beim Entstehen und Vergehen des Hauptstromes in Bewegung gesetzten Elektrizitäten, und erzeugen elektrische Spannungserscheinungen, und zwar erscheint jedes Ende, elektroskopisch geprüft, in rascher Aufeinanderfolge abwechselnd positiv und negativ elektrisch, je nachdem es sich augen-

Die Unterbrechung des Hauptstromes, dessen Poldrähte in die Klemmen *c* und *d* eingeschraubt werden, besorgt der magnetische Hammer *M* (249); die Enden des Hauptdrahtes stehen ferner mit den Klemmschrauben *e* und *f* in Verbindung, in welche die Drähte mit den Handhaben eingeschraubt werden, wenn man den in dem Hauptdraht selbst induzierten Extrastrom benutzen will, der sich

blicklich mit der vom Öffnungsstrom oder vom Schließungsstrom herangeführten Elektrizität geladen hat. Bei hinreichend großer Spannung springen sogar von jedem Ende der offenen Nebenrolle auf einen genäherten Leiter Funken über; die so entladene Elektrizität ist aber immer nur diejenige, welche dem Öffnungsstrom entspricht, denn nur dieser erreicht eine hinreichende Spannung, um eine Luftstrecke in Form eines Funkens durchbrechen zu können. Bei Einschaltung einer Luftstrecke erscheint demnach das eine Ende der Induktionsspule stets positiv, das andere stets negativ, und man bezeichnet sie daher als entgegengesetzt elektrische Pole oder „Elektroden“. Induktionsapparate, welche so starke Spannungserscheinungen zeigen, nennt man Funkeninduktoren; sie wurden zuerst von Ruhmkorff in Paris gebaut. Die heutige Form solcher Apparate zeigt Fig. 236. Um die gewünschte hohe Spannung zu erzielen, macht man die Induktionsrolle aus sehr vielen Windungen eines

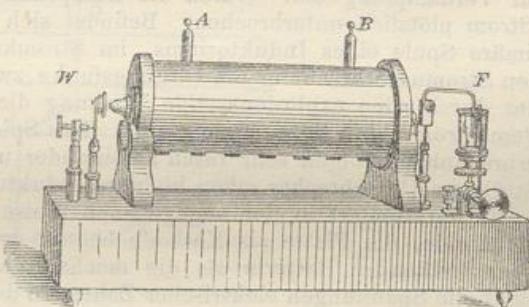


Fig. 236.
Funkeninduktor.

feinen Drahtes, und sorgt außerdem dafür, daß der Öffnungsextrastrom, welcher durch Funkenbildung an der Unterbrechungsstelle das Verschwinden des Hauptstromes verzögern würde, möglichst besiegelt wird; dies geschieht dadurch, daß man zwei zu beiden Seiten der Unterbrechungsstelle gelegene Punkte des Hauptdrahtes mit den beiden Belegungen eines Kondensators verbindet, der, in dem Fußbrette des Apparats enthalten, die beiden Elektrizitäten des Extrastromes während der Unterbrechung in sich aufnimmt. Schiebt man durch die Polklemmen A B der sekundären Rolle starke Drähte mit isolierten Handgriffen und nähert ihre Enden einander, so geht zwischen ihnen ein prasselnder Funkenstrom über, ähnlich demjenigen der Influenzmaschine. Verbindet man die Pole mit den beiden Belegen einer Leidener Flasche, so erhält man, wie bei der Influenzmaschine, eine Reihe knallender Funken, die aber um so kürzer werden, je größer die Kapazität der Leidener Flasche ist. Der Funkeninduktor setzt uns also in den Stand, mittels einer galvanischen Batterie, deren Spannung gering ist, alle Erscheinungen der Reibungselektrizität, welche ja auf hohen Spannungen beruhen, hervorzubringen.

Zum Betriebe eines Funkeninduktors bedarf man eines selbsttätigen Unterbrechers. Als solchen verwendet man bei kleineren Induktoren den Wagnerschen Hammer (s. Fig. 236 bei *W*). Bei größeren Induktoren, die zum Betriebe einer höheren Stromstärke bedürfen, genügt aber die Berührung zwischen Platin spitze und Platinplättchen nicht; hier verwendet man zweckmäßiger einen starken, in einen Napf voll Quecksilber eintauchenden Platinstift. Zur Unterbrechung des Stromes wird der Stift entweder durch die Wirkung eines Elektromagneten (wie beim Wagnerschen Hammer) aus dem Quecksilber herausgerissen und dann durch eine Feder wieder zurückgeführt (Foucaultscher Quecksilber-Unterbrecher) (s. Fig. 236 bei *F*), oder er wird durch einen kleinen Elektromotor in eine rasche, hin- und hergehende Bewegung versetzt (Motor-Unterbrecher). Man schwächt dabei den Öffnungsfunk und schützt das Quecksilber vor Verdampfung, indem man die Quecksilberoberfläche mit einer Schicht Wasser oder Alkohol bedeckt. Einfacher als diese mechanischen Unterbrecher ist der in jüngster Zeit von Wehnelt konstruierte elektrolytische Unterbrecher. Wenn man einen Strom durch eine mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Zersetzungszelle schickt und die eine Elektrode sehr klein wählt, indem man z. B. einer großen Bleiplatte eine kurze in ein isolierendes Rohr eingesetzte Platin spitze gegenüberstellt, so tritt an dieser Spitze infolge der hohen Stromdichtigkeit eine Erhitzung des Elektrolyten bis zur Verdampfung ein. Durch die Dampfhülle, die die Spitze umgibt, wird der Strom plötzlich unterbrochen. Befindet sich nun eine Drahtspule, z. B. die primäre Spule eines Induktionsums, im Stromkreise, so entsteht bei dieser plötzlichen Stromunterbrechung ein Öffnungsfunk zwischen Elektrolyt und Platin spitze, der durch seine explosionsartige Wirkung die Dampfhülle zerstört und zu erneutem Stromschluß Veranlassung gibt. Das Spiel wiederholt sich dann. Diese Unterbrechungen folgen sehr rasch aufeinander und sind sehr vollständig, so daß mit diesem Unterbrecher schon kleinere Induktoren sehr kräftige Wirkungen geben. Er funktioniert in der angegebenen Weise aber nur richtig, wenn die Spitze als Anode, die Platte als Kathode benutzt wird. Er verlangt höhere Spannung der treibenden Batterie als die mechanischen Unterbrecher; man kann unmittelbar die Spannungen elektrischer Zentralen benutzen (110 Volt und mehr). Da seine Wirkung auf der Betätigung des Öffnungsfunkens beruht, so muß er ohne Kondensator benutzt werden.

268. Magnetelektrische Maschine. Die Induktionserscheinungen gewähren die Möglichkeit, ohne Zuhilfenahme von galvanischen Elementen oder anderen Stromquellen, ausschließlich durch Bewegung von Spulen in einem Magnetfelde elektrische Ströme zu erzeugen. Wir betrachten zunächst die Induktionswirkung in einem einfachen geschlossenen Leiter, etwa dem Drahtviereck *abcd* (Fig. 237), wenn dasselbe durch ein Magnetfeld senkrecht zu den Kraftlinien in der Richtung *BA* hindurchbewegt wird. Nach der Rechten-Hand-Regel (260) werden dabei in den Seiten *ab* und *cd* elektromotorische Kräfte induziert, die gleich groß sind und sich daher gegenseitig aufheben, wenn *ab* und *cd* in gleicher Zeit gleich viele Kraftlinien schneiden. Schneidet aber *ab* mehr Kraftlinien als *cd*, treten also durch *ab* mehr Kraftlinien in die Fläche des Vierecks ein, als durch *cd* aus ihm austreten, so überwiegt die elektromotorische Kraft in *ab* und es entsteht ein Strom in der Richtung *adcb*. Treten aber umgekehrt durch *cd* mehr Kraftlinien aus, als durch *ab* eintreten, so überwiegt die elektromotorische Kraft in *cd* und es entsteht ein Strom in der entgegengesetzten Richtung *abdc*. Allgemein kann man sagen: In einer Spule entsteht ein Induktionsstrom, sobald sich die Zahl der magnetischen Kraftlinien, die die Spule durchsetzen,

ändert. Die Größe der induzierten elektromotorischen Kraft ist durch die Zahl der in der Sekunde in die Spule eintretenden oder austretenden Kraftlinien bestimmt; die Richtung aber ist entsprechend dem Lenzschen Gesetze stets so, daß der Induktionsstrom mit seinen magnetischen Kraftlinien der Änderung des Feldes entgegenwirkt. Nimmt die Zahl der Kraftlinien zu, so ist der Induktionsstrom so gerichtet, daß sein Kraftfeld dem erregenden entgegengesetzt gerichtet ist; nimmt jenes ab, so ist das Kraftfeld des Induktionsstromes ihm gleichgerichtet. Diese Fassung des Induktionsgesetzes macht die Wirkungsweise der zur Stromerzeugung dienenden Maschinen leicht verständlich.

Bei den ältesten Maschinen benutzte man zur Erzeugung des magnetischen Feldes Stahlmagnete; man bezeichnet derartige Maschinen als **magnetelektrische** Maschinen. Einem kräftigen

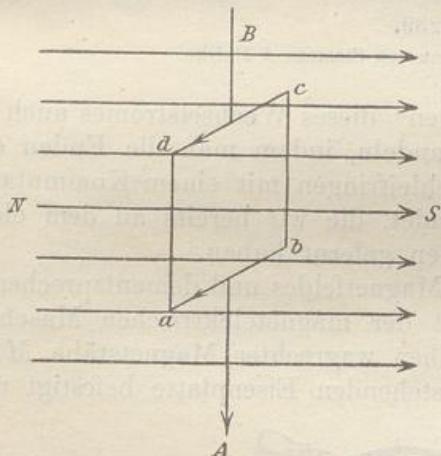


Fig. 237.

Induktion in geschlossenem Leiter bei Bewegung durch ein Magnetfeld.

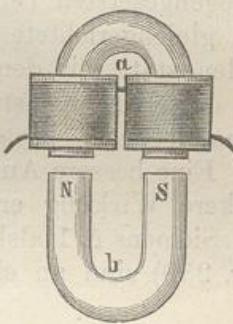


Fig. 238.

Magnetinduktion.

Hufeisenmagneten (Fig. 238) steht ein ebenfalls hufeisenförmiger Eisenkern gegenüber, dessen Schenkel mit Drahtspulen umgeben sind. Entweder der Magnet (Pixii, 1832) oder der Eisenkern mit den Spulen (Clarke, 1836) ist drehbar um die Mittellinie *ab*. In der gezeichneten Stellung gehen die Kraftlinien durch die linke Spule von unten nach oben, durch die rechte von oben nach unten. Wird der bewegliche Teil um 90° gedreht, so verschwinden die Kraftlinien und treten bei weiterer Drehung um 90° in umgekehrter Richtung wieder in die Spulen ein. Während dieser Drehung wird in jeder Spule eine elektromotorische Kraft von bestimmter Richtung induziert; durch passende Verbindung der Spulen können diese Kräfte addiert oder hintereinandergeschaltet werden. Bei weiterer Drehung um 180° aber verschwinden die Kraftlinien wieder aus ihrer umgekehrten Lage und kehren in die ursprüngliche zurück. Während dieser

zweiten Hälfte der Bewegung wird daher eine elektromotorische Kraft von entgegengesetzter Richtung induziert. Verbindet man die freien Enden der Spulen mit zwei isolierten Kupferringen auf der Drehungsachse, so kann man durch Federn, die auf diesen Ringen schleifen, die Spulen mit einem äußeren Stromkreise verbinden. Bei dauernder Drehung zirkuliert in diesem dann ein Strom, der nach jeder halben Umdrehung seine Richtung wechselt, und zwischen diesen Umkehrpunkten in seiner Stärke ansteigt und wieder abfällt. Einen solchen Strom nennt man einen Wechselstrom. Man kann aber die beiden

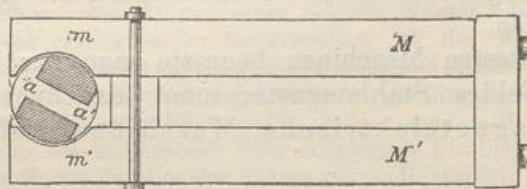


Fig. 239.
Magnetelektrische Maschine von Siemens & Halske.

entgegengesetzten Teile oder „Phasen“ dieses Wechselstromes auch in zwei gleichgerichtete Phasen verwandeln, indem man die Enden der Spulen statt mit den isolierten Schleifringen mit einem Kommutator von derselben Konstruktion verbindet, die wir bereits an dem elektromagnetischen Motor (251) kennen gelernt haben.

Eine bessere Ausnutzung des Magnetfeldes und dementsprechende stärkere Wirkung erzielt man mit der magnetoelektrischen Maschine von Siemens & Halske. Zwei Reihen wagrechter Magnetstäbe $M M'$ (Fig. 239) sind an einer lotrecht stehenden Eisenplatte befestigt und

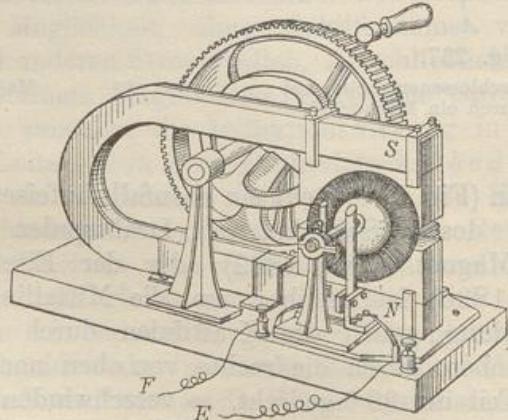


Fig. 240.
Magnetelektrische Maschine von Gramme.

an ihren vorderen Enden bei $m m'$ derart ausgedreht, daß die hierdurch gebildete zylindrische Höhlung den „Zylinderinduktor“ aufzunehmen vermag. Dieser besteht aus einem Eisenkern, dessen Gestalt an seinem doppel-T-förmigen Querschnitt $a a'$ zu erkennen ist; in seine

seitlichen Ausbuchtungen kommen die Drahtwindungen der Länge nach zu liegen; das Ganze ist von einer schützenden Messinghülle umgeben, die oben und unten die Zapfen der Drehungsachse trägt.

Diese Maschinen liefern bei Anwendung eines Kommutators zwar einen stets gleichgerichteten Strom, aber keinen konstanten, sondern einen pulsierenden, in seiner Intensität periodisch auf- und abschwankenden Strom.

Ein wesentlicher Fortschritt im Bau magnetoelektrischer Maschinen wurde durch die Einführung des Pacinottischen (1860) oder Grammeschen (1871) Ringankers erzielt. Bei der Grammeschen Maschine (Fig. 240) dreht sich zwischen den Polen *N* und *S* eines hufeisenförmigen Magnets um eine zur Ebene seiner Schenkel senkrechte Achse ein Ring von weichem Eisen *ABCD* (Fig. 241): auf ihn ist eine Anzahl von Drahtspulen aufgeschoben, von denen jede mit der folgenden in fortlaufender Verbindung steht. Von den Verbindungsstellen je zweier benachbarter Spulen laufen metallische

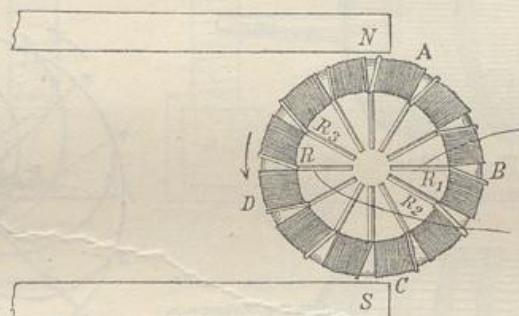


Fig. 241.

Zur Grammeschen Maschine.

Fortsätze $R R_1 R_2 R_3$ zur Achse des Ringes, wo sie rechtwinklig umgebogen und isoliert voneinander auf der Achse parallel zu ihr befestigt sind. Zwei Drahtbündel oder Bürsten (in der Figur 241 angedeutet durch von R und R_1 auslaufende Drähte) schleifen federnd beiderseits auf diesem Teil der Achse, den man den Kollektor nennt, und nehmen die während der Umdrehung in den Spulen erregten Induktionsströme auf. Unter dem Einfluß des Magnets wird nämlich der Ring selbst magnetisch, und zwar so, daß er gleichsam aus zwei halbkreisförmigen Magneten *ABC* und *ADC* besteht, welche in *A* und *C* mit gleichnamigen Polen zusammenstoßen und in *B* und *D* ihre neutralen Stellen haben. Die Lage dieser Pole ändert sich während der Umdrehung des Ringes nicht, da ja das weiche Eisen seine Magnetisierung nicht festhält; die Wirkung ist somit die nämliche, als ob der Eisenring mit einem Südpol bei *A* und einem Nordpol bei *C* unbeweglich stehen bliebe und bloß die Drahtspulen längs desselben dahinglitten. Dabei schwankt die Zahl der Kraftlinien in den Spulen periodisch auf und ab. Sie ist am größten in den Punkten *B* und *D*, gleich Null in den Punkten *A* und *C*,

in denen die Richtung der Kraftlinien in Beziehung zur Spulenachse sich bei der Bewegung der Spulen umkehrt. Daher hat die induzierte elektromotorische Kraft in allen Spulen der unteren Hälfte die eine, in allen der oberen Hälfte die entgegengesetzte Richtung. Die Spulen jeder Hälfte verhalten sich wie hintereinander geschaltete galvanische Elemente, sie addieren ihre elektromotorischen Kräfte. Die beiden Hälften aber halten sich mit ihren entgegengesetzten Kräften in sich das Gleichgewicht und wirken auf den äußeren Stromkreis wie zwei parallel geschaltete Reihen von Elementen, von denen jede die Hälfte des äußeren Stromes liefert. Fig. 242 zeigt die Ausführung eines derartigen Ringankers mit dem Kollektor.

Beim Grammeschen Ring schneiden nur die an der Außenseite des Ringes befindlichen Teile der Drahtwindungen die Kraftlinien.

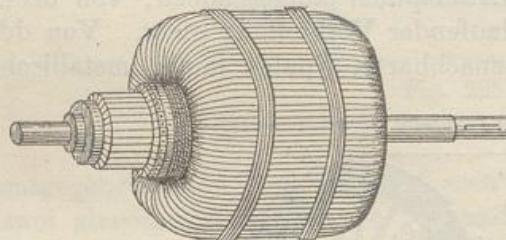


Fig. 242.
Ringanker.

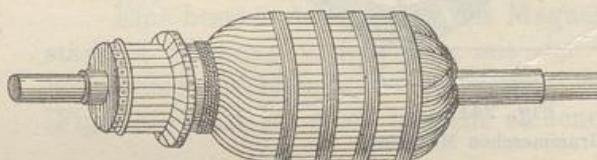


Fig. 243.
Trommelanker.

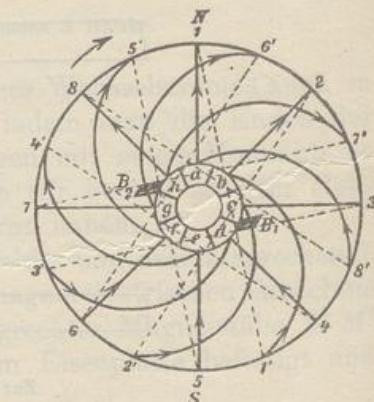


Fig. 244.
Wickelungsschema eines Trommelankers.

Die Induktionswirkung beschränkt sich daher auf diese Teile, und die auf der Innenseite befindlichen Stücke der Drahtwindungen dienen nur zur Rückleitung. In dieser Beziehung zweckmäßiger und außerdem leichter herzustellen ist der Trommelanker von Hefner-Alteneck (Fig. 243). Er ist gewissermaßen aus dem Doppel-T-Anker von Siemens & Halske (Fig. 239) hervorgegangen, indem er auch aus einem zylindrischen Eisenkern besteht, der der Länge nach mit Draht umwickelt ist; doch trägt er nicht eine Spule, sondern eine größere Anzahl von Spulen, deren Windungsebenen um gleiche Winkel gegeneinander gedreht sind, und die genau wie die Spulen des Grammeschen Ringes mit Hilfe eines Kollektors in zwei Reihen hintereinander geschaltet sind, so daß auch hier die Ströme beider Hälften an den neutralen Punkten des Kollektors durch Schleifbürsten abgenommen werden können. Fig. 244 stellt schematisch diese Art der Bewickelung für einen Trommelanker mit 8 Spulen dar; *a b c . . . h* sind die Lamellen des Kollektors; *B₁ B₂* sind

die Schleifbürsten. Diese Art der Bewickelung ist die heutzutage übliche.

269. **Dynamoelektrische Maschinen.** Ring- und Trommelwickelung sind zuerst an magnetoelektrischen Maschinen eingeführt worden. Natürlich erhält man wesentlich stärkere Wirkungen, wenn man statt der Stahlmagnete Elektromagnete benutzt. Es ist nun offenbar möglich, den im rotierenden Anker erzeugten Strom um diese Elektromagnete herumzuleiten, und zwar in solcher Richtung, daß die Erregung der Elektromagnete dadurch verstärkt wird. Dabei fand W. Siemens (1862), daß eine anfängliche Erregung dieser Elektromagnete durch eine besondere Stromquelle ganz entbehrlich ist. Der schwache auch im weichsten Eisen zurückbleibende

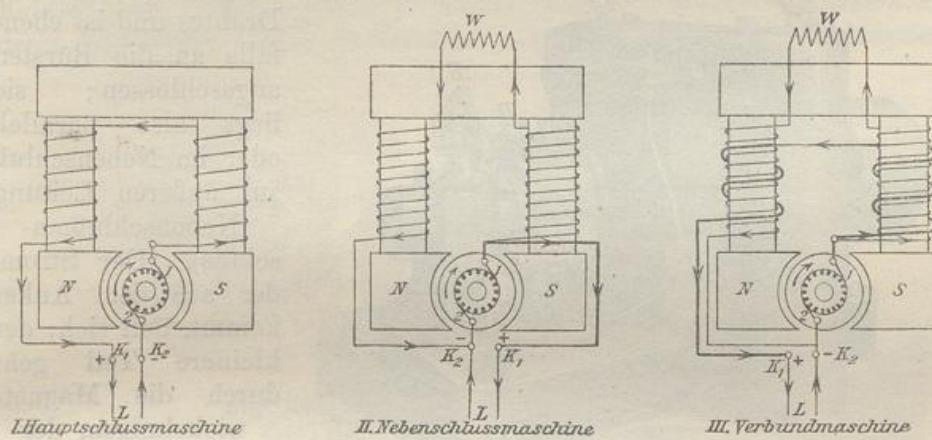


Fig. 245.
Typen der Dynamomaschinen.

Magnetismus der Elektromagnete reicht vielmehr hin, um beim Drehen des Ankers in diesem einen zunächst schwachen Induktionsstrom zu erregen, welcher den Magnetismus der Elektromagnete bei richtiger Zuleitung steigert und dadurch wiederum die Induktion verstärkt. Bei fortgesetzter Drehung wird nach diesem Prinzip die Stromstärke im Schließungskreis bis zu einer Grenze gesteigert, welche durch die Sättigung der Magnete und andere Umstände bedingt ist. Die Aufstellung dieses dynamoelektrischen Prinzips durch W. Siemens bildete die Grundlage für die Entwicklung der modernen Elektrotechnik. Nach diesem Prinzip sind die dynamoelektrischen Maschinen (Dynamomaschinen oder auch bloß Dynamos) gebaut, die heutzutage oft in gewaltigen Dimensionen zur Erzeugung elektrischer Ströme benutzt werden. Dabei liegt eine dreifache Möglichkeit der Anwendung des dynamoelektrischen Prinzipes vor und man unterscheidet demgemäß drei verschiedene Typen von Dynamomaschinen, die durch die drei Schemata der Fig. 245 erläutert werden mögen. Man kann erstens den Strom, der aus dem rotierenden Anker bei Bürste 1 herauskommt, zunächst um die Feldmagnete herumleiten, von da zur positiven Polklemme K_1 der Maschine, von der aus er in die Gebrauchsleitung strömt, um von ihr zur negativen Polklemme K_2 und der

Bürste 2 zurückzukehren (Hauptschluß-, Serien- oder Reihenmaschine, weil Anker und Magnetwickelung hintereinander, in Serie oder Reihe geschaltet sind). Da bei unveränderlicher Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers die induzierte elektromotorische Kraft von der Stärke des Magnetfeldes abhängt, so steigt bei dieser Maschine die Betriebsspannung, wenn der äußere Widerstand sinkt, und infolgedessen die Stromstärke steigt, während bei großem äußerem Widerstand die Spannung nahezu auf Null heruntersinkt. Bei dem zweiten Typus wird der Strom von den Bürsten unmittelbar zu den Polklemmen und der äußeren Leitung geführt; die Magnetwickelung aber besteht

aus zahlreichen Windungen eines dünneren Drahtes und ist ebenfalls an die Bürsten angeschlossen; sie liegt also parallel, oder im Nebenschluß zur äußeren Leitung

(Nebenschlußmaschine). Der Strom, der aus dem Anker kommt, teilt sich; der kleinere Teil geht durch die Magnetwickelungen, der Hauptanteil in die äußere Leitung. Da beim Durchgange des Stromes durch den

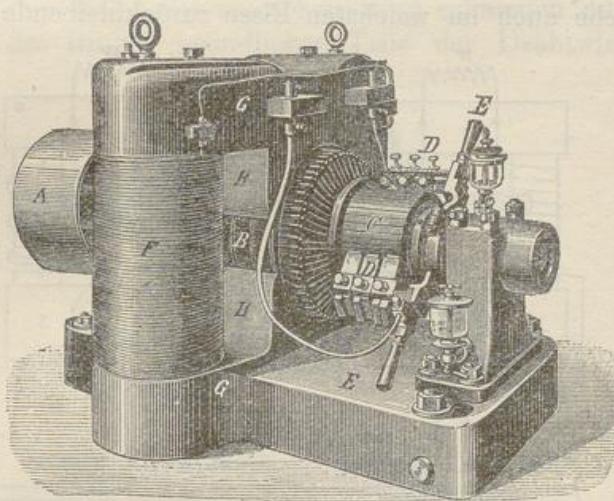


Fig. 246.
Dynamomaschine.

Anker infolge des Ankerwiderstandes ein Bruchteil der induzierten elektromotorischen Kraft verbraucht wird, und zwar um so mehr, je mehr Strom durch den Anker hindurchfließt, so sinkt die Spannung an den Bürsten, die Klemmspannung, mit wachsender Stromentnahme; infolgedessen nimmt der Strom in den Magnetwickelungen ab, und die induzierte elektromotorische Kraft im Anker sinkt. Diese Maschinen zeigen also gerade das umgekehrte Verhalten wie die Hauptschlußmaschinen. Wird der äußere Widerstand sehr klein, so sinkt die Erregung auf Null herunter. Um die Klemmspannung bei veränderlicher Stromentnahme auf gleichem Werte halten zu können, fügt man in die Magnetwickelung einen regulierbaren Widerstand (W) ein, den Nebenschlußregulator (Edison). Man kann aber auch die beiden in ihren Wirkungen entgegengesetzten Schaltungen vereinen (Typus III, Verbund- oder Compoundmaschine). Hier ist der Hauptstrom mit wenigen starken Windungen um die Feldmagnete herumgeführt; außerdem haben diese noch die Nebenschlußwickelung. Beide können so gegeneinander abgeglichen werden, daß die Maschine innerhalb weiter Grenzen der Stromentnahme mit unveränderlicher Klemmspannung arbeitet.

Fig. 246 zeigt eine Dynamomaschine eines etwas älteren Typus; die neueren Maschinen sind, um das Magnetfeld der Feldmagnete nach Möglichkeit auf den Anker zu konzentrieren, so gedrungen gebaut, daß man die einzelnen Teile der Maschine von außen nicht erkennen kann. Bei der abgebildeten Maschine sieht man die horizontale Achse, welche die zum Antrieb dienende Riemscheibe *A*, den Trommelanker *B* und den Kollektor *C* trägt. Die auf dem letzteren schleifenden Bürsten *D* sind an einem drehbaren Arm, der Bürstenbrücke *E*, befestigt, die mit Hilfe der Handgriffe so verstellt werden kann, daß die Bürsten den Kollektor genau in den neutralen Punkten berühren; man erkennt die richtige Einstellung daran, daß keine Funken zwischen den Bürsten und den Kollektorlamellen auftreten. Die Feldmagnete bestehen aus zwei großen, senkrecht stehenden Spulen *F*, deren Eisenkerne durch horizontale eiserne Querbalken *G* miteinander

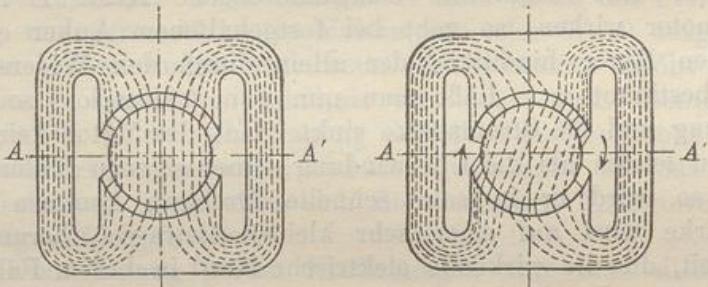


Fig. 247.

Kraftlinienverlauf in der Dynamomaschine
bei Leerlauf.

Fig. 248.

bei Stromentnahme.

verbunden sind; der untere ist mit der Grundplatte der Maschine aus einem Stück gegossen. Diese Polschuhe tragen nach innen zu Fortsätze *H*, die, halbkreisförmig ausgehöhlten, den Trommelanker zwischen sich aufnehmen. Die Spulen der Feldmagnete werden so vom Strom durchflossen, daß sie gleiche Pole nach oben und nach unten erzeugen, so daß im Eisen der Maschine ein Kraftlinienfluß entsteht, der für die Maschine, wenn sie ohne Stromentnahme läuft (Leerlauf), durch Fig. 247 dargestellt ist. Wenn aber Strom aus dem Anker entnommen wird, so erzeugt dieser eine Quermagnetisierung des Ankers in einer zu dem ursprünglichen Feld im Anker senkrechten Richtung, wobei zunächst die Bürsten im Äquator *AA'* anliegend zu denken sind; indem beide Felder zusammenwirken, entsteht im stromdurchflossenen Anker eine Magnetisierung, wie sie in Fig. 248 dargestellt ist. Die magnetischen Kraftlinien erscheinen im Anker im Sinne der Drehungsrichtung des Ankers gedreht, um so mehr, je stärker der entnommene Strom ist. Aus der Drehung der Kraftlinien im Anker folgt dann eine Drehung der Lage der neutralen Punkte und daraus die Notwendigkeit einer Verstellbarkeit der Bürsten, um sie für jede Stromstärke auf die jeweilige Lage der neutralen Punkte einzustellen zu können.

270. **Elektromotoren. Elektrische Kraftübertragung.** Leitet man den Strom einer Dynamomaschine durch die Bewickelung einer zweiten, so gerät diese in Umdrehung und kann nun als elektromagnetischer Motor (Elektromotor) mechanische Arbeit verrichten. Im rotierenden Anker eines Elektromotors sind natürlich die gleichen Induktionswirkungen vorhanden, wie sie in der Dynamomaschine zur Stromerzeugung benutzt werden. Sie äußern sich, entsprechend dem Lenzschen Gesetze (260), als gegenelektromotorische Kraft, welche die den Motor antreibende elektromotorische Kraft zu vermindern bestrebt ist, um so mehr, je schneller der Anker sich dreht, während andererseits in der Dynamomaschine die elektromagnetische Rückwirkung zwischen dem induzierten Strom und den Feldmagneten der Bewegung des Ankers entgegenwirkt und durch einen entsprechenden Energieaufwand der Antriebsmaschine überwunden werden muß. Läßt man eine bestimmte elektromotorische Kraft E auf einen Elektromotor wirken, so geht bei festgehaltenem Anker ein Strom durch den Motor hindurch, der allein durch den Widerstand des Motors bestimmt ist. Läßt man nun den Anker los, so gerät er in Drehung und die Stromstärke sinkt. Hat der Motor keine andere Arbeit zu leisten als die Überwindung seiner eigenen Reibungswiderstände, so wird er in sehr schnelle Drehung kommen und die Stromstärke wird auf einen sehr kleinen Betrag i_0 heruntergehen. Die Arbeit, die die wirkende elektrische Kraft in diesem Falle leistet, die sogenannte Leerlaufarbeit, ist dann gleich Ei_0 . Wird der Motor aber „belastet“, d. h. muß er als Antriebsmaschine äußere Arbeit leisten, so vermindert sich seine Umdrehungsgeschwindigkeit, die Stromstärke steigt auf einen höheren Wert i , damit wächst die Zugkraft, die die Feldmagnete auf den Anker ausüben, und desgleichen steigt die Arbeitsleistung der treibenden elektrischen Kraft auf Ei . Von diesem Arbeitsaufwande aber wird nur ein Teil als nutzbare Arbeit gewonnen, da stets ein gewisser Bruchteil für die Unterhaltung des Stromes im Motor aufgewandt werden muß und als Joulesche Wärme in den Drahtwindungen des Motors verloren geht.

Ist E die angelegte elektromotorische Kraft, J die Stromstärke bei stillstehendem Motor, so leistet die Kraftquelle eine Arbeit $E \cdot J$ (234), die ganz auf Erzeugung von Wärme im Betrage $J^2 \cdot w$ oder E^2/w verwendet wird; denn die Stromstärke J ist in diesem Falle nach dem Ohmschen Gesetz $= E/w$, wenn w den Widerstand des Motors bedeutet. Dreht sich der Motor, so entsteht eine von seiner Umdrehungsgeschwindigkeit abhängige elektromotorische Gegenkraft e ; der Strom ist infolgedessen $i = (E - e)/w$. Die Arbeit aber, welche die Batterie leistet, ist $E \cdot i = (E^2 - Ee)/w$. Die im Stromkreis erzeugte Wärme beträgt jetzt $i^2 \cdot w = (E - e)^2/w$. Dieser Wert ist kleiner als die von der Batterie geleistete Gesamtarbeit, um den Betrag $e(E - e)/w = e \cdot i$. Dieser nicht in Wärme umgesetzte Anteil der Leistung findet sich in der mechanischen Arbeit des Motors wieder.

Man kann auf diese Weise die Arbeit einer stationären Dampfmaschine, eines Wassergefälles usw., indem man sie mittels einer ersten Dynamo in Stromenergie umsetzt, auf beträchtliche Entfernung übertragen, wie z. B. bei der elektrischen Eisenbahn, in deren

Wagengestell die zweite als Motor wirkende Dynamomaschine angebracht ist, welche die Räder umdreht.

Die Leitung starker Ströme auf sehr große Entfernungn bietet übrigens erhebliche praktische Schwierigkeiten. Wird an der entfernten Station eine bestimmte Stromstärke erfordert, so muß man dem kupfernen Leitungsdräht bei doppelter Länge auch den doppelten Querschnitt geben, damit sein Widerstand der gleiche bleibe, und man braucht das vierfache Gewicht an Kupfer. Die Kosten der Leitung nehmen also mit dem Quadrate der Entfernung zu, und man erreicht sehr schnell eine Grenze, bei welcher die Anlage nicht mehr wirtschaftlich ist. Bei der Kraft- oder richtiger Arbeitsübertragung kommt es aber in erster Linie nicht darauf an, eine gewisse Stromstärke oder eine gewisse Spannung, sondern das Arbeitsvermögen oder die Energie des Stromes ohne zu große Verluste nach der entfernten Station überzuführen. Diese Energie ist aber durch das Produkt aus Spannung und Stromstärke (in Voltampère oder Watt) ausgedrückt, und bleibt sonach ungeändert, wenn die Spannung erhöht und die Stromstärke in demselben Verhältnis vermindert wird. Bei doppelter Spannung z. B. ist zur Übertragung derselben Arbeitsmenge nur die halbe Stromstärke erforderlich, und der Querschnitt wie das Gewicht der Kupferleitung vermindert sich für denselben Energieverlust in der Leitung auf ein Viertel.

Zur Überwindung großer Entfernungn muß man also Ströme von hoher Spannung und geringer Stromstärke anwenden (Marcel Deprez, 1882). Die Konstruktion von Gleichstrommaschinen für hohe Spannung ist jedoch mit großen Schwierigkeiten verbunden. Dagegen können Maschinen, welche Wechselstrom erzeugen, für hochgespannte Ströme wesentlich leichter hergestellt werden; daher wird für Kraftübertragung auf große Entfernungn heutzutage vorzugsweise Wechselstrom angewandt. Die Wechselstrommaschinen beruhen auf demselben einfachen Prinzip der Stromerzeugung durch Induktion, das wir oben bei den magnetoelektrischen Maschinen (268) bereits kennen gelernt haben; doch werden natürlich statt der Stahlmagnete Elektromagnete angewandt, die von einer besonderen Stromquelle erregt werden müssen; und ferner werden statt eines Magneten und eines Spulenpaares viele Magnete und Spulenpaare in einer Maschine vereinigt. Die großen in der Elektrotechnik gebrauchten Wechselstrommaschinen sind im wesentlichen folgendermaßen eingerichtet. Längs einem Radkranz sind eine Anzahl von Drahtspulen angeordnet, welche bei der Drehung des Rads zwischen zwei feststehenden Radkränzen rotieren, an deren jedem in gleicher Lage Elektromagnete befestigt sind. Diese Elektromagnete, durch eine Gleichstrom-Dynamomaschine erregt, sind derart geschaltet, daß sowohl die nebeneinanderliegenden wie die einander gegenüberstehenden Magnete entgegengesetzte Polarität haben, so daß jedem Südpol ein Nordpol gegenüber und zwischen zwei Nordpolen ein Südpol steht. Wird der Spulenkranz in gleichförmige Drehung versetzt, so entstehen in

dem Bewickelungsdraht Wechselströme, die für sämtliche Spulen hintereinander geschaltet und von zwei Schlußringen der Achse abgenommen werden.

271. **Transformatoren.** Für die Fortleitung und Verteilung der elektrischen Energie bietet der Wechselstrom noch einen anderen außerordentlichen Vorteil. Leitet man ihn durch eine Spule, die auf einen Eisenkern gewickelt ist, so wird in einer zweiten Spule, die die erste umgibt, oder die auf denselben Eisenkern, etwa auf eine andere Stelle eines geschlossenen eisernen Ringes, gewickelt ist, durch einfache Induktionswirkung, wie in einem Induktionsapparate, ebenfalls ein Wechselstrom hervorgerufen. Diese sekundäre Spule kann nun als Stromquelle für einen zweiten, mit dem ersten direkt gar nicht verbundenen Stromkreis benutzt werden. Man ist also in der Lage, mit einem einzigen Wechselstromkreis eine Anzahl von einander ganz unabhängiger Stromkreise zu speisen. Außerdem aber hat man es mit diesen Apparaten, die Transformatoren genannt werden (Gaulard und Gibbs, 1887) in der Hand, dem sekundären Strome eine beliebige andere Spannung zu erteilen, als sie der gegebene primäre Strom besitzt. Man kann wie bei den Induktionsapparaten, die sekundäre Spule aus vielen Windungen eines dünneren Drahtes herstellen und erhält dadurch eine höhere Spannung, als die des gegebenen Stromes ist. Man kann aber auch die Spannung „heruntertransformieren“, indem man den gegebenen Strom durch eine Spule von vielen Windungen schickt, und den sekundären aus einer Spule von geringerer Windungszahl entnimmt. Sitzt die beiden Spulen auf einem in sich geschlossenen Eisenkern, so daß die in der einen Spule erzeugten magnetischen Kraftlinien möglichst vollzählig auch durch die andere Spule hindurchgehen, so verhalten sich die Spannungen in den beiden Spulen sehr nahe wie die Windungszahlen der Spulen. Zugleich mit dieser Umformung der elektromotorischen Kraft vollzieht sich eine Umformung der Stromstärken im umgekehrten Sinne. Denn die elektrische Energie, die dem einen Stromkreise entnommen wird, wird fast ungeschmälert auf den anderen übertragen; daher muß das Produkt aus Stromstärke und Spannung in beiden Stromkreisen das gleiche sein. Durch solche Transformatoren verwandelt man also schwache Ströme von hoher Spannung in starke Ströme von niedriger Spannung und umgekehrt. Mit ihrer Hilfe transformiert man den Strom einer Wechselstrommaschine auf diejenige hohe Spannung, deren man zu seiner Fortführung auf große Entfernungen bedarf, und transformiert ihn an der Verbrauchsstelle wieder auf diejenige niedrige Spannung herunter, die für die praktische Verwendung zu Beleuchtungs- oder Arbeitszwecken erforderlich ist.

272. **Drehstrom-Motoren.** Der von einer Wechselstrommaschine gelieferte und nach Bedürfnis transformierte hin- und herpulsierende Strom kann ebensogut wie ein Gleichstrom unmittelbar zum Betriebe von Bogen- und Glühlampen verwendet werden. Behufs Kraftüber-

tragung müßte man ihn durch eine ganz gleiche zweite Wechselstrommaschine leiten, welche genau auf die gleiche Umdrehungszahl wie die erste Maschine gebracht ist; denn nur dann kann sich die Stromrichtung in den Spulen gleichzeitig (synchron) mit den Polen der Elektromagnete umkehren, was notwendig ist, wenn die Kraft den Spulenkranz immer in gleicher Richtung antreiben soll. Wird dieser Einklang, etwa durch größere Belastung des Motors, im mindesten gestört, so wechselt die Kraft ihre Richtung, hält den Spulenkranz zurück, statt ihn vorwärts zu treiben, und der Motor bleibt stehen.

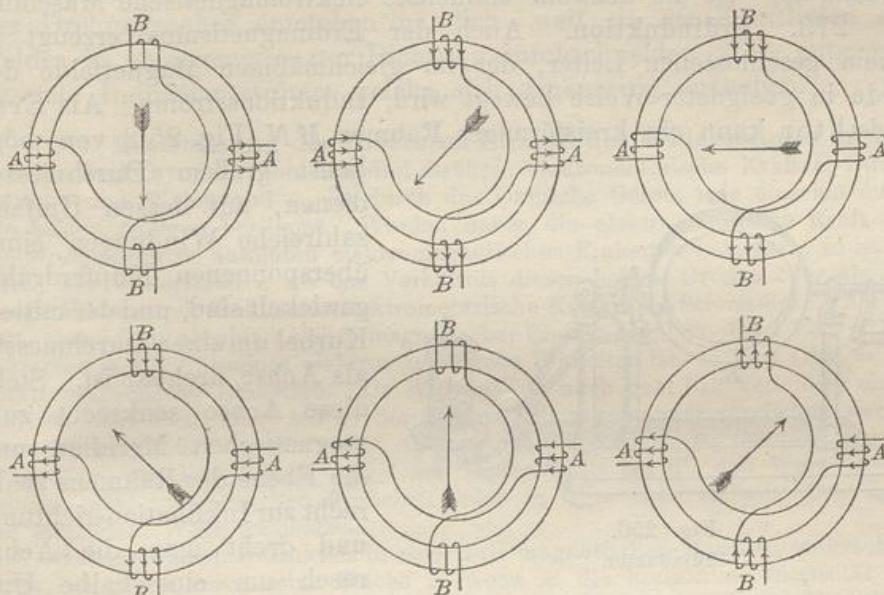


Fig. 249.
Drehstrom.

In einfacher Weise wurde die Aufgabe der Kraftübertragung mittels hochgespannter Wechselströme gelöst durch die Erfindung der Drehstrom-Motoren (Ferraris, 1887, Dolivo-Dobrowolsky, 1890). Ein feststehender Eisenring trägt zwei im rechten Winkel zueinander gestellte Spulenpaare *AA* und *BB* (Fig. 249). Durch jedes Spulenpaar geht je ein Wechselstrom, von denen der eine um eine Viertelschwingungsperiode hinter dem anderen zurückbleibt, so daß die Stromstärke in *A* ihren größten Wert hat, wenn sie in *B* gleich Null ist, und umgekehrt. In dem Augenblick, in welchem dies der Fall ist (erste Figur), erzeugen die Spulen *A* Magnetpole in *B*, und im Innern des Ringes entsteht ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien die durch den Pfeil angedeutete Richtung haben. Eine Achtelperiode später sind die Ströme in beiden Spulenpaaren gleich stark, und erzeugen ein Magnetfeld von der in der zweiten Figur dargestellten Lage. Nach einer Viertelperiode ist die Stromstärke am größten in *BB* und gleich Null in *AA*; hier bilden sich jetzt die

Pole, und das Feld nimmt die in der dritten Figur angegebene Richtung an. Nach drei Achtelperioden hat der Strom in $A A$ seine Richtung umgekehrt, und das Feld bekommt die in der vierten Figur dargestellte Lage. So setzt sich die Drehung des Magnetfeldes fort, bis es nach Ablauf einer ganzen Periode wieder in die in der ersten Figur angegebene Lage zurückgekehrt ist (fünfte und sechste Figur). Bringt man nun innerhalb des Eisenringes einen um seine Achse drehbaren Eisenzyylinder oder einen Anker mit einer in sich geschlossenen Bewickelung (Kurzschlußanker) an, so wird dieser durch das sich drehende Magnetfeld mitgenommen. Ein solcher „Drehstrommotor“ ist die denkbar einfachste elektromagnetische Maschine.

273. **Erdinduktion.** Auch der Erdmagnetismus erzeugt in einem geschlossenen Leiter, der im gleichmäßigen Magnetfelde der Erde in geeigneter Weise bewegt wird, Induktionsströme. Als Erdinduktor kann ein kreisförmiger Rahmen $M N$ (Fig. 250) von mög-

lichst großem Durchmesser dienen, auf dessen Umfang zahlreiche Windungen eines übersponnenen Kupferdrahts gewickelt sind, und der mittels Kurbel um einen Durchmesser als Achse drehbar ist. Steht diese Achse senkrecht zum magnetischen Meridian und die Ebene des Rahmens senkrecht zur Inklinationsrichtung, und dreht man die Achse rasch um eine halbe Umdrehung, so beobachtet man

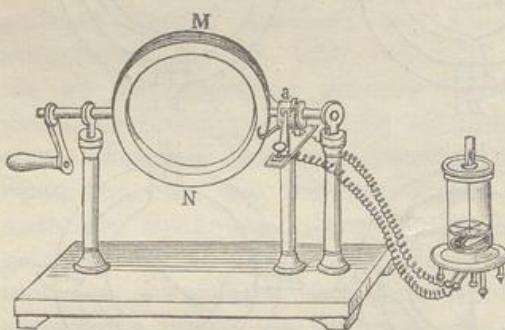


Fig. 250.
Erdinduktor.

an einem eingeschalteten (ballistischen) Galvanometer einen Induktionsstrom, dessen Stärke der Gesamtintensität des Erdmagnetismus proportional ist. Dreht man nun ebenso rasch um eine halbe Umdrehung weiter (oder auch zurück), so entsteht ein Induktionsstrom von gleicher Stärke aber entgegengesetzter Richtung. Bewirkt man letztere Drehung gerade in dem Augenblick, in welchem die durch den ersten Induktionsstoß abgelenkte Galvanometernadel zurückschwingend die Gleichgewichtslage passiert, so wird die Ablenkung nach der entgegengesetzten Seite größer, weil die Nadel schon in Bewegung war, als sie den zweiten Induktionsstoß empfing. Setzt man dieses „Multiplikationsverfahren“ fort, so erreicht man nach einiger Zeit eine größte Ablenkung, welche als Maß für die Stärke des Erdmagnetismus betrachtet werden kann.

Stellt man die Ebene der Windungen horizontal und die Umdrehungsachse in den magnetischen Meridian, so kann bei einer halben Umdrehung nur die vertikale Komponente (V) des Erdmagnetismus induzierend wirken. Stellt man dagegen die Umdrehungsachse vertikal und die Ebene des Rahmens senkrecht zum magne-

tischen Meridian, so wirkt bei jeder Drehung um 180° nur die horizontale Komponente (H) des Erdmagnetismus. Die in beiden Fällen beobachteten Galvanometerablenkungen verhalten sich daher wie diese Komponenten (wie $V:H$). Durch dasselbe Verhältnis wird aber auch die Tangente des Inklinationswinkels ausgedrückt ($\operatorname{tg} i = V:H$). Durch dieses von W. Weber (1838) angegebene Verfahren kann also die magnetische Inklinationswinkel mittels des Erdinduktors bestimmt werden.

Wird der Apparat so gestellt, daß die Drehachsachse in die Inklinationsrichtung fällt, so erhält man am Galvanometer keine Ablenkung. In den beiden Hälften des Drahtkreises zu beiden Seiten der Drehachsachse entstehen nämlich, weil sie die Kraftlinien des Feldes in entgegengesetzter Richtung durchschneiden (268), entgegengesetzte Induktionsströme, welche sich gegenseitig aufheben.

274. Bestimmung der absoluten Einheit des Widerstandes mittels des Erdinduktors. Von den drei Größen: elektromotorische Kraft E , Stromstärke i und Widerstand w , ist durch das Ohmsche Gesetz jede einzelne durch die beiden anderen bestimmt. Werden daher die elektromotorische Kraft und die Stromstärke in absoluten elektromagnetischen Einheiten gemessen, so ist dadurch der Widerstand w als das Verhältnis dieser beiden Größen oder als derjenige Widerstand, in dem die elektromotorische Kraft 1 die Stromstärke 1 hervorruft, ebenfalls in absoluter elektromagnetischer Einheit gegeben. Da 1 Volt = 10^8 , 1 Ampère = 10^{-1} absolute elektromagnetische Einheiten ist, so ist 1 Ohm = 10^9 elektromagnetische Einheiten. Da Widerstände nach dem Brücken- oder einem anderen Verfahren leicht mit großer Genauigkeit miteinander verglichen werden können, so genügt es, für einen einzigen Widerstand, z. B. für eine Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnitt bei 0° , den Wert in absoluten elektromagnetischen Einheiten oder in Ohm festzustellen. Das kann auf folgendem Wege geschehen.

Hat man einen Drahtkreis in einer zum magnetischen Meridian senkrechten Lage, so gehen durch seine Fläche F , wenn H die horizontale Intensität des Erdmagnetismus ist, $F \cdot H$ Kraftlinien hindurch. Dreht man diesen Drahtkreis um eine vertikale Achse um 90° , so gehen in dieser neuen Lage gar keine Kraftlinien mehr durch die Fläche des Drahtkreises hindurch. Also ist, wenn die Drehung in der Zeit τ vollzogen wird, die mittlere induzierte elektromotorische Kraft:

$$E = \frac{F \cdot H}{\tau}$$

und wenn w der Widerstand des Drahtkreises ist, die mittlere Stärke des Induktionsstromes

$$i = \frac{F \cdot H}{\tau w},$$

oder die ganze bei der Drehung in Bewegung gesetzte Elektrizitätsmenge

$$i \cdot \tau = e = \frac{F \cdot H}{w}.$$

Die Elektrizitätsmenge e lässt sich mit Hilfe eines ballistischen Galvanometers in absolutem elektromagnetischen Maße ermitteln (243); ebenso lässt sich H in absolutem Maße und F in cm^2 bestimmen. Dadurch ist dann der Widerstand w ebenfalls in absolutem elektromagnetischen Maße gegeben.

Versuche dieser Art haben ergeben, daß 1 Siemenssche Einheit, d. h. eine Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnitt bei 0° = 940 700 000

elektromagnetische Einheiten oder = 0,9407 Ohm ist. Ein Quecksilberfaden von 1 mm² Querschnitt hat demnach bei 0° einen Widerstand von 1 Ohm, wenn er 106,3 cm lang ist.

275. Induktion in körperlichen Leitern. Foucaultsche Ströme.
Rotationsmagnetismus. Nicht nur in geschlossenen Drahtwindungen, sondern auch in jedem körperlichen Leiter, gegen welchen ein naher Magnet seine Lage ändert, werden Ströme (Foucaultsche Ströme) von solcher Richtung induziert, daß sie die gegenseitige Bewegung von Leiter und Magnet zu hemmen streben. Führt man z. B. ein Messingblech zwischen den Polen eines starken Elektromagnets hindurch, so fühlt man einen Widerstand, als wenn man durch eine zähe Substanz, wie Käse, hindurchschnitte. Eine Kupferscheibe, die man zwischen den Polen in rasche Rotation versetzt hat, wird plötzlich zum Stillstand gebracht, wenn der Elektromagnet erregt wird. Die Bewegungsenergie, die der Leiter durch diesen „magnetischen Reibungswiderstand“ verliert, wird, wie bei der gewöhnlichen Reibung, in Wärme (Joulesche Wärme) verwandelt: der bewegte Leiter erwärmt sich. Ein mit leicht schmelzbarer Metalllegierung ausgegossener kupferner Hohlzylinder, zwischen den Polen in rasche Umdrehung versetzt, erhitzt sich so stark, daß die Metalllegierung schmilzt.

Die Rückwirkung der in einem bewegten Leiter durch einen Magnet induzierten Ströme vermag auch den letzteren in Bewegung zu setzen. Über einer wagrechten Kupferscheibe, die durch die Zentrifugalmaschine in rasche Umdrehung versetzt werden kann, befindet sich eine in horizontaler Ebene drehbare Magnetnadel. Wird die Kupferscheibe gedreht, so dreht sich auch die Nadel in demselben Sinne wie die Scheibe. Ebenso nimmt auch ein wagrechter Magnet, der um eine vertikale Achse rasch rotiert, eine über ihm in wagrechter Ebene drehbare Kupferscheibe mit sich. Arago (1825) bezeichnete diese von ihm entdeckten und erst später von Faraday durch Induktionsströme erklärten Erscheinungen als Rotationsmagnetismus.

Diese Induktionswirkungen treten in allen Metallmassen auf, die wechselnder Magnetisierung unterworfen sind, und führen Erwärmungen und entsprechende Energieverluste herbei. Man vermeidet sie, indem man die Metallmassen in solcher Weise unterteilt, daß diese Foucault- oder Wirbelströme nicht zustande kommen können. Aus diesem Grunde werden die Eisenkerne der Induktionsapparate, der Transformatoren, des Ankers der Dynamomaschinen und Motoren nicht aus ganzen Eisenstücken hergestellt, sondern aus Drähten oder Blechen, die durch dünne isolierende Schichten voneinander getrennt sind.

276. Dämpfung. Läßt man einen wagrecht aufgehängten Magnetstab innerhalb einer feststehenden kupfernen Hülse schwingen, so wirken die in der Hülse von ihm induzierten Foucaultschen Ströme hemmend auf seine Bewegung ein, und er kommt weit eher zur Ruhe, als wenn man ihn frei schwingen ließe. Von diesem Mittel zur

Dämpfung der Schwingungen macht man bei Galvanometern Gebrauch, um zu bewirken, daß der Magnet sich rasch in seine Gleichgewichtslage einstelle (vgl. Fig. 182 *a* und *b*). Ist die Dämpfung so stark, daß der Magnet sich, ohne hin und her zu schwingen, in seine Ruhelage einstellt, so heißt das Galvanometer „aperiodisch“.

277. **Das Telephon und Mikrophon.** Das Telephon (Fernsprecher, Reis, 1861) übermittelt gesprochene Worte oder andere Laute durch elektrische Ströme deutlich hörbar an eine entfernte Station. Das Bellsche Telephon (1875) besteht aus einem Stahlmagnet *A* (Fig. 251), auf dessen durch ein weiches Eisenstück verlängerten Pol eine Spirale *B* aus dünnem Draht aufgeschoben ist. Vor diesem Pole ist eine kreisförmige dünne Platte *EE* von weichem Eisen mit ihrem Rande rings eingeklemmt, welche, wenn man durch das davor befindliche Mundstück gegen sie spricht, wie ein Trommelfell in Schwingungen versetzt wird. Die periodischen Änderungen, welche durch die zitternden Bewegungen der Platte im Felde des Magnets hervorgebracht werden, erzeugen in der Drahtspule entsprechende Induktionsströme, welche durch die in der Holzhülle eingebetteten Drähte *CC* und durch eine mittels der Klemmen *DD* eingeschaltete Drahtleitung nach der entfernten Station fortgepflanzt werden, dort die Drahtspule eines ganz gleichen Instrumentes umkreisen, und das Feld seines Magnets in gleichem Rhythmus ändern. Hierdurch wird die Eisenplatte des zweiten Telephons in ganz übereinstimmende durch das jetzt als Schalltrichter dienende Mundstück hörbare Schwingungen versetzt. Der an der Ausgangsstation hervorgebrachte Klang, z. B. derjenige der menschlichen Stimme, wird auf diese Weise mit allen Eigentümlichkeiten seiner Klangfarbe nach der Empfangsstation fortgepflanzt.

Das Telephon bleibt stumm, wenn man durch seine Drahtwindungen einen konstanten Strom leitet; nur beim Schließen und Öffnen desselben hört man ein Knacken. Es tönt nur, wenn man einen intermittierenden oder einen Wechselstrom durchleitet, oder überhaupt einen Strom, dessen Stärke periodischen Schwankungen unterworfen ist. Man kann daher das Telephon, da es auf Wechselströme antwortet, nach F. Kohlrausch (1880) bei der Messung des galvanischen Widerstandes in Elektrolyten (265) statt eines Elektrodynamometers in die Wheatstonesche Brücke einschalten; man hat alsdann den Widerstand des Rheostaten oder des Meßdrahtes so lange abzuändern, bis das Telephon schweigt.

Das Mikrophon (Lüdtge, Hughes, 1878) in seiner einfachsten Form besteht aus einem an beiden Enden zugespitzten Stäbchen *k* (Fig. 252) aus Gaskohle, welches mit zwei an einem Brettchen be-

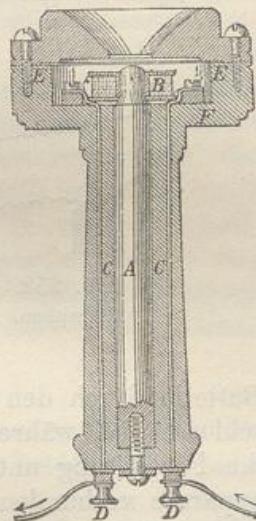


Fig. 251.
Telephon.

festigten Kohlenstückchen K und K' in loser Berührung ist. Die Kohlenstückchen K und K' sind mit den Enden eines Schließungskreises verbunden, in welchen eine galvanische Batterie B und ein Telephon T eingeschaltet sind. Spricht man in der Nähe der Kohlenstückchen, so vernimmt man die Worte in dem Telephon. Die Ursache dieser Wirkung ist die Veränderung der Innigkeit der Berührung zwischen den Kohlen durch die Schallschwingungen, wodurch Änderungen des galvanischen Widerstandes und damit periodische Schwankungen der Stromstärke herbeigeführt und entsprechende Schwingungen der Eisenplatte des Telephons hervorgerufen werden.

Im Fernsprechverkehr benutzt man als Sprechapparat ein Mikrophon (Transmitter), das Telephon selbst nur zum Hören. Von den zahlreichen Formen der gebräuchlichen Mikrophone sei hier nur der Universal-Transmitter von Berliner erwähnt. In einer dosenförmigen Gummikapsel befindet sich zwischen zwei horizontalen Kohlenplatten grobes Kohlenpulver, welches, wenn man durch einen

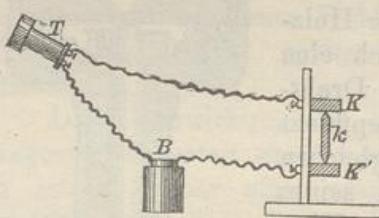


Fig. 252.
Mikrophon.

Batterie durch den Kohlenkontakt und diese Hauptrolle in sich geschlossen ist, während die Hörtelephone der beiden Stationen durch die Fernleitung unter sich und mit den Nebenrollen der Induktionsapparate verbunden sind. Durch die Schwankungen der Stromstärke in der Hauptrolle werden in der Nebenrolle Induktionsströme wacherufen, welche das entfernte Telephon zu lautem Sprechen bringen. Das Mikrophon als Sprechapparat leistet, wie man sieht, den Dienst eines Relais (248), welches statt der sehr schwachen eigentlichen Telephonströme die größere Stromenergie einer galvanischen Batterie zu verwenden gestattet. Der kleine Induktionsapparat wirkt als Transformator, welcher den starken Strom der Batterie in einen schwachen Strom von höherer Spannung umsetzt, der durch einen dünnen Draht leicht in große Entfernung geleitet werden kann. Als Rückleitung wird wie beim Telegraphen nicht ein zweiter Draht sondern die Erde benutzt.

278. **Der sprechende Lichtbogen.** Es ist in jüngster Zeit gelungen, noch auf einem anderen Wege Stromschwankungen in Schallschwingungen umzusetzen. Wenn man durch den Strom einer Akkumulatorenbatterie oder einer Dynamomaschine unter Vorschaltung

Schalltrichter gegen die untere Platte spricht, mit Leichtigkeit den Schwingungen derselben folgt und entsprechende Schwankungen des Batteriestromes hervorruft. Dieser Strom geht aber nicht direkt durch die Drahtwindungen des Telephons, sondern durch die Hauptrolle eines kleinen in dem Gehäuse des Transmitters befindlichen Induktionsapparates, so daß an jeder Station die daselbst stehende

eines Regulierwiderstandes einen elektrischen Lichtbogen betreibt und den Strom außerdem durch die eine Spule eines Transformatoren gehen läßt, während man durch die andere Spule den Batteriestrom eines Mikrophonkreises hindurchschickt, so übertragen sich die Stromschwankungen, die durch das Sprechen im Mikrophonkreis hervorgerufen werden, auf den Stromkreis der Bogenlampe. Der Lichtbogen, dessen Volumen und Temperatur durch die Stromstärke bedingt sind, kommt in entsprechende Schwankungen und diese gehen als Schallschwingungen an die Luft über. Der Lichtbogen spricht — bei richtiger Anordnung, so laut und deutlich, daß man es in einem größeren Saal verstehen kann — alles, was in das Mikrophon hineingesprochen wird (Simon, 1898).

Die Stromschwankungen, die die Schallschwingungen erzeugen, bewirken natürlich auch entsprechende Schwankungen der Lichtstärke des Bogens. Leitet man die Strahlen der Bogenlampe mittels eines Reflektors auf eine entfernte Station und sammelt sie hier wieder mit Hilfe eines zweiten Hohlspiegels, so kann man die Lichtschwankungen des Bogens hier wieder in Schallschwingungen umsetzen. Ein Apparat, der dies ermöglicht, ist die Selenzelle (Bells Photophon). Das Selen hat nämlich die Eigentümlichkeit, durch Belichtung seinen elektrischen Widerstand zu vermindern (223). Schaltet man eine passend hergestellte Selenschicht in einen Stromkreis, der ein Element und ein Telephon enthält, so werden durch intermittierende Belichtungen Stromschwankungen erzeugt, die das Telephon in Schallschwingungen umsetzt. Auf diese Weise ist es möglich, das in das Mikrophon gesprochene Wort mit Hilfe des elektrischen Lichtbogens — ohne Drähte — in die Ferne zu senden und dort wieder hörbar zu machen (Lichttelephonie).

279. Elektrische Schwingungen. Wir verbinden die Pole der sekundären Spule eines Funkeninduktors mit den beiden Belegungen einer Leidener Flasche. Bei Unterbrechung des primären Stromes ladet dann der Induktionsstrom die Leidener Flasche, und diese Ladungen können sich in Form eines Funkens ausgleichen, wenn die Belegungen mit einer Funkenstrecke von passender Länge verbunden sind. Zieht man diese Funkenstrecke so weit auseinander, daß keine Funken mehr übergehen, so werden die Ladungen der Belege sich offenbar rückwärts durch die sekundäre Spule hindurch wieder ausgleichen. Dieser Vorgang vollzieht sich aber nicht in Form eines einfachen Ausgleiches. Wenn der Rückfluß der Ladungen sich zu einem Strom durch die Spule entwickelt hat, so hört dieser Strom nicht auf, wenn die Belege entladen sind, und die treibende Spannungsdifferenz damit auf Null gesunken ist, sondern die Selbstinduktion der Spule (263) bewirkt, daß der Strom noch weiter anhält und die Belege von neuem, aber entsprechend seiner Richtung in umgekehrtem Sinn, wie anfangs, laden. Ist dies eingetreten und hat sich der Strom damit erschöpft, so sind die Belegungen wieder ge-

laden, entgegengesetzt wie vorher. Der beschriebene Vorgang wiederholt sich nun in umgekehrter Richtung, die Elektrizitäten strömen zurück; die Selbstinduktion ladet die Belege von neuem, dieses Mal wieder so, wie sie es zu Anfang waren, und so geht das Spiel der hin und her, von der einen Belegung auf die andere und wieder zurückströmenden Elektrizitäten so lange, bis die Energie der ursprünglichen Ladung durch Stromwärme und andere Verluste verbraucht ist.

Daß nicht ein einfacher Ausgleich, sondern diese wechselnden Ladungen stattfinden, kann man nachweisen mit Hilfe der Lichtenbergischen Staubfiguren (191). Verbindet man die eine Belegung der Leidener Flasche mit einer Metallspitze, die man auf eine Harzplatte aufsetzt, so erhält man durch einmalige Unterbrechung des Primärstromes auf der Platte nicht eine einfache, positive oder negative Staubfigur, sondern eine zusammengesetzte, die aus einer Reihe von abwechselnd positiven und negativen ineinander steckenden Figuren besteht (v. Bezold, 1870). Daß diese Figuren den zeitlich aufeinanderfolgenden abwechselnden Ladungen der Belegung entsprechen, kann man ebenfalls leicht beweisen, indem man die Harzplatte während des Vorganges bewegt, etwa auf der Schwungsmaschine rotieren läßt (W. König, 1898). Man erhält dann die ab-



Fig. 253.
Bild eines oszillatorischen Funkens auf bewegter Platte.

wechselnd positiven und negativen Figuren, statt ineinander steckend, hintereinander liegend.

Daß dieser Wechsel der Ladung auf den Belegungen der Flasche durch ein Hin- und Herströmen der Elektrizität durch die die beiden Belegungen verbindende Sekundärspule des Induktionsapparates vermittelt wird, läßt sich ebenfalls leicht nachweisen, indem man in die Zuleitung von dem einen Pol der Sekundärspule nach der Flaschenbelegung eine kleine Funkenstrecke zwischen Metallspitzen einschaltet. Durch diese Funkenstrecke strömt die Elektrizität auf die Flasche über. Entwirft man nun von diesem Funken mit einer Linse ein Bild auf einer bewegten photographischen Platte, so zeichnet sich das rötliche Licht der positiven Spitze der Funkenstrecke als eine schwache, das Glimmlicht der negativen Spitze als eine starke Linie auf der Platte ab. Das Bild eines solchen Funkens (Fig. 253) aber läßt erkennen, daß die Spitzen abwechselnd positiv und negativ sind, die Strömung also abwechselnd in der einen und der anderen Richtung erfolgt.

Einen Vorgang der beschriebenen Art nennt man eine elektrische Schwingung. Sie kommt offenbar in einer ganz ähnlichen Weise zustande, wie die Schwingung einer schweren Masse, die an einer elastischen Feder hängt (20). Wie es bei dieser die Trägheit ist, die die Masse über die Ruhelage hinausführt und die Feder von neuem dehnt oder zusammendrückt, so ist es bei jener die Selbstinduktion, die die elektrischen Ladungen über den Ausgleichspunkt hinweg auf die entgegengesetzten Belege hinüberführt. Wie die elastischen, so haben auch die elektrischen Schwingungen eine bestimmte Schwingungsdauer; darunter versteht man die Zeit, die verstreicht von einer positiven Ladung des einen Beleges bis zur nächsten positiven Ladung desselben Beleges. Diese Zeit ist unabhängig von der Stärke der Ladung, wie sie bei den elastischen Schwingungen unabhängig von der Schwingungsweite ist. Wie sie bei diesen von dem Verhältnis der Masse zur wirkenden Kraft abhängt (S. 29), so hängt sie bei jener von dem Verhältnis der Selbstinduktion (L) zu derjenigen Größe ab, welche die treibende Kraft, nämlich die Spannungsdifferenz der Belege bestimmt. Diese Spannungsdifferenz ist aber bei gleicher Elektrizitätsmenge umgekehrt proportional der Kapazität (C) der Flasche. Für die Schwingungsdauer der elektrischen Schwingungen hat man daher, entsprechend der Formel auf S. 29:

$$T = 2 \pi \sqrt{L \cdot C}$$

Verbindet man die sekundäre Spule des Induktoriums statt mit einer, mit 4 Flaschen von derselben Größe, so ist die Dauer der elektrischen Schwingungen nunmehr doppelt so groß. Nimmt man statt des ursprünglich benutzten Induktoriums ein kleineres, dessen Sekundärspule eine 4 mal kleinere Selbstinduktion hat, so ist die Schwingungsdauer nur halb so groß, wie anfangs. Bei einem mittelgroßen Induktorium und einer großen Leidener Flasche ist die Schwingungsdauer von der Größenordnung 0,01 Sekunde.

Schnellere Schwingungen erhält man mit kleineren Kapazitäten und kleineren Spulen. Ladet man eine Leidener Flasche und leitet den Entladungsschlag durch eine Spule hindurch, so ist auch dieser Vorgang ein oszillatiorischer, auch dann noch, wenn man die Spule durch eine einfache Drahtleitung ersetzt. Feddersen hat dies zuerst nachgewiesen (1858), indem er den Entladungsfunkens einer Leidener Flasche mit Hilfe eines sehr schnell rotierenden Spiegels auseinander zog und photographierte. Statt eines zusammenhängenden Funkenbandes zeigte dieses Bild eine Folge von Funken von abwechselnd umgekehrter Richtung, ähnlich wie es Fig. 253 für eine langsame elektrische Schwingung zeigt. Man kann die Tatsache, daß man es auch bei der Entladung einer Leidener Flasche durch einen kurzen Schließungskreis hindurch mit elektrischen Schwingungen zu tun hat, nach Lodge (1890) durch folgenden Versuch demonstrieren.

(Fig. 254). Zwei gleichgroße Leidener Flaschen werden nebeneinander aufgestellt. Die eine (*A*) hat als Verbindung zwischen den beiden Belegungen einen Drahtbügel mit einer Funkenstrecke. Bei der zweiten (*B*) sind die Belege durch einen ähnlichen Drahtbügel direkt verbunden; doch kann hier die Länge dieses Schließungskreises durch die verschiebbare Brücke *s* verändert werden; bei *c* bildet ein Stanniolstreifen von der inneren Belegung her eine Brücke nach der äußeren mit einer kleinen Funkenstrecke dazwischen. Wird *A* geladen und entladen sich die Belege durch den Schließungskreis und

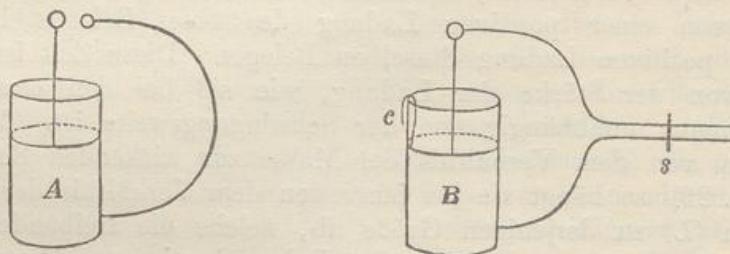


Fig. 254.
Resonanz bei oszillierender Flaschenentladung.

die Funkenstrecke hindurch, so wirkt dieser Vorgang induzierend auf den Schließungskreis der zweiten Flasche. Aber nur bei einer bestimmten Lage der Brücke *s* wird die Wirkung in diesem Kreise so heftig, daß bei *c* Funken überspringen. Verschiebt man *s* nach der einen oder der anderen Seite, so verschwinden die Funken in *c*. Eine solche Anpassung des einen Vorganges an den anderen ist nur erklärlich als eine Abstimmung auf gleiche Schwingungsdauer der elektrischen Schwingungen. Die Wirkung von *A* auf *B* wird dann durch Resonanz (308) so verstärkt, daß die Funken in *c* auftreten.

Wie die Wechselströme einer Wechselstrommaschine, so lassen sich auch die hin- und hergehenden Ströme dieser elektrischen Schwingungen mittels eines geeigneten Transformators auf noch höhere Spannungen hinauftransformieren (Tesla, 1891). Zu dem Ende schaltet man in den Schließungsbogen der Leidener Flasche statt des einfachen Drahtes, wie er in Fig. 253 *A* gezeichnet ist, die aus wenigen weiten Windungen eines dicken kurzen Drahtes gewickelte primäre Rolle des Transformators ein; die sekundäre Rolle besteht aus einer Lage von vielen Windungen eines dünnen Drahtes, die auf einen Glas- oder Hartgummizylinder aufgewickelt sind. Die engere sekundäre Rolle ist von der weiteren primären entweder durch einen breiten Luftzwischenraum getrennt, oder beide Spulen werden zur besseren Isolierung in ein mit gut isolierendem Öl gefülltes Gefäß gesenkt. Bei jeder Funkenentladung entstehen an den Polen der sekundären Rolle so hohe Spannungen, daß aus ihnen, oder aus Drähten, die mit ihnen verbunden sind, bläuliche Lichtbündel hervorschießen.

Geißlersche Röhren (281) leuchten in der Nähe der Drähte oder zwischen zwei mit diesen verbundenen Metallplatten auch ohne unmittelbare Berührung (Tesla-Licht).

Bei solchen Flaschenentladungen durch kürzere Drähte hindurch beträgt die Schwingungsdauer nur noch Milliontel einer Sekunde, wie Feddersen festgestellt hat. Noch 100 mal schnellere Schwingungen hat H. Hertz erhalten (1888), indem er Kapazität und Selbstinduktion noch weiter verkleinerte. Statt eines Kondensators benutzte er als Kapazität zwei isolierte Metallzyylinder, die mit den Polen eines Induktoriums verbunden, durch dieses geladen werden und sich durch eine kleine Funkenstrecke zwischen ihren einander zugekehrten Enden entladen. Daß auch diese Entladungen oszillatorisch waren, konnte, wie bei dem Versuche von Lodge, durch Resonanzwirkung auf einen zweiten abzustimmenden Leiter mit ganz kleiner Funkenstrecke nachgewiesen werden. Während aber die Schließungskreise der Leidener Flasche nur in geringem Abstande aufeinander einwirken, lassen sich die Wirkungen des Hertzschen Oszillators auf größere Entferungen hin verfolgen. Dadurch gelang es Hertz, die Art dieser Ausbreitung zu untersuchen und die Geschwindigkeit zu messen, mit der sich diese Wirkungen fortpflanzen. Sie ergab sich gleich der Lichtgeschwindigkeit. Wir werden auf diese wichtigen Untersuchungen, die Elektrizität und Optik in engste Verbindung miteinander gebracht haben, am Schlusse der Optik noch einmal zurückkommen, nachdem wir die für das Verständnis dieser Versuche erforderlichen allgemeinen Gesetze der Wellenausbreitung, sowie im besonderen die Eigenschaften des Lichts näher kennen gelernt haben.

280. Die weitere Ausgestaltung der elektrischen Theorien. Entsprechend dem zuerst von Faraday entwickelten Gedanken pflegt man die magnetischen und die elektrischen Kräfte als Äußerungen von Spannungen in dem auch den leeren Raum erfüllenden Mittel, dem Lichtäther, anzusehen (136, 170). Die Arbeit, die zur Herstellung des magnetischen oder des elektrischen Zustandes erforderlich war, ist als Energie dieses Spannungszustandes in dem Äther aufgespeichert (171). Daß diese beiden Zustände ineinander umsetzbar sind, lehren die Induktionserscheinungen, und ganz besonders sind die elektrischen Schwingungen ein anschauliches Beispiel dafür, daß sich die Energie eines elektrostatischen Feldes in die magnetische Energie einer elektrischen Strömung und diese wieder in die Energie eines elektrostatischen Feldes verwandeln kann, genau so, wie bei den Schwingungen einer elastischen Feder potentielle und kinetische Energie der Materie sich abwechselnd ineinander umsetzen. Diesen Zusammenhang der Vorgänge im Äther hat Maxwell auf die allgemeinste Weise formuliert, indem er folgende zwei Sätze aufstellte: „Jede zeitliche Änderung der magnetischen Kraft ist mit einer bestimmten räumlichen Verteilung von elektrischer Kraft verbunden, und umgekehrt, jede zeitliche Änderung der elektrischen Kraft ist mit einer entsprechenden räumlichen Verteilung von magnetischer Kraft verbunden.“

Die elektrischen Kräfte gehen von den elektrischen Ladungen aus. Jede Veränderung der elektrischen Kräfte führt von einer Änderung in der Verteilung dieser Ladungen, also von einer Bewegung dieser Ladungen her. Während also ruhende Ladungen nur elektrische Kräfte ausüben, erzeugen bewegte Ladungen zugleich auch ein magnetisches Feld. Diese Anschauung stützt sich zunächst natürlich auf die Tatsache, daß ein Strom um sich herum ein magnetisches Feld erzeugt und ein solcher Strom unserer ursprünglichen Auf-

fassung gemäß (204) in einer Bewegung elektrischer Ladungen durch den Schließungskreis hindurch besteht. Dabei haben wir uns aber den Strom als eine gleichzeitige Bewegung positiver Elektrizität in der einen und negativer Elektrizität in der anderen Richtung vorgestellt. Diese Anschauung kann zwar für die Metalle nicht direkt bewiesen werden; aber sie trifft jedenfalls für die Elektrolyte zu, in denen sich ja positiv und negativ geladene Ionen gleichzeitig nach entgegengesetzten Richtungen bewegen (210). Daß aber magnetische Kräfte nicht bloß in diesem Falle auftreten, sondern auch dann, wenn freie positive oder negative Ladungen bewegt werden, das bedurfte offenbar eines besonderen experimentellen Nachweises. Dieser ist zuerst von Rowland geführt worden (1876). Eine senkrecht stehende Hartgummischeibe wurde elektrisch geladen und dann um eine wagerechte Achse in möglichst rasche Drehung versetzt. Die auf diese Weise im Kreise herumgeführte statische Ladung der Scheibe übt dann auf eine im Mittelpunkt der Scheibe befindliche Magnetnadel eine ablenkende Wirkung aus, geradeso wie der Kreisstrom einer Tangentenbusssole die Nadel der Bussole ablenkt. Denken wir uns nur einen schmalen Streifen des Randes der Scheibe gleichmäßig mit elektrischer Ladung bedeckt, so stellt die rotierende ringförmige Ladung einen Kreisstrom dar; ist σ die in elektrostatischen Einheiten gemessene Elektrizitätsmenge, die auf je 1 cm des Ringumfangs haftet, und ist u die Geschwindigkeit, mit der sich ein Punkt des Ringes bewegt, so gehen bei der Rotation $u \cdot \sigma$ elektrostatische Einheiten der Elektrizität in jeder Sekunde durch einen fest gedachten Querschnitt des Ringes hindurch. Genaue Wiederholungen des Rowlandschen Versuchs, besonders durch Himstedt, haben ergeben, daß die magnetische Wirkung der bewegten elektrostatischen Ladung gleich derjenigen eines elektrischen Stromes ist, dessen elektromagnetisch gemessene Stärke = $\frac{u \cdot \sigma}{3 \cdot 10^{10}}$

sein würde. Das ist dieselbe Beziehung, wie sie sich aus den Versuchen von W. Weber und R. Kohlrausch für das Verhältnis der elektrostatischen und elektromagnetischen Stromeinheit (243) ergeben hat. Man kann sich von der Bedeutung dieser, oben mit C bezeichneten Größe, nunmehr auch folgende Vorstellung machen. Wenn $\sigma = 1$ ist, d. h. wenn bei dem Versuch mit der rotierenden Hartgummischeibe auf 1 cm des geladenen Ringes die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge haftet, so muß die Geschwindigkeit u der Bewegung = $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec (d. i. gleich der Lichtgeschwindigkeit) sein, damit dieser „Konvektionsstrom“ dem Strom 1 in elektromagnetischem Maße, oder einem Strom von 10 Ampère äquivalent ist.

Wenn aus diesen Versuchen hervorgeht, daß ein geladener Körper bei seiner Bewegung um sich herum ein magnetisches Feld erzeugt, so folgt daraus auch, daß ein geladener Körper, wenn er durch ein magnetisches Feld bewegt wird, von diesem eine Kraft erfährt, die nach der Linken-Hand-Regel auf der Richtung der magnetischen Kraft und der Richtung der Bewegung senkrecht steht (254), ihn also aus seiner Bewegung senkrecht abzulenken sucht. Die Größe dieser Kraft läßt sich nach Obigem leicht angeben. Fließt ein Strom von der in elektromagnetischer Einheit gemessenen Stärke i senkrecht zu den Kraftlinien eines magnetischen Feldes von der Stärke \mathfrak{H} , so ist die Kraft, die auf die Länge l des durchströmten Leiters wirkt, $\mathfrak{H} \cdot i \cdot l$ Dynen. Ist der Strom ein Konvektionsstrom in obigem Sinne, ist also $i = \frac{u \cdot \sigma}{3 \cdot 10^{10}}$, so ist die

Kraft = $\frac{\mathfrak{H} \cdot u \cdot \sigma \cdot l}{3 \cdot 10^{10}}$ Dynen. Da σ die Elektrizitätsmenge auf der Längeneinheit ist, so ist $\sigma \cdot l$ die ganze Elektrizitätsmenge auf der Länge l , für die die Kraft durch obigen Ausdruck gegeben ist. Wird also ein Körper mit der elektrostatisch gemessenen Ladung e_s mit der Geschwindigkeit u senkrecht zu den Kraftlinien eines magnetischen Feldes von der Stärke \mathfrak{H} bewegt, so hat die ablenkende Kraft des Feldes den Betrag $\frac{\mathfrak{H} \cdot u \cdot e_s}{3 \cdot 10^{10}}$ Dynen. Hat die Elektrizitätsmenge, in elektromagnetischer Einheit gemessen, den Wert e_m , so ist der

Betrag der Kraft $\mathfrak{H} \cdot u \cdot e_m$ Dynen, oder bei Messung in Coulomb $\frac{\mathfrak{H} \cdot u \cdot e_m}{10}$ Dynen.

Die Gesamtheit der gewonnenen Erkenntnisse läßt sich dann zu der Vorstellung zusammenfassen, daß alle elektrischen und magnetischen Vorgänge in letztem Grunde auf dem Spannungszustande beruhen, den elektrische Ladungen in der Ruhe oder in der Bewegung in dem umgebenden Äther hervorrufen. Über die Beschaffenheit dieser elektrischen Ladungen hat man schließlich noch eine weitere Hypothese entwickelt, die zunächst an die Tatsachen der Elektrolyse und der Ionenladungen anknüpft. An jeder freien Valenz eines Ions haftet die gleiche Elektrizitätsmenge (210). Erzeugen wir einen elektrischen Strom mit Hilfe eines galvanischen Elements, so ist der Strom die Summe der in dem Innern des Elektrolyten an die Polplatten abgegebenen Ionenladung, also ein ganzes Vielfaches der an einer Valenz haftenden Ladung. Dies führt zu der Vorstellung, daß die Elektrizität, ebenso wie die Materie, eine atomistische Struktur habe, d. h. jede Ladung aus gewissen kleinsten, nicht weiter teilbaren Elementarladungen sich zusammensetze. Als diese kleinste in der Natur vorkommende Elektrizitätsmenge hat man die an der freien Valenz eines Ions haftende Ladung anzusehen. Man bezeichnet sie deswegen als elektrisches Atom oder als elektrisches Elementarquantum. Die Größe dieser Elektrizitätsmenge läßt sich berechnen, wenn man die Zahl der Atome z. B. in 1 cm^3 Wasserstoff kennt. Diese Zahl ist zuerst von Loschmidt aus Überlegungen abgeleitet worden, die sich auf die kinetische Theorie der Gase (129) gründen. Danach sind in 1 cm^3 eines Gases bei 760 mm Druck und 0° ungefähr 30 Trillionen (30×10^{18}) Moleküle vorhanden. Da 2 Wasserstoff-Ionen bei der Entladung 1 neutrales Wasserstoff-Moleköl geben, so ist die Zahl der Wasserstoff-Ionen, die 1 cm^3 neutralen Wasserstoff liefern, 60×10^{18} . Nun haften an 1 g Wasserstoff 96540 Coulomb (211); 1 cm^3 neutraler Wasserstoff aber wiegt $0,00009 \text{ g}$ (88). Folglich verteilt sich die Ladung von $96540 \times 0,00009 = 8,69$ Coulomb $= 8,69 \times 3 \times 10^9 = 26 \times 10^9$ elektrostatischen Einheiten auf 60×10^{18} Ionen; an jedem Ion haftet also die Ladung $4,3 \times 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten. Diese Hypothese von der atomistischen Struktur der Elektrizität und der Existenz eines elektrischen Elementarquants hat eine weitere Stütze in neueren Untersuchungen über die Leitung der Elektrizität in Gasen gefunden.

281. Leitung in Gasen. Geißlersche Röhren. Wir haben in der Elektrostatik die Gase im wesentlichen als Nichtleiter behandelt (152). Aber wir haben bereits einige Fälle kennen gelernt, in denen elektrische Ströme durch Gase hindurchgehen, so den kurz dauernden elektrischen Funken (179) und den mit konstantem Strom brennenden galvanischen Lichtbogen (236). Auch die Büschel- und Glimmentladung (191, 168) stellt einen konstanten Strom von Elektrizität durch die Luft hindurch dar; im Gegensatz zu dem galvanischen Lichtbogen, der durch verhältnismäßig geringe Spannungen bei hoher Stromstärke unterhalten wird, gehen in dem sogenannten Spitzstrom, der überhaupt erst bei einer gewissen Minimalspannung einsetzt, bei Spannungen von Tausenden von Volts nur geringe Elektrizitätsmengen über. Die genannten Fälle haben das gemeinsam, daß bei ihnen die Fähigkeit der Luft, den Elektrizitätsübergang zu vermitteln, durch den Entladungsvorgang selbst geschaffen und unterhalten wird. Man bezeichnet deswegen solche Strömungen in Gasen als selbständige Strömungen. Einem Gase kann aber seine Isolationsfähigkeit auch durch eine äußere Ursache genommen

werden. In einem solchen Falle erzeugt eine Potentialdifferenz ebenfalls einen elektrischen Strom in dem Gase, der aber aufhört, sobald jene Ursache aufhört wirksam zu sein; man nennt deshalb solche Ströme unselbständige Strömungen. Sie sind dadurch ausgezeichnet gegenüber den selbständigen Strömungen, daß es keiner Minimalspannung bedarf, um sie einzuleiten, sondern daß schon die kleinste Spannungsdifferenz eine entsprechende Elektrizitätsbewegung hervorruft. Wir haben einen Fall dieser Art ebenfalls bereits kennen gelernt in der Leitfähigkeit der Flammengase (168). Ein geladener Körper wird entladen, nicht bloß, wenn man ihn etwa mit einer Bunsenflamme bestreicht, sondern auch, wenn er in größerer Entfernung mit den von der Flamme aufsteigenden, aber abgekühlten Gasen in Berührung kommt, und ebenso, wenn er einfach in der Nähe der Flamme steht und mit deren Gasen gar nicht in Berührung kommt. Die gleiche Eigenschaft zeigt die Luft in der Nähe glühender Metalle; sie wird ihr ferner zuteil, wenn sie von den weiterhin zu besprechenden Kathodenstrahlen, Röntgenstrahlen oder den Strahlungen radioaktiver Körper getroffen wird. Die durch solche Umstände hervorgerufene Leitfähigkeit der Gase ist auf alle Fälle eine sehr geringe, selbst im Vergleich zu der neben der metallischen Leitung doch schon sehr geringen Leitfähigkeit der Elektrolyte. Man mißt daher auch in den meisten Fällen diese Ströme in Gasen nicht mit den üblichen Mitteln der Strommessung, sondern auf elektrometrischem Wege, indem man die Entladungsgeschwindigkeit eines geladenen Körpers mißt. Die Untersuchung dieser Erscheinungen hat nun in allen Fällen zu der Vorstellung geführt, daß die elektrische Strömung in Gasen, ebenso wie in Elektrolyten, eine Konvektionsströmung ist, d. h. daß die elektrischen Ladungen an materielle Teilchen gebunden sind und diese letzteren unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes mit ihren Ladungen, je nach deren Vorzeichen, in dem einen oder anderen Sinne wandern. Zum Unterschiede von den elektrolytischen Ionen, die in Lösungen durch Dissoziation entstehen (210), bezeichnet man diese materiellen Träger der elektrischen Strömung in Gasen als Gasionen und nennt die Gase, wenn sie leiten, ionisiert. Die Flammengase z. B. sind ionisiert. Bringt man einen negativ geladenen Körper in die Nähe einer Flamme, so zieht die Kraft des elektrischen Feldes die positiven Ionen aus der Flamme nach dem Körper hin und der Körper entladet sich. Bringt man eine Flamme zwischen die entgegengesetzt geladenen Platten eines Kondensators, so sieht man, daß der leuchtende äußere Mantel der Flamme nach der negativen Platte, der innere Teil in geringerem Maße nach der positiven Platte hin gezogen wird, und schließt daraus, daß der äußere Teil überwiegend positive, der innere negative Ionen enthält.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Gasionen unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes durch ein Gas hindurchbewegen, ist sehr viel größer als diejenige der elektrolytischen Ionen in den so viel dichteren Flüssigkeiten. Während ein Wasserstoffion in einer Lösung unter einem Potentialgefälle von

1 Volt auf 1 cm nur 0,003 cm in 1 Sekunde zurücklegt (210), durchwandern die Gasionen unter der gleichen Kraft in der gleichen Zeit Strecken von 1 cm und mehr. Diese Geschwindigkeiten sind im allgemeinen für negative Gasionen etwas größer als für positive. Sie sind ferner in feuchten Gasen geringer als in trockenen, was durch die Annahme erklärt wird, daß die Ionen in feuchten Gasen durch Anlagerung von Wasserdampfmolekülen ihre Masse vermehren. Die Gasionen haben ferner die Eigentümlichkeit, bei Nebelbildung als Kondensationskerne zu wirken. Wird eine ionisierte feuchte Gasmasse adiabatisch ausgedehnt und dadurch abgekühlt (127), so schlägt sich der Wasserdampf auf den Gasionen nieder, und zwar zuerst auf den negativen, bei weiterer Abkühlung auch auf den positiven (C. T. R. Wilson, 1897). Diese Eigenschaft ist benutzt worden, um zu bestimmen, wie groß die Ladung eines einzelnen Gasions ist. Man kann nämlich auf Grund des bekannten Reibungswiderstands der Luft auf eine bewegte Kugel aus der Geschwindigkeit, mit der die Nebeltröpfchen heruntersinken, die Größe der Tröpfchen und daraus ihre Masse berechnen; dividiert man nun die Gesamtmasse des gebildeten Nebels, die man ebenfalls aus Beobachtungsdaten berechnen kann, durch die Masse der einzelnen Tropfen, so erhält man die Zahl der Nebeltröpfchen. Bestimmt man andererseits die Gesamtladung der zur Nebelbildung benutzten Ionen und dividiert diese durch die Zahl der Tröpfchen, so erhält man die Ladung des einzelnen Ions. Untersuchungen nach dieser Methode von J. J. Thomson, Townsend und Wilson ausgeführt, haben übereinstimmend das interessante Ergebnis gehabt, daß die Ladung des einzelnen Gasions dieselbe Größe hat, wie die Valenzladung eines elektrolytischen Ions, also mit dem oben berechneten Elementarquantum übereinstimmt. Diese Ladungen haften aber bei den ionisierten Gasen nicht an den Valenzen einzelner Atome oder Atomgruppen, wie in den Elektrolyten, sondern scheinen als Mittelpunkte zur Anlagerung neutraler Moleküle zu dienen, so daß die Träger dieser Ladungen schließlich Komplexe von Molekülen sind, die man dann im Gegensatz zu den Atomionen als Molionen bezeichnet.

Da die Ionen entgegengesetzter Ladung natürlich das Bestreben haben, sich wieder zu vereinigen, so verschwindet die Ionisierung des Gases nach kurzer Zeit, sobald die ionisierende Ursache aufhört zu wirken. Solange sie aber wirkt, wird sich ein gewisses Gleichgewicht zwischen der ionisierenden Wirkung und dem Vereinigungsbestreben der Ionen herstellen. Wenn nun ein elektrisches Feld die entgegengesetzten Ionen nach entgegengesetzten Richtungen auseinanderführt, so wird zwar anfangs mit wachsender Potentialdifferenz die Zahl der in der Zeiteinheit an die Elektrode gelangenden Ionen, d. i. die Stromstärke, zunehmen; wenn aber die Kraft schließlich so groß wird, daß so viel Ionen an die Elektrode übergeführt werden, wie die ionisierende Ursache in derselben Zeit erzeugt, so kann eine Vermehrung der übergeführten Ionenzahl durch eine Steigerung der Potentialdifferenz offenbar nicht mehr erreicht werden; der Strom hat dann sein Maximum erreicht. Die unselbständige Strömung in Gasen folgt also nicht dem Ohmschen Gesetz, nach dem Strom und Spannung einander proportional sind, sondern die Stromstärke strebt mit wachsender Spannung einem Maximalwerte zu, der natürlich von der Stärke der ionisierenden Wirkung abhängt. Diesen Maximalwert nennt man den Sättigungsstrom.

Die Erscheinungen der Glimmentladung nehmen besonders auffallende und glänzende Formen an, wenn sie in luftverdünnten Räumen erfolgen. Wir haben die dabei auftretenden Veränderungen der Entladungsform bereits oben (191) kurz beschrieben. Man erzeugt diese Erscheinungen bequemer mit Hilfe des Funkeninduktors. Kommt es aber darauf an, die Strom- und Spannungsverhältnisse bei diesen Entladungsformen zu untersuchen, so ist es nötig, sie in Gestalt eines konstanten Stromes mit Hilfe einer Hochspannungsbatterie zu erzeugen, die man sich am zweckmäßigsten durch Hinter-

einanderschaltung von tausend oder mehr kleinen Akkumulatoren herstellt.

Die verdünnten Gase werden dabei in Glasmöhren eingeschlossen, in die an geeigneten Stellen eingeschmolzene Platin- oder Aluminiumdrähte als Elektroden hineinragen, welche außerhalb mit Ösen zum Einhängen der Leitungsdrähte versehen sind (Gassiot, 1854, Geißler und Plücker, 1858). Von den mannigfaltigen Formen, welche man diesen Geißlerschen Röhren zu geben pflegt, ist eine der einfachsten in Fig. 255 dargestellt. Enthält die Röhre mäßig (z. B. auf $1/300$) verdünnte Luft, so erscheint beim Durchgang des Stromes die negative Elektrode (Kathode) von einer zarten tiefblauen Licht-

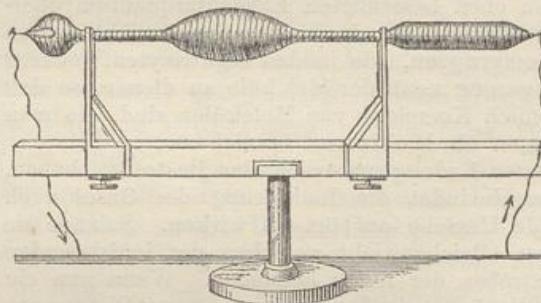


Fig. 255.
Geißlersche Röhre.

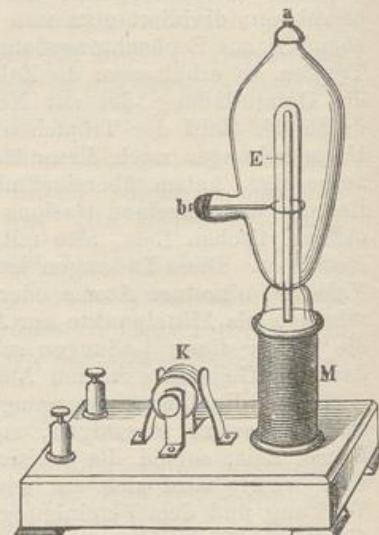


Fig. 256.
Drehung des Lichtstromes um einen Magnet.

hülle, dem Glimmlicht (191), umgeben; von der positiven Elektrode (der Anode) aber ergießt sich eine pfirsichblüte rote Lichtgarbe durch die ganze Röhre fast bis zur negativen Lichthülle, bleibt aber von dieser durch einen dunklen Zwischenraum, den man wohl auch als den Faradayschen Dunkelraum bezeichnet, getrennt; diese Garbe, die positive Lichtsäule, löst sich bei weiterer Verdünnung des Gasinhalts der Röhre in eine Reihe heller und dunkler Schichten auf, welche zur Achse der Röhre senkrecht stehen. Einem genäherten elektrischen Strom oder einem Magnet gegenüber verhält sich die positive Lichtgarbe wie ein beweglicher Stromleiter; sie wird z. B. von einem Magnet abgelenkt nach denselben Gesetzen wie ein beweglicher Leitungsdräht, und gerät in dauernde Umdrehung um einen Magnetenpol. Man zeigt dies bequem mittels der Vorrichtung Fig. 256; in ein eiförmiges Glasgefäß, in welchem die Luft hinreichend verdünnt ist, ragt ein mit einer Glas-

hülle bedeckter Eisenstab *E* hinein; der Lichtstrom ergießt sich parallel zum Eisenstab zwischen den beiden Platinelektroden, deren eine (*a*) am oberen Ende des Eies angebracht ist, während die andere (*b*) weiter unten den Eisenstab ringförmig umgibt; stellt man das Ei auf den Pol eines Elektromagnets *M*, so wird der Eisenstab magnetisch, und die Lichtgarbe dreht sich nun um ihn ebenso, wie ein beweglich aufgehängter Leitungsdräht (254); die Richtung der Drehung kehrt sich um, wenn man mittels des Kommutators *K* die Pole des Elektromagnets wechselt oder wenn man die Richtung des Lichtstroms umkehrt.

Die Farbe des positiven Lichtstromes ist je nach der Beschaffenheit des in der Röhre enthaltenen Gases verschieden, z. B. in Wasserstoffgas purpurrot, in Kohlensäure grünlich. Immer aber ist sein Licht reich an jenen violetten und ultravioletten Strahlen, welche das als „Fluoreszenz“ bezeichnete Selbstleuchten des Glases hervorzurufen imstande sind; indem man Teile der Röhre aus stark fluoreszierenden Glassorten, z. B. dem hellgrün leuchtenden Uranglas, in zierlichen Formen herstellt, wird die Pracht und Mannigfaltigkeit der Lichterscheinungen noch bedeutend gesteigert.

Bei näherer Betrachtung sieht man, daß das Glimmlicht der Kathode nicht unmittelbar anliegt, sondern durch einen zweiten dunklen Raum, den man den dunklen Kathodenraum oder den Crookesschen Dunkelraum nennt, von ihr getrennt ist. Unmittelbar auf der Oberfläche der Kathode aber liegt eine dünne, meist rötlich-gelbe Lichthaut, die man als erste Kathodenschicht bezeichnet. Bis zu Drucken von einigen Millimetern herunter nimmt die positive Säule den größten Teil des ganzen Entladungsrohres ein, während das Glimmlicht nur eine schmale Lichthülle über der Kathode bildet. Bei weiterer Verdünnung des Gasinhalts der Röhre zieht sich das positive Licht allmählich zurück, das Glimmlicht dehnt sich aus und entfernt sich von der Kathode, indem der Crookessche Dunkelraum sich ebenfalls ausdehnt.

Untersucht man die Spannungsdifferenz, die man an die Elektroden einer Geißlerschen Röhre anlegen muß, um einen Strom von bestimmter Stärke durch die Röhre hindurchzuschicken, so findet man, daß mit abnehmendem Druck des Gases diese Spannungsdifferenz abnimmt bis zu einem Minimalwerte, der von Gestalt und Größe der Röhre und der Elektroden abhängt, und bei weiterer Verdünnung wieder stark anwächst. In der Nähe dieses Umkehrdrucks ist die zum Betrieb der Röhre erforderliche Spannung unter Umständen so gering, daß nicht bloß der Öffnungs- sondern auch der Schließungsstrom eines Induktoriums (264) durch die Röhre hindurchgeht; die Röhre zeigt dann negatives Glimmlicht an beiden Elektroden.

Indem man in die Glaswand der Röhre Metalldrähte, sog. Sonden, senkrecht zur Strombahn einschmilzt, kann man feststellen, wie sich die an die Elektroden angelegte Potentialdifferenz auf die einzelnen Teile der Entladung verteilt. Diese Verteilung ist sehr ungleichmäßig. Von der Anode aus fällt das Potential zunächst ziemlich steil ab; dann vermindert sich der Potentialfall und bleibt innerhalb der positiven Lichtsäule nahezu konstant; innerhalb des Faradayschen Dunkelraumes tritt eine weitere Verminderung bis zu einem geringsten Werte des Potentialfalles im negativen Glimmlicht ein; in diesem ist

die Abnahme des Potentials am kleinsten. Dann aber folgt von der Grenze des negativen Glimmlichtes durch den Kathodendunkelraum hindurch bis zur Kathode ein sehr steiler Abfall des Potentials, der sog. Kathodenfall. Er hat bei allmählich steigender Verdünnung einen konstanten Wert, solange das Glimmlicht die Kathode noch nicht vollständig bedeckt (normaler Kathodenfall); bei abnehmendem Druck oder gesteigerter Stromstärke dehnt sich dann das Glimmlicht nur weiter über die Kathode hin aus. Sobald aber die Kathode vom Glimmlicht ganz eingehüllt ist, tritt bei weiterer Verdünnung oder steigender Stromstärke eine Zunahme des Kathodenfalles ein (anormaler Kathodenfall).

Eine Erklärung der komplizierten Erscheinungen in Geißlerschen Röhren läßt sich auf Grund der Vorstellung entwickeln, daß zunächst durch das elektrische Feld eine Ionisierung des Gases hervorgerufen wird, und daß die gebildeten Ionen unter dem Einfluß der elektrischen Kraft in dem verdünnten Gase so hohe Geschwindigkeiten erlangen, daß sie einerseits beim Zusammenstoß mit den Gasmolekülen Lichtschwingungen hervorrufen, anderseits durch den Stoß eine weitere Ionisierung des Gases bewirken.

282. Kathodenstrahlen. Elektronen. Röntgenstrahlen. Bei fortgesetzter Verdünnung des Gases in einer Geißlerschen Röhre verschwindet schließlich das positive Licht ganz; die Röhre zeigt nur noch ein schwaches Leuchten des negativen Glimmlichts. Gleichzeitig aber sieht man die Glaswand an den der Kathode gegenüberliegenden Stellen in grünlichem Lichte aufleuchten. Diese bei hohen Verdünnungen auftretende Erscheinung röhrt von einer Wirkung her, die in Form einer Strahlung senkrecht von der Kathode ausgeht; man hat ihr deswegen nach Goldsteins Vorschlag den Namen Kathodenstrahlen gegeben.

Während der positive Lichtstrom in einer gewöhnlichen Geißlerschen Röhre wie ein beweglicher Stromleiter die Verbindung nach der negativen Elektrode herstellt, sich stets nach dieser hinwendet und allen etwa vorhandenen Krümmungen der Röhre folgt, gehen in Röhren, in denen die Luft bis auf etwa ein Millionstel einer Atmosphäre verdünnt ist, die Kathodenstrahlen in geraden Linien senkrecht von der Kathode aus und werden in ihrer Richtung durch die Lage der Anode nicht im mindesten beeinflußt. Crookes (1879) bediente sich zum Nachweis dieser von Hittorf (1869) entdeckten Eigentümlichkeit der folgenden Einrichtung. In die V-förmige Röhre Fig. 257 sind die Drähte *a b c* eingeschmolzen, deren jeder eine kleine kreisförmige Blechplatte trägt; setzt man *a* mit dem negativen, *b* mit dem positiven Pol des Induktionsapparats in Verbindung, so pflanzen sich die Kathodenstrahlen in gerader Linie nur bis *c* fort, ohne dort um die Ecke zu biegen; denn nur der Schenkel *a c* leuchtet in grünem Licht. Verbindet man aber *a* mit dem positiven, *c* mit dem negativen Pol, so ergießen sich die Kathodenstrahlen in der zur Kathodenplatte *c* senkrechten Richtung geradlinig nach *b* hin, und nur der Schenkel *b c* zeigt die grüne Phosphoreszenz, obwohl die Entladung nur durch den Schenkel *a c* hindurchgeht. Die Kathodenstrahlen gehen also senkrecht von der Kathode aus, unbekümmert um den Weg, den die Entladung befolgt. Man kann diesen wesentlichen Unterschied zwischen der elektrischen Entladung in mäßig verdünnter und sehr stark verdünnter Luft sehr auffallend an den beiden ganz gleichen, kugel-

formigen Gefäßen *A* und *B* (Fig. 258) wahrnehmen, deren ersteres nur bis zu einem mäßigen Grade (2 mm Quecksilber), das andere aber bis auf etwa ein Millionstel Atmosphäre ausgepumpt ist. Verbindet man die Elektrode *a*, welche die Form einer Schale hat, mit dem negativen, die Elektroden *b*, *c*, *d* der Reihe nach mit dem positiven Pol, so sieht man in dem ersten Gefäß einen roten Lichtstrom von der jeweiligen positiven Elektrode nach der negativen Elektrode sich ergießen, und an letzterer die blaue negative Lichthülle auftreten, in dem anderen Gefäß aber sieht man nichts von einer positiven Lichtgarbe; von der schalenförmigen negativen Elektrode jedoch gehen die Kathodenstrahlen aus, laufen ungefähr im Mittelpunkt der Kugel, von welcher die Schale ein Abschnitt ist, wie in einem Brennpunkt

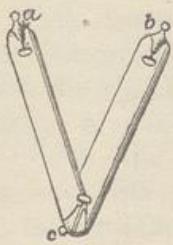
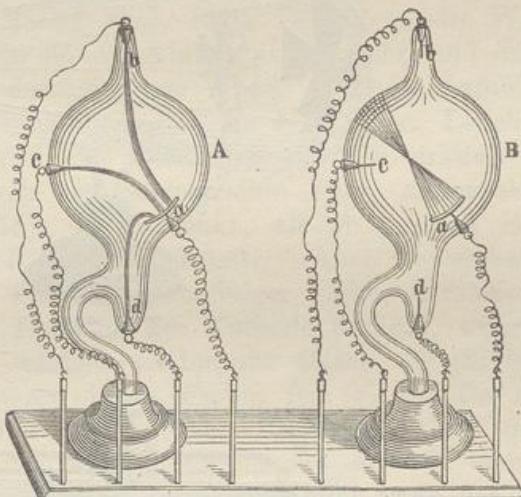


Fig. 257.

Fig. 258.
Crookes'sche Röhren.

zusammen, gehen darüber hinaus wieder kegelförmig auseinander und erzeugen auf der gegenüberliegenden Glaswand einen Fleck grünen Phosphoreszenzlichts, der sich heiß anfühlt; diesen Weg schlagen die Kathodenstrahlen unbeirrt ein, welchen der Drähte *b*, *c*, *d* man auch zur Anode machen mag. Die Kathodenstrahlen selbst sind nicht sichtbar. Man kann ihren Weg nur verfolgen an den Wirkungen, die sie auf Körper, die sie treffen, ausüben. Diese Wirkungen sind verschiedener Art.

Ein Körper, der von Kathodenstrahlen getroffen wird, erwärmt sich: wird in der Glaskugel Fig. 258 *B* im Krümmungsmittelpunkt der schalenförmigen negativen Elektrode *a* ein Stück Platin-Iridium angebracht, so wird es durch die gesammelten Strahlen bis zur Weißglut erhitzt und schließlich geschmolzen.

Da wo die Strahlen des Kathodenlichts auf die Glaswand des Gefäßes treffen, erregen sie das Glas zu lebhaftem Selbstleuchten (Fluoreszenz und Phosphoreszenz); das Thüringer Glas, aus welchem



Fig. 259.

diese Gefäße gewöhnlich verfertigt werden, leuchtet hell apfelgrün, Uranglas dunkler, grün, englisches Glas blau. Um die Phosphoreszenz anderer Körper unter der Einwirkung der Kathodenstrahlen zu beobachten, schließt man sie in Röhren wie Fig. 259 ein; Rubin und Kalkspat leuchten rot, Diamant hellgrün, Galmei smaragdgrün, Phenakit blau, Pektolith gelb.

Die Strahlen des Kathodenlichts werden von einem festen Körper, auf den sie treffen, aufgehalten; in dem birnförmigen Gefäß Fig. 260 trägt die positive Elektrode ein aus Aluminiumblech ausgeschnittenes Kreuz *b*; da nur die an dem Kreuz vorbeigehenden Strahlen *a c*, *a d* der Kathode *a* zur gegenüberliegenden Glaswand gelangen und deren

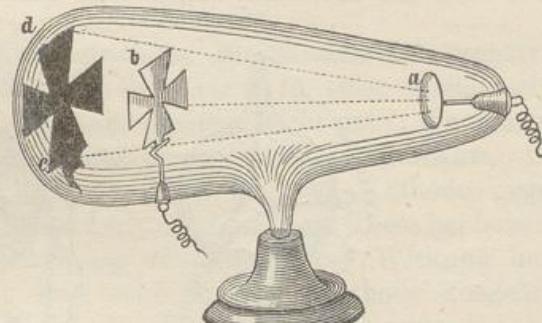
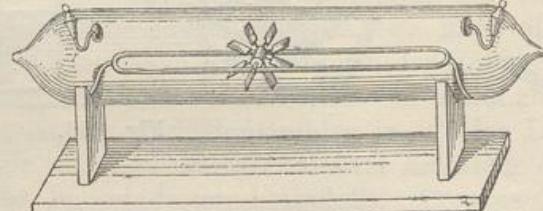


Fig. 260.

Fig. 261.
Crookes'sche Röhren.

Phosphoreszenz erregen, so erscheint daselbst auf hellgrün leuchtendem Grunde der dunkle Schatten des Kreuzes. Wirft man jetzt das um ein Scharnier drehbare Kreuz durch eine leichte Erschütterung des Apparates um, so daß die geradlinigen Kathodenstrahlen nun die gegenüberliegende Glaswand ungehindert treffen, so tritt das vorher dunkle Kreuz jetzt hell auf dunklerem Grunde hervor; das Glas hat nämlich an den schon vorher von den Strahlen getroffenen Stellen sein Phosphoreszenzvermögen teilweise verloren; der Teil aber, welcher vorher beschattet war, ist noch nicht „ermüdet“, sondern besitzt noch frische Empfänglichkeit.

Die Kathodenstrahlen vermögen, wie Crookes entdeckt hat, mechanische Wirkungen hervorzubringen. In der Röhre Fig. 261 ist eine gläserne Schienenbahn angebracht, auf welcher ein kleines Rad

mit Glimmerschaufeln rollen kann; verbindet man die oberhalb der Bahn gelegenen Elektroden mit den Polen des Induktors, so wird das Rad von der Kathode nach der Anode hingetrieben, als ob von jener her ein Luftstrom gegen die oberen Schaufeln bliese. Doch ist es nach neueren Untersuchungen nicht richtig, diese Erscheinungen auf eine Stoßwirkung der Kathodenstrahlen zurückzuführen. Vielmehr ist es wahrscheinlich, daß die Wärmewirkung der Kathodenstrahlen hier eine ähnliche Rolle spielt, wie die Wärmewirkung der Lichtstrahlen bei den Radiometern (s. diese 350).

Die Kathodenstrahlen schienen in die Röhre gebannt zu sein, so daß Körper, die man ihrer Wirkung aussetzen wollten, in die Röhre eingeschlossen werden mußten, bis es Lenard (1893) gelang, sie ins Freie zu lassen. Nachdem Hertz gefunden, daß dünne Blattmetalle für Kathodenstrahlen durchlässig sind, fügte Lenard in die Wand einer Hittorf'schen Röhre ein dünnes Aluminiumblatt ein, und durch dieses dunkle „Fenster“ in durchsichtiger Wand traten die Kathodenstrahlen hinaus in die Luft und erregten sie zu diffusem Leuchten.

Auch die Kathodenstrahlen unterliegen der Einwirkung des Magnets. Sie werden durch ein magnetisches Feld, entsprechend der Linken-Hand-Regel (254), so abgelenkt, als ob positive Elektrizität in ihnen auf die Kathode zuströmt. Aber sie verhalten sich dabei (nach Hittorf) wie ein geradliniger steifer Stromfaden, der nur mit seinem einen Ende an der Kathode festsitzt, während der positive Lichtstrom in weniger verdünnten Gasen als ein biegsamer Leiter erscheint, dessen beide Enden fest sind. Da also die Kathodenstrahlen offenbar eine Erscheinung sind, die nicht auf die Kathode zu, sondern von ihr fortwandert, so hat man es in ihnen mit einem Strom negativer Elektrizität zu tun, der von der Kathode ausgeht. Es ist auch gelungen (Perrin, 1895) nachzuweisen, daß sie negative Ladungen mit sich führen. Treffen sie auf einen isolierten Körper, so laden sie ihn negativ. Von einem positiv geladenen Körper werden sie angezogen, von einem negativ geladenen, z. B. einer zweiten Kathode, werden sie abgestoßen (Deflexion, Goldstein).

Alle Eigenschaften der Kathodenstrahlen lassen sich durch die Annahme erklären, daß negativ geladene kleine Massenkörper von der Kathode fortgeschleudert werden. Ist m die Masse, e die elektrische Ladung eines solchen Teilchens und ist V die Potentialdifferenz des Kathodenfallen, die die Teilchen von der Kathode forttreibt, so ist die Geschwindigkeit v , mit der ein Teilchen das Gebiet des Kathodenfalls verläßt und z. B. die Röhre cb in Fig. 257 durchfliegt, dadurch gegeben, daß die elektrische Arbeit eV gleich der lebendigen

Kraft $\frac{1}{2}mv^2$ des Teilchens sein muß, also $\frac{m}{e}v^2 = 2V$. Fliegt anderseits ein solches Teilchen senkrecht zu den Kraftlinien eines magnetischen Feldes von der Stärke H , so wirkt eine Kraft Hev (280) auf das Teilchen senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung; die Bahn des Teilchens krümmt sich in einem konstanten magnetischen Felde zu einer kreisförmigen Bahn vom Radius r , indem die Zentrifugalkraft $\frac{mv^2}{r}$ jener ablenkenden Kraft Hev das Gleichgewicht hält;

also ist $\frac{m}{e} v = \mathfrak{H} \cdot r$. Aus diesen beiden Beziehungen kann man, indem man für dieselben Kathodenstrahlen \mathcal{V} , \mathfrak{H} und r mißt, die Geschwindigkeit v der Bewegung der Teilchen und das Verhältnis $\frac{e}{m}$ ihrer Ladung zu ihrer Masse ermitteln. Versuche dieser Art haben ergeben, daß die Geschwindigkeit dieser Teilchen ganz außerordentlich groß ist. Sie ist natürlich verschieden je nach den Kräften, die die Geschwindigkeit hervorbringen; aber sie hat stets Werte, die etwa zwischen $\frac{1}{10}$ und $\frac{1}{3}$ der Lichtgeschwindigkeit (3×10^9 bis 1×10^{10} cm/sec) liegen. Für das Verhältnis der Ladung zur Masse aber hat sich, wenn die Ladung in Coulombs ausgedrückt wird, ungefähr die Zahl 2×10^8 ergeben, d. h. 1 Gramm solcher Teilchen würde eine Ladung von 2×10^8 Coulombs mit sich führen. Ein Gramm Wasserstoffionen führt nur 96 540 oder nahezu 1×10^5 Coulombs mit sich (211). Das Verhältnis der Ladung zur Masse ist also für die Kathodenstrahlteile ungefähr 2000 mal so groß wie für ein elektrolytisches H -Ion. Da es die oben (281) erwähnten Versuche über die Größe der Ladung eines Ions durchaus wahrscheinlich machen, daß auch die Ladung der Kathodenstrahlteilchen gleich dem elektrischen Elementarquantum ist, so folgt aus dem Werte für $\frac{e}{m}$, daß in den Kathodenstrahlen diese Ladung an einen Träger geknüpft ist, dessen Masse nur der zweitausendste Teil von der Masse eines Wasserstoffatoms ist. In den Kathodenstrahlteilchen haben wir es also nicht mehr mit Atomen der gewöhnlichen Materie zu tun, sondern mit einer Substanz von sehr viel feinerer Zerteilung. Es ist sogar fraglich, ob man den aus diesen Überlegungen hervorgehenden Wert der Masse eines Kathodenstrahlteilchens wirklich als Masse im Sinne der tragen Masse der gewöhnlichen Materie auffassen darf. Versuche von W. Kaufmann an Kathodenstrahlen von sehr großer Geschwindigkeit haben nämlich ergeben, daß das Verhältnis e/m bei hohen Geschwindigkeiten mit wachsender Geschwindigkeit erst langsam, dann immer rascher abnimmt, als ob die Masse m des Teilchens mit wachsender Geschwindigkeit größer und größer würde. Dieses Resultat läßt sich verstehen, wenn man sich vergegenwärtigt, daß eine mit solcher Geschwindigkeit bewegte Ladung ein magnetisches Feld um sich herum erzeugt (280), dessen Stärke um so größer ist, je schneller sich das Teilchen bewegt. Die Erzeugung dieses magnetischen Feldes und ebenso jede Verstärkung desselben, erfordert einen gewissen Aufwand von Energie, die dem Teilchen bei der Beschleunigung seiner Bewegung zugeführt werden muß. Die Versuche von Kaufmann lassen nun darauf schließen, daß die ganze Energie, die man aufwenden muß, um einem Kathodenstrahlteilchen eine bestimmte Geschwindigkeit zu erteilen, in der Energie des magnetischen Feldes enthalten ist, daß also den Teilchen ein Trägheitswiderstand im Sinne der gewöhnlichen Materie überhaupt nicht zukommt, sondern daß ihr Trägheitswiderstand ein scheinbarer, elektromagnetischer, von der Art der Selbstinduktion eines elektrischen Stromes ist.

Auf Grund dieser Ergebnisse betrachtet man die Kathodenstrahlteilchen als freie elektrische Atome, oder freie Elementarquanten der Elektrizität. Es hat sich für sie der Name Elektronen eingebürgert. Es ist aber bemerkenswert, daß alle Untersuchungen bisher nur das Vorhandensein negativer Elektronen ergeben haben. Alle positiv geladenen Ionen sind in ihrer Masse von der Größenordnung der gewöhnlichen materiellen Atome. Positive Ionen scheinen also aus einem neutralen Atom oder Molekül nur durch Abspaltung eines Elektrons, negative Ionen durch Anlagerung neutraler Atome oder Moleküle an ein freies Elektron zu entstehen.

Goldstein hat zuerst beobachtet, daß durch eine durchlöcherte Kathode von der Seite des Anodenraumes her eine Wirkung hindurchtritt, die sich in dem Raum hinter der Kathode ebenfalls in Form von Strahlen ausbreitet; da die Erscheinung besonders deutlich

hervortritt, wenn an die Löcher der Kathode nach rückwärts kurze röhrenförmige Kanäle angesetzt sind, hat Goldstein diese Strahlen als Kanalstrahlen bezeichnet. Nach neueren Untersuchungen ist es wahrscheinlich, daß die Kanalstrahlen von positiv geladenen Teilchen gebildet werden, die vor der Kathode auf diese zu- und durch ihre Löcher hindurchfliegen. Doch ist die Geschwindigkeit dieser Teilchen beträchtlich kleiner und ihre Masse entsprechend größer als die der Kathodenstrahlen. Das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse kommt dem eines Wasserstoffions nahe. (W. Wien.)

Die Erscheinungen der Kathodenstrahlen entwickeln sich am vollkommensten bei einem gewissen Grade der Verdünnung, etwa bei einem Druck von ein Milliontel Atmosphäre; darüber hinaus werden sie schwächer, und wenn man die Verdünnung noch weiter treibt durch fortgesetztes Auspumpen mit einer sehr guten Quecksilberluftpumpe und unter Anwendung von Stoffen, welche die noch vorhandenen Gasreste zu absorbieren vermögen, so kann man schließlich ein Vakuum erhalten, durch das elektrische Entladungen überhaupt nicht mehr hindurchgehen.

Die Kathodenstrahlen üben, wenn sie auf Körper auftreffen, noch eine andere sehr merkwürdige Wirkung aus. Röntgen (1895) fand, daß eine in die Nähe einer Hittorf'schen Röhre gebrachte fluoreszierende Substanz, z. B. Baryumplatincyanür, hell aufleuchtet, auch dann, wenn die Röhre mit schwarzem undurchsichtigen Karton umhüllt ist.

Er wies nach, daß von der Röhre, und zwar von den Stellen der Glaswand, die von Kathodenstrahlen getroffen werden, eine unsichtbare Strahlung ausgeht, welche die Kartonhülse durchdringt, und sich geradlinig nach allen Seiten verbreitet. Diese Strahlen, von Röntgen selbst X-Strahlen genannt, werden heute allgemein als Röntgenstrahlen bezeichnet. Man erhält kräftigere Wirkungen, wenn die Kathodenstrahlen nicht auf Glas, sondern auf ein in der Röhre angebrachtes Platinblech fallen. Man verstärkt ferner die Wirkung und erreicht den Vorteil, daß die Röntgenstrahlen alle nahezu von demselben Punkte ausgehen, indem man eine hohlspiegelartig geformte Kathode verwendet und das Platinblech in dem Brennpunkt der Kathodenstrahlen anbringt (Fokusröhren). Fig. 262 zeigt die Form einer solchen Röntgenröhre. Es empfiehlt sich im allgemeinen, das Platinblech *c*, die sogenannte Antikathode, mit der Anode *b* zu verbinden.

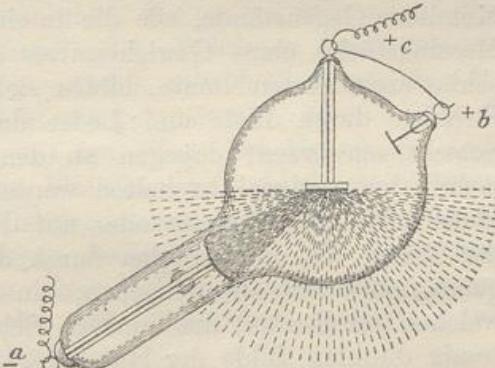


Fig. 262.
Röntgenstrahlen.

dern auf ein in der Röhre angebrachtes Platinblech fallen. Man verstärkt ferner die Wirkung und erreicht den Vorteil, daß die Röntgenstrahlen alle nahezu von demselben Punkte ausgehen, indem man eine hohlspiegelartig geformte Kathode verwendet und das Platinblech in dem Brennpunkt der Kathodenstrahlen anbringt (Fokusröhren). Fig. 262 zeigt die Form einer solchen Röntgenröhre. Es empfiehlt sich im allgemeinen, das Platinblech *c*, die sogenannte Antikathode, mit der Anode *b* zu verbinden.

Diese Röntgenschen Strahlen unterscheiden sich von den Kathodenstrahlen dadurch, daß sie von einem Magnet nicht abgelenkt werden; für sie sind alle Körper mehr oder weniger durchlässig; sie gehen leicht durch Papier, Holz, Leder, Hartgummi, auch durch nicht zu dicke Metallplatten. Die Durchlässigkeit ist bei gleicher Schichtdicke wesentlich bedingt durch die Dichte; das spezifisch schwere Blei ist bei 1,5 mm so gut wie undurchlässig, während eine zehnmal so dicke Schicht des leichten Aluminiums die Wirkung zwar schwächt, aber nicht völlig aufhebt. Wie Röntgen ferner zeigte, werden diese Strahlen weder regelmäßig zurückgeworfen, noch gebrochen.

Man hat diese Strahlen für Licht von sehr kurzer Wellenlänge gehalten; es ist aber nicht möglich, eine Wellenlänge der Röntgenstrahlen festzustellen. Vielmehr sprechen die Versuche dafür, daß man es bei ihnen nicht mit Wellen von bestimmter Periode, sondern nur mit ganz kurz dauernden Erschütterungen des Lichtäthers zu tun hat, die durch das Aufprallen der Kathodenstrahlteilchen mit ihrer außerordentlichen Geschwindigkeit auf die Antikathode hervorgebracht werden. Die Geschwindigkeit der Röntgenstrahlen ist von E. Marx (1905) gemessen und gleich der Lichtgeschwindigkeit gefunden worden.

Von besonderer Bedeutung ist, daß gewöhnliche photographische Trockenplatten für die Röntgenschen Strahlen empfindlich sind, so daß man die Erscheinungen dauernd fixieren kann. Da die Strahlen durch Holz und Papier fast ungehindert hindurchgehen, so kann man die Aufnahmen bei verschlossener Kassette oder auf der in schwarzes Papier gewickelten Platte selbst im beleuchteten Zimmer machen. Metallene Gegenstände, wie die in einem Holzkasten eingeschlossenen Messingstücke eines Gewichtssatzes oder die Münzen in einem verschlossenen Portemonnaie, bilden sich auf der Platte ab, indem die Strahlen durch Holz und Leder durchgehen und die empfindliche Schicht schwärzen, dagegen an den von Metall bedeckten Stellen mehr oder weniger abgehalten werden. Legt man die Hand auf den Holzdeckel der Kassette oder auf die Papierhülle, so erscheint auf der Platte, da die Strahlen durch die Weichteile leichter hindurchgehen als durch die Knochen, ein Schattenbild des Handskeletts, welches (im Positiv) die dunklen Schatten der Knochen in dem nur wenig dunklen Bilde der Hand zeigt. Ein goldener Ring scheint frei um den Finger zu schweben. Mittels kräftiger Fokusröhren und starker Entladungen eines großen Induktoriums gelingt es, nicht bloß von den Extremitäten, sondern auch vom Kopf und Rumpf Durchleuchtungsbilder auf einem Baryumplatincyanürschirm und photographische Aufnahmen zu erhalten. In der Medizin, besonders in der Chirurgie, wird von dieser Methode, das Innere des Körpers zu untersuchen, ausgedehnter Gebrauch gemacht.

283. Radioaktive Substanzen. Bald nach der Entdeckung Röntgens machte H. Becquerel die weitere sehr merkwürdige Entdeckung, daß Wirkungen ähnlicher Art, wie sie die Röntgenstrahlen ausüben, andauernd von allen uranhaltigen Substanzen ausgehen. G. C. Schmidt wies das gleiche von Thoriumverbindungen nach.

Von größter Wichtigkeit aber waren die Entdeckungen von Herrn und Frau Curie, denen es gelang, aus dem Mineral Pechblende auf chemischem Wege einen Stoff zu gewinnen, der jene merkwürdigen Eigenschaften in außerordentlich viel höherem Grade besitzt als die Uran- und Thorverbindungen. Dieser Körper wird aus den Aufschlüssen der Pechblende auf dieselbe Weise wie das Baryum und mit diesem zusammen als Chlorid ausgefällt und kann von dem Baryumchlorid durch wiederholtes Auskristallisieren aus heißer Lösung getrennt werden, da das Chlorid jenes Stoffes weniger löslich ist als das Baryumchlorid. Man hat es bei diesem Stoff ohne Zweifel mit dem Chlorid eines neuen Elements zu tun, dem die Entdecker den Namen Radium erteilten; denn das Radium besitzt ein charakteristisches Spektrum und wohldefinierte chemische Verbindungen, aus denen sein Atomgewicht durch Frau Curie zu dem hohen Werte 225 bestimmt worden ist. Doch ist es noch nicht gelungen, es als Element darzustellen; man kennt nur seine Verbindungen. Aus der Pechblende haben Herr und Frau Curie noch eine zweite, mit dem Wismut verknüpfte Substanz von ähnlichen Eigenschaften hergestellt, die sie Polonium nannten, und Debierne entdeckte einen dritten Stoff von ähnlicher Art, den er Aktinium nannte.

Die genannten Stoffe sind dadurch ausgezeichnet, daß sie in höherem oder geringerem Grade eigentümliche Strahlen aussenden, die man nach dem ersten Entdecker dieser Wirkungen Becquerelstrahlen nennt. Diese Strahlen wirken auf die photographische Platte; sie erregen das Leuchten eines Baryumplatincyanürschirmes, und sie machen die Luft leitend. Die Blättchen eines geladenen Elektroskopes fallen langsam zusammen, sobald ein Uranpräparat in die Nähe des Knopfes des Elektroskops gebracht, oder in das Gehäuse eingeschoben wird. Nimmt man statt des Uranpräparats ein Radiumpräparat, so sinken die Blättchen augenblicklich zusammen. Es ist ganz besonders diese Wirkung, deren man sich zur genaueren Untersuchung dieser Strahlungen bedient hat. Das Maßgebende dabei ist, daß diese Strahlen ohne Zufuhr äußerer Energie ausgesandt werden. Alle Stoffe, die diese Eigenschaft besitzen, werden radioaktive Stoffe genannt.

Die genauere Untersuchung, vor allem des Einflusses, den ein magnetisches Feld auf die Strahlung ausübt, hat ergeben, daß die Becquerelstrahlen nicht einheitlicher Art sind. Man unterscheidet vielmehr drei Arten von Strahlen der radioaktiven Stoffe, die man nach Rutherford als α -, β -, und γ -Strahlen bezeichnet. Die α -Strahlen sind stark absorbierbar, führen positive Ladung mit sich und werden vom Magneten wenig, dem Sinne nach wie bewegte, positiv geladene Körper abgelenkt; sie entsprechen in ihrem Verhalten den Kanalstrahlen, sind also als positiv geladene Masseteilchen anzusehen. Die β -Strahlen sind weniger absorbierbar, führen negative Ladung mit sich und werden in magnetischen und elektrischen Feldern stark und in gleichem Sinne wie Kathodenstrahlen abgelenkt. Aus der gleich-

zeitigen Einwirkung magnetischer und elektrischer Felder hat man die Geschwindigkeit und das Verhältnis e/m der Ladung zur Masse für diese β -Strahlteilchen ebenso ermittelt, wie für die Kathodenstrahlen, und diese Untersuchungen haben ergeben, daß diese Teilchen mit Kathodenstrahlteilchen oder Elektronen identisch sind; nur ist ihre Geschwindigkeit noch größer als in den Kathodenstrahlen; sie liegt zwischen 2,1 und $2,8 \times 10^{10}$ cm/sec, geht also bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit heran. Es sind diese β -Strahlen des Radiums, an denen W. Kaufmann den Einfluß der Geschwindigkeit auf das Verhältnis e/m (282) nachgewiesen hat. Die γ -Strahlen endlich sind sehr wenig absorbierbare, vom Magnet gar nicht beeinflußte Strahlen, die den Röntgenstrahlen verwandt sind.

Eine im wesentlichen durch die α -Strahlen bedingte auffällige Erscheinung hat Crookes zuerst beobachtet. Wenn man ein Körnchen eines stark radioaktiven Stoffes an einem Draht befestigt dicht vor einen Leuchtschirm von Baryumplatinicyanür oder phosphoreszierendem Zinksulfid bringt und den Schirm mit einer Lupe betrachtet, so sieht man zahllose Lichtpunktchen, die in beständigem Wechsel aufleuchten und wieder verschwinden (Spinthariskop). Es scheint, als ob jedes Auftreffen eines von der radioaktiven Substanz abgeschleuderten positiven Teilchens ein lokales Aufleuchten zur Folge hätte.

Ein Radiumpräparat besitzt andauernd eine etwas höhere Temperatur als die Umgebung. Es gibt also nicht bloß die beschriebenen Strahlungen, sondern auch Wärme dauernd an die Umgebung ab. Doch läßt sich auch diese Wärmeentwicklung auf die Wirkung der Strahlungen zurückführen. Denn das Radiumpräparat sendet Strahlen nicht bloß von seiner Oberfläche aus, sondern auch aus seinem Innern heraus. Diese letzteren Strahlen aber werden zum größten Teil im Innern der Substanz absorbiert werden und dort auf Kosten ihrer kinetischen Energie Wärme erzeugen. Durch Beobachtungen im Eiskalorimeter hat man gefunden, daß 1 mgr Radium in einer Sekunde 0,000028 gr cal, also in einer Stunde 0,1 gr cal, in einem Jahre 876 gr cal abgibt. Erwägt man, daß ein Radiumpräparat jahrelang, ohne daß man eine Erschöpfung wahrzunehmen vermag, diese Energiemengen abgibt, so sieht man, daß in dem Radium Energiemengen von außerordentlicher Größe aufgespeichert sind und zu allmählicher Umsetzung kommen. Diese Energiemengen sind viel größer, als daß sie von chemischen Prozessen der gewöhnlichen Art herrühren könnten. Die vollständige Verbrennung von 1 mgr Kohle liefert nur 8 gr cal. Aber noch andere Gründe sprechen dafür, daß die radioaktiven Vorgänge nicht in molekularen Veränderungen der Substanz (Dissoziation der Moleküle oder dgl.) ihren Ursprung haben können. Erstens hängen alle derartigen Vorgänge in hohem Maße von der Temperatur ab, die radioaktiven Erscheinungen aber sind von der Temperatur ganz unabhängig. Ein Radiumpräparat hat im geschmolzenen Zustande die gleichen radioaktiven Wirkungen, wie in einem Bade von der Temperatur der flüssigen Luft. Zweitens aber hängt die Stärke der radioaktiven Wirkungen nur von der vorhandenen Menge des radioaktiven Elements ab, gleichgültig in welchen Verbindungen das

Element vorliegt. Diese Tatsachen sprechen dafür, daß es nur auf das Atom des radioaktiven Elements ankommt, daß die Energie, die in den radioaktiven Vorgängen zur Umsetzung kommt, aus der potentiellen Energie des aus feineren Elementarteilchen aufgebauten Atoms stammt, und daß die radioaktiven Vorgänge die Begleiterscheinungen der Aufspaltung und Umwandlung von Atomen sind.

Für die Anschauung, daß man es bei den radioaktiven Vorgängen mit einer Umwandlung der Atome zu tun habe, spricht eine Tatsache, die zuerst von Ramsay und Soddy beobachtet, dann von Curie und Dewar und von Himstedt und G. Meyer bestätigt worden ist. Aus Radiumpräparaten entwickeln sich andauernd Spuren eines Gases, das selbst wieder radioaktive Eigenschaften besitzt; man hat es Radiumemanation genannt. Schließt man dieses Gas in eine Geißlersche Röhre ein, so zeigt es ein ganz bestimmtes Spektrum (344). Aber im Laufe der Zeit verwandelt sich dieses Spektrum und nach einigen Wochen zeigt die Röhre das vollständige Heliumspektrum. Die Emanation hat sich in Helium umgewandelt. Dieser Versuch ist ohne Zweifel ein direkter Beweis dafür, daß aus dem Radium Helium entsteht, daß also eine Atomumwandlung wirklich vor sich geht.

Andererseits hat Rutherford gelehrt, wie man aus dem Studium des zeitlichen Verlaufs der radioaktiven Wirkungen Schlüsse auf die stofflichen Umwandlungen ziehen kann, deren Begleiterscheinungen eben jene Wirkungen sind. Die Radiumemanation z. B., die sich als Gas aus Radiumverbindungen entwickelt, ist selbst radioaktiv, also in einer atomistischen Umwandlung begriffen. Prüft man mit dem Elektroskop ihre ionisierende Wirkung in einem Gefäß, das nur die Emanation und kein Radium enthält, so findet man, daß die Wirkung in 4 Tagen auf die Hälfte, in weiteren 4 Tagen abermals auf die Hälfte, d. h. auf ein Viertel des Anfangswertes, in abermals 4 Tagen auf ein Achtel usf. heruntergeht. Die Wirkung nimmt für Zeiten, die in arithmetischer Reihe wachsen, in geometrischem Verhältnis ab. Ist nun die radioaktive Strahlung eine Begleiterscheinung des Atomzerfalls, so wird bei der gleichen Umwandlung die Strahlung um so stärker sein, je mehr Atome im Zerfall begriffen sind. Dann folgt aus der obigen Beobachtung über die Abnahme der Wirkung der Radiumemanation, daß die Zahl der zerfallenden Atome immer der Zahl der vorhandenen Atome proportional ist, oder daß immer derselbe Prozentsatz der vorhandenen Atome im Zerfall begriffen ist. Dieses Gesetz hat sich für alle radioaktiven Umwandlungen bestätigt. Aber der Prozentsatz der zerfallenden Atome ist bei den verschiedenen radioaktiven Stoffen sehr verschieden, und entsprechend ebenso die Zeit, in der die radioaktiven Wirkungen des Stoffes sich um einen bestimmten Betrag, etwa auf den halben Wert vermindern. Diese sogen. Halbwertszeit ist eine charakteristische Konstante für jeden radioaktiven Stoff. Am Radium selbst hat man eine Abnahme der Wirkungen direkt noch nicht feststellen können. Aus der Menge der von ihm ausgehenden α -Teilchen hat man schätzungsweise den Betrag der Halbwertszeit zu 1300 Jahren berechnet. Die Emanation dagegen, die sich aus dem Radium bildet, hat eine Halbwertszeit von 3,8 Tagen, und ein anderes radioaktives Gas, das sich unter den Umwandlungsprodukten des Thors befindet, die Thoremanation, sinkt schon in 54 Sekunden auf die Hälfte ihres Betrages herab.

Bei der Umwandlung der Emanation entsteht unter Aussendung von α -Strahlen ein neuer radioaktiver Körper, den man Radium-A genannt hat. Er tritt als aktiver Niederschlag auf der Oberfläche von Körpern auf, die mit der Emanation in Berührung sind, besonders stark dann, wenn diese Körper auf ein hohes negatives Potential geladen sind. Aber die Prüfung des zeitlichen Verlaufs der Wirkungen von Radium-A zeigt, daß dieser Körper sich sehr schnell umwandelt; seine Halbwertszeit beträgt 3 Minuten. Die Anwendung des obigen Gesetzes der radioaktiven Umwandlungen auf den weiteren Verlauf dieser radioaktiven Wirkungen hat zu der Vorstellung geführt, daß auf das

Radium-A fünf weitere Umwandlungsstufen folgen. Die letzte von ihnen, Radium-F, hat eine Halbwertszeit von 143 Tagen; da dies derselbe Wert ist, den man für das von dem Ehepaar Curie entdeckte Polonium gefunden hat, unterliegt es keinem Zweifel, daß Polonium mit diesem Umwandlungsprodukt des Radiums identisch ist. Die chemische Natur dieser verschiedenen mehr oder weniger schnell vergänglichen Umwandlungsstufen des Radiums hat sich noch nicht feststellen lassen.

Auch für Uran, Thorium und Aktinium hat man solche Umwandlungsreihen auf Grund der Beobachtungen aufstellen können.

Hinsichtlich der Entstehung des Heliums machen es die neuesten Untersuchungen wahrscheinlich, daß die α -Teilchen Heliumatome sind. Man hat für diese Teilchen den Wert des Verhältnisses m/e bestimmt und hat ihn doppelt so groß gefunden, wie für ein Wasserstoffatom. Da es nun unwahrscheinlich ist, daß die α -Teilchen Wasserstoffmoleküle sind, da ferner die Entstehung des Heliums nicht bloß aus dem Radium, sondern auch aus dem Aktinium in jüngster Zeit nachgewiesen worden ist, so neigt man der Ansicht zu, daß die α -Teilchen Heliumatome, aber, da das Atomgewicht des Heliums = 4 ist, solche mit 2 Valenzladungen sind.

Eine Beobachtung von besonderem Interesse haben Elster und Geitel gemacht. Sie exponierten einen auf ein hohes negatives Potential geladenen Draht längere Zeit in freier Luft und fanden, daß sich auf ihm ein radioaktiver Niederschlag gebildet hatte. Sie führten dadurch den Beweis, daß in der Atmosphäre dauernd ein radioaktives Gas, eine Emanation enthalten ist. Weitere Untersuchungen haben ergeben, daß diese Emanation in der Hauptsache Radiumemanation ist. Auf diesen Gehalt an Emanation und ihren Zerfallsprodukten dürfte die natürliche Leitfähigkeit der Luft (193) zum größten Teil zurückzuführen sein. Da die Luft in Kellern und Höhlen ein besonders großes Leitvermögen besitzt, und da ferner Quellen sich in der Regel mehr oder weniger emanationshaltig erweisen, so kann man als sicher annehmen, daß die Emanation der atmosphärischen Luft aus dem Boden stammt und der Luft aus diesem andauernd zuströmt. Diese Tatsachen sprechen für eine weite Verbreitung radioaktiver Elemente und speziell des Radiums in der Erde.