

Elektrizität.

§ 157. **Arten der Elektrizität.** Wenn man gewisse Körper reibt, so werden sie befähigt, andere leichte Körper anzuziehen. Diese zuerst beim Bernstein (*ἤλεκτρον*) beobachtete Eigenschaft wird Elektrizität genannt. Elektrizität kann jedoch nicht nur durch mechanische Arbeit entstehen, sondern auch durch chemische, thermische u. a. Energie und läßt sich auch umgekehrt in solche überführen. Wie beim Magnetismus unterscheidet man zwei Arten von Elektrizität, positive und negative, und stellt sich diese der Bequemlichkeit halber oft wieder als zwei Fluida vor (die modernen Anschauungen über das Wesen der Elektrizität sind in §§ 212, 216, 218 erwähnt). Je nachdem man die Elektrizität im Zustande der Ruhe oder Bewegung betrachtet, spricht man von statischer Elektrizität und vom elektrischen Strome.

A. Statische Elektrizität¹ (Reibungselektrizität).

§ 158. **Elektrische Anziehung und Abstoßung.** Das am längsten bekannte Mittel, Körper elektrisch zu machen, besteht darin, sie zu reiben. Die dabei entstehende Elektrizität ist entweder von der Beschaffenheit, wie sie geriebenes Glas annimmt, oder aber sie gleicht derjenigen, die geriebenes Siegelack (Harz) zeigt. Man bezeichnet (willkürlich) die Glaselektrizität als positive, die Harzelektrizität als negative Elektrizität. Das Material, mit dem man reibt, erhält immer gleichviel entgegengesetzte Elektrizität wie der geriebene Körper. Durch Versuche läßt sich zeigen, daß gleichgroße, aber entgegengesetzte Elektrizitätsmengen sich gegenseitig neutralisieren, und ferner, daß gleichnamige elektrische Körper sich abstoßen, ungleichnamige sich anziehen. Man kann letzteres z. B. mit dem sog. elektrischen Pendel nachweisen; dasselbe besteht aus zwei Holundermarkkugeln, die mittels je eines Seidenfadens an einem Stativ aufgehängt sind. Hierbei gilt das COULOMBSche Gesetz [vgl. § 149]: Die Kraft der elektrischen Anziehung bzw. Abstoßung ist direkt proportional dem Produkt der betr. Elektrizitätsmengen, umgekehrt proportional dem Quadrate ihrer Entfernung,

$$F = \frac{e e'}{r^2} \cdot k.$$

Setzt man in dieser Formel die von der gewählten Einheit der Elektri-

¹ Die Lehre von der statischen Elektrizität heißt auch Elektrostatik; ihre Anwendung zu Heilzwecken wird nach medizinischem Sprachgebrauch meist Franklination genannt.

zitätsmenge abhängige Konstante $k = 1$, so ergibt sich als absolute elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge diejenige Elektrizitätsmenge, welche auf eine gleichgroße im Abstände 1 cm die Kraft 1 Dyne ausübt¹. Die praktische Einheit der Elektrizitätsmenge heißt nach dem Entdecker des obigen Gesetzes ein **Coulomb**².

§ 159. **Leiter und Nichtleiter.** Außer durch Reibung kann ein Körper auch durch Berührung mit einem elektrischen Körper elektrisch werden. Nach ihrem Verhalten hierbei unterscheidet man Leiter und Nichtleiter. Bei ersteren verbreitet sich die Elektrizität von der Berührungsstelle aus schnell über den ganzen Körper; man kann ihn also von einer einzigen Stelle aus „laden“, umgekehrt aber auch „entladen“. Letzteres geschieht z. B., wenn man ihn mit der Hand berührt, weil dann die Elektrizität durch den ebenfalls gut leitenden menschlichen Leib zur Erde abfließt, die das größte Magazin sowohl für positive wie für negative Elektrizität vorstellt. Auf dieser Eigenschaft der Leiter beruhen gewisse **Elektroskope**, d. s. Apparate zum Erkennen der Elektrizität. Durch den Korken eines Glasbehälters (Fig. 132) geht hier eine Metallstange, die oben in einen Knopf, unten in zwei Streifen von Blattgold usw. endigt. Berührt man den Knopf mit einem elektrischen Körper, so fließt die Elektrizität in die Goldstreifen, die sich dann gegenseitig abstoßen. Bei den Nichtleitern bleibt dagegen die Elektrizität nur an der Stelle, der sie direkt zugeführt wird, und umgekehrt behält ein solcher Körper seine Elektrizität, wenn nur eine Stelle abgeleitet wird. Da somit Nichtleiter, welche Leiter umgeben, diese vor dem Verluste der Elektrizität schützen, heißen sie auch **Isolatoren** [vgl. § 167]. Zu ihnen gehören z. B. **Glas, Harz, Seide, Wolle, Luft**³; zu den Leitern vor allem die Metalle, unter denen wieder **Silber** am besten leitet, ferner **Kohle, Flüssigkeiten** und feuchte Körper, z. B. der **Tierleib**.



Fig. 132.

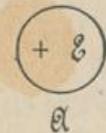
§ 160. **Elektrisches Potential.** Ein mit der positiven Elektrizitätsmenge $+E$ geladener Körper A (Fig. 133) besitzt die Eigenschaft, andere ebenfalls positiv elektrische Körper abzustößen. Nähert

¹ Als Dimension der elektrostatischen Einheit der Elektrizitätsmenge ergibt sich analog dem im § 149 Anm. Gesagten, $m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$ bzw. $gr^{1/2} cm^{3/2} sec^{-1}$.

— ² 1 Coulomb entspricht $3 \cdot 10^9$ elektrostatischen Einheiten [vgl. § 219]. —

³ Auch feuchte Luft ist ein guter Isolator! Leitend wird Luft durch Ionisierung [vgl. 212].

man ihm also einen mit der Elektrizitätseinheit $+e$ geladenen Körper B aus der Unendlichkeit¹ bis etwa zum Punkte P , so wird gegen die abstoßenden Kräfte von A eine bestimmte Arbeit geleistet.



\times
 \mathcal{F}

Fig. 133.

\ominus
 \mathcal{B}

Überläßt man dann B der Einwirkung von A , so wird umgekehrt B von P aus in die Unendlichkeit abgestoßen und leistet nach dem Gesetze von der Erhaltung

der Energie eine ebenso große Arbeit, wie vorher zur Annäherung aufgewandt werden mußte. B besitzt also in P eine bestimmte potentielle Energie oder, wie man auch sagt, ein bestimmtes Potential². Das Potential in einem Punkte eines elektrischen Feldes³ entspricht demnach der Arbeit, die gegen elektrische Kräfte aufgewandt werden muß, um die Einheit der (gleichnamigen) Elektrizitätsmenge aus unendlicher Entfernung bis zu diesem Punkte heranzubringen. Umgekehrt kann man auch sagen, es entspricht der Arbeit, die elektrische Kräfte leisten, um die Einheit der (gleichnamigen) Elektrizitätsmenge von diesem Punkte aus bis zur Unendlichkeit fortzubewegen. Hierbei ist es ganz gleich, welchen Weg die Elektrizitätseinheit zwischen P und der Unendlichkeit zurücklegt. Wäre das nämlich nicht der Fall, würde man z. B. auf dem Wege

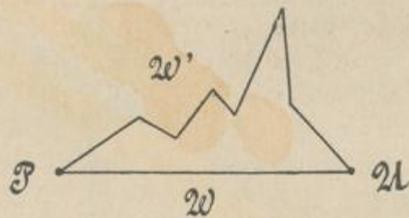


Fig. 134.

W (Fig. 134) weniger Arbeit zur Annäherung der Elektrizitätseinheit aufwenden, als auf dem Wege W' bei ihrer Abstoßung geleistet wird, so erhielte man ja eine Arbeitsleistung ohne entsprechende Energieaufwendung, kurz ein Perpetuum mobile, was bekanntlich ein Ding der Unmöglichkeit ist. In

jedem Punkte eines elektrischen Feldes hat daher das Potential

¹ Mit „unendlich“ ist hier die Entfernung gemeint, in der die von A ausgeübte Abstoßung $= 0$ ist. — ² Ungefähr gleichbedeutend damit ist der Begriff „elektrische Spannung“. Diese äußert sich in dem Bestreben der Elektrizität, den Leiter zu verlassen, und kann etwa mit dem Druck eines Gases auf die Wand des einschließenden Behälters verglichen werden. — ³ „Elektrisches Feld“ heißt der Raum, in dem elektrische Kräfte wirksam sind. „Feldstärke“ ist die in einem Punkte des elektrischen Feldes auf die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge ausgeübte Kraft, gemessen in Dynen. Auch hier benutzt man wieder Kraftlinien [§ 150] zur bequemen Darstellung der Richtung und Größe der elektrischen Kräfte. Je dichter die Kraftlinien, desto größer die Feldstärke.

nur einen ganz bestimmten Wert. Die Flächen, welche Punkte gleichen Potentials einschließen, heißen Äquipotentialflächen. Die elektrischen Kräfte bzw. Kraftlinien stehen überall senkrecht zu den Potentialflächen.

Das Potential¹ ist direkt proportional der Elektrizitätsmenge, umgekehrt der Entfernung, $V = \frac{e}{r}$. Herrscht in 2 Punkten verschiedenes Potential, so entspricht die Potentialdifferenz (oder der Spannungsunterschied) an diesen Punkten der Arbeit, die zur Überführung der Elektrizitätseinheit aus der einen Lage in die andere erforderlich ist. Ebenso wie nun eine Flüssigkeit bestrebt ist, von einem höheren Niveau zu einem tieferen zu fließen, wie ein Gas sich von Orten größeren Druckes zu solchen geringeren Druckes ausbreitet, fließt auch die Elektrizität von Orten höheren zu solchen niedrigeren Potentials. Die Erfahrungstatsache, daß alle zur Erde abgeleiteten Körper ihre Elektrizität verlieren, drückt man daher dadurch aus, daß man für die Erde das Potential 0 annimmt, wie man ja auch aus praktischen Gründen das Meeresniveau willkürlich als Nullniveau annimmt. Und wie man streng genommen nur von Temperatur- und Niveaudifferenzen sprechen kann, gibt es auch kein absolutes Potential, sondern nur Potentialdifferenzen. Aus dem Gesagten folgt ohne weiteres, daß an allen Stellen eines Leiters, bei dem die Elektrizität im Gleichgewicht ist, dasselbe Potential herrscht und umgekehrt. Die praktische Einheit für Potentiale und Potentialdifferenzen heißt Volt (nach dem berühmten Physiker VOLTA). Während nun eine Arbeit aufgewendet werden muß, um Elektrizität von Orten niederen Potentials zu solchen höheren Potentials zu bringen, wird im umgekehrten Falle von der Elektrizität eine Arbeit geleistet, die gleich dem Produkt aus Elektrizitätsmenge und Potentialdifferenz ist [vgl. § 179].

§ 161. **Elektrische Kapazität.** Wie das Niveau einer Flüssigkeit nicht nur durch ihre Menge, sondern auch durch die Weite, die Kapazität², des Behälters bedingt ist, wie die Temperaturzunahme eines Körpers nicht nur von der zugeführten Wärmemenge, sondern auch von der Wärmekapazität [§ 98] abhängt, kommt auch für das Potential eines Körpers dessen elektrisches „Fassungsvermögen“ oder seine elektrische Kapazität in Betracht. Das heißt: Um verschiedene Körper auf dasselbe Potential zu bringen, sind verschieden große Elektrizitätsmengen erforderlich. Die Kapazität ist somit das

¹ In Formeln gewöhnlich mit V bezeichnet, was wohl Abkürzung von *Vis* Kraft ist. — ² *capacitas* Fassungsvermögen.

Verhältnis zwischen Elektrizitätsmenge und Potential, $\kappa = \frac{e}{V}$. Die praktische Einheit der Kapazität wird nach dem großen Physiker FARADAY mit dem Namen Farad bezeichnet. Ein Körper hat die Kapazität 1 Farad, wenn er bei Ladung mit 1 Coulomb das Potential 1 Volt annimmt. Gewöhnlich benutzt man jedoch als Einheit das Mikروفarad, den millionsten Teil des Farads. Die elektrische Kapazität hängt nicht wie die Wärmekapazität von der stofflichen Beschaffenheit des Körpers ab, sondern von seiner Größe und Form¹ sowie von der Anwesenheit anderer Leiter [vgl. § 167].

§ 162. **Elektrometer.** Aus der erwähnten Formel $\kappa = \frac{e}{V}$ folgt natürlich, daß man jede dieser drei Größen (Kapazität, Elektrizitätsmenge, Potential) kennt, wenn die beiden anderen gegeben sind. So ist z. B. $V = \frac{e}{\kappa}$. Das bedeutet aber, daß das Potential eines Körpers seiner Ladung proportional ist. Da nun der Ausschlag eines Elektroskops [§ 159] proportional der zugeführten Elektrizitätsmenge ist, ist er auch proportional dem Potential, zu dem das Elektroskop geladen wurde, somit auch proportional dem Potential des ladenden Körpers. Man kann daher mit jedem Elektroskop nicht nur Elektrizitätsmengen, sondern auch Potentiale bzw. Potentialdifferenzen messen, indem man den Ausschlag aus der Ruhelage feststellt, und nennt

den Apparat dann Elektrometer. Bei manchen Elektrometern dient zur Ablesung des Ausschlags eine, gewöhnlich nach Volts geeichte, Skala. Für genaue Messungen, auch kleiner Potentiale, wird viel das Quadrantelektrometer von Lord KELVIN (früher W. THOMSON) benutzt.

Hier befindet sich ein ungefähr sohlenförmiges Aluminiumblättchen zwischen vier, kreuzweise miteinander verbundenen, metallischen Quadranten, die zusammen eine Art Schachtel bilden (Fig. 135). Werden nun die Quadrantenpaare mit den entgegengesetzten Polen

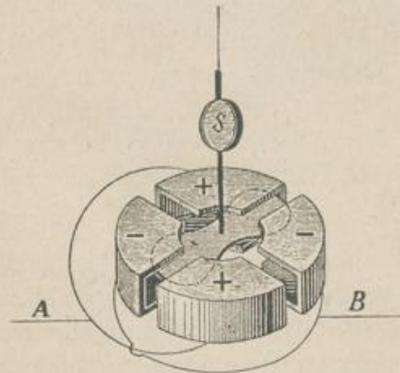


Fig. 135.

einer Elektrizitätsquelle durch die Leitungen A und B verbunden, also auf gleiche entgegengesetzte Potentiale von bekannter Größe gebracht, während das Aluminiumblättchen mit dem zu untersuchenden Körper verbunden wird, so

¹ Setzt man in die Formel $\kappa = \frac{e}{V}$ für V seinen Wert $\frac{e}{r}$ ein [§ 160], so ergibt sich $\kappa = r$. Für isolierte Kugeln ist also die Kapazität zahlenmäßig gleich dem Radius.

wird das Blättchen aus seiner Ruhelage (die einer Spalttrichtung entspricht) abgelenkt. Und zwar ist seine Drehung, die man durch Spiegelablesung (mittels des Spiegels *S*) mißt, proportional der übergegangenen Elektrizitätsmenge bzw. dem Potential des zu messenden Körpers; auch läßt die Richtung zugleich die Art der übergegangenen Elektrizität erkennen. Man kann auch umgekehrt das Aluminiumblättchen auf ein bekanntes hohes Potential laden und entweder den zu messenden Körper mit dem einen Quadrantenpaar verbinden, während das andere Paar zur Erde abgeleitet wird, oder aber die Drähte *A* und *B* an zwei Stellen legen, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll.

§ 163. **Verteilung der Elektrizität.** Da gleichnamige Elektrizitätsmengen sich abstoßen, so folgt unmittelbar daraus, daß sich bei Leitern die Elektrizität stets an der Oberfläche befinden muß. Experimentell wies dies FARADAY dadurch nach, daß er sich mit einem Elektroskop in das Innere eines isoliert aufgestellten Metallkäfigs begab. Wurde das Elektroskop mit dessen Wand leitend verbunden, so zeigte es auch bei stärkster Elektrisierung des Käfigs keinen Ausschlag. Die Elektrizitätsmenge pro Flächeneinheit heißt elektrische Dichte (genauer „Oberflächendichte“) und ist der Elektrizitätsmenge direkt, dem Krümmungsradius umgekehrt proportional. Auf einer Kugel ist die Dichte also überall gleich, und um so größer, je kleiner die Kugel ist. Am größten ist die Dichte an Hervorragungen, besonders an Spitzen. Hier bekommt die zentrifugale Kraft das Übergewicht, und trotz der umgebenden Isolatoren strömt Elektrizität aus, wobei Lichterscheinungen [§ 168] entstehen können. Auch wird an stark geladenen Spitzen der elektrische Wind beobachtet, der darauf beruht, daß Luft- und Staubteilchen angezogen, gleichnamig geladen dann kräftig abgestoßen werden.

§ 164. **Elektrische Influenz.** Elektrizität entsteht auch schon durch Annäherung eines elektrischen Körpers. Man spricht dann von Influenzwirkung¹. Zur Erklärung nimmt man an, daß schon in jedem unelektrischen Körper beide Arten von Elektrizität vorhanden sind, jedoch so, daß sie sich neutralisieren. Nähert man nun einem solchen unelektrischen Körper *B* (Fig. 136) einen elektrischen Körper

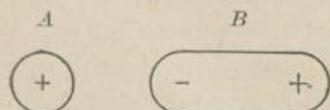


Fig. 136.

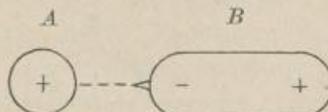


Fig. 137.

A, so wird die gleichnamige Elektrizität von *B* in das abgewandte Ende gestoßen, die ungleichnamige in das zugewandte angezogen. Letztere heißt dann gebundene, erstere freie Elektrizität. Wird

¹ *influo* hineinfließen, beeinflussen.

A wieder entfernt, so findet wieder ein Ausgleich statt, und *B* wird wieder unelektrisch. Wird aber vorher die freie Elektrizität, hier also die positive, zur Erde abgeleitet, und dann erst *A* entfernt, so bleibt auf *B* negative Elektrizität zurück. Die Ableitung kann nun auch durch Spitzen geschehen. Bringt man eine solche an der *A* zugewandten Seite von *B* an (Fig. 137), so strömt die negative Elektrizität aus [§ 163], die positive bleibt zurück. Gleichzeitig neutralisiert aber die ausströmende negative Elektrizität die positive von *A*, so daß es den Anschein hat, als wäre durch die Spitze positive Elektrizität von *A* nach *B* hinübergesaugt worden. Dies Prinzip kommt z. B. zur Anwendung bei der

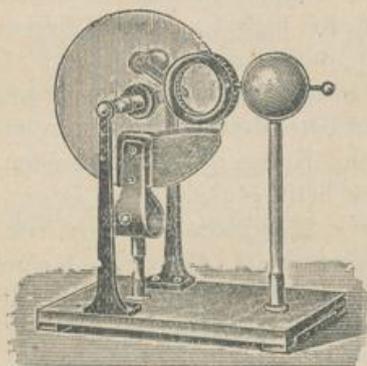


Fig. 138.

§ 165. **Reibungselektriermaschine.** Eine solche (Fig. 138) besteht aus einer vertikalen, drehbaren Glasscheibe, die bei ihrer Bewegung an das sogenannte Reibzeug, ein mit Zinnamalgame bestrichenes Lederkissen, gepreßt wird. Dadurch entsteht auf dem Reibzeug negative, auf der Glasscheibe positive Elektrizität. Letztere gelangt durch die Drehung auf die entgegen-

gesetzte Seite. Dort sind zu beiden Seiten der Glasscheibe mehrere Spitzen angebracht, die zu einer isoliert stehenden Metallkugel, dem sogenannten Konduktor, führen. Durch Influenz entsteht nun im Konduktor positive, in den Spitzen negative Elektrizität; letztere strömt gegen die Glasscheibe aus und macht sie wieder unelektrisch. Die Reibungselektriermaschine hat nur noch historisches Interesse; sie ist jetzt vollkommen verdrängt durch die Influenzmaschinen [§ 167].

§ 166. **Ansammlungsapparate.** Auf Influenz beruhen auch die Apparate, welche die Ansammlung größerer Elektrizitätsmengen ge-

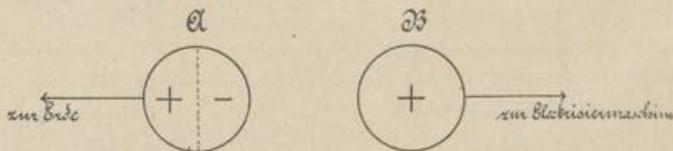


Fig. 139.

statten. Ein solcher Apparat, auch Kondensator genannt, besteht aus zwei sich nahe gegenüberstehenden Leitern (Leitern), welche durch eine isolierende Zwischenschicht („Dielektricum“) voneinander getrennt sind. *A* und *B* (Fig. 139) seien z. B. zwei solche

durch Luft getrennte Konduktoren; *B* sei mit einer Elektrisiermaschine verbunden, *A* zur Erde abgeleitet („geerdet“). Wäre der Konduktor *B* nur allein vorhanden, so könnte er durch die Maschine nur so viel Elektrizität (angenommen positive) zugeführt erhalten, bis auf ihm dasselbe Potential erreicht ist wie auf der Maschine. Steht ihm aber der geerdete Konduktor *A* gegenüber, so entsteht auf diesem durch Influenz positive und negative Elektrizität. Erstere, die ja „frei“ ist, fließt zur Erde ab; letztere wird durch die positive Elektrizität von *B* gebunden, bindet aber rückwärts auch einen Teil der Elektrizität von *B*. Hierdurch wird aber die freie Elektrizität von *B*, d. h. solche, die nach außen wirken kann, verringert; mit andern Worten, das Potential von *B* sinkt, dafür wächst aber wieder seine Kapazität [§ 161], so daß er jetzt mehr Elektrizität von der Elektrisiermaschine aufnehmen kann als vorher, nämlich soviel, bis er deren Potential wieder erreicht. Entfernt man dann *A*, so ist auf *B* jetzt nur freie Elektrizität vorhanden, deren Menge und somit auch Potential weit höher ist, als es bei einfacher Ladung möglich gewesen wäre. Die Kapazität eines Leiters wird also durch die Nachbarschaft eines anderen, geerdeten, Leiters erhöht. Gewöhnlich bezeichnet man *B* als Kollektor¹, *A* als Kondensator² (im engeren Sinne), da ja durch *A* eine „Verdichtung“ der Elektrizität auf *B* stattfindet.

Unter Kapazität eines Kondensators versteht man diejenige Elektrizitätsmenge, die nötig ist, um den Kollektor auf das Potential 1 zu laden, während der Kondensator (im engeren Sinne) geerdet ist. Diese Kapazität wächst mit der Größe der Konduktoren und nimmt ab mit ihrer Entfernung; sie ist aber auch wesentlich von der Natur des Dielektriums abhängig. Letzteres wird verständlich, wenn man annimmt, daß die elektrische Energie durch Bewegungen des Lichtäthers fortgepflanzt wird, wobei die Moleküle der Dielektrica eine wichtige Rolle spielen [vgl. § 218]. Die Zahl, welche angibt, wieviel mal mehr Elektrizität der Kollektor aufnehmen kann, wenn Luft durch eine gleichdicke Schicht eines anderen Dielektriums ersetzt ist, heißt Dielektrizitätskonstante; sie ist z. B. für Glas 4—8, für Hartgummi 2—3, für Glimmer 6—8. Man kann also auch sagen, die Kapazität eines Leiters ist direkt proportional der Dielektrizitätskonstante des umgebenden Isolators.

Der einfachste Kondensator ist die FRANKLINSche Tafel, eine einfache Glastafel, die beiderseits mit Stanniol belegt ist, so jedoch, daß ein breiter Rand frei bleibt (damit keine Funken überspringen). Die viel angewandte Leidener Flasche (Fig. 140) ist ein Glasgefäß, das innen und außen bis in die Nähe des oberen Randes mit Stanniol belegt ist. Hier ist das Glas das Dielektrikum, die innere Belegung der Kollektor, die äußere der Kondensator (im engeren Sinne).

¹ colligo sammeln. — ² condenseo verdichten.

Um die Flasche bequem laden zu können, ist mit der inneren Belegung eine Metallstange verbunden, die mit einem Knopfe endigt. Man ladet eine solche Leidener Flasche, indem man die äußere Belegung mit der Erde und den Knopf mit einer Elektrizitätsquelle verbindet. Da die erreichbare Spannung von der



Fig. 140.

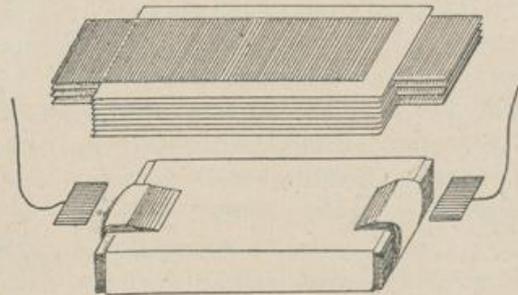


Fig. 141.

Größe der Belegungen abhängt, vereinigt man zweckmäßig mehrere Flaschen zu einer sog. Leidener Batterie, indem man die äußeren Belegungen auf eine gemeinschaftliche leitende Unterlage stellt und die Knöpfe der inneren Belegungen miteinander oder mit einem Hauptknopfe verbindet. Ein handlicher Kondensator von großer Kapazität ist ferner der FIZEAUsche Kondensator, der namentlich bei Funkeninduktoren zur Anwendung kommt. Er besteht aus einer großen Zahl paraffingetränkter Papierblätter, die mit Stanniolstreifen belegt sind; letztere ragen abwechselnd nach einer Seite über die Papierblätter hinaus und sind so miteinander verbunden, daß alle paarigen und alle unpaarigen Blätter je eine große Metallbelegung bilden. Fig. 141 zeigt diese Anordnung sowie die Art der Verbindung mit dem zu- und ableitenden Drahte.

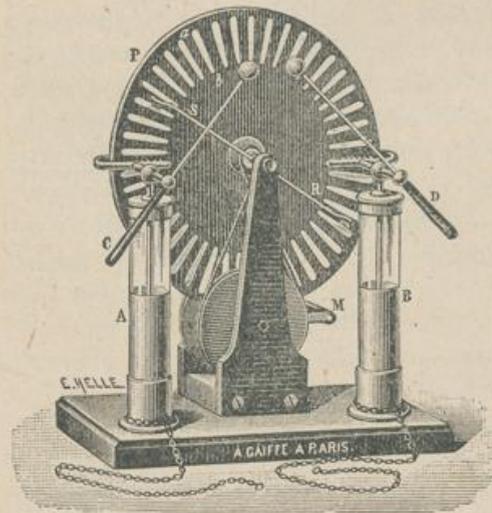


Fig. 142.

aus Stanniol (z. B. *ab*) beklebt sind. Beide Scheiben werden von zwei mit Spitzen versehenen Metallgabeln umfaßt, die mit zwei an

§167. **Influenzelektrisierungsmaschinen.** Diese von HOLTZ und TÖPLER gleichzeitig erfundenen Maschinen dienen zur Erzeugung größerer Mengen von statischer Elektrizität. In neuerer Zeit haben sich besonders die selbsterregenden WIMSHURSTmaschinen eingebürgert (Fig. 142). Diese bestehen aus zwei in entgegengesetzter Richtung rotierenden Glas- oder Hartgummischeiden, die beide mit zahlreichen Sektoren

den Handgriffen C und D befestigten Konduktorkugeln sowie mit zwei Leidener Flaschen (A und B) in Verbindung stehen. Vor jeder Scheibe befindet sich ferner ein sogenannter Ausgleicher oder Anreger (in Fig. 142 sieht man nur den vorderen RS , während der hintere, senkrecht zu diesem stehende unsichtbar ist), an dessen Enden Metallpinsel sitzen, die auf den Stanniolbelägen schleifen.

Zur ungefähren Erklärung der (in Wirklichkeit viel komplizierteren) Verhältnisse diene die schematische Fig. 143, in der der innere und äußere Kreis die vordere bzw. hintere Scheibe vorstellt, ab den vorderen, cd den hinteren Ausgleicher. Zunächst sei angenommen, daß sich nur der innere Kreis in der Pfeilrichtung bewegt, und daß der Sektor bei a etwas negative Elektrizität (etwa vom letzten Gebrauch her) besitzt. Geht derselbe an den Sektoren des äußeren Kreises vorbei, so entsteht durch Influenz in diesen positive und negative Elektrizität, die sich aber bald wieder ausgleichen, wenn der Sektor vorbei ist. Kommt letzterer aber an die Stelle d , wo der Ausgleicher cd die hintere Scheibe berührt, so entsteht dort gebundene positive Elektrizität, während die freie negative durch den metallischen Ausgleicher nach c hinströmt. Da sich nun auch der äußere Kreis (die hintere Scheibe) in umgekehrter Richtung wie der innere (die vordere Scheibe) dreht, so entsteht in allen ihren Sektoren links von d positive, in denen rechts von c negative Elektrizität. Kommt nun einer der negativ geladenen hinteren Sektoren an die Stelle b , wo der vordere Ausgleicher die vordere Scheibe berührt, so influenziert er hier positive (gebundene) Elektrizität, während die negative durch den Ausgleicher nach a abströmt, welches ja die Stelle war, von der wir ausgingen. Zugleich ziehen die bei δ vorübergehenden positiven Sektoren der hinteren Scheibe negative Elektrizität an und stoßen die positive durch den Ausgleicher nach d . Es resultiert daraus eine immer stärkere Ladung der Sektoren derart, wie es in der Figur durch die Zeichen $+$ und $-$ angedeutet ist. In zwei Quadranten (I und III) ist also die Elektrizität beider Scheiben gleichnamig. Dort bringt man die Spitzenkämme an, die dann den mit ihnen verbundenen Konduktoren fortwährend positive bzw. negative Elektrizität zuführen.

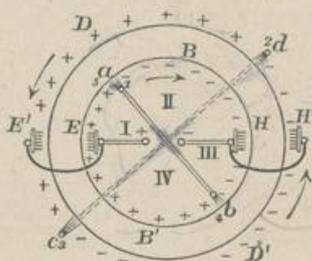


Fig. 143.

§ 168. **Entladung.** Ein elektrisch geladener Körper kann einmal dadurch entladen werden, daß man ihn mit einem anderen Körper von niedrigerem Potential, insbesondere mit der Erde, leitend verbindet; dann fließt die Elektrizität in kontinuierlichem Strom ab, auf dessen Gesetze im nächsten Abschnitt eingegangen werden soll. Ist jedoch die Spannung der Elektrizität genügend hoch¹, so findet eine Entladung auch durch einen Isolator hindurch statt. Und zwar erfolgt dieselbe, wenn sich in der Nähe des geladenen Körpers ein

¹ Bei Entladung zwischen 2 Kugeln von 1 cm Durchmesser ist z. B. für einen Funken von 0,1 bzw. 1 bzw. 10 mm Länge eine Spannung von ca. 1000 bzw. 5000 bzw. 30000 Volt erforderlich.

anderer Körper mit entgegengesetzter Elektrizität befindet (die eventuell erst durch Influenz entsteht), in Gestalt des elektrischen Funkens. Man spricht dann auch von einer disruptiven¹ Entladung. Dieselbe dauert außerordentlich kurze Zeit (ca. $\frac{1}{250000} - \frac{1}{500000}$ Sekunde) und ist bei nicht zu großem Widerstande oszillierend², d. h. besteht aus einer Reihe sehr schnell hin und her gehenden Einzelentladungen, deren Dauer nur Milliontel von Sekunden beträgt [vgl. § 215]. Die Wirkungen des elektrischen Funkens sind sehr mannigfaltig. Abgesehen von der Lichtwirkung, die besonders schön in GEISSLER'schen Röhren [§ 206] zutage tritt, kann er feste Gegenstände durchbohren, chemische Zersetzungen oder Verbindungen herbeiführen (z. B. Bildung von Ozon aus dem Sauerstoff der Luft), beeinflußt in eigentümlicher Weise den tierischen Organismus (sog. elektrische Schläge, die eventuell tödlich werden können) usw.

Kann wegen zu großer Entfernung beider Leiter keine Funkenentladung zustande kommen, so entstehen beim Ausströmen von hochgespannter Elektrizität an Stellen großer Dichte, besonders an Spitzen, bei positiver Ladung Büschel violetter Strahlen, sog. Büschellicht, bei negativer kleine Lichtpünktchen (sog. Spitzenlicht). Bei starker Lufterlektrizität werden diese Erscheinungen bisweilen an den Spitzen hoher Gegenstände beobachtet (St. Elmsfeuer). Das sog. Glimmlicht ist eine schwache Lichthülle, welche an spitzen Gegenständen, besonders an den Elektroden in GEISSLER-Röhren vorkommt.

§ 169. **Blitzableiter.** Der Blitz ist ein elektrischer Funke im großen, der durch disruptive Entladung ungleichnamiger Lufterlektrizität oder; beim sogenannten Einschlagen, durch Vereinigung von Lufterlektrizität mit der entgegengesetzten eines irdischen Gegenstandes, besonders des Grundwassers, entsteht. Der Donner entspricht seinerseits dem Knall, der den elektrischen Funken begleitet, und muß wegen der geringeren Geschwindigkeit des Schalles natürlich später wahrgenommen werden. Menschen, welche direkt vom Blitze getroffen werden, erleiden ausgedehnte Verbrennungen und gehen meist zugrunde. Aber auch die Nähe eines einschlagenden Blitzes ist gefährlich wegen des sogenannten Rückschlages, d. i. die plötzliche Wiederherstellung des durch Influenz (des Blitzes) gestörten elektrischen Gleichgewichts. Der von FRANKLIN erfundene Blitzableiter bietet dem zustande gekommenen Blitze eine bequeme (metallische) Bahn bis zum Grundwasser hin, leitet ihn also von der Umgebung ab. Ob er auch das Zustandekommen eines Blitzes verhüten kann, indem durch Spitzenausstrahlung [§ 164] ein Ausgleich der elektrischen Spannungen zwischen Wolken und Erdboden stattfindet, wird heute für fraglich gehalten.

¹ *disrumpe* zerreißen, zerschmettern. — ² *oscillum* Schaukei.

B. Strömende Elektrizität.

a. Der galvanische Strom und seine Gesetze.

§ 170. **Galvani und Volta.** Im Jahre 1780 wurde der Bologneser Professor LUIGI GALVANI von einem Assistenten aufmerksam gemacht, daß Froschschenkel, mit einem Skalpell berührt, jedesmal zuckten, wenn Funken aus dem Konduktor einer nahen Elektrisiermaschine gezogen wurden. Während dies heute durch den Rückschlag erklärt wird, sah GALVANI darin eine Äußerung der tierischen Elektrizität und stellte zahlreiche Versuche darüber an. Als er u. a. enthäutete Froschschenkel mittels kupferner Drähte an einem Eisengeländer aufhängte, zuckten dieselben lebhaft, wenn sie das Geländer berührten. Auch dies schrieb GALVANI der tierischen Elektrizität zu. ALESSANDRO VOLTA (Professor in Pavia) dagegen erklärte diese Erscheinung so, daß durch die Berührung der beiden Metalle Elektrizität entsteht, welche durch die Schenkel fließt und sie zum Zucken bringt. Diese VOLTASche Erklärung hat am meisten Anklang gefunden. Doch ist sie nur zum Teil richtig, und auch GALVANI hatte recht; denn in der Tat existieren in den lebenden Nerven und Muskeln (sowie auch in anderen Körpergeweben) elektrische Spannungen. Jedenfalls gebührt VOLTA das Verdienst, eine neue Entstehungsart der Elektrizität gefunden zu haben. Und wenn man jetzt auch die Entstehung des elektrischen Stromes nicht mehr auf die einfache Berührung zweier Leiter, sondern auf die dabei eintretenden chemischen Vorgänge zurückführt, so bleiben die von VOLTA gefundenen Tatsachen trotzdem bestehen.

§ 171. **Gesetze der Kontaktelektrizität.** VOLTA fand also, daß bei Berührung zweier verschiedener Metalle das eine positiv, das andere negativ elektrisch wird; heute sagen wir, daß hierbei eine Potentialdifferenz entsteht. Die (ihrem Wesen nach unbekannt) Kraft, welche diese Potentialdifferenz erzeugt, heißt elektromotorische Kraft [§ 173]. VOLTA fand nun weiter, daß sich die Metalle und Kohle, die sog. Leiter erster Klasse in einer Reihe so anordnen lassen, daß jeder in der Reihe voranstehende Körper bei Berührung mit einem nachfolgenden ein höheres Potential annimmt, also ihm gegenüber positiv wird. Diese VOLTASche Spannungsreihe lautet (etwas modifiziert):
 + Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Platin, Kohle —
 Die Potentialdifferenz ist nun um so größer, je weiter die betreffenden Körper in dieser Reihe auseinanderstehen. Sie ist aber unabhängig von der Form und Größe der sich berührenden Platten und wird auch nicht geändert, wenn noch andere Metalle dazwischengeschaltet sind; durch eine Kombination von *Zn*, *Fe*, *Ag*, *Pt* wird also dieselbe Spannungsdifferenz erzielt wie zwischen *Zn* und *Pt*. Daraus geht auch hervor, daß, wenn ausschließlich Leiter erster Klasse ring-

förmig verbunden sind, in diesem Kreise kein Strom möglich ist, weil ja jedes Metall gleichzeitig als Anfangs- und Endglied der Reihe betrachtet werden kann, die Potentialdifferenz also $= 0$ ist.

Diesen Gesetzen der Spannungsreihe gehorchen aber die Leiter zweiter Klasse, zu denen besonders Flüssigkeiten (Säuren und Salzlösungen) gehören, nicht. Bei einer Kombination von Leitern erster und zweiter Klasse ist also die Potentialdifferenz der Endglieder nicht gleich der algebraischen Summe derjenigen der Zwischenglieder, so daß hier die Anordnung zu einem geschlossenen Kreise möglich ist. Taucht nämlich ein Metall in eine Flüssigkeit, so wird das herausstehende Ende meist negativ elektrisch, die Flüssigkeit und dadurch auch das eingetauchte Ende meist positiv; und zwar ist die Spannungsdifferenz um so größer, je weiter vorn in der Spannungsreihe das Metall steht; *Zn* wird also am stärksten negativ, *Cu* bedeutend schwächer. Tauchen nun *Zn* und *Cu* zusammen in eine Flüssigkeit (Fig. 144), so geht die starke positive Elektrizität des unteren Zinkendes

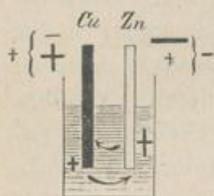


Fig. 144.

durch die Flüssigkeit zum Kupfer und trifft an dessen hervorstehendem Ende mit schwach negativer Elektrizität zusammen, macht es daher schwach positiv. Umgekehrt geht die schwach positive Elektrizität des unteren Kupferendes bis zum oberen Zinkende und schwächt dessen stark negative Elektrizität so, daß es schwach negativ elektrisch wird. Im allgemeinen wird

von zwei in eine Flüssigkeit tauchenden Metallen das in der VOLTASCHEN Spannungsreihe voranstehende an seinem freien Ende negativ, das weiter hinten stehende positiv elektrisch.

§ 172. **Galvanische Elemente.** Die Verbindung zweier Metalle mit einer Flüssigkeit heißt galvanisches Element oder galvanische Kette. Sind die beiden Metalle außerhalb der Flüssigkeit durch einen sog. Schließungsdraht verbunden, so ist die Kette geschlossen, sonst offen. In einer geschlossenen Kette fließt beständig ein elektrischer Strom, der durch die fortwährend wirkende elektromotorische Kraft andauernd im Gange erhalten wird. Man nennt diesen Strom auch dem Entdecker zu Ehren galvanischen Strom [vgl. § 188 Anm.]. Der (positive) Strom fließt z. B. im Schließungsdraht eines Zink-Kupfer-Elements vom positiven Kupfer zum negativen Zink. Im Elemente selbst muß er natürlich vom Zink zum Kupfer fließen, damit der Stromkreis geschlossen ist. Die freien Enden der Metalle eines Elementes, bzw. die Enden der damit verbundenen Drähte, heißen Pole oder Elektroden; diejenige Elektrode, von welcher der Strom herkommt, beim positiven Strom also die positive, wird speziell Anode genannt, die andere

Kathode¹. Unter Anode und Kathode ohne nähere Bezeichnung versteht man stets den äußeren positiven oder negativen Pol. Durch Vereinigung mehrerer Elemente entsteht eine galvanische Batterie.

Die älteste Form derselben ist die Voltasche Säule; sie besteht aus abwechselnd übereinandergeschichteten Zink- und Kupferplatten, zwischen denen immer befeuchtete Tuchlappen liegen. Die Reihenfolge ist also hier Zink, Feuchtigkeit, Kupfer; Zink, Feuchtigkeit, Kupfer usw. — Eine Abart ist die ZAMBONISche Säule, die aus 1000—2000 Plattenpaaren von unechtem Gold- und Silberpapier zusammengesetzt ist, wobei die kupfer- bzw. zinnhaltigen Metallseiten jedes Paares gegeneinander sehen. Die im Papier stets enthaltene Feuchtigkeit bildet die erforderliche Flüssigkeit.

Eine nähere Beschreibung einiger moderner galvanischer Elemente erfolgt im § 188. Zunächst sollen einige für das Verständnis des galvanischen Stroms notwendige Grundbegriffe erläutert werden, nämlich elektromotorische Kraft, Stromstärke und Widerstand.

§ 173. Als **elektromotorische Kraft** (E) bezeichnet man diejenige (ihrem Wesen nach unbekannt) Kraft, die Elektrizität in Bewegung setzt. Sie ist z. B., wie wir sahen, wirksam bei der Berührung zweier verschiedener Metalle, indem sie die in denselben bis dahin im Gleichgewicht bzw. neutralen Zustande befindliche Elektrizität so verschiebt, daß eben ein Metall positiv, das andere negativ elektrisch wird. Die elektromotorische Kraft ist also die Ursache einer Potentialdifferenz, aber nicht identisch mit dieser [vgl. § 177]. Eine Potentialdifferenz ist nicht möglich ohne eine elektromotorische Kraft; wohl aber können elektromotorische Kräfte ohne Potentialdifferenzen auftreten (z. B. bei der Induktion). Die durch die elektromotorische Kraft erzeugte Potentialdifferenz ist am größten an den Polen der Stromquelle. Sind diese durch eine überall gleichmäßige Leitung verbunden, so findet ein kontinuierlicher Abfall des Potentials oder, wie man auch sagt, ein kontinuierlicher Spannungsverlust vom positiven zum negativen Pole hin statt. Ist jedoch an einer Stelle der Leitung ein Widerstand eingeschaltet, so herrscht zu beiden Seiten desselben eine größere Potentialdifferenz, als sie ohne den Widerstand an den betreffenden Stellen existieren würde (weil eben zur Überwindung des Widerstandes elektromotorische Kraft verbraucht wird); und bei unendlich großem Widerstand, d. h. bei völliger Unterbrechung der Leitung, ist die Potentialdifferenz ein Maximum. Wegen ihrer nahen Verwandtschaft mißt man elektromotorische Kräfte ebenso wie Potentialdifferenzen durch ein gemeinschaftliches Maß, nämlich Volts [§ 160]. Die Messung selbst erfolgt durch Elektrometer [§ 162] bzw. in der Praxis durch Voltmeter [§ 192].

§ 174. Als **Stromstärke** oder Stromintensität (I), bezeichnet

¹ ὁδὸς Weg, ἀνά aufwärts, κατά hinab. Also Elektrode = Weg der Elektrizität, Anode = Eintrittsstelle, Kathode = Austrittsstelle des elektrischen Stromes.

man diejenige Elektrizitätsmenge, die in 1 Sekunde durch irgend-einen Querschnitt der Strombahn hindurchgeht¹; also $I = \frac{e}{t}$. Um die wichtige Tatsache, daß die Stromstärke an allen Stellen eines (unverzweigten) Stromkreises gleich ist, dem Verständnis näher zu bringen sei an die Verhältnisse bei strömendem Wasser erinnert. Würde nämlich bei einem Flusse durch irgendeinen Querschnitt seines Bettes weniger Wasser hindurchgehen als durch einen anderen, so würde Stauung eintreten, was eben nicht der Fall ist. Bei engem Querschnitt fließt das Wasser schneller; die Menge, die hindurchgeht, bleibt somit dieselbe. Genau so ist es beim elektrischen Strom, nur mit der Abweichung, daß hier die Elektrizität durch enge Querschnitte nicht schneller fließt, sondern dichter wird. Ist also, der Stromkreis an einer Stelle verengt, so ist hier die Stromdichte (d. h. das Verhältnis zwischen Stromstärke und Querschnitt) größer, die Stromstärke aber bleibt dieselbe. Die Stromstärke kann nun durch irgendeine von ihr abhängige Wirkung des elektrischen Stromes gemessen werden. So hat z. B., wie wir noch sehen werden, die Stromstärke einen Einfluß auf die Größe der Ablenkung einer Magnetnadel auf die Menge der Zersetzungsprodukte, die der Strom erzeugt, usw. Als praktische Einheit hat man diejenige Stromstärke gewählt, die ein konstanter Strom besitzt, der aus einer Silbersalzlösung in 1 Sekunde 1,118 mg Silber abscheidet [§ 186]. Diese Einheit heißt dem gleichnamigen Physiker zu Ehren ein **Ampère**. Die Stromstärke 1 Ampère besitzt derjenige Strom, bei dem die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb im Verlaufe von 1 Sekunde durch den Querschnitt des Stromkreises geht². Also $1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Sekunde}}$. Zum Messen der Stromstärke dienen in der Praxis die Ampèremeter [§ 192].

§ 175. Unter **elektrischem Widerstand** versteht man alles, was die Bewegung des elektrischen Stromes schwächt, also die Stromstärke vermindert. Der Widerstand (W) ist offenbar um so größer, je länger und je schmaler die Strombahn ist; er ist also direkt proportional der Länge (l), umgekehrt proportional dem Querschnitt (q) des Leiters. Der Widerstand ist aber natürlich auch von der Natur des Leiters abhängig; gute Leiter setzen dem elektrischen Strom einen geringen Widerstand entgegen, schlechte Leiter einen großen. Man bezeichnet

¹ Zuweilen wird Stromstärke mit elektromotorischer Kraft verwechselt, da „Stärke“ an „Kraft“ denken läßt. Besser wäre daher vielleicht die Bezeichnung „Sekundenstrom“ für Stromstärke; doch hat sich der letztere Ausdruck so eingebürgert, daß man sich mit ihm eben abfinden muß. — ² Die absolute elektrostatische Einheit der Stromstärke ist vorhanden, wenn die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge [§ 158] in 1 Sekunde durch den Querschnitt des Leiters fließt. Dimension: $m^{1/2}l^{3/2}t^{-2}$ bzw. $\text{gr}^{1/2}\text{cm}^{3/2}\text{sec}^{-2}$ [vgl. § 191].

Widerstand von + auf

dies Verhalten als spezifischen Widerstand (k) und berechnet denselben gewöhnlich für einen Draht von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt. Den kleinsten spezifischen Widerstand haben Metalle, besonders Silber und Kupfer, einen erheblich größeren schon Kohle, und einen noch weit größeren Flüssigkeiten [vgl. § 103]. Der elektrische Widerstand wird demgemäß durch die Formel $W = \frac{l}{q} k$ ausgedrückt.

Der spezifische Widerstand (somit auch sein reziproker Wert, die spezifische Leitfähigkeit) hängt auch von der Temperatur ab. Im allgemeinen wird der Widerstand der Metalle mit steigender Temperatur größer, der von Elektrolyten [§ 185] geringer. Warme Lösungen leiten also besser als kalte, so daß man z. B. für medizinische Zwecke die Elektroden mit warmer Salzlösung anfeuchtet. Ebenfalls kleiner bei steigender Temperatur wird auch der Widerstand der Kohle und der Oxyde einiger Erdmetalle (Magnesium, Thorium, Osmium), was z. B. bei der Nernstlampe praktisch verwertet wird. Erwähnenswert ist noch, daß die an sich geringe Leitfähigkeit des metallischen Selens durch Belichtung, insbesondere mit rotem Lichte, verstärkt wird; hierauf beruht u. a. eine Methode der Fernphotographie.

Als praktische Einheit des Widerstandes hat man den Widerstand gewählt, den ein Quecksilberfaden von 1,063 m Länge und 1 qmm Querschnitt dem Strome bietet. Diese Widerstandseinheit wird nach dem gleichnamigen Physiker ein Ohm genannt. Die Messung von Widerständen kann auf verschiedene Weise erfolgen. Bei der Substitutionsmethode z. B. wird zuerst der unbekannte Widerstand in eine Strombahn eingeschaltet und die Stromstärke an einem Meßinstrument abgelesen; dann wird der unbekannte Widerstand durch einen Widerstandskasten (s. u.) ersetzt, der so reguliert wird, daß wieder dieselbe Stromstärke herrscht; sein Widerstand ist somit jetzt gleich dem unbekanntem. Die beste Methode ist aber die Messung mit der WHEATSTONEsehen Brücke [§ 178].

Apparate, welche in bequemer Weise die Einschaltung von Widerständen in die Strombahn gestatten, heißen Rheostate¹. Von den vielen Arten seien hier nur zwei angeführt.

Die Stöpselrheostate oder Widerstandskästen, deren Schema Fig. 145 zeigt, sind Kästen, auf deren Deckel dicke Metallklötze in geringem Abstände voneinander liegen. Je zwei benachbarte Klötze sind im Innern des Kastens durch einen, meist spiralförmig aufgerollten, Draht von bestimmtem Widerstand leitend verbunden. Außerdem kann aber noch dadurch eine Verbindung zwischen ihnen hergestellt werden, daß in die Lücken zwischen ihnen dicht anschließende Metallstöpsel eingesetzt werden. In letzterem Falle geht der Strom natürlich durch die Stöpsel, weil dieser Weg für ihn einen geringeren Wider-

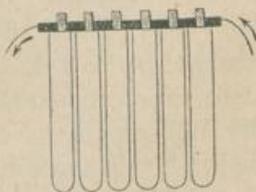


Fig. 145.

Stöpsel

¹ τὸ ῥέον das Fließende, ἵστημι zum Stehen bringen, hemmen.

stand bietet [§ 178]. Wird aber ein Stöpsel herausgezogen, so muß der Strom durch den zugehörigen Drahtkreis fließen. Solche Stöpselrheostate gestatten daher die Einschaltung genau abgemessener bekannter

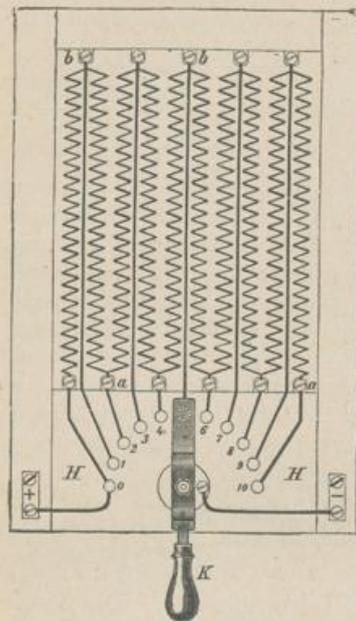


Fig. 146.

Widerstände in die Strombahn. — Zuweilen kommt es aber nur darauf an, rasch Widerstände einzuschalten, ohne ihre Größe genau zu kennen. Diesem Zwecke dienen z. B. Kurbelrheostate. Bei der in Fig. 146 abgebildeten Form sind eine Anzahl Metallspiralen in einem Rahmen befestigt und enden in Metallknöpfen, auf denen eine Messingfeder mittels des Griffes *K* verschoben werden kann. Das eine Ende der Leitung ist mit dem Knopf *a*, das andere mit der Messingfeder verbunden, so daß je nach der Stellung der letzteren eine verschiedene Zahl von Spiralen (in Fig. 146 z. B. 5) und somit auch entsprechende Widerstände eingeschaltet sind.

§ 176. **Ohmsches Gesetz.** Über die gegenseitigen Beziehungen zwischen Stromstärke, elektromotorischer Kraft und Widerstand gibt das berühmte Ohmsche Gesetz Aufschluß, welches der Grundpfeiler der ganzen Elektrotechnik ist. Es lautet: Die Stromstärke (*I*) ist direkt proportional der

elektromotorischen Kraft (*E*), umgekehrt proportional dem Widerstande (*W*), also

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

Hieraus folgt ohne weiteres

$$E = I \cdot W. \quad W = \frac{E}{I}.$$

Die bereits erwähnten praktischen Einheiten für Stromstärke, elektromotorische Kraft und Widerstand sind nun so gewählt, daß

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{\text{Ohm}} \text{ bzw. } 1 \text{ Milliampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1000 \text{ Ohm}}.$$

Man kann also 1 Ampère auch definieren als die Stromstärke, die entsteht, wenn die elektromotorische Kraft der Stromquelle 1 Volt und der Widerstand im Stromkreise 1 Ohm beträgt. Analog 1 Volt als diejenige elektromotorische Kraft, die bei 1 Ohm Widerstand die Stromstärke 1 Ampère ergibt. Und 1 Ohm als den Widerstand, der vorhanden ist, wenn bei einer elektromotorischen Kraft 1 Volt die Stromstärke 1 Ampère entsteht.

Der gesamte Stromkreis setzt sich nun aus zwei Teilen zusammen: aus dem inneren Stromkreis, das ist die Strombahn innerhalb der

Stromquelle (Element, Dynamomaschine usw.) und aus dem äußeren Stromkreis, das ist der Schließungsbogen. Dementsprechend ist zu unterscheiden ein innerer oder wesentlicher Widerstand (w_i) und ein äußerer oder außerwesentlicher Widerstand (w_a). Das OHMSche Gesetz heißt also genauer

$$I = \frac{E}{w_i + w_a}$$

Aus dieser Formel ergeben sich wichtige praktische Folgerungen. Will man größere Stromintensität erzielen, als ein einziges Element liefern kann, so verbindet man mehrere Elemente zu einer Batterie. Hierbei kann man entweder den positiven Pol des einen Elements mit dem negativen des nächsten verbinden (Hintereinander-, Reihen- oder Serienschaltung), oder alle positiven Pole miteinander und ebenso alle negativen vereinigen (Nebeneinander- oder Parallelschaltung). Im letzteren Falle vergrößert man bei n Elementen die Flächen der Elektroden um das n fache. Die elektromotorische Kraft bleibt hierbei dieselbe wie bei 1 Elemente, da sie ja von der Größe der Metallplatten unabhängig ist [§ 171]; dagegen wird der innere Widerstand um das n fache kleiner, weil ja jetzt der Strom durch eine n mal breitere Flüssigkeit geht. Es ist daher hier $I = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + w_a}$.

Ist der äußere Widerstand so gering daß er vernachlässigt werden kann, so ist also $I = n \cdot \frac{E}{w_i}$, d. h. man erzielt eine n fache Intensität.

Ist aber w_a groß, so wird die Intensität nicht wesentlich vergrößert. In diesem Falle bedient man sich der Hintereinanderschaltung. Hierbei wird die elektromotorische Kraft um das n fache vergrößert, aber auch der innere Widerstand. Es ist also $I = \frac{nE}{nw_i + w_a}$. Kann nw_i gegen-

über w_a vernachlässigt werden, so ist $I = \frac{nE}{w_a}$, d. h. die Intensität wird um das n fache vergrößert. Also bei großem inneren Widerstande schaltet man die Elemente nebeneinander, bei großem äußeren hintereinander. Ist der äußere Widerstand aber im Verhältnis zum inneren weder sehr groß noch sehr klein, so wendet man eine gemischte Schaltung an. Durch Rechnung läßt sich zeigen, daß bei einer gegebenen Zahl von Elementen diejenige Schaltung die größte Stromstärke liefert, bei welcher der innere Widerstand dem äußeren möglichst gleichkommt.

Das OHMSche Gesetz gilt auch für jeden einzelnen Teil eines Stromkreises. Man kann daher mit seiner Hilfe die Potentialdifferenz oder den Spannungsunterschied zwischen zwei Punkten der Strom-

bahn berechnen, wenn der Widerstand auf dieser Strecke und die Stromstärke bekannt ist. Es ist nämlich $e = I \cdot w$. Während es sich also in der analogen obigen Formel $E = I \cdot W$ um die elektromotorische Kraft (E) und den gesamten Widerstand im Stromkreise (W) handelt, kommt hier nur die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten der Strombahn (e) und der lokale Widerstand dieser Stelle (w) in Betracht. Die Stromstärke ist dagegen in beiden Fällen dieselbe, da sie ja überall in einem Stromkreise gleich ist.

§ 177. **Klemmenspannung.** Eine Potentialdifferenz ist, wie bereits [§ 173] erwähnt, zwar eine Folge der elektromotorischen Kraft, darf aber mit ihr nicht identifiziert werden. Selbst an den Polen eines geschlossenen Elements (bzw. einer Dynamomaschine usw.) ist die Potentialdifferenz — hier gewöhnlich Klemmenspannung genannt (nach den Klemmen, die zur Befestigung des Schließungsdrahtes dienen) — nicht gleich der elektromotorischen Kraft, sondern kleiner. Die elektromotorische Kraft hat ja nicht nur die Aufgabe, die Elektrizität durch den äußeren Stromkreis, also vom positiven zum negativen Pol der Stromquelle zu schaffen, sondern sie muß dieselbe auch durch den inneren Stromkreis, also durch das Element usw. selbst hindurch treiben. Es ist also $E = I (w_a + w_i)$. Die Klemmenspannung dagegen, die nur den Strom im äußeren Schließungskreise zu unterhalten hat, ist $e = I \cdot w_a$, also um so viel kleiner als die elektromotorische Kraft, wie der Spannungsverlust im Inneren des Elementes usw. ($I \cdot w_i$) beträgt. Ist allerdings der äußere Widerstand unendlich groß — was z. B. der Fall ist, wenn das Element nicht durch einen Schließungsbogen geschlossen ist —, dann kann die Klemmenspannung für praktische Zwecke der elektromotorischen Kraft gleichgesetzt werden; denn dann kommt eben $I \cdot w_i$ gegenüber $I \cdot w_a$ nicht in Betracht.

§ 178. **Stromverzweigungen.** Für Stromverzweigungen gelten die beiden KIRCHHOFFSchen Gesetze:

1. An jedem Verzweigungspunkte ist die Summe der Stromstärken aller ankommenden Ströme gleich der Summe der Stromstärken aller abfließenden. Anders ausgedrückt, die algebraische Summe der Stromstärken daselbst ist gleich Null, wenn man nämlich die ankommenden Ströme als positiv, die abfließenden als negativ bezeichnet. Dies Gesetz ist lediglich ein Ausdruck dafür, daß in einem elektrischen Strome keine „Stauung“ eintreten kann [§ 174].

2. In jedem geschlossenen Teile eines Stromnetzes ist die Summe aller elektromotorischen Kräfte gleich der Summe aller Spannungsverluste (bzw. gleich der Summe aller

Produkte aus Stromstärke und Widerstand für jeden Teil der Leitung). Hierbei sind solche elektromotorischen Kräfte, die gleichgerichtete Ströme erzeugen, mit gleichen Vorzeichen zu versehen, andernfalls mit entgegengesetzten. Dieses Gesetz ist eine Verallgemeinerung des OHMSchen Gesetzes.

Betrachten wir zunächst eine einfache Verzweigung, wie sie in Fig. 147

dargestellt ist. Zwischen Punkt A und B herrscht eine bestimmte Potentialdifferenz e , ganz gleich, ob der Strom auf dem oberen oder unteren Wege von A nach B gelangt [§ 160]. Es ist also nach § 176

$$e = i_1 w_1 = i_2 w_2,$$

folglich

$$i_1 : i_2 = w_2 : w_1.$$

In Worten: Die Stromstärken der Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände der Zweigbahnen. Hierauf beruhen ja auch die schon erwähnten Stöpselrheostate.

Verbindet man die beiden Stromzweige noch durch einen Draht,

so erhält man die sog. WHEATSTONESche Brücke (Fig. 148). Wie aus den Pfeilen sofort hervorgeht, kreuzen sich in der „Brücke“ CD zwei Ströme. Durch geeignete Anordnung der Widerstände in den Strecken 1, 2, 3, 4 kann man bewirken, daß diese sich kreuzenden Ströme sich aufheben, daß also in der

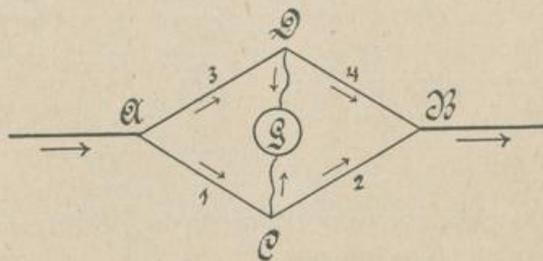


Fig. 148.

Brücke kein Strom herrscht. Ist dies der Fall, dann muß natürlich in den Punkten C und D dasselbe Potential herrschen; denn bestände eine Potentialdifferenz, so würde auch ein Strom zirkulieren [§ 160]. Herrscht aber in C und D dasselbe Potential, so ist auch die Potentialdifferenz zwischen A und D dieselbe wie zwischen A und C , ebenso die Potentialdifferenz zwischen D und B gleich derjenigen zwischen C und B . Anders ausgedrückt, es ist $i_1 w_1 = i_3 w_3$ und $i_2 w_2 = i_4 w_4$. Wenn nun in der Brücke kein Strom herrscht, kann man sich offenbar diesen Draht entfernt denken, ohne daß am Gleichgewicht des Systems etwas geändert wird. Dann muß aber $i_1 = i_2$ und $i_3 = i_4$ sein, weil ja

in derselben Strombahn stets die gleiche Stromstärke herrscht. Berücksichtigt man dies und dividiert die beiden eben angeführten Gleichungen, so erhält man $w_1:w_2 = w_3:w_4$. Unter dieser Bedingung herrscht also in der Brücke kein Strom. Umgekehrt kann man nach dieser Formel, wenn in der Brücke kein Strom herrscht — was sich ja leicht durch ein Galvanometer [§ 192] nachweisen läßt — den Widerstand einer der Zweigbahnen berechnen, wenn die drei anderen Widerstände, bzw. ein Widerstand und das Verhältnis der beiden anderen, bekannt sind. Ist z. B. w_3 der unbekannte Widerstand, dann ist $w_3 = \frac{w_1}{w_2} \cdot w_4$.

Um den Widerstand von Flüssigkeiten mittels der Brückenmethode zu messen, muß man Wechselströme [§ 198] anwenden, da sie sonst zersetzt würden. An Stelle des Galvanometers, das für Wechselströme ungeeignet ist, schaltet man dann in die Brücke ein Telephon ein, das so lange tönt, wie ein Strom durch die Brücke geht.

Eine spezielle Anwendung der WHEAISTONESchen Brücke ist das Bolometer¹, das zur Messung strahlender Wärme dient. Hier bildet ein berußer Metalldraht bzw. -streifen einen Zweig der Meßvorrichtung. Durch Bestrahlung wird sein Widerstand vergrößert [§ 175]; infolgedessen macht das Galvanometer in der Brücke, das vorher durch Regulierung der Zweigwiderstände stromlos gemacht worden ist, einen der absorbierten Strahlungsenergie proportionalen Ausschlag.

b. Wärme-, Licht- und chemische Wirkungen.

§ 179. **Stromarbeit und Stromeffekt.** Die Arbeit, die ein elektrischer Strom leisten kann, muß nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie theoretisch gleich der Arbeit sein, die zur Stromerzeugung notwendig war [vgl. § 160]. Zum leichteren Verständnis des Begriffes Stromarbeit ist ein Vergleich mit strömendem Wasser zweckmäßig. Wird z. B. 1 Kilogramm Wasser 10 Meter gehoben, so ist dazu eine Arbeit von 10 Kilogramm Metern erforderlich. Andererseits leistet diese Wassermenge, wenn sie dieselbe Strecke herunterfällt, die gleiche Arbeit; wenn sie nur 5 Meter fällt, 5 Kilogramm Meter usw. Die von strömendem Wasser geleistete Arbeit ist als proportional dem Gewicht bzw. der Menge des Wassers und der Niveaudifferenz. Genau so liegen die Verhältnisse bei der strömenden Elektrizität. Auch hier ist die Energie des elektrischen Stromes bzw. die von ihm geleistete Arbeit gleich dem Produkt aus Elektrizitätsmenge und Potentialdifferenz (die ja durchaus das Analogon der Niveaudifferenz ist). Wie bereits erwähnt, mißt man nun in der Praxis Elektrizitätsmengen nach Coulombs [§ 158], Potentialdifferenzen nach Volts [§ 160]. Daraus folgt, daß die elektrische Energie bzw. Arbeit sich durch Volts \times Coulombs oder kurz Volt-Coulombs ausdrücken läßt. Bewegt

¹ *Bóllos* Wurf, Strahl.

sich also z. B. eine Elektrizitätsmenge von 100 Coulomb zwischen zwei Punkten, deren Potentialdifferenz 5 Volt beträgt, so leistet der Strom eine Arbeit von 500 Volt-Coulomb. 1 Volt-Coulomb hat denselben Wert wie 1 Joule (§ 12).

Unter Stromeffect versteht man die Stromarbeit pro Sekunde (§ 13). Das praktische Maß des Stromeffectes ist demnach $\frac{1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Sekunde}}$. Da nun 1 Coulomb pro Sekunde nichts anderes ist wie 1 Ampère (§ 174), so nennt man das praktische Maß des Stromeffectes 1 Volt-Ampère. Dieses hat wieder denselben Wert wie 1 Watt, das ja 1 Joule pro Sekunde ist (§ 13).

Es ist also, allgemein ausgedrückt, die Stromarbeit in t Sekunden $= E \cdot I \cdot t$ oder (da nach dem OHMSchen Gesetze $E = I \cdot W$) auch $= I^2 \cdot W \cdot t$ Volt-Coulomb bzw. Joule bzw. Wattstunden (§ 13). Und der Stromeffect ist $= E \cdot I$ bzw. $I^2 W$ Watt.

§ 180. **Joulesche Wärme.** Die Stromarbeit äußert sich stets darin, daß sie den Leiter mehr oder weniger erwärmt. Diese sog. JOULESche Wärme, die von der Stromrichtung ganz unabhängig ist, entspricht als eine Form der Stromarbeit natürlich einer der im vorigen Paragraphen angegebenen Formeln. Gewöhnlich wählt man zu ihrem Ausdruck die Formel $I^2 W \cdot t$ (bzw. für die Zeiteinheit $I^2 \cdot W$). Die Stromwärme ist also proportional dem Widerstand und dem Quadrate der Stromstärke (JOULESches Gesetz). Da 1 Joule = 0,24 Grammkalorien (§ 78), so beträgt die JOULESche Wärme $0,24 \cdot I^2 \cdot W \cdot t$ Grammkalorien.

Nach obiger Formel hat man es also in der Hand, durch passende Widerstände die Umwandlung der Stromenergie in Wärme zu verringern oder zu erhöhen. Wo die Wärmewirkung eine unerwünschte Beigabe ist (z. B. in Telegraphenleitungen) wird man einen möglichst geringen Widerstand wählen (gute Leiter, große Querschnitte!). Wo dagegen die Erwärmung Selbstzweck ist, wird man einen großen Widerstand (dünne Drähte!) einschalten. Von den vielfachen Anwendungen der JOULESchen Wärme seien z. B. die Sicherungen erwähnt; es sind dies in die Strombahn eingeschaltete Drähte bzw. Streifen aus Blei oder leicht schmelzbaren Legierungen, die bei einer bestimmten Stromstärke durchbrennen und somit den Strom selbsttätig unterbrechen, falls die vorgeschriebene Stromstärke überschritten wird, was z. B. bei Kurzschluß¹ der Fall ist; auf diese Weise sichern sie also die in der Strombahn befindlichen Apparate vor Zerstörung. Weiter wird die JOULESche Wärme zu Heizapparaten

¹ Kurzschluß nennt man die Verbindung des zu- und ableitenden Teils der Strombahn durch einen Leiter von sehr geringem Widerstand, also z. B. auch durch direkte Berührung.

benutzt. Hierher gehören auch die elektrischen Thermophore, bei denen in Asbestgewebe eingebettete Drähte erhitzt werden, um erkrankte Körperteile zu erwärmen. Erwähnt sei auch die Galvano-kaustik, d. i. die Durchtrennung bzw. Zerstörung von Körpergeweben mittels verschiedenartig geformter Brenner aus Platin-Iridium, die erst am Orte des Eingriffes durch einen hindurchgesandten Strom glühend gemacht werden. Eine der wichtigsten Anwendungen der JOULEschen Wärme ist schließlich ihre Benutzung zu Beleuchtungszwecken.

§ 181. **Elektrisches Glühlicht.** Bei den von EDISON erfundenen elektrischen Glühlampen wird ein Leiter bis zur Weißglut erhitzt und hierdurch das bekannte schöne Licht erzeugt. Bei den ursprünglichen Lampen geht der Strom durch einen dünnen, hufeisenförmig gebogenen Kohlenfaden, der sich in einer luftleeren Glasbirne befindet, weil er sonst infolge von Sauerstoffzutritt verbrennen würde. Widerstandsfähiger sind die Metallfadenlampen, bei denen dünne Fäden aus Osmium, Tantal, Wolfram usw. verwandt werden. Im Gegensatz dazu wird bei den Nernstlampen das Glühlicht in freier Luft erzeugt; als Glühkörper funktioniert hier ein Stift, der aus Oxyden seltener Erdmetalle besteht und ein sehr helles weißes Licht gibt. Da er aber den elektrischen Strom nur bei höherer Temperatur leitet, muß er durch eine ihn umgebende zum Glühen gebrachte Platinspirale erst vorgewärmt werden, so daß das Licht erst $\frac{1}{2}$ bis 1 Minute nach Einschalten des Stroms erscheint.

§ 182. **Bogenlicht.** Auf der JOULEschen Wärme beruht auch das elektrische Bogenlicht. Benutzt man nämlich zwei Kohlen als Elektroden und sendet einen starken Strom hindurch, so geht derselbe kontinuierlich durch die Spitzen, wenn sie einander berühren; entfernt man sie dann aber, so entsteht zwischen ihnen ein außerordentlich heller Lichtbogen, auch DAVYScher Lichtbogen genannt. Bei dem Übergang durch die Luftschicht entsteht nämlich eine so bedeutende Wärme (ca. 4000° CELSIUS), daß die Kohlenspitzen und die Luft glühend werden. Hierbei fliegen Stücke von der positiven zur negativen Kohle über, und da erstere überhaupt stärker erhitzt wird, so brennt sie schneller ab; es bildet sich ein Krater in ihr, während die negative Kohle spitz bleibt. Schließlich wird dadurch die Luftschicht zwischen beiden Kohlen und somit der Widerstand zu groß und der Strom erlischt. Daher ist eine Regulation nötig, wie sie z. B. automatisch von der Differentillampe von v. HEFNER-ALTENECK geleistet wird.

Der untere Teil des Eisenstabes *AB* (Fig. 149) wird von wenigen starken Windungen des Stromkreises umgeben. Dieser geht von hier zum Hebel *CD*, der in der Mitte von *AB* befestigt ist und in *E* seinen Drehpunkt hat; vom

Hebel dann durch beide Kohlen und schließlich zur Batterie zurück. In a zweigt sich eine Nebenleitung ab, die in vielen schwachen Windungen um den oberen Teil von AB geht und sich bei b mit dem ersten Stromkreise wieder vereinigt. Berühren sich die Kohlen, so geht der Strom hauptsächlich durch den unteren Draht, weil hier der Widerstand kleiner ist. Dadurch wird der Eisenstab nach unten gezogen (§ 194) und infolge der Hebelwirkung die obere Kohle nach oben, so daß der Lichtbogen entsteht. Wird nun die Entfernung zwischen beiden Kohlen größer, so wächst der Widerstand im unteren Stromkreise, und der Strom fließt mehr durch den oberen. Dadurch wird der Eisenstab nach oben gezogen, und die obere Kohle geht durch Hebelwirkung nach unten.

Eine größere Lichtausbeute und günstigeres (gelbes) Licht als die gewöhnlichen Kohlenbogenlampen

geben die sog. Flammenbogenlampen, nach dem Erfinder auch BREMER-Lampen genannt; hier sind die Kohlen mit bestimmten Salzen, besonders Fluorkalzium, getränkt. Medizinisch wertvoll sind die Quecksilberbogenlampen, bei denen in einem luftverdünnten Rohre zwischen Quecksilberelektroden ein Lichtbogen aus Quecksilberdampf erzeugt wird; dieses Licht ist nämlich

besonders reich an ultravioletten Strahlen. Da gewöhnliches Glas diese größtenteils absorbieren würde, benutzt man hierbei Rohre aus Quarzglas („Quarzlampen“).

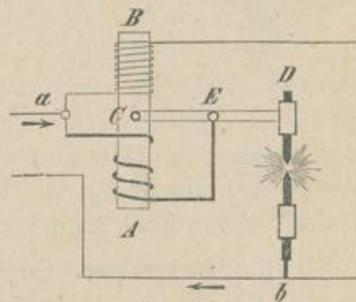


Fig. 149.

§ 183. Peltiersches Phänomen. Geht der Strom durch eine Stelle, an der zwei einen Stromkreis bildende Metalle zusammengelötet sind, so zeigt sich hier außer der JOULESchen Wärme, je nach der Stromrichtung, noch eine besondere Erwärmung oder Abkühlung. Am stärksten zeigt sich dieses PELTIERsche Phänomen an Lötstellen von Wismut und Antimon. Geht der Strom vom Antimon zum Wismut, so findet eine Erwärmung statt, im umgekehrten Falle eine Abkühlung. Dies tritt auch bei anderen Metallen ein, und es läßt sich wieder eine thermoelektrische Spannungsreihe aufstellen. Fließt der Strom zuerst durch das in der Reihe voranstehende Metall, so findet eine Erwärmung, sonst eine Abkühlung statt. Die Endglieder dieser Reihe sind Antimon und Wismut.

§ 184. Thermoelektrizität. Wird umgekehrt die Lötstelle zweier Metalle erwärmt, so entsteht ein Strom in bestimmter Richtung, z. B. vom Wismut zum Antimon; wird sie abgekühlt, so entsteht ebenfalls ein elektrischer Strom, aber von entgegengesetzter Richtung. Die thermoelektrische Kraft ist im allgemeinen der Temperaturdifferenz proportional und um so größer, je weiter die Metalle in der

1. Temperatur in 1. Aufg. 1,118 mg Silber abgeführt

Spannungsreihe auseinanderstehen. Will man die schwache elektromotorische Kraft eines solchen Thermostromes erhöhen, so vereinigt man mehrere Thermoelemente zu einer Thermosäule, bei der immer die ungeraden Lötstellen an einer Seite liegen und zusammen erwärmt werden. Fig. 150 zeigt z. B. die Nobil'sche Thermosäule,

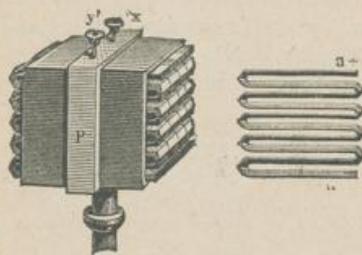


Fig. 150.

die hauptsächlich zur Messung strahlender Wärme benutzt wird, da schon sehr geringe Temperaturdifferenzen elektrische Ströme erzeugen, die mit einem Galvanometer (Thermomultiplikator) sehr genau nachzuweisen sind. Auch zur Messung sehr hoher und sehr niedriger Temperaturen finden Thermosäulen bzw. Thermoelemente Anwendung; für den ersten Fall be-

nutzt man eine Kombination von Platin und Platin-Rhodium, für den zweiten von Platin und Konstantan. Manche Arten von Thermosäulen werden auch zum Laden kleinerer Akkumulatoren benutzt.

§ 185. **Elektrolyse.** Geht ein elektrischer Strom durch sog. Leiter zweiter Klasse [§ 171], so werden diese zersetzt. Man nennt diesen Vorgang Elektrolyse¹, die betreffenden Flüssigkeiten auch Elektrolyte. Die Zersetzungsprodukte treten nur an den Elektroden auf, nämlich an der negativen Elektrode (Kathode) die Wasserstoffatome der Säuremoleküle bzw. die Metallatome der Laugen- und Salzmoleküle, dagegen an der positiven Elektrode (Anode) die übrigbleibenden Atomgruppen. Geht also z. B. ein elektrischer Strom durch ein Gefäß mit verdünnter Salzsäure (HCl), in das als Elektroden zwei Drähte oder Platten tauchen, so entsteht an der Kathode H , an der Anode Cl . Wenn nun die Zersetzungsprodukte auf die Elektroden oder die Flüssigkeit chemisch einwirken, was meist der Fall ist, so entstehen sekundäre Prozesse. Geht z. B. der Strom durch verdünnte Salpeterlösung (KNO_3), so entsteht primär an der Kathode K , an der Anode NO_3 . Das K setzt sich aber mit dem Lösungswasser um nach der Formel $K + H_2O = KOH + H$. Den analogen Vorgang an der Anode erläutert die Formel $2 NO_3 + H_2O = 2 HNO_3 + O$. Es wird also hier durch sekundäre Prozesse an der Kathode Wasserstoff, an der Anode Sauerstoff frei. Die scheinbare Zersetzung von Wasser durch den elektrischen Strom ist stets auf solche sekundäre Prozesse (bedingt durch die im Wasser enthaltenen Salze) zurückzuführen; chemisch ganz reines Wasser wird nicht zersetzt, leitet auch den elektrischen Strom so gut wie gar nicht.

¹ *λύσις* Auflösung, Zersetzung.

positiv Anode / Kationen
negativ Kathode / Anionen (Metall + H)

Eine Erklärung dieser Erscheinungen gibt die jetzt allgemein angenommene Theorie von CLAUDIUS-HELMHOLTZ-ARRHENIUS. Danach ist es eine charakteristische Eigenschaft aller Elektrolyte, daß in ihnen eine Anzahl von Molekülen in zwei Teil-moleküle (bzw. Atomgruppen) zerfällt¹, die beide mit gleichviel aber entgegengesetzter Elektrizität verbunden sind. Diese elektrolytische Dissoziation² der Moleküle ist um so ausgedehnter, je verdünnter die Lösungen sind. Da gleichgroße Mengen entgegengesetzter Elektrizität vorhanden sind, neutralisieren sie sich gegenseitig, so daß die Flüssigkeit als Ganzes unelektrisch ist. Im Gegensatz zu den gewöhnlichen Atomen bzw. Atomgruppen sind auch die mit Elektrizität geladenen Teil-moleküle chemisch ganz unwirksam. Geht nun ein elektrischer Strom durch die Lösung, so werden die elektropositiven Atome bzw. Atomgruppen von der negativen Kathode angezogen, die elektronegativen dagegen von der positiven Anode. Die in den Lösungen vorhandenen elektrisch geladenen Teil-moleküle bzw. Atomgruppen wandern also unter dem Einfluß des elektrischen Stromes durch die Flüssigkeit hindurch zur Kathode bzw. Anode. Man nennt sie deshalb auch Ionen³ und zwar speziell die zur Kathode gehenden Kationen, die zur Anode gehenden Anionen. Metall- und Wasserstoffatome sind stets Kationen; man kann auch sagen, „sie schwimmen mit dem Strom“. Die übrigen Atomgruppen sind Anionen. Demnach zerfällt z. B. das Schwefelsäuremolekül (H_2SO_4) in das elektropositive Kation $H_2\oplus$ und das elektronegative Anion $\ominus SO_4$. Analog Silbernitrat ($AgNO_3$) in $Ag\oplus$ und $\ominus NO_3$. Gelangen die Ionen bei ihrer Wanderung an die Elektroden, so geben sie hier ihre Elektrizität an diese ab und verhalten sich jetzt wie gewöhnliche chemische Atome bzw. Atomgruppen in statu nascendi, so daß eben an den Elektroden (und zwar nur hier) chemische Umsetzungen eintreten. Nach dieser Theorie besteht also die Arbeitsleistung des elektrischen Stromes nur im Transport der Ionen zu den Elektroden und in der Neutralisation ihrer Ladung daselbst. Der Transport der Ionen ist seinerseits wieder die Grundlage für die Fortpflanzung des elektrischen Stromes in den Elektrolyten; es handelt sich dabei also um Konvektion nicht um Leitung der Elektrizität [vgl. § 104].

§ 186. **Faradaysche Gesetze.** Für alle elektrolytischen Zersetzungen gelten die beiden folgenden, von FARADAY gefundenen Grundgesetze:

1. Die Menge der Zersetzungsprodukte ist in gleichen Zeiten der Stromstärke proportional. Man kann somit auch

¹ Diese Annahme findet eine wesentliche Stütze darin, daß der osmotische Druck in Elektrolyten größer ist, als der Zahl der Vollmoleküle entspricht. /

² *dissocio* trennen. — ³ *ion* gehend, wandernd; *aná* hinauf, *katá* hinab.

die Stromstärke durch die elektrolytischen Wirkungen des Stromes messen, wenn man eine Einheit hierfür festgelegt hat. In der Tat ist, wie bereits erwähnt [§ 174], die praktische Einheit der Stromstärke, 1 Ampère, auf diese Weise bestimmt worden.

2. Die durch den gleichen Strom in verschiedenen Elektrolyten während gleicher Zeiten abgeschiedenen Zersetzungsprodukte verhalten sich wie ihre chemischen Äquivalentgewichte. Unter letzteren versteht man den Quotienten aus Atomgewicht und Wertigkeit der Elemente bzw. Radikale. Ein Strom, der 1 gr *H* abscheidet, scheidet demnach auch ab 35,5 gr *Cl*, 108 gr *Ag*, 62 gr NO_3 , $\frac{1,6}{2}$ gr *O*, $\frac{6,5}{2}$ gr *Zn*, $\frac{1,97}{3}$ gr *Au* usw.

Man kann also die Stromstärke messen, wenn man weiß, wieviel Zersetzungsprodukte („elektrochemische Äquivalente“) ein Strom von 1 Ampère in 1 Sekunde liefert. Es sind dies z. B. 1,118 mgr Silber, 0,328 mgr Kupfer, 0,174 cem Knallgas usw. Die hierauf beruhenden Apparate zur Messung der Stromstärke heißen Voltameter (nicht zu verwechseln mit Voltmetern!).

Beim Knallgasvoltameter z. B. mißt man die Menge des durch Zersetzung angesäuerten Wassers entstandenen Gemenges von Wasserstoff und Sauerstoff, welches Knallgas heißt. Beim Silbervoltameter stellt man die Gewichtszunahme fest, die eine als Kathode benutzte und mit Silbernitratlösung gefüllte Platinschale dadurch erfährt, daß sich beim Stromdurchgang Silber auf ihr niederschlägt.

§ 187. **Anwendungen der Elektrolyse.** Die Elektrolyse dient u. a. zur Reindarstellung von Metallen aus ihren Verbindungen, insbesondere des Aluminiums. Bei der Galvanostegie¹ wird auf elektrolytischem Wege ein festhaftender metallischer Überzug, z. B. von Gold, Silber, Nickel, auf anderen minderwertigen Metallen erzeugt („galvanische Vergoldung, Versilberung, Vernickelung“ usw.). Der betreffende Gegenstand wird als Kathode in den Strom geschaltet; als Elektrolyt dient eine Lösung eines Gold-, Silber-, Nickel- usw. Salzes, aus der die Metall-Ionen zur Kathode wandern und den dort befindlichen Gegenstand überziehen. Als Anode dient ein Streifen aus Gold, Silber, Nickel usw., der durch die Anionen aufgelöst wird und so die elektrolytische Flüssigkeit beständig erneuert. Ähnlich ist die Galvanoplastik, bei der man von einem mit ganz schwacher Fettschicht überzogenen Gegenstand, der wieder als Kathode eingeschaltet wird, einen Metallabguß herstellt. Auch medizinisch wird die Elektrolyse vielfach angewandt. Bringt man die (oft nadel-förmigen) Elektroden an die zu beeinflussende Stelle, so bilden die im wesentlichen Kochsalz enthaltenden Körpersäfte den Elektro-

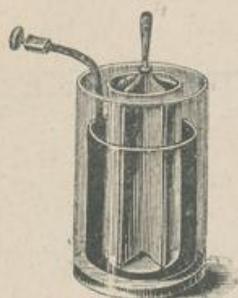
¹ *отлив* mit einer Decke versehen.

lyten. An der Anode findet Säurebildung, an der Kathode Laugenbildung statt, was z. B. zur Blutstillung und zur Beseitigung von Haaren und Neubildungen aller Art benutzt wird. Bei der Iontophorese werden gelöste Medikamente durch die Haut hindurch in den Körper, entsprechend den Gesetzen der Ionenwanderung, eingeführt.

§ 188. **Konstante Elemente.** Die ursprünglichen galvanischen Elemente hatten alle den Fehler, daß ihre elektromotorische Kraft bald abnahm. Es beruht dies darauf, daß durch elektrolytische Prozesse, die natürlich auch im Inneren eines solchen Elementes vor sich gehen, die Elektroden verändert werden, was man auch mit dem Namen *galvanische Polarisation* bezeichnet. Im Kupfer-Zink-Schwefelsäure-Element scheiden sich z. B. am Zink¹ die SO_4 -Ionen ab und bilden mit dem Zink Zinksulfat; am Kupfer tritt der elektropositive Wasserstoff auf und umgibt es mit einem feinen Häutchen. Es tauchen also nicht mehr die reinen Elektroden in die Flüssigkeit; und da die elektromotorische Kraft eines Elements nur von der Natur der Elektroden (und der Flüssigkeit) abhängt, so ist klar, daß durch die Polarisation eine Änderung der elektromotorischen Kraft bewirkt wird. Und zwar wird dieselbe kleiner, da durch die Ionen die Elektrizität der Elektroden zu einem Teil neutralisiert wird. Ja, es tritt sogar ein dem ursprünglichen entgegengesetzt gerichteter Strom, der sog. *Polarisationsstrom*, zwischen den veränderten Elektroden auf, indem z. B. im angeführten Falle das untere Kupferende durch den darauf abgelagerten positiven Wasserstoff zur Anode, das Zinksulfat zur Kathode wird. Um konstante Elemente zu erhalten, d. h. solche, deren elektromotorische Kraft annähernd gleich bleibt, muß man also die Wirkung der Polarisation beseitigen². Diese „Depolarisation“ wird dadurch erreicht, daß man die Kathode in eine Flüssigkeit tauchen läßt, die den hauptsächlich die Polarisation bedingenden Wasserstoff sofort oxydiert. Oft nimmt man auch für jede Elektrode eine besondere Flüssigkeit, die entweder durch eine poröse Scheidewand (die der Ionenwanderung kein Hindernis bietet) getrennt oder (bei verschiedenem spezifischen Gewicht) einfach übereinander geschichtet sind.

¹ Zum Verständnis dieser Vorgänge muß man beachten, daß für die innere Strombahn Zink die Anode, Kupfer die Kathode vorstellt, während für die äußere Strombahn Kupfer Anode, Zink Kathode ist (vgl. Fig. 152). — ² Da man in der Medizin den galvanischen Strom auch konstanten Strom nennt (besser wäre: kontinuierlichen Strom) muß man sich vor Mißverständnissen hüten. Also auch inkonstante Elemente liefern „konstanten“ Strom.

Beim DANIELL-Element (Fig. 151) z. B. taucht innerhalb eines Glasgefäßes ein Zinkzylinder in 25%ige Schwefelsäure. Im Zinkzylinder steht wieder ein poröser Tonzylinder, gefüllt mit konzentrierter Kupfervitriollösung, in die ein Kupferblech taucht. Der Vorgang im Element ist folgender (Fig. 152):



CA. 1/10 NAT. GRÖSSE

Fig. 151.

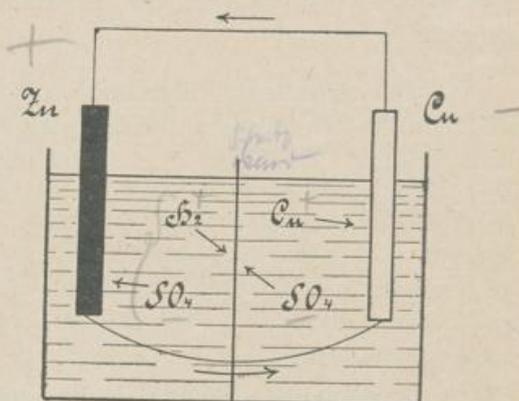


Fig. 152.

Das Kupfervitriol und die Schwefelsäure zerfallen in die Ionen Cu und SO_4 bzw. H_2 und SO_4 . Es wandern nun Cu und H_2 zur Kathode, also zum Kupfer, die beiden SO_4 -Ionen zum Zink. Am Kupfer schlägt sich also Kupfer nieder. Die H_2 -Ionen der Schwefelsäure treffen auf die SO_4 -Ionen des Kupfersulfats und verbinden sich mit diesen wieder zu Schwefelsäure, während die SO_4 -Ionen der

Schwefelsäure sich mit dem Zink zu Zinksulfat ($ZnSO_4$) verbinden, das sich in der Schwefelsäure auflöst. Das Resultat ist also, daß sich beständig Zink auflöst und gleichzeitig äquivalente Mengen Kupfer an der Kupferelektrode niederschlagen. Die Klemmenspannung [§ 177] beträgt hier rund 1 Volt.

Das Chromsäure-Element, wegen seiner gebräuchlichen Form (Fig. 153) auch Flaschenelement genannt, enthält eine Zink- und eine Kohlen-Elektrode, die in ein Gemisch von Schwefelsäure und doppeltchromsaurem Kali tauchen. Aus letzterem bildet sich Chromsäure, die den entstehenden Wasserstoff oxydiert. Um den Zinkverbrauch einzuschränken, werden die Elektroden nur während des Gebrauchs in die Flüssigkeit gesenkt; man spricht daher auch von „Tachelementen“.



Fig. 153.

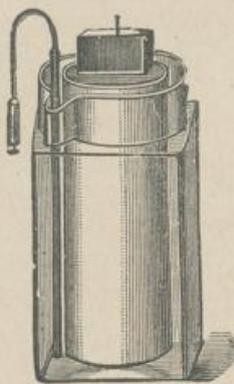


Fig. 154.

Beim LECLANCHÉ-Element (Fig. 154) taucht Zink in Salmiaklösung, Kohle in die Braunsteinfüllung (MnO_2) eines porösen Tonzylinders. Hier wirkt der aus dem Braunstein abgespaltene Sauerstoff depolarisierend. Vom LECLANCHÉ-

Daniell	Zink	H_2SO_4	$CuSO_4$	Cu
Chromsäure	"	H_2SO_4	doppeltchromsaure K.	Stoff
Leclanché	"	NH_4Cl	MnO_2	Stoff

lator-, „Zelle“ besteht nun aus einer gewissen Zahl positiver und negativer Platten, die miteinander abwechseln; von letzteren wird gewöhnlich eine mehr genommen, so daß jede positive Platte zwischen zwei negativen steht. Alle positiven Platten enden oben in einer Bleileiste, ebenso die negativen. In der Zelle sind die Platten also parallel geschaltet (Fig. 157). Die Zellen selbst werden gewöhnlich hintereinander geschaltet. Die Akkumulatoren zeichnen sich einmal durch ihre große und sehr konstante elektromotorische Kraft (ca. 2 Volt) aus; vor allem können sie aber zur Aufspeicherung elektrischer Energie dienen.

c. Elektromagnetismus und Elektrodynamik.

§ 190. **Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom.** Im Jahre 1820 entdeckte OERSTEDT, daß ein elektrischer Strom, der eine Magnetnadel umfließt, dieselbe ablenkt. und zwar senkrecht zu seiner Ebene zu stellen sucht. Die Richtung der Ablenkung ergibt sich aus der sog. AMPÈRESCHEN Schwimmregel: Denkt man sich in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, das Gesicht der Nadel zugekehrt, so wird ihr Nordpol nach links abgelenkt. Dasselbe Resultat erhält man auch durch die sog. Rechte-Hand-Regel: Hält man die rechte

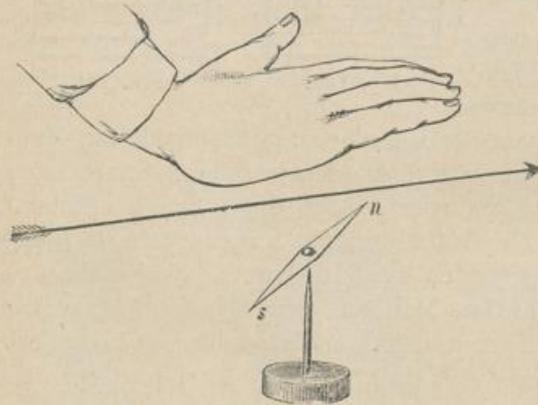


Fig. 158.

Hand in der Richtung des positiven Stromes so über den Stromleiter, daß die Handfläche der Magnetnadel zugekehrt ist, so wird ihr Nordpol nach der Richtung des abgelenkten Daumens abgelenkt (Fig. 158). Die Ablenkung der Magnetnadel dient zum Nachweis elektrischer Ströme. Die betreffenden Apparate heißen Galvanoskope.

Die Tatsache, daß ein elektrischer Strom magnetische Wirkungen hervorbringt, kann man auch so ausdrücken, daß ein stromdurchflossener Leiter ein magnetisches Feld besitzt, daß auch von ihm Kraftlinien [§ 150] ausgehen. Bei einem geraden Leiter bilden diese Kraftlinien konzentrische Kreise um die einzelnen Teile der Strombahn. Durch benachbarte Leiter wird der Verlauf der Kraftlinien in gesetzmäßiger Weise beeinflusst, bei einem Kreisstrom z. B. ist in einer bestimmten Ebene der Kraftlinienverlauf so, wie in Fig. 159 angedeutet.

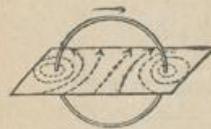


Fig. 159.

§ 191. **Biot-Savartsches Gesetz.** Ein Stromelement (d. i. ein sehr kleines Stück eines stromdurchflossenen Leiters) von der Länge l (Fig. 160) wirkt bei der Stromstärke i auf einen im Abstände r befindlichen Magnetpol m , wenn die Richtung von l und r den Winkel φ bilden, mit einer Kraft $F = \frac{m \cdot i \cdot l}{r^2} \cdot \sin \varphi$. Liegt der Magnetpol in der

Mitte eines kreisförmigen Stromes, so wird φ ein rechter Winkel, da ja der Radius senkrecht auf jedem Teil der Peripherie steht; es wird also $\sin \varphi = 1$. In diesem Falle nimmt das Gesetz die einfache Form an:

$$F = \frac{m \cdot i \cdot l}{r^2}.$$

Hieraus ergibt sich die sog. absolute

elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Diese besitzt nämlich der Strom, der beim Durchfließen der Längeneinheit (1 cm) auf einen Magnetpol von der Stärke 1 im senkrechten Abstände 1 cm die Kraft 1 Dyne ausübt¹. Diese absolute elektromagnetische Einheit der Stromstärke ist gleich $3 \cdot 10^{10}$ elektrostatischen Einheiten der Stromstärke [§ 174] oder auch gleich 10 Ampère. 1 Ampère ist also gleich 0,1 absoluten elektromagnetischen Einheiten der Stromstärke.

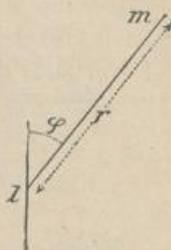


Fig. 160.

§ 192. **Strommessung mittels der Magnetnadel.** Da die Ablenkung der Magnetnadel der Stromstärke proportional ist, kann sie zur Bestimmung derselben benutzt werden. Der einfachste hierauf beruhende Apparat ist die Tangentenbussole. Hier fließt ein Strom durch einen vertikalen, in die Ebene des magnetischen Meridians gestellten Kreis aus Metalldraht und wirkt auf eine horizontale Magnetnadel ein. Wie sich zeigen läßt, ist hier die Tangente des Ablenkungswinkels der Stromstärke proportional; daher der Name. Zu feineren Messungen dienen die Multiplikatoren oder (Nadel-) Galvanometer, bei denen die Wirkung des Stromes dadurch verstärkt ist, daß er in vielen Windungen die Nadel umkreist. Außerdem wendet man hier astatische Nadeln an. Bei diesen ist der störende Einfluß des Erdmagnetismus dadurch aufgehoben, daß eine gleich starke Magnetnadel über der ersten so angebracht ist, daß die ungleichnamigen Pole übereinanderliegen (Fig. 161). Aus der AMPÈRESCHEN

¹ Aus obiger Formel ergibt sich auch die Dimension [§ 5] der Stromstärke im elektromagnetischen Maßsystem. Es ist nämlich $i = \frac{F \cdot r^2}{m \cdot l}$. Da sich r und l als Längenmaße heben, ist die Dimension von $i = \frac{\text{Kraft} \times \text{Länge}}{\text{Polstärke}}$. Unter Berücksichtigung von §§ 11 und 149 (Anmerkung) ist demnach die Dimension $\frac{m l t^{-2} \cdot l}{m^{1/2} l^{1/2} t^{-1}} = m^{1/2} l^{1/2} t^{-1}$ bzw. $gr^{1/2} cm^{1/2} sec^{-1}$.

Regel folgt ohne weiteres, daß die zweite Nadel außerhalb des Stromkreises angebracht sein muß, weil ja sonst überhaupt keine Ausschläge zustande kämen.

Derartige Galvanometer werden aber (nicht nur zur Messung von Stromstärken, sondern auch von Spannungsdifferenzen benutzt. Sind sie so geeicht, daß die Skala für jeden Ausschlag der Nadel die Zahl der Ampères bzw. Volts direkt anzeigt, so heißen sie Ampèremeter bzw. Voltmeter (nicht zu verwechseln mit Voltmeter).

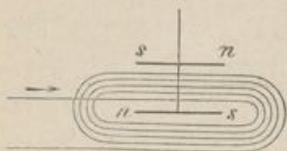


Fig. 161.

Kennt man nämlich die Ausschläge eines Galvanometers für eine bestimmte Zahl von Ampères und seinen Widerstand in Ohms, so ergibt sich ja nach der Formel $1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampère} \times 1 \text{ Ohm}$ [§ 176] auch sofort der Spannungsunterschied, der den Ausschlag hervorruft.

Ein Ampèremeter kommt stets in den Hauptstromkreis, und zwar — da die Stromstärke in demselben überall gleich ist — an eine beliebige Stelle desselben. Es besteht aus wenigen Windungen von dickem Draht, damit nicht das Instrument selbst durch größeren Widerstand die Stromstärke beeinflusst.

Ein Voltmeter wird dagegen stets an die beiden Punkte des Hauptstromkreises angelegt, deren Spannungsdifferenz gemessen werden soll; es liegt also im Nebenschluß. (Im Gegensatz zur Stromstärke ist ja die Spannung innerhalb eines Stromkreises nicht konstant, sondern fällt vom positiven zum negativen Pol). Um die Stromstärke und Spannungsverteilung im Hauptstromkreis möglichst wenig zu beeinflussen, müssen die Voltmeter einen großen Widerstand besitzen; sie bestehen daher aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes.

Fig. 162 zeigt z. B. das Schema einer von einer Dynamomaschine *M* versorgten Lichtanlage *L*. *A* ist das in die Hauptleitung eingeschaltete Ampèremeter.

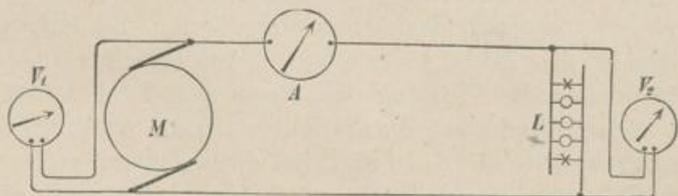


Fig. 162.

meter; die Voltmeter V_1 und V_2 liegen im Nebenschluß zur Hauptleitung, und zwar mißt V_1 die Spannung an den Polen der Maschine (Klemmenspannung), V_2 den Spannungsunterschied an den Enden der Lichtanlage.

Eine dritte Anwendung finden Galvanometer zur Messung von Elektrizitätsmengen, wenn es sich um Ströme von sehr kurzer Dauer, z. B. den Entladungsstrom von Leidener Flaschen handelt. Der erste Ausschlag der Galvanometernadel bei einem solchen Stromstoß ist nämlich der durch das Galvanometer hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge proportional. Ein hierzu benutztes Instrument heißt ballistisches Galvanometer.

Drehspulengalvanometer s. § 194, aperiodische Galvanometer s. § 198.

§ 193. **Elektromagnete.** Solange ein elektrischer Strom um einen Eisenstab geht, ist dieser magnetisch. Ein solcher durch den elektrischen Strom erzeugter Elektromagnet besitzt einen zwar nur temporären, aber äußerst starken Magnetismus. Nach der Molekulartheorie kann man sich vorstellen, daß der Strom ebenso wie die Magnetnadel auch alle Molekularmagnete in eine bestimmte Richtung bringt. Dadurch ist verständlich, daß auch für Elektromagnete das in § 152 über Koërzitivkraft, Hysteresis, remanenten Magnetismus Gesagte

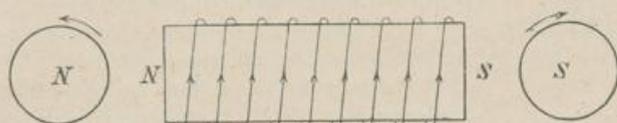


Fig. 163.

Geltung hat. Die Lage des Nordpols findet man wieder leicht nach der AMPÈRESCHEN Regel. Ferner ergibt eine einfache Überlegung, daß, wenn man von oben auf einen Südpol sieht, der Strom im Sinne des Uhrzeigers verläuft, beim Nordpol umgekehrt (Fig. 163).

Von den unzähligen auf Elektromagnetismus beruhenden Apparaten seien hier nur zwei beschrieben. Beim Telegraphen¹ von MORSE wird auf der Geberstation *G* (Fig. 164) durch Druck auf den Knöpf des sog. Schlüssels

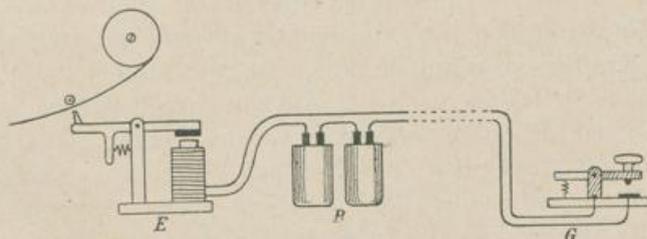


Fig. 164.

der von der Batterie *B* gelieferte Strom geschlossen; während dieser Zeit wird auf der Empfängerstation *E* ein Elektromagnet wirksam und zieht einen Anker an. Dabei wird durch Hebelwirkung ein Schreibstift gegen einen durch ein Uhrwerk gleichmäßig schnell vorbeibewegten Papierstreifen gedrückt und macht je nach der Dauer des Stromes Punkte und Striche. Aus diesen setzt sich dann das sog. MORSE-Alphabet zusammen. Da aber bei großen Entfernungen der Widerstand im Drahte zu groß wird, so daß der Elektromagnet nicht kräftig genug funktioniert, so wendet man ein sog. Relais an. Hier hat der erste Elektromagnet nur einen sehr leichten Hebel anzuziehen, durch den

¹ *τηλε* fern, *γραφω* schreiben.

ein neuer Stromkreis mit besonderen Elementen geschlossen wird, der dann erst den Schreibapparat in Tätigkeit setzt. Wie STEINHEIL zeigte, ist beim Telegraphen nur ein Leitungsdraht nötig; versenkt man nämlich seine beiden Enden genügend tief in die Erde, so besorgt diese die Rückleitung.

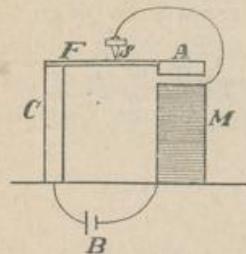


Fig. 165.

Der WAGNERsche Hammer ist ein selbsttätiger Stromunterbrecher. Hier wird ein Eisenstück *M* (Fig. 165) durch den herumgesandten Strom magnetisch und zieht den Anker *A* an, der durch eine Feder *F* an *C* befestigt ist. Hierdurch wird aber die Feder von der Metallspitze *S* entfernt, somit die Leitung unterbrochen; *M* verliert seinen Magnetismus, und die Feder geht in ihre alte Lage zurück, wodurch der Strom wieder geschlossen wird usf. Der WAGNERsche Hammer ist u. a. ein Bestandteil kleinerer Induktionsapparate [§ 204] sowie auch der elektrischen Klingeln; bei letzteren ist mit dem Anker

ein Klöppel verbunden, der bei Anziehung des Ankers gegen eine Glocke schlägt.

§ 194. Wirkungen zwischen elektrischen Strömen und Magneten.

Eine von einem Strom durchflossene Drahtspirale bzw. Drahtspule heißt ein Solenoid¹ (Fig. 166). Ein solches sucht nicht nur einen



Fig. 166.

Magneten senkrecht zu der Richtung seiner einzelnen Stromkreise, mit anderen Worten also in die Richtung seiner Achse zu stellen,

sondern der Magnet wird auch entweder in die Spirale hineingezogen oder von ihr abgestoßen. Das Solenoid wirkt somit wie ein Stabmagnet; auch der Kraftlinienverlauf in beiden ist sehr ähnlich. Der Nordpol des Solenoids ist wieder nach der AMPÈRESchen Regel zu finden. In Fig. 166 ist er z. B. links; daher wird auf der rechten Seite ein magnetischer Südpol abgestoßen; ein Nordpol angezogen. Ein Stab aus weichem Eisen wird durch das Solenoid zuerst magnetisiert (bzw. von den Kraftlinien des Solenoids geschnitten) und dann wieder angezogen oder abgestoßen. Darauf beruht u. a. die Differentiallampe [§ 182].

Ist umgekehrt der elektrische Stromkreis beweglich, so sucht der Magnet denselben senkrecht zu seiner Achse zu stellen und übt ferner auf ihn anziehende oder abstoßende Wirkung aus. Man kann dies mittels des AMPÈRESchen Gestells (Fig. 167) nachweisen, bei dem der Stromkreis frei beweglich in Quecksilbernäpfchen aufgehängt ist. Daher wird auch unter dem Einflusse des Erdmagnetismus die Ebene eines solchen Strom-

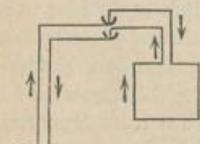


Fig. 167.

¹ σωλήν Röhre.

kreises sich senkrecht zum magnetischen Meridian stellen. Durch geeignete Anordnungen kann man auch bewirken, daß ein Magnet unter dem Einflusse eines elektrischen Stromkreises beständig rotiert und umgekehrt.

Auf der Drehung eines beweglichen Stromkreises unter dem Einflusse eines Magneten beruhen auch die (Dreh-) Spulengalvanometer von DEPREZ-D'ARSONVAL, WESTON u. a. Die drehbare Spule befindet sich hier zwischen den Polen eines starken Hufeisenmagneten und wird, solange kein Strom durch sie fließt, durch eine Spiralfeder usw. in einer bestimmten Lage erhalten (Fig. 168). Geht nun der Strom durch sie hindurch, so dreht sie sich, indem sie dabei die Elastizität der Feder überwindet, um einen der Stromstärke proportionalen Winkel, um nach Aufhören des Stromes in die Ruhelage zurückzukehren. An der Spule ist ein Zeiger befestigt, der über einer Skala spielt, die nach Ampères oder Volts geeicht ist [vgl. § 192]. Diese Art von Galvanometern ist unempfindlich gegen Änderungen des Erdmagnetismus und den Einfluß benachbarter Ströme, da diese gegenüber dem starken Feldmagneten nicht in Betracht kommen.

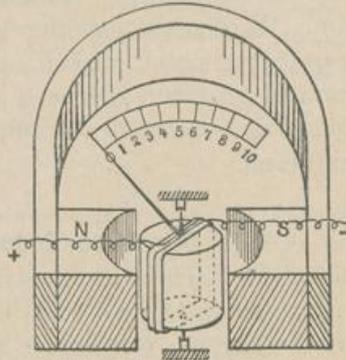


Fig. 168.

Erwähnt sei noch kurz das für sehr feine, besonders physiologische, Messungen benutzte Saitengalvanometer, bei dem ein sehr feiner Metallfaden zwischen den Polen eines starken Magneten ausgespannt ist. Geht Strom durch ihn, so wird seine Mitte ausgebogen. Diese Bewegungen kann man entweder durch ein Mikroskop mit Okularskala direkt beobachten, oder aber, bei raschem Wechsel, auf einen Schirm projizieren und kinematographisch aufnehmen.

§ 195. **Elektrodynamik.** Da, wie gezeigt wurde, elektrische Ströme wie Magnete wirken, so ist begreiflich, daß auch zwei elektrische Ströme aufeinander anziehende oder abstoßende Wirkung ausüben. AMPÈRE stellte nun folgende elektrodynamische Gesetze auf:

1. Parallel gerichtete Ströme ziehen sich an, wenn sie gleiche Richtung haben, im entgegengesetzten Falle stoßen sie sich ab.

2. Gekreuzte Ströme ziehen sich an, wenn in beiden der Strom gleichgerichtet ist, d. h. entweder in beiden nach der Kreuzungsstelle hin oder von ihr fort geht; andernfalls stoßen sie sich ab. In jedem Falle also suchen sie sich parallel zu stellen (Fig. 169).

3. Die Kraft, mit der sich die Ströme anziehen oder abstoßen, ist proportional dem Produkte der Stromstärken und dem Produkte der aufeinanderwirkenden Strom-

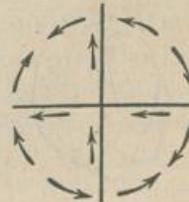


Fig. 169.

elemente, umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung.

§ 196. **Ampères Theorie des Magnetismus.** Die ähnlichen Wirkungen, welche elektrische Ströme und Magnete entfalten, veranlaßten AMPÈRE, die Theorie aufzustellen, daß jedes Eisenmolekül dauernd von einem Strom umflossen wird. Da nun diese Molekularströme verschiedene Richtungen haben, so heben sie sich gegenseitig auf. Werden sie aber durch einen Magneten oder elektrischen Strom parallel gerichtet, wirken sie also wie ein Solenoid, so wird das Eisen zum Magneten. Hiernach ist die Anziehung und Abstoßung zweier Magnete ohne weiteres auf die elektrodynamischen Gesetze zurückzuführen.

d. Induktion.

§ 197. **Begriff der Induktion.** Bei jeder Schließung und Öffnung eines elektrischen Stromes entstehen in einem benachbarten geschlossenen Leiter (der an und für sich stromlos sein kann) ebenfalls elektrische Ströme von kurzer Dauer, wie man durch ein eingeschaltetes Galvanometer leicht nachweisen kann. Man nennt den ersten Strom den primären oder induzierenden¹, den zweiten den sekundären, induzierten oder Induktionsstrom. Induktionsströme entstehen ferner beim Stärker- und Schwächerwerden, sowie beim Nähern und Entfernen des primären Stromes. Außer dieser Elektro- oder Volta-Induktion gibt es noch eine Magneto-Induktion, indem nämlich auch durch Näherung oder Entfernung eines Magneten in einem benachbarten geschlossenen Leiter Ströme entstehen. — Die erwähnten, verschiedenen Möglichkeiten kann man kurz folgendermaßen zusammenfassen: In einer sekundären Spule entsteht ein Induktionsstrom, wenn sie die Kraftlinien eines magnetischen Feldes schneidet, bzw. wenn sich die Zahl der von ihr eingeschlossenen Kraftlinien ändert.

§ 198. **Richtung der Induktionsströme.** Im sekundären Stromkreise entsteht beim Schließen, Stärkerwerden und Nähern des primären Stromes ein diesem entgegengesetzt gerichteter, beim Öffnen, Schwächerwerden und Entfernen ein gleichgerichteter Induktionsstrom. Die Verstärkung des primären Stromes ist ja offenbar ein Analogon zur Annäherung, wie auch das Schließen des Stromes als plötzliche Annäherung aus unendlicher Entfernung betrachtet werden kann. Natürlich entstehen auch Induktionsströme von entsprechender Richtung, wenn an Stelle des primären Stromkreises ein Magnet sich dem sekundären Stromkreise nähert oder von ihm entfernt bzw. umgekehrt. Durch fortgesetztes

¹ *induco* hineinführen, veranlassen.

Schließen und Öffnen des primären Stromes bzw. durch Rotation eines Magneten vor einem Stromkreise (oder umgekehrt) erhält man somit Ströme von ständig wechselnder Richtung, sog. Wechselströme.

Alle speziellen Fälle faßt das LENZsche Gesetz folgendermaßen zusammen: Ein Induktionsstrom ist stets so gerichtet, daß er die Zustandsänderung, durch welche er entstand, mittels elektromagnetischer bzw. elektrodynamischer Rückwirkung zu hemmen sucht. Nähert man z. B. dem primären Leiter *I* (Fig. 170), in dem der Strom von *A* nach *B* fließt, den sekundären Leiter *II*, so entsteht in diesem ein Induktionsstrom in der Richtung von *D* nach *C*; bei Entfernung von *II* dagegen in der Richtung von *C* nach *D*. Da nun parallele gleichgerichtete Ströme sich anziehen, entgegengesetzt gerichtete sich abstoßen [§ 195], so suchen also die entstehenden Induktionsströme die weitere Annäherung bzw. Entfernung zu hemmen. Was für diesen Fall gilt, trifft auch für alle anderen Fälle zu.

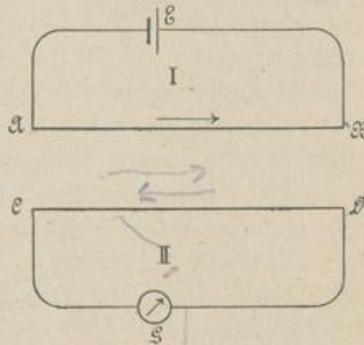


Fig. 170.

Das LENZsche Gesetz ist offenbar nur ein Spezialfall des Gesetzes von der Erhaltung der Energie und ein Ausdruck dafür, daß die Induktionsströme nicht aus nichts entstehen, sondern ein Äquivalent der mechanischen Arbeit sind, die bei der Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Felde usw. erforderlich ist.

Auf dem LENZschen Gesetze beruht es z. B., daß eine Magnetnadel, welche über Kupferplatten schwingt, gedämpft wird, d. h. bald zur Ruhe kommt. Derartig eingerichtete Galvanometer heißen aperiodisch, da die Nadel eben keine periodischen Schwingungen mehr macht.

Zuweilen sind solche in größeren Metallmassen induzierte Ströme (sog. FOUCAULTsche oder Wirbelströme) unerwünscht, da sie starke Erwärmung verursachen bzw. eine beabsichtigte Bewegung, z. B. des Ankers von Dynamomaschinen, hemmen können. Man beseitigt sie dadurch, daß man die betr. Eisenteile nicht massiv herstellt, sondern aus einzelnen Platten bzw. Drähten zusammensetzt und dadurch die Bahn der Wirbelströme gewissermaßen zerschneidet. Dies kommt z. B. auch für den Eisenkern von Induktionsapparaten in Betracht.

§ 199. **Größe der induzierten elektromotorischen Kraft.** Die elektromotorische Kraft eines Induktionsstromes ist proportional der Feldstärke des induzierenden Stromes oder Magneten, ferner der Länge des sekundären Stromkreises und drittens der Geschwindigkeit, mit der sich die Stärke oder Lage des induzierenden Stromes bzw. Magneten

ändert. Man kann auch sagen: Die in einem geschlossenen Leiter induzierte elektromotorische Kraft ist proportional der Änderung der Kraftlinienzahl, die pro Sekunde in der von ihm begrenzten Fläche erfolgt. Zur Erzielung starker Induktionsströme wird man also erstens die Feldstärke des primären Stromes bzw. Magneten möglichst groß machen; bei einem Solenoid wird man z. B. dessen Feld durch einen Eisenkern verstärken. Zweitens wird man als sekundären Stromkreis eine Spule mit möglichst zahlreichen Windungen wählen, da die elektromotorischen Kräfte der einzelnen Windungen sich wie bei hintereinander geschalteten galvanischen Elementen summieren. Drittens wird man für rasche Unterbrechung des primären Stromes bzw. schnelle Rotation im magnetischen Felde sorgen.

§ 200. **Selbstinduktion. Extraströme.** Induktion findet nicht nur von einem primären auf einen sekundären Stromkreis statt, sondern auch innerhalb des primären Stromkreises selbst, natürlich aber nur bei Schwankungen der Stromstärke bzw. beim Schließen und Öffnen des Stromes. Diese sog. Selbstinduktion kommt zwar auch bei geraden Stromleitern vor, die man sich ja in der Längsrichtung aus einzelnen nebeneinanderliegenden und somit sich beeinflussenden Teilen zusammengesetzt denken kann; besonders tritt sie aber in Spulen auf, wo jede Windung nicht nur auf sich selbst, sondern auch auf die benachbarten wirkt. Die durch Selbstinduktion hervorgegerufenen Ströme heißen Extraströme; am wichtigsten ist der Schließungs- und Öffnungs-Extrastrom. Nach dem LENZschen Gesetze müssen die Extraströme, wie alle Induktionsströme, eine derartige Richtung haben, daß sie den Intensitätsschwankungen des Hauptstromes, durch die sie ja entstehen, entgegenwirken. Hierbei ist wieder Schließen als plötzliches Ansteigen der Stromstärke von Null auf einen bestimmten Wert, Öffnen als plötzliches Absinken auf Null zu betrachten. Der Schließungsextrastrom hat also entgegengesetzte Richtung wie der Hauptstrom. Erschwächt denselben und bewirkt, daß er nur allmählich seine volle Stärke erreicht. Der Öffnungsextrastrom dagegen hat dieselbe Richtung wie der Hauptstrom. Wird dieser durch die Öffnung unterbrochen, so bleibt in der Strömbahn noch die gleichgerichtete elektromotorische Kraft des Öffnungsextrastroms wirksam, die so groß ist, daß sie die Unterbrechungsstelle in Form des sog. Öffnungsfunkens überbrücken kann. Die Selbstinduktion wirkt also sowohl bei Stromschluß wie bei Stromöffnung hemmend bzw. verzögernd auf den Hauptstrom; sie kann gewissermaßen als eine Art „elektrische Trägheit“ betrachtet und mit dem Schwungrad bei Maschinen in Parallele gesetzt werden. Da nun die Stromstärke des Hauptstromes bei der Schließung nur langsam zur vollen Höhe anwächst, bei der Öffnung

aber sehr rasch auf Null sinkt, muß auch nach dem im vorigen Paragraphen Gesagten der Öffnungsextrastrom eine wesentlich größere elektromotorische Kraft besitzen als der Schließungsextrastrom.

§ 201. **Elektrische Maschinen.** Die elektrischen Maschinen, die alle auf Induktionswirkung beruhen, dienen dazu, mechanische Energie in elektrische zu verwandeln (stromerzeugende Maschinen, Generatoren) oder umgekehrt elektrische Energie in mechanische (Kraftmaschinen, Elektromotoren). Bei ersteren wird ein Stromleiter in einem magnetischen Felde durch mechanische Arbeit in Bewegung versetzt, bei letzteren wird einem im magnetischen Felde befindlichen Leiter ein elektrischer Strom zugeführt. Durch Verbindung eines Generators mit einem Elektromotor kann eine Kraftübertragung, auch auf weite Entfernungen, erzielt werden. Die elektrischen Maschinen bestehen im wesentlichen 1. aus dem Feldmagneten, der das magnetische Feld liefert; es ist dies bei den magnetelektrischen Maschinen ein permanenter Stahlmagnet, bei den (jetzt fast ausschließlich üblichen) elektromagnetischen Maschinen ein Elektromagnet; 2. aus dem Induktor oder Anker; d. i. ein Leiter, der sich durch Zuführung mechanischer oder elektrischer Energie (gewöhnlich rotierend) bewegt. — Je nachdem der gelieferte Strom ständig dieselbe oder regelmäßig wechselnde Richtung hat, unterscheidet man Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen.

Fig. 171 zeigt z. B. das Prinzip einer magnetelektrischen Maschine. NS ist der Feldmagnet, ns der Induktor, um dessen Schenkel zwei miteinander verbundene Drahtspulen gewickelt sind. Während einer ganzen Umdrehung von ns müssen in dem Drahte zwei entgegengesetzt gerichtete Ströme entstehen. Denn während einer halben Umdrehung nähert sich ja die eine Spule dem Nordpol des Magneten, die andere dem Südpol. Bei geeigneter Wicklung des Drahtes entsteht aus den beiden Impulsen ein einziger Strom in bestimmter Richtung, die sich bei der nächsten halben Umdrehung natürlich ändern muß. Solche Maschinen liefern also Wechselströme, die erst durch eine geeignete Vorrichtung, den Stromwender oder Kommutator, gleichgerichtet werden.

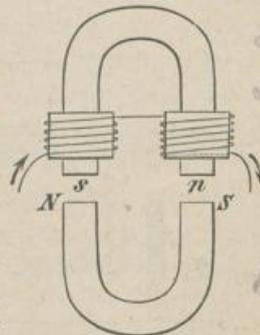


Fig. 171.

Bedeutend erhöht wurde die Wirksamkeit dieser Maschinen, als man an Stelle der gewöhnlichen Magnete starke Elektromagnete anwandte und den Induktor zwischen den ausgehöhlten Polen des Feldmagneten rotieren ließ, so daß beide einander immer möglichst genähert bleiben. Auch hierbei entstehen Wechselströme, die durch einen Kommutator in Gleichstrom verwandelt werden können; doch ist dieser pulsierend, d. h. seine Stärke nimmt periodisch ab und zu. Dagegen erhält man einen nahezu konstanten Gleich-

strom durch den von PACINOTTI und GRAMME erfundenen Ringanker.

Derselbe besteht aus einem Ringe von weichem Eisen, der zwischen den Polen N und S (Fig. 172) eines starken Magneten um seine eigene Achse rotiert.

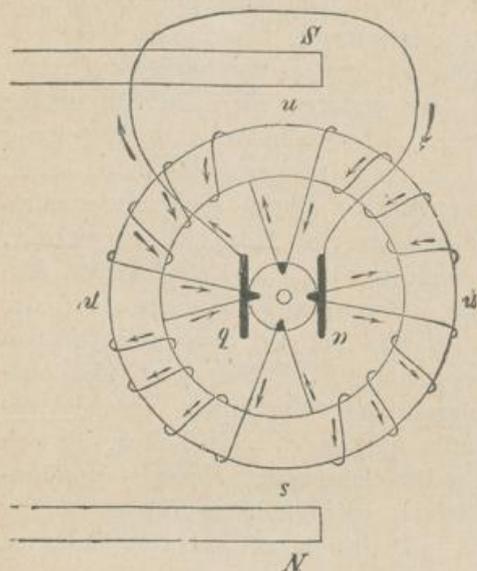


Fig. 172.

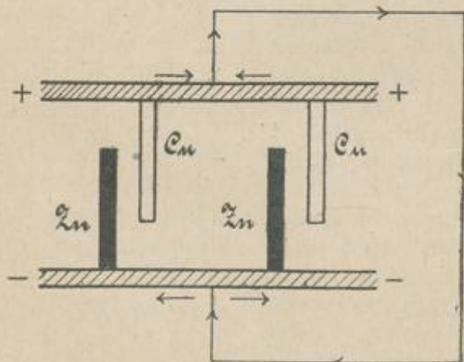


Fig. 173.

Um den Ring sind zahlreiche Gruppen von Drahtwindungen (in der Figur nur vier), alle nach derselben Richtung gewickelt; das Ende einer jeden ist in der Achse mit dem Anfange der nächsten leitend verbunden, indem sie an eine entsprechende Zahl von isolierten Metallstreifen angelötet sind. Dieser mittlere Teil des Apparates heißt Kollektor. Rotiert der Ring, so müssen in den Drahtwindungen der oberen Hälfte entgegengesetzte Ströme entstehen wie in den unteren. Diese entgegengesetzt gerichteten Ströme stoßen nun an den Stellen p und p' zusammen, welche somit analog den Polen zweier nebeneinander geschalteter galvanischer Elemente sind (vgl. Fig. 173). Ebenso wie bei solchen wird auch beim GRAMMESchen Ring die Elektrizität abgeleitet, indem in Höhe von p und p' zwei Metallstücke a und b , die sog. Bürsten, am Kollektor schleifen. Es entsteht somit ein stets gleichgerichteter Strom von b nach a .

Auf ähnlichen Prinzipien wie der GRAMMESche Ring beruht der Trommelanker von v. HEFNER-ALTENECK, bei dem der Wicklungsdraht auf einen, ebenfalls zwischen den Polen eines Elektromagneten rotierenden, Eisenzylinder („Trommel“) parallel zur Längsachse gewickelt ist.

§ 202. **Dynamoprinzip.** Neben der Verbesserung der Ankerkonstruktionen trug vor allem die von WERNER SIEMENS 1867 gemachte Entdeckung des Dynamoprinzips zur großartigen Entwicklung der elektrischen Maschinen bei. Dasselbe besteht darin, daß man den durch Drehung des Induktors in diesem entstandenen Strom um den Hufeisenmagneten (bzw. um ein hufeisenförmiges Stück von weichem

Eisen, das ja infolge des Erdmagnetismus stets eine Spur Magnetismus enthält) herum leitet und somit dessen magnetische Wirkung verstärkt. Diese erhöht wieder die Wirksamkeit des Induktionsstroms, und so setzt sich dieser Circulus fort, bis zur magnetischen Sättigung des Eisens. Als Anker derartiger Dynamomaschinen kann jeder Gleichstrom liefernde Anker dienen, also der GRAMMESCHE Ring, der Trommelanker usw. Man unterscheidet wieder Hauptstrommaschinen (Fig. 174), wo der Strom hintereinander Feldmagnet und äußeren Stromkreis durchfließt, Nebenschlußmaschinen, wo der Feldmagnet im Nebenschluß liegt, und Verbundmaschinen, die eine Kombination der beiden ersten Typen sind.

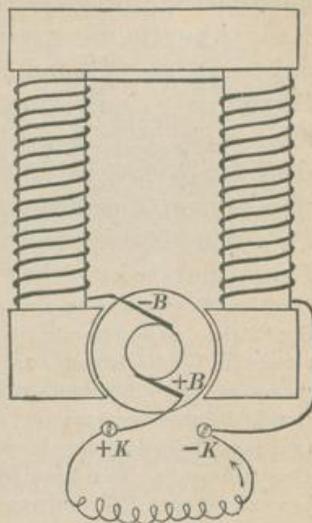


Fig. 174.

§ 203. **Transformatoren.** Unter Transformatoren im engeren (technischen) Sinne versteht man Vorrichtungen, durch welche ein Wechselstrom von bestimmter Spannung mittels Induktion einen zweiten Wechselstrom von anderer Spannung erzeugt. Wickelt man auf einen Eisenkern (der für technische Zwecke ringförmig geschlossen ist) einen primären und darüber einen sekundären Stromkreis, so treten, wie oben ausgeführt, in letzterem Induktionsströme auf, wenn im primären Stromkreise Schwankungen der Stromstärke entstehen; letzteres ist natürlich auch der Fall, wenn ein Wechselstrom hindurchgesandt wird. Es verhalten sich nun die elektromotorischen Kräfte in beiden Stromkreisen wie die Windungszahlen der primären und sekundären Spule. Auf Grund dieser Tatsache ist man in der Lage, einen Wechselstrom von gegebener Spannung in einen anderen Wechselstrom von gewünschter Spannung zu verwandeln. Man braucht in den Stromkreis des ersteren ja nur eine Spule einzuschalten, die man mit einer sekundären Spule von entsprechend größerer oder kleinerer Windungszahl umgibt. Da nun nach dem Gesetze von der Erhaltung der Energie bei dieser Umwandlung der Effekt in beiden Stromkreisen, also die Zahl der Volt-Ampère bzw. Watt gleich sein muß, wird natürlich einer erhöhten Spannung im sekundären Stromkreise eine geringere Stromstärke daselbst entsprechen und umgekehrt. So kann z. B. ein Strom von 10 Volt und 2 Ampère in einen Strom von 40 Volt transformiert werden, der dann aber nur 0,5 Ampère haben kann. Durch Wechselstromtransformatoren kann man also Ströme von niedriger Spannung und großer

Stromstärke in solche von hoher Spannung und geringer Stromstärke verwandeln und umgekehrt. Wegen dieser bequemen Transformierbarkeit spielen Wechselströme bei der elektrischen Kraftübertragung eine große Rolle. Denn während es darauf ankommt, an Ort und Stelle Ströme von hoher Intensität zur Verfügung zu haben, würde die Fortleitung solcher sehr unzweckmäßig sein, da ja die unproduktive JOULEsche Wärme mit dem Quadrate der Intensität wächst [§ 180]. Zum Transport der elektrischen Kraft verwendet man daher hochgespannte Wechselströme von geringer Intensität, für welche sehr dünne Drähte genügen, und transformiert sie dann am Gebrauchsorte in solche von großer Intensität, aber geringer Spannung.

Im Gegensatz zu den Transformatoren sind Umformer Vorrichtungen, durch die eine bestimmte Stromart in eine andere verwandelt wird, z. B. Gleichstrom in Wechselstrom und umgekehrt. Man erreicht dies z. B. dadurch, daß man eine Wechselstrom- mit einer Gleichstrommaschine koppelt (entweder durch Riemenübertragung oder durch Aufbau auf derselben Rotationsachse) und je nach Bedarf die eine als Motor, die andere als Generator benutzt („Motor-Generatoren“). Man kann aber die Umformung auch in einer einzigen Maschine bewerkstelligen („Umformer im engeren Sinne“). Die Ausdrücke „Transformator“ und „Umformer“ werden übrigens manchmal auch gleichbedeutend für einander gebraucht.

§ 204. **Induktionsapparate.** Auf analogen Grundlagen wie die Wechselstromtransformatoren beruhen auch die Induktionsapparate im engeren Sinne. Auch hier haben wir wieder eine in den primären Stromkreis eingeschaltete primäre Spule, die aus relativ wenigen Windungen eines dicken Drahtes besteht. Sie ist umgeben von der sekundären Spule, die mit sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes bewickelt ist. Auch hier befindet sich im Inneren der Primärspule zur Verstärkung des magnetischen Feldes ein Eisenkern, der aber hier nicht ringförmig geschlossen, sondern stabförmig ist [vgl. § 198]. Man kann zwar einen solchen Induktionsapparat auch dadurch betreiben, daß man durch die Primärspule Wechselstrom sendet. Gewöhnlich aber werden die zur induktiven Erregung der Sekundärspule erforderlichen Schwankungen der Stärke des magnetischen Feldes (bzw. der Kraftlinienzahl) dadurch erzielt, daß ein im primären Stromkreise fließender Gleichstrom durch automatische Vorrichtungen in raschem Wechsel geschlossen und geöffnet wird. Wie bereits erwähnt [§ 200], besitzt der sekundäre Öffnungsinduktionsstrom eine viel höhere Spannung und deshalb u. a. auch eine größere physiologische Wirksamkeit als der Schließungsinduktionsstrom.

Für medizinische Zwecke kommen kleine Induktionsapparate¹ in Betracht, bei denen die automatische Stromunterbrechung

¹ Der von solchen Apparaten gelieferte Strom wird nach medizinischem Sprachgebrauch auch *faradischer Strom* genannt (nach FARADAY, dem Entdecker der Induktion).

durch den WAGNERSchen Hammer [§ 193] bzw. Modifikationen desselben erfolgt. Bei gegebenem Apparat ist die Induktionswirkung um so kräftiger, je stärker der Primärstrom, je tiefer der Eisenkern in der Primärspule und je kleiner der Abstand beider Spulen („Rollabstand“) ist. Letzterer Faktor läßt sich bei den sog. Schlittenapparaten (DU BOIS-REYMOND) dadurch variieren, daß die sekundäre Spule über die primäre verschoben werden

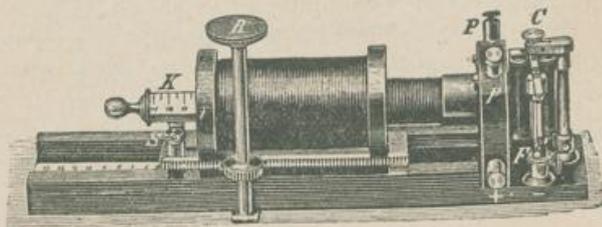


Fig. 175.

kann. Bei dem in Fig. 175 abgebildeten Apparat geschieht dies z. B. durch Drehen des Knopfes *R*.

Von diesen kleinen medizinischen Apparaten unterscheiden sich die großen von RÜHMKORFF erfundenen Funkeninduktoren, die zur Erzeugung von Röntgenstrahlen usw. dienen, prinzipiell nicht. Nur wird in ihnen durch verschiedene Faktoren eine derartig hohe Spannung (10000 bis 1 Million Volt) erreicht, daß zwischen den Polen der sekundären Spule Funken von oft außerordentlicher Länge und Intensität übergehen können. So ist z. B. die Windungszahl der sekundären Spule außerordentlich groß; bei den größten Apparaten sind bis zu 160 km Draht aufgewickelt. Erhöht wird die Wirkung auch durch den FIZEAUSchen Kondensator [§ 167]. Wird ein solcher Kondensator, der eine große Kapazität besitzt, parallel zur Unterbrechungsstelle geschaltet, so wird die Spannung an dieser so verringert, daß die Öffnungsfunken (welche ja der raschen Unterbrechung entgegenwirken, somit die Spannung der sekundären Öffnungsströme verringern) nicht zustande kommen. Von besonderer Wichtigkeit für den Wirkungsgrad der Induktoren sind schließlich die Unterbrecher, da ja von der Schnelligkeit und Exaktheit der Unterbrechung die Größe der elektromotorischen Kraft im sekundären Stromkreise wesentlich abhängt.

Während der WAGNERSche Hammer nur 15–20 Unterbrechungen pro Sekunde gibt, daher nur für kleinere Induktoren verwendbar ist, erzielt man mit den modernen Unterbrechern bis zu vielen Hunderten Unterbrechungen pro Sekunde. Von den vielen Arten sei hier nur kurz der WEHNELT-Unterbrecher beschrieben. Hier taucht in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure als Kathode eine breite Bleiplatte, als Anode ein Platinstift. An diesem tritt, wegen des hier großen Widerstandes, sehr starke Erhitzung (JOULEsche Wärme) ein, so daß die benachbarten Flüssigkeitsteilchen in Dampf verwandelt werden, wodurch Stromunterbrechung erfolgt. Ist nun im primären Stromkreise eine

Spule mit beträchtlicher Selbstinduktion vorhanden, so entsteht infolge der plötzlichen Abnahme der Stromstärke ein kräftiger Öffnungsextrastrom, der unter Funkenbildung die erhitzte Gashülle durchschlägt, in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt und explosionsartig auseinandertreibt, so daß jetzt wieder Flüssigkeit den Stift berührt und der Strom geschlossen ist. Auf diese Weise erhält man bis zu 3000 Unterbrechungen pro Sekunde.

§ 205. **Telephon und Mikrophon.** Von den unendlich vielen auf Induktion beruhenden Apparaten ist einer der interessantesten das Telephon¹ von BELL. An den beiden Orten, zwischen denen gesprochen wird, befindet sich ein Stabmagnet, der von einer Drahtspule umgeben ist; die Drahtspulen beider Orte sind miteinander verbunden. Vor den Nordpolen n und n' (Fig. 176) der Magnete be-

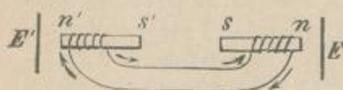


Fig. 176.

findet sich je ein dünnes Eisenplättchen E und E' , in denen durch Influenz auf der den Magneten zugekehrten Seite ein magnetischer Südpol entsteht. Nähert man das Eisenplättchen E dem Magneten

und damit auch der geschlossenen Drahtspule, so entsteht in dieser ein Induktionsstrom, der zum Nordpol des anderen Magneten fließt und diesen, da er entgegengesetzt wie ein Uhrzeiger geht [vgl. § 193] verstärkt; das Eisenplättchen E' wird also angezogen. Entfernt man dagegen E , so wird E' abgestoßen. Beide Eisenplättchen bewegen sich also stets gleichsinnig. Wird daher gegen E gesprochen, so wird es in Schwingungen versetzt, die genau dieselben Schwingungen in E' hervorrufen; letztere werden dann als Töne vernommen. Der eine Draht kann wie beim Telegraphen durch die Erdleitung ersetzt werden.

Eine wesentliche Verstärkung der Wirkung erzielt man, wenn man das eigentliche Telephon nur als Empfänger (Hörapparat) benutzt, als Geber (Sprechapparat) dagegen ein sog. Mikrophon. Hier geht ein Batteriestrom durch mehrere, auf einem Resonanzboden angebrachte, mit den Spitzen sich berührende Kohlenstäbchen und von hier aus zur Empfangsstation. Wird gegen den Resonanzboden gesprochen, so wird durch die mechanische Erschütterung hierbei der Kontakt der Kohlenspitzen und somit auch der Widerstand im Stromkreise geändert; es entstehen Schwankungen im Magnetismus des Hör-Telephons, und die Eisenplatte desselben gerät in Schwingungen, die denen der Tonquelle genau entsprechen. Anstelle der Kohlenstäbchen kann man auch Kohlenkörner benutzen, die sich zwischen zwei leitenden Platten befinden. Für größere Entfernungen verbindet man den Stromkreis des Mikrophons mit der primären, den des Telephons mit der sekundären Spule eines Transformators, wodurch ein für Fernleitungen besser geeigneter Strom von höherer Spannung erzielt wird [vgl. § 203].

¹ τῆλε fern, φωνάω sprechen.

e. Entladungen in verdünnten Gasen. Radioaktivität.

§ 206. **Lichterscheinungen in Geißler- und Hittorf-Röhren.** Unter GEISSLERSCHEN Röhren versteht man verschieden geformte Glasröhren, die Luft oder ein anderes Gas in starker Verdünnung enthalten und mit zwei eingeschmolzenen Aluminium-Elektroden versehen sind (Fig. 177). Hat man den Druck in einer solchen Röhre durch Auspumpen auf 6—8 mm Quecksilber erniedrigt und sendet dann hochgespannte Elektrizität, z. B. mittels einer Influenzmaschine oder eines Funkeninduktors hindurch, so entsteht kein gewöhnlicher elektrischer Funke, sondern zwischen beiden Elektroden verläuft ein helles violettes Lichtband, das sich bei 1—3 mm Druck verbreitert und eine Schichtung aufweist. Das von der Anode ausgehende Licht sieht mehr rötlich aus und reicht bis in die Nähe der Kathode, von der es durch einen dunklen Zwischenraum getrennt ist. Auch an der Kathode sieht man eine kleine bläuliche Lichthülle (Glimmlicht). Bei zunehmender Luftverdünnung dehnt sich das Glimmlicht immer mehr nach der Anode zu aus, während das Anodenlicht immer kleiner wird und schließlich ganz verschwindet. Beträgt der Druck im Innern der Röhre nur noch 0,01—0,001 mm Quecksilber — so stark evakuierte Röhren werden HITTORFSche oder CROOKESsche Röhren genannt —, so zeigt die Röhre, die jetzt fast gar kein Anodenlicht und nur ein ganz schwaches diffuses Glimmlicht aufweist, an der der Kathode gegenüberliegenden Stelle grünliche oder bläuliche Fluoreszenz, deren Ursache unsichtbare, von der Kathode ausgehende Strahlen sind.



Fig. 177.

§ 207. **Kathodenstrahlen. Anodenstrahlen.** Die Haupteigenschaften der von HITTORF und CROOKES entdeckten Kathodenstrahlen sind folgende: 1. Sie erzeugen in nichtmetallischen Körpern, z. B. in der Wand der Glasröhre, Fluoreszenz. 2. Sie breiten sich senkrecht zur Kathode geradlinig aus, ganz unabhängig davon, wo die Anode ist. Ist die Kathode hohlspiegelartig, so vereinigen sie sich in einem Brennpunkt (Fig. 179). Die geradlinige Ausbreitung wird dadurch bewiesen, daß von einem undurchlässigen festen Körper auf der fluoreszierenden Stelle der gegenüberliegenden Glaswand ein ähnliches Schattenbild entsteht (Fig. 178). 3. Sie besitzen starke Wärmewirkungen. 4. Sie können in labilem Gleichgewicht befindliche leichte Körper in Bewegung setzen. 5. Sie gehen durch sehr dünne Metall-



Fig. 178.

schichten (aber nicht durch Glimmer- oder Glasplatten) hindurch. Kittet man also z. B. ein dünnes Aluminiumblättchen gegenüber der Kathode auf die daselbst durchlochte Wand, so kann man die Kathodenstrahlen auch außerhalb der Röhre untersuchen, wo sie jedoch bald diffus zerstreut werden. 6. Sie ionisieren die Luft [§ 212]. 7. Sie werden durch magnetische und elektrostatische Einwirkungen aus ihrer Richtung abgelenkt. 8. Sie erzeugen dort, wo sie auf feste Körper aufprallen, eine neue Art von Strahlen, die Röntgenstrahlen.

Wahrscheinlich sind die Kathodenstrahlen die Bahnen allerkleinster materieller Teilchen, die mit negativer Ladung von der Kathode aus mit ungeheurer Geschwindigkeit (ein bis drei Zehntel der Lichtgeschwindigkeit) fortgeschleudert werden. Man nennt derartige „Elementarquanta“ der Masse, die — etwa 2000mal kleiner als ein Wasserstoffatom — mit einem „Elementarquantum“ negativer Elektrizität verbunden sind, Elektronen. Manche Forscher nehmen sogar an, daß die Elektronen nur eine scheinbare Masse besitzen, daß es also reine Elektrizitätsteilchen sind, deren (durch Selbstinduktion bewirkte) Trägheit gegen Geschwindigkeitsänderungen eine Masse nur vortäuscht. Jedenfalls kennt man bisher nur negative Elektronen [vgl. § 212].

Die von der Anode ausgehenden Anodenstrahlen, die ebenfalls magnetisch und elektrisch ablenkbar sind, stellen die Bahnen mit positiver Elektrizität geladener Teilchen vor, welche ungefähr die Größe der gewöhnlichen Atome und dementsprechend eine viel kleinere Geschwindigkeit besitzen als die Kathodenstrahlen. Zu den Anodenstrahlen gehören wahrscheinlich auch die sog. Kanalstrahlen, das sind Strahlen, die durch eine durchlöchernte Kathode von der Anodenseite her hindurchtreten.

§ 208. Röntgenstrahlen. Als RÖNTGEN 1895 zufällig beobachtete, daß fluoreszierende Körper aufleuchteten, wenn eine in der Nähe befindliche, mit undurchlässigem Stoff bedeckte HITTORFSche Röhre in Betrieb war, war dies für ihn der Anlaß zu systematischen Untersuchungen, die ihn zur Entdeckung einer neuen Art unsichtbarer Strahlen führten. Während er sie selbst „X-Strahlen“ nannte, heißen sie jetzt allgemein ihm zu Ehren Röntgenstrahlen. Diese Röntgenstrahlen entstehen überall dort, wo Kathodenstrahlen auf feste Körper auftreffen, u. a. auch an fluoreszierenden Teile der Röhrenwand. Besonders wirksame Röntgenstrahlen erhält man, wenn Kathodenstrahlen auf Platin (oder Iridium oder Tantal) fallen. Man konstruiert daher die sog. Röntgenröhren so, daß man in den Brennpunkt einer hohlspiegelförmigen Kathode (*a* in Fig. 179) eine Platte aus Platin usw. (*b*) als sog. Antikathode¹ bringt, von der die wirksamen Röntgenstrahlen ausgehen. Durch diese Anordnung erreicht man zugleich, daß die Röntgenstrahlen möglichst nur von einem Punkte der Antikathode ausgehen, der eben im Brennpunkte der Kathodenstrahlen liegt (daher der Name Fokusröhren); hierdurch

¹ *à*vtl gegenüber.

erhält man wesentlich schärfere Bilder. Erwähnt sei noch, daß man Röhren, bei denen die Luft maximal verdünnt ist, hart, weniger stark evakuierte weich nennt; erstere liefern „harte“, letztere „weiche“ Strahlen.

Die Röntgenstrahlen erregen Fluoreszenz, sind photographisch wirksam, ionisieren die Luft [§ 212] und besitzen Wärmewirkungen. Im Gegensatz zu den Kathodenstrahlen sind sie durch magnetische oder elektrische Kräfte nicht ablenkbar und entfalten ihre Wirkungen zum wesentlichen Teile auch außerhalb der Röhre. Besonders wichtig ist ihre Eigenschaft, feste (auch undurchsichtige) Körper zu durchdringen, um so besser, je härter die Strahlen sind und je kleiner die Dichte bzw. das Atomgewicht der betreffenden Körper ist.

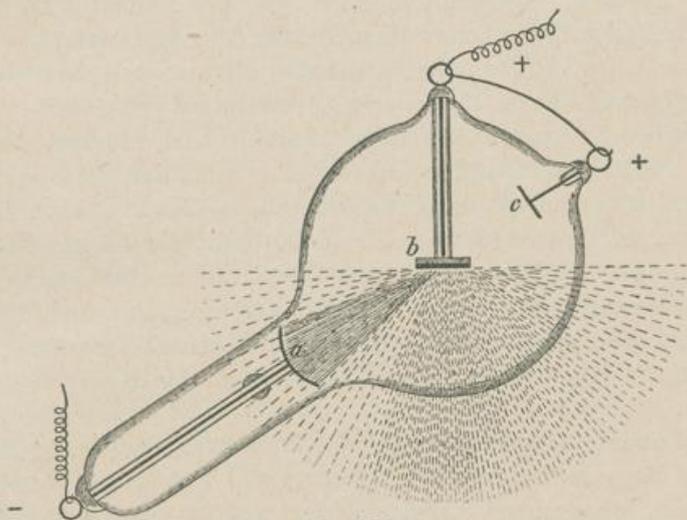


Fig. 179.

Die Schwermetalle sind z. B. in viel geringerem Grade durchlässig als das leichte Aluminium, die Knochen weniger als die Haut und Muskeln usw. Da nun die Röntgenstrahlen, wie erwähnt, auch photochemische Wirkungen besitzen und Fluoreszenz erzeugen, so kann man mit ihnen Gegenstände photographieren („röntgenographieren“) bzw. direkt sehen („röntgenoskopieren“), die sich im Innern von undurchsichtigen, aber für Röntgenstrahlen durchlässigen Körpern befinden, z. B. Geld in einem Portemonnaie, Knochen im tierischen Körper usw. Es entsteht dann nämlich ein Schattenbild der undurchlässigen Objekte, z. B. der Knochen, da hinter denselben die photographische Platte nicht zersetzt wird, resp. der (meist mit Baryumplatinzyanür beschriebene) Fluoreszenzschirm nicht aufleuchtet.

Die Röntgenstrahlen entstehen wahrscheinlich dadurch, daß die Elektronen der Kathodenstrahlen auf die Antikathode aufprallen, wodurch kurz-

dauernde Erschütterungen des Äthers ausgelöst werden. Nachdem es gelungen ist, bei ihnen Polarisations-, Beugungs- und Interferenzerscheinungen nachzuweisen (letztere mittels Kristallen, die gewissermaßen natürliche molekulare „Gitter“ vorstellen), nimmt man an, daß auch die Röntgenstrahlen auf transversalen Ätherschwingungen beruhen, die sich wellenförmig mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Und zwar sind die Wellenlängen der Röntgenstrahlen die kleinsten, die man kennt, nämlich je nach Qualität der Strahlen ca. $0,01-4 \mu\mu$ [vgl. § 135].

§ 209. **Radioaktive Stoffe und Strahlen.** Wenige Monate nach der Entdeckung RÖNTGENS fand BECQUEREL, daß metallisches Uran und seine Verbindungen ohne äußere Einwirkung dauernd Strahlen ausstrahlen, die wie die Röntgenstrahlen photographisch wirksam sind, feste Substanzen durchdringen, Fluoreszenz erregen, und die Luft leitend machen, also in die Nähe gebrachte elektrisch geladene Körper entladen. Man nennt derartige Strahlen radioaktive Strahlen (zuweilen auch nach dem Entdecker BECQUEREL-Strahlen) und die Stoffe, von denen sie ausgehen, radioaktive Stoffe. Da die Pechblende (ein uranoxydhaltiges Mineral) viel stärker radioaktiv ist als metallisches Uran, lag der Gedanke nahe, daß die Strahlen von gewissen Beimengungen des Urans ausgehen. Nach vielen mühsamen Versuchen gelang es 1898 dem Ehepaar CURIE, als Träger der Radioaktivität aus der Pechblende zwei Elemente zu isolieren, die dem Wismut bzw. Baryum nahestehen, das Polonium und Radium. Bald fand man noch weitere primär radioaktive Elemente, nämlich das Aktinium (ebenfalls in der Pechblende), das Kalium und Rubidium.

Die stärkste Wirkung besitzt das Radium. Es gleicht chemisch sehr dem Baryum, hat aber das Atomgewicht 226. Seine (anscheinend unbegrenzt) abgegebene Energie äußert sich — abgesehen von den ausgesandten radioaktiven Strahlen (s. u.) — in Licht- und Wärmerscheinungen: Radium leuchtet ohne vorherige Bestrahlung intensiv im Dunkeln und strahlt in 1 Stunde pro Gramm 138 Grammkalorien aus.

Die von radioaktiven Substanzen ausgehende Strahlung ist nicht einheitlich, sondern enthält mindestens drei verschiedene Arten von Strahlen: Die α -Strahlen sind ein Analogon zu den Kanalstrahlen; wahrscheinlich bestehen sie aus positiv geladenen Helium-Atomen. Die β -Strahlen entsprechen im wesentlichen den Kathodenstrahlen; doch ist ihre Geschwindigkeit eine größere. Die γ -Strahlen verhalten sich ähnlich wie die Röntgenstrahlen, besitzen aber ein viel stärkeres Durchdringungsvermögen.

Zur Messung der Radioaktivität benutzt man die Eigenschaft der radioaktiven Strahlen, die Luft zu ionisieren [vgl. § 212].

§ 210. **Umwandlung der radioaktiven Stoffe.** Als Ursache für die Entstehung der erheblichen Energiemengen, die den radioaktiven Strahlungen und der dauernden Erwärmung des Radiums zugrunde liegen müssen, nimmt man jetzt allgemein einen Zerfall der Atome

der betreffenden Stoffe in einfachere Atome an, wobei auch die früher für unmöglich gehaltene Umwandlung eines Elementes in ein anderes stattfindet. Es besteht hier eine gewisse Ähnlichkeit mit den Verhältnissen bei der Explosion von Sprengstoffen, wo ebenfalls durch Sprengung der zusammengesetzten Moleküle die bis dahin potentielle Energie der Atome in stark wirkende kinetische Energie verwandelt wird; nur daß sich eben bei den radioaktiven Stoffen die Vorgänge nicht an Molekülen, sondern an Atomen abspielen.

So zerfällt z. B. ein Atom Radium in ein Atom Helium, das als α -Strahlung fortfliegt, und ein Atom Radium-Emanation. Die Emanation, ein gasförmiges Element (neuerdings Niton genannt), zerfällt wiederum einerseits in Helium (was man spektroskopisch direkt nachweisen kann), andererseits in Radium A. Aus diesem bilden sich schrittweise — jedesmal wieder durch Abspaltung von Helium (Aussendung von α -Strahlen) — neue radioaktive Stoffe, die der Reihe nach als Radium B—F bezeichnet werden. Radium F wird für identisch mit Polonium gehalten. Endprodukt des Umwandlungsprozesses soll schließlich das inaktive Blei sein. Radium selbst stammt wahrscheinlich wieder vom Uran ab. In analoger Weise zerfällt z. B. Thorium in Mesothor, Radiothor, Thor X, Thor-Emanation, Thor A, B, C, bis auch hier ein inaktives Endprodukt entsteht.

Die Umwandlungszeit ist für die verschiedenen Stoffe sehr verschieden; sie schwankt zwischen Sekunden und Tausenden, ja Millionen von Jahren. Aus praktischen Gründen gibt man gewöhnlich die sog. Halbwertszeit an, d. h. die Zeit, in der die radioaktive Wirkung des Stoffes bzw. die Zahl seiner Atome auf den halben Wert gesunken ist.

Die Halbwertszeit, die für jeden radioaktiven Stoff eine charakteristische Größe ist, beträgt z. B. für Radium 1730 Jahre, Radium-Emanation 4 Tage, Radium A 3 Minuten, Radium B 27 Minuten, Radium C 20 Minuten, Thor-Emanation 54 Sekunden, Aktinium-Emanation 4 Sekunden. Beim Uran wird sie auf ca. 5 Milliarden Jahre geschätzt.

§ 211. **Emanationen.** Bringt man einen Körper in die Nähe eines Radiumpräparates, so wird er, allerdings nur vorübergehend, ebenfalls radioaktiv. Diese Erscheinung, die man früher induzierte Radioaktivität nannte, beruht darauf, daß die vom Radium abgeschiedene gasförmige Emanation sich auf den Körper ausbreitet, wobei das aus ihr entstehende Radium A und seine Umwandlungsprodukte einen festen Überzug („aktiven Beschlag“) auf dem betr. Körper bilden. Man kann die Emanation dadurch nachweisen, daß man mit negativer Elektrizität geladene Drähte ausspannt und die sich auf ihnen entstandenen aktiven Beschläge mittels eines Lappens abwischt und sammelt, so daß ihre Wirkung auf ein Elektroskop usw. unter-

sucht werden kann. Auf diese Weise gelang es nachzuweisen, daß die Radium-Emanation fast überall vorkommt, auch in der Luft, in tiefen Schächten, in Thermalquellen usw. Wahrscheinlich stammt sie von bestimmten Bestandteilen des Erdbodens her. — Es gibt auch eine Thor- und eine Aktinium-Emanation, die analoge Eigenschaften besitzen.

§ 212. **Ionisation von Gasen.** Durch gewisse Einwirkungen (Kathoden-, Röntgen-, radioaktive Strahlen, ultraviolettes Licht, Flammengase usw.) können Gase, insbesondere auch Luft, die Fähigkeit bekommen, Elektrizität zu leiten. Zur Erklärung nimmt man an, daß die Gasmoleküle aus positiv und negativ elektrischen Teilchen zusammengesetzt sind, die sich unter gewöhnlichen Umständen neutralisieren. Durch die genannten Einwirkungen findet nun eine teilweise Zertrümmerung der Gasmoleküle statt, so daß negative Elektronen [§ 207] frei werden. Da somit das elektrische Gleichgewicht gestört ist, müssen die Restatome positiv elektrisch sein. Man nennt diese kleinsten Massenteilchen wieder (Gas-)Ionen, obwohl sie mit den Ionen der Elektrolyse [§ 185] nicht identisch sind, und unterscheidet nach dem Gesagten negative Elektron-Ionen und positive Atom-Ionen. Beide können wahrscheinlich noch weitere neutrale Moleküle an sich ziehen, so daß größere positive und negative Molekülgruppen, sog. Mol-Ionen, entstehen. Zwar findet nach einiger Zeit eine spontane Wiedervereinigung der Ionen zu neutralen Molekülen statt. Bis dahin aber sind eben freie Ionen vorhanden, die wie bei der Elektrolyse unter dem Einflusse eines elektrischen Feldes „wandern“ können, wodurch ein Transport von Elektrizität, mit andern Worten Leitung der Elektrizität in dem betr. Medium stattfindet. Kommt nun z. B. ionisierte Luft in die Nähe eines geladenen Elektroskops, so werden von diesem die ungleichnamigen Ionen angezogen, welche seine Ladung neutralisieren. Das Elektroskop wird also unelektrisch; seine Ladung ist scheinbar durch die Luft fortgeleitet worden. Im Gegensatz zur Elektrolyse finden bei der Ionisation von Gasen keine chemischen Zersetzungen statt.

Die Größe der ionisierenden Kraft kann man z. B. dadurch messen, daß man ihren Einfluß auf die Entladungsgeschwindigkeit eines geladenen Elektroskops prüft, nachdem man diese vorher unter gewöhnlichen Umständen festgestellt hat. Auch kann man sich der Methode des Sättigungsstroms bedienen. Verbindet man z. B. zwei gegenüberstehende Metallplatten, zwischen denen sich Luft befindet, mit den Polen einer Batterie, so geht unter gewöhnlichen Verhältnissen zwischen ihnen kein Strom über. Ionisiert man jetzt die Luft zwischen den Platten, indem man z. B. Röntgenstrahlen hindurchgehen läßt, so entsteht zwischen ihnen ein Ionenstrom. Vergrößert man die elektromotorische Kraft der Stromquelle, z. B. durch Einschaltung neuer Elemente, so wächst die Stromstärke entsprechend dem OHMSchen Gesetz. Dies ist aber nur so lange der Fall, wie von den Röntgenstrahlen genügend Ionen erzeugt

⊕ ⊖ = Ladung

werden. Werden alle von den Röntgenstrahlen gebildeten Ionen für die Stromleitung in Anspruch genommen, so kann auch durch eine Vermehrung der elektromotorischen Kraft keine Vermehrung der Stromstärke mehr erreicht werden. Diese dann vorhandene maximale Stromstärke, die eben Sättigungsstrom heißt, ist also ein Maß für die ionisierende Kraft.

f. Elektrische Schwingungen.

§ 213. **Schwingungen im allgemeinen.** Unter Schwingungen oder Oszillationen versteht man durch einen Anstoß (Impuls) erzeugte periodisch hin- und hergehende Bewegungen, wie sie z. B. ein Pendel zeigt. Als Ergänzung zu dem in §§ 33 und 55ff. bereits Gesagten sei hier noch folgendes bemerkt: Bei jeder Schwingung eines materiellen Körpers kommen zwei Faktoren in Betracht: Die Kraft (k), welche den Anstoß zur Bewegung gibt, und die Masse (m) des Körpers, deren Trägheit oder Beharrungsvermögen der Bewegung entgegenwirkt. Diese beiden Faktoren bestimmen auch die Schnelligkeit der Schwingungen, d. h. die Schwingungszahl pro Sekunde, folglich auch ihren reziproken Wert, die Schwingungsdauer (T). Für letztere gilt die

Formel $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Der mathematische Beweis dieser Formel soll hier nicht gegeben werden. Es ist aber ohne weiteres einleuchtend, daß die Schwingungsdauer mit der zu bewegenden Masse zunehmen, andererseits im umgekehrten Verhältnis zur Größe des Impulses stehen muß, was eben die Formel besagt. Erfolgen die Schwingungen dauernd mit der gleichen Amplitude [§ 57], so heißen sie ungedämpft. Wird aber die Schwingungsweite, wie in der Regel, allmählich kleiner, z. B. durch den Luftwiderstand oder infolge anderweitiger Abgabe von Energie nach außen, so spricht man von gedämpften Schwingungen.

Verbindet (oder „koppelt“) man nun zwei Pendel durch eine gespannte Schnur, wie in Fig. 180 dargestellt, und gibt dem Pendel A einen Impuls nach rechts, so wirkt er, wenn er wieder nach links schwingt, auf Pendel B ein und bringt es zum „Mitschwingen“. Eine Zeitlang bewegen sich dann beide Pendel zugleich, wobei die Schwingungen von B allmählich größer, die von A kleiner werden und schließlich aufhören. Nun bringt das allein schwingende Pendel B umgekehrt A zum Mitschwingen, und so setzt sich der Vorgang wechselseitig fort. Die gegenseitige Beeinflussung ist am stärksten, wenn beide Pendel möglichst gleiche Eigenschwingungen haben, anders ausgedrückt, wenn zwischen ihnen „Resonanz“ [§ 70] besteht. Aber auch in diesem Falle werden

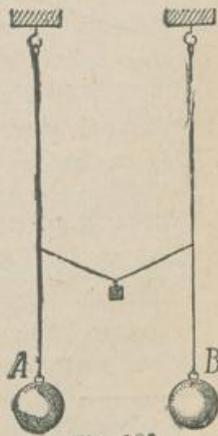


Fig. 180.

die Schwingungen jedes Pendels durch die des anderen gestört (gedämpft); es entstehen gewissermaßen „Schwebungen“ [§ 75]. Würde man dagegen, nachdem *B* durch *A* in maximale Schwingung versetzt ist, die Verbindungsschnur durchschneiden, so würde *B* mit viel geringerer Dämpfung weiter schwingen.

§ 214. **Elektrische Schwingungskreise.** Analog den mechanischen und akustischen gibt es auch elektrische Schwingungen. Als solche können z. B. alle Wechselströme gelten. Im engeren Sinne versteht man darunter aber nur die äußerst raschen Oszillationen, die in einer elektrischen Funkenstrecke entstehen [§ 168] und sich von hier aus teils in den Schwingungskreis teils in die umgebende Luft ausbreiten. Schwingungskreis nennt man jeden Leiter, der die Bahn elektrischer Schwingungen bildet; ein solcher Schwingungskreis kann wieder geschlossen (z. B. in Fig. 181) oder offen, d. h. unterbrochen¹ sein (z. B. in Fig. 183).

Auch bei den elektrischen Schwingungen kommt für die Entstehung und Dauer ein Kraftfaktor und ein Beharrungsfaktor in Betracht. Ersterer ist gegeben durch die elektromotorische Kraft bzw. die durch sie erzeugte Potentialdifferenz (*V*) an den Polen der Funkenstrecke; letzterer durch die Selbstinduktion (*L*), die ja als eine Art elektrischer Trägheit aufgefaßt werden kann [§ 200]. Es ist daher verständlich, daß für die Dauer einer elektrischen Schwingung in einem (geschlossenen) Schwingungskreis eine analoge Formel gilt, wie für die Dauer einer mechanischen Schwingung [§ 213], nämlich $T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$, wobei zu berücksichtigen ist, daß *V* bei gleicher Elektrizitätsmenge umgekehrt proportional der Kapazität *C* ist [§ 161]. Diese sog. THOMSONSche Schwingungsformel ist sehr wichtig, da man mit ihrer Hilfe durch Regulierung der Kapazität und Selbstinduktion² in einem Schwingungskreis die Dauer der Schwingungen, somit auch die davon abhängige Länge der elektrischen Wellen beliebig verändern kann.

Wie man nun die Schwingungen eines Pendels auf einen andern mit ihm mechanisch gekoppelten übertragen kann, so kann man auch durch Koppelung zweier elektrischer Schwingungskreise erreichen, daß die im ersten erzeugten Schwingungen auch im zweiten auftreten. Und zwar kann der zweite Schwingungskreis mit dem ersten durch direkte metallische Leitung verbunden werden (elektrische oder

¹ Das Dielektricum eines eingeschalteten Kondensators gilt nicht als Unterbrechung in diesem Sinne. — ² Mit „Kapazität“ und „Selbstinduktion“ bezeichnet man in der Praxis oft einen „Leiter (Kondensator) mit bestimmter Kapazität“ bzw. einen „Leiter mit bestimmter Selbstinduktion“. Als Kapazität benutzt man gewöhnlich Leidener Flaschen, als Selbstinduktion Spulen; doch besitzen auch gerade Leiter Selbstinduktion [§ 200].

galvanische Koppelung, z. B. in Fig. 184); oder aber man verbindet den ersten Schwingungskreis mit der primären, den zweiten mit der sekundären Spule eines Transformators (elektromagnetische oder induktive Koppelung, z. B. in Fig. 185). Genau wie beim Pendel tritt dann auch hier ein Mitschwingen des zweiten Kreises bei Erregung des ersten ein. Und dieses Mitschwingen ist ebenfalls am stärksten, wenn Resonanz besteht, d. h. wenn die Eigenschwingungen des zweiten Schwingungskreises den in ihn hineingesandten Schwingungen genau entsprechen. Eine solche Resonanz kann man aber durch Regulierung der Kapazität bzw. Selbstinduktion nach der THOMSONSchen Formel unschwer erreichen („Abstimmung“).

Besteht der zweite Schwingungskreis aus einer Spule oder einem geraden Draht, der mit dem primären Kreise nur einseitig verbunden ist, während er auf der anderen Seite frei endigt, so werden die elektrischen Schwingungen am freien Ende reflektiert, und es entstehen, analog den Vorgängen in Pfeifen [§ 69], stehende Schwingungen. Die Wirkung derselben wird an den Stellen des Drahtes am größten sein, wo sich ein Schwingungsbauch befindet. Will man also am freien Ende des zweiten Schwingungskreises besonders kräftige Wirkungen erzielen, so wird man durch Regulierung der Kapazität bzw. Selbstinduktion dafür sorgen, daß hier gerade ein Schwingungsbauch ist.

Um im zweiten Schwingungskreise möglichst wenig gedämpfte Schwingungen zu erhalten, ist es analog wie beim Pendelversuch [§ 213] erforderlich, den störenden Einfluß der Schwingungen des ersten Schwingungskreises auszuschalten, nachdem eine kräftige Erregung des zweiten Kreises stattgefunden hat. Man erreicht das am besten mittels der von WIEN entdeckten Löschfunken. Das sind kleinste, zwischen sehr nahe stehenden Kupferscheiben übergehende Fünkchen, die im Gegensatz zu den gewöhnlichen Funken schon nach 1—2 Oszillationen erlöschen, da infolge der guten Wärmeableitung durch die Kupferplatten die Luft zwischen diesen rasch abgekühlt wird und somit den Funkenstrom nicht mehr leitet. Da solche Funken den zweiten Schwingungskreis nur durch einen kurzen Anstoß erregen, spricht man auch von Stoßfunken bzw. Stoßerregung. Derartige Löschfunken sind aber auch noch in einer anderen Hinsicht von großer Bedeutung; man kann nämlich mit ihrer Hilfe auf diese Weise eine sehr hohe Zahl von Funkenentladungen pro Sekunde erhalten [vgl. § 215].

§ 215. **Hochfrequenzströme.** Läßt man die oszillierenden Funkenentladungen von Leidener Flaschen, die ihrerseits von einem Funkeninduktor gespeist werden, durch die Primärspule eines Transformators gehen, so entstehen in dieser Hochfrequenzströme, d. h. Wechselströme, deren Wechselzahl einige Hunderttausend bis eine Million pro Sekunde und darüber beträgt. (Die Wechselzahl ist doppelt so groß wie die Zahl der Funkenoszillationen.) Verbindet man mit der primären

noch eine sekundäre Spule, die mehr Windungen besitzt, so werden diese hochfrequenten Ströme infolge des enorm raschen und plötzlichen Wechsels im primären Stromkreis noch auf eine außerordentlich hohe

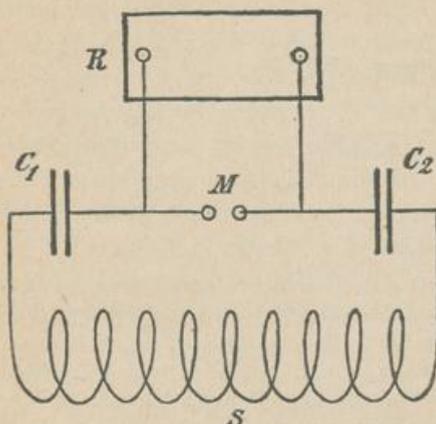


Fig. 181.

Spannung (mehrere hunderttausend Volt) gebracht [§ 199]. Man nennt solche „Ströme hoher Wechselzahl und Spannung“ auch nach den beiden Forschern, die sie unabhängig voneinander entdeckten, TESLA- oder d'ARSONVAL-Ströme. Fig. 181 zeigt schematisch die Anordnung eines zu ihrer Erzeugung dienenden Apparates. *R* bedeutet hier Induktor, *C*₁ und *C*₂ Leidener Flaschen, *M* Funkenstrecke, *S* Primärspule des Transformators. Die (hier nicht gezeichnete) Sekundärspule

kann mit der primären induktiv gekoppelt sein; sie kann aber auch an einen Pol der letzteren direkt angeschlossen werden (ODUNSCHER Resonator).

Von den merkwürdigen Wirkungen solcher Hochfrequenzströme sei hier nur kurz folgendes erwähnt: Schaltet man z. B. ohne Anwendung der Sekundärspule in den Stromkreis einen Kupferbügel, zwischen dessen Schenkel eine kleine Glühlampe an dünnem Drahte befestigt ist (Fig. 182), so leuchtet die

Lampe auf, was bei Anwendung von Gleichstrom nicht der Fall wäre; denn dieser würde wegen des viel kleineren Widerstandes des Kupferbügels fast ausschließlich durch diesen gehen. Hochfrequenzströme mit ihrer hohen Wechselzahl bleiben dagegen nur an der Oberfläche des Leiters, da sie in das Innere wegen der dort sehr erheblichen Selbstinduktion und dadurch bedingten starken Vermehrung des scheinbaren Widerstandes (der sog. Impedanz) nicht eindringen können. Für sie kommt daher nicht das Material eines Leiters, sondern nur sein von der Länge abhängiger Oberflächenwiderstand in Betracht; deshalb wählen sie eben den kürzeren Weg über die Glühlampe. — Schaltet man die Sekundärspule ein, so erhält man an ihrem freien Pole intensive Büschelausstrahlungen, namentlich wenn gute Resonanz besteht [§ 214]. — Merkwürdig ist auch, daß Geißleröhren schon in der Nähe eines Teslatransformators, ohne direkte Verbindung mit ihm, aufleuchten,

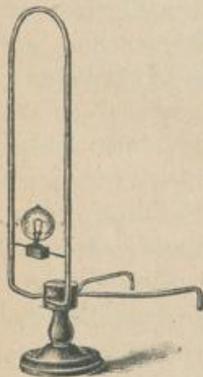


Fig. 182.

namentlich wenn man sie zwischen zwei mit den Polen der Sekundärspule verbundene Metallschirme bringt (TESLA'S „Licht der Zukunft“). — Trotz ihrer hohen Spannung sind solche Teslaströme für den menschlichen Körper ganz ungefährlich, da sie wegen ihrer hohen Wechselzahl und geringen Stromstärke (einige hundert Milliampère) nur minimale elektrochemische Wirkungen

verursachen. Sie werden sogar zur Behandlung („Arsonvalisation“) gewisser Krankheiten benutzt.

Ebenfalls hochfrequente Ströme, aber von weit niedrigerer Spannung (bis zu einigen Hundert Volt), anderseits von größerer Stromstärke (2—3 Ampère) benutzt man zur Diathermiebehandlung, deren Wesen darin besteht, daß innerhalb des menschlichen Körpers selbst erhebliche Mengen JOULEScher Wärme erzeugt werden. Gleichströme und Wechselströme niedriger Wechselzahl können hierzu nicht benutzt werden, da sie viel zu starke, ev. tödliche Reizwirkungen verursachen würden. Aber auch noch gewöhnliche Hochfrequenzströme würden unangenehme Erscheinungen machen, wenn ihre Stromstärke so stark wäre, wie es zur Erzielung wirksamer Stromwärme erforderlich ist. Um solche Nebenwirkungen ganz zu vermeiden, sind Schwingungen erforderlich, die möglichst zahlreich pro Sekunde und möglichst kontinuierlich erfolgen; solche Schwingungen erhält man mittels der Löschfunken [§ 214].

Wenn oben gesagt wurde, daß die mittels gewöhnlicher Funkenstrecke erzeugten Hochfrequenzströme eine Wechselzahl von ca. 1 Million haben, so ist das insofern richtig, da jede Oszillation ca. 1 Milliontel Sekunde dauert. Es ist aber ergänzend hinzuzufügen, daß solche rasche Oszillationen keineswegs kontinuierlich vorhanden sind. Ein gewöhnlicher elektrischer Funke besteht nämlich aus ca. 15—20 gedämpften Oszillationen, die zusammen etwa $\frac{1}{50000}$ Sekunde dauern. Da man nun höchstens 100 derartige Funken pro Sekunde erzeugen kann, so entsteht nach jedem Funken eine Pause, die 500mal länger ist als die Wirkungszeit. Tatsächlich sind also hier nur etwa 100×20 , also ca. 2000 Oszillationen in der Sekunde vorhanden. Bei Anwendung von Löschfunken kann man dagegen pro Sekunde bis zu 20000 Funken erzielen, von deren jedem wieder ein Zug stark gedämpfter Schwingungen ausgeht, so daß die Pausen hier ganz erheblich kürzer sind.

§ 216. **Elektrische Wellen. Hertz'sche Versuche.** Von der Funkenstrecke bzw. vom freien Ende eines Schwingungskreises breiten sich die elektrischen Schwingungen in die umgebende Luft in Form von elektrischen Wellen aus¹. Diese elektrischen Wellen gehen nur durch Dielektrica, nicht durch Metalle hindurch und sind den Lichtwellen vollkommen analog. Wie diese sind sie also ebenfalls an den Äther als Substrat gebunden und gehorchen auch den gleichen Gesetzen der Reflexion, Brechung, Interferenz und Polarisation; auch haben sie dieselbe Geschwindigkeit, nämlich $v = 300000$ km pro Sekunde. Sie unterscheiden sich von den Lichtwellen nur quantitativ, in dem ihre Länge erheblich größer, ihre Schwingungszahl somit, entsprechend der Formel $v = n\lambda$ [§ 61], erheblich kleiner ist.

¹ Gleichzeitig mit den elektrischen Schwingungen, aber senkrecht zu ihnen, breiten sich übrigens auch magnetische Schwingungen aus.

Diese wichtigen Tatsachen wurden durch die genialen Versuche von HERTZ (1888) festgestellt, nachdem bereits vorher FARADAY und namentlich MAXWELL ihre Theorie entwickelt hatten. Da gewöhnliche elektrische Wellen für Laboratoriumsversuche viel zu groß sind (wenn von einer Funkenstrecke 1 Million Schwingungen pro Sekunde ausgehen, entstehen nach der Formel $v = n\lambda$ Wellen von 300 m Länge), so kam es darauf an, möglichst kleine elektrische Wellen zu erzeugen. Nach der eben angeführten Formel muß man also die Zahl der Schwingungen (n) in der Funkenstrecke möglichst groß oder, was ja dasselbe ist, die Dauer der einzelnen Schwingungen (T) möglichst klein machen. Nach der THOMSONschen Schwingungsformel tritt dies aber ein, wenn Kapazität bzw. Selbstinduktion möglichst klein sind. Demgemäß benutzte HERTZ als Wellensender („Oszillator“, O , Fig. 183) einen

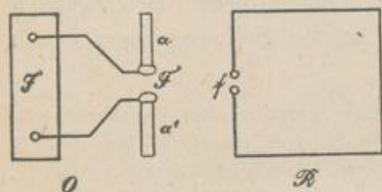


Fig. 183.

Schwingungskreis mit kleiner geradliniger Entladungsbahn und mit kleiner Kapazität (statt Kondensatoren z. B. zwei kleine Metallzylinder a und a'). Auf diese Weise konnte HERTZ Wellen bis zu 60 cm Länge erzeugen. (Heute kann man Wellen bis zu 2 mm herstellen, während die

obere Grenze bis zu mehreren Tausend Metern reicht). Wenn nun die von der Funkenstrecke F des Induktors J ausgehenden elektrischen Wellen auf den Resonator R treffen, so bewirken sie, daß in dessen Funkenstrecke f ebenfalls kleine Fünkchen übergehen, deren Stärke von der Stellung des Resonators zum Oszillator, von seiner Entfernung und von seiner Resonanz abhängt. Mit diesem einfachen Apparate konnte also HERTZ die genannten Eigenschaften der elektrischen Wellen nachweisen.

§ 217. **Funkentelegraphie.** Die praktische Verwertung der HERTZschen Laboratoriumsversuche ist in erster Linie den zielbewußten Arbeiten MARCONIs (seit 1895) zu verdanken, der dadurch zum Begründer der Funkentelegraphie (weniger gut auch „Telegraphie ohne Draht“ genannt) geworden ist. Einen weiteren Ausbau hat dieselbe durch die wichtigen Arbeiten von BRAUN, SLABY, Graf ARCO, WIEN u. a. erfahren. Hier können nur einige wichtige Punkte kurz skizziert werden. Schon MARCONI fand, daß die Aussendung elektrischer Wellen wesentlich dadurch gefördert wird, wenn man von der Funkenstrecke aus einen langen Draht (sog. Antenne) aufwärts in die Luft führt, während man die andere Seite erdet; heute verwendet man ganze Systeme von Drähten, die durch Masten gestützt werden. Bald erkannte man auch, daß es nicht ausschließlich auf die Länge der Antennen ankommt, wie man zuerst geglaubt hatte, sondern auf

ihr richtiges Verhältnis zu den auf ihr sich bildenden stehenden elektrischen Schwingungen [vgl. § 214]. Eine gleiche Antenne ist auch auf der Empfangsstation mit dem Schwingungskreis verbunden, der aber statt der Funkenstrecke einen Detektor besitzt (s. u.). Die Apparate der Aufgabe- und der Empfangsstation müssen gegenseitig wie auch in ihren einzelnen Teilen gut abgestimmt sein. Wirklich brauchbar konnte die Funkentelegraphie aber erst durch die Erfindung wirksamer Wellenanzeiger (Detektoren¹) werden, da der primitive HERTZsche Resonator [§ 216] für die Zwecke der Praxis ganz unzureichend war.

Der erste brauchbare Wellenanzeiger war der von BRANLY 1890 erfundene Kohärer² oder Fritter. Es ist dies eine mit Metallspänen gefüllte Glasröhre, die mittels zweier Elektroden in einen Stromkreis eingeschaltet wird, der eine eigene Stromquelle besitzt. In diesem besteht unter gewöhnlichen Verhält-

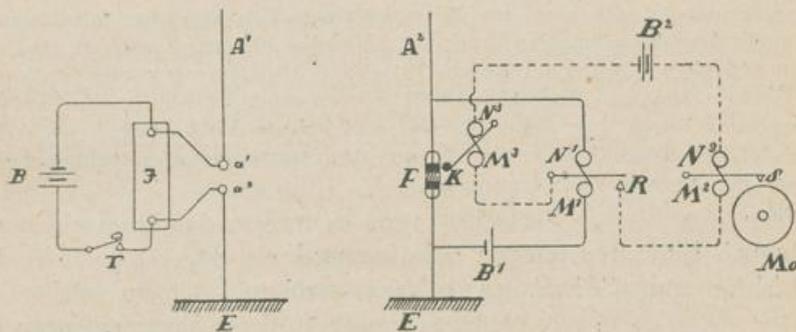


Fig. 184.

nissen kein Strom, da der Kohärer einen zu großen Widerstand bildet. Sobald jedoch elektrische Wellen auf den Kohärer treffen, verringert sich sein Leitungswiderstand, indem die Metallteilchen (vielleicht durch kleine unsichtbare Funken zusammengeschweißt) kohärenter werden. Der nun entstehende Strom zeigt sich z. B. durch Ertönen einer in den Stromkreis eingeschalteten elektrischen Klingel an und dauert so lange, bis der Zusammenhang der Metallteilchen wieder mechanisch gelockert ist, was z. B. automatisch durch einen mit einem WAGNERschen Hammer verbundenen Klöppel erfolgen kann.

Fig. 184 zeigt schematisch die erste MARCONI-Schaltung. Wird der Morsetaster *T* heruntergedrückt, so wird der von der Batterie *B* gespeiste Primärkreis des Induktors *I* geschlossen, und während dieser Zeit erfolgt in der mit dem Sekundärkreis des Induktors verbundenen Funkenstrecke *a'a'* ein Übergang von Funken, deren Oszillationen sich auf die Antenne *A¹* fortsetzen, wo sie stehende Schwingungen bilden. Von der Spitze der Antenne gehen dann, namentlich wenn hier ein Schwingungsbauch ist, kräftige elektrische Wellen in die Luft, die sich auch auf der Empfangsantenne *A²* ausbreiten und hier

¹ *delego* aufdecken. — ² *cohaereo* zusammenhängen.

den Fritter F leitend machen, so daß im Stromkreis der Batterie B^1 jetzt ein elektrischer Strom entsteht. Dadurch wird der Elektromagnet M^1N^1 wirksam und zieht seinen Anker an, der bei R einen zweiten (gestrichelt gezeichneten) Stromkreis mit besonderer Stromquelle B^2 schließt. Hierdurch wird auch der Elektromagnet M^2N^2 wirksam und betätigt den Morseschreibapparat SMo . Zugleich zieht aber auch der Elektromagnet M^2N^2 seinen Anker an, und hierdurch schlägt der Klöppel K gegen den Fritter und macht ihn wieder leitungsunfähig, so daß weiter ankommende elektrische Wellen von neuem auf den Morseschreiber wirken können.

Heute ist der Fritter in der Praxis durch andere Detektoren vollkommen verdrängt worden. Am wichtigsten sind die **Kontakt-detektoren**, bei denen eine Metall- oder Graphitspitze ein Mineralplättchen (z. B. Bleiglanz) berührt. Sie lassen die elektrischen Schwingungen im wesentlichen nur in einer Richtung durch, formen also den hochfrequenten Wechselstrom in unterbrochenen Gleichstrom um, der in einem eingeschalteten Telephon ein Geräusch bzw. einen Ton hervorbringt. Diese Detektoren unterscheiden sich vom Fritter dadurch, daß sie keiner Hilfsbatterie bedürfen und auch die Wirkung der auf sie treffenden Wellen summieren. Erzeugt man also auf der Geberstation n Funken pro Sekunde, so hört man im Telephon einen Ton von der Schwingungszahl n (System der „tönenden Funken“). Man hat hier somit auch in der Höhe der im Telephon erzeugten Töne ein Mittel zur Abstimmung zweier Stationen. Die Übermittlung von Buchstaben und Worten erfolgt wieder so, daß auf der Geberstation durch den Taster kürzere und längere Funkenreihen nach dem Morsealphabet ausgelöst werden, die auf der Empfangsstation entsprechende kürzere und längere Töne erzeugen.

Ein wesentlicher Fortschritt war es ferner, daß BRAUN den ursprünglich benutzten offenen Schwingungskreis (Fig. 184) durch den geschlossenen Schwingungskreis ersetzte, weil ein solcher die

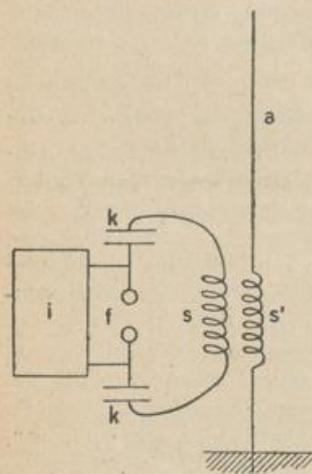


Fig. 185.

Aufspeicherung größerer Energiemengen gestattet und gegen störende Einwirkungen seitens der Antenne besser geschützt ist. Mit diesem geschlossenen Schwingungskreis ist dann die Antenne galvanisch oder aber induktiv (Fig. 185) gekoppelt. Die Aufgabe-station besteht hier also aus dem geschlossenen Erregerkreis und dem damit gekoppelten Senderkreis; die Empfangsstation analog aus dem Empfängerkreis und dem damit gekoppelten Detektorkreis. Schließlich sei noch die Anwendung der Löschkunten bei der Funkentelegraphie erwähnt. Sie bewirken einmal durch Stoßerregung [§ 214], daß auf der Antenne nur ganz schwach gedämpfte Schwingungen entstehen; ferner

ist es der bei ihnen möglichen raschen Funkenfolge [§ 215] zu verdanken, daß im Telephon der Empfangsstation musikalische Töne, nicht nur Geräusche, entstehen. — Durch diese und noch andere

sinnreiche Verbesserungen, auf die nicht näher eingegangen werden kann, lassen sich jetzt durch Funkentelegraphie Nachrichten auf 8000 km und darüber hinaus übermitteln.

§ 218. **Licht und Elektrizität.** Zwischen Licht und Elektrizität bestehen eine Reihe interessanter Beziehungen. So wird z. B. die Ebene polarisierten Lichtes in durchsichtigen Dielektrica, die sich in einem magnetischen Felde befinden (FARADAY), sowie bei Reflexion an polierten Endflächen von Magneten (KERR) gedreht. Auch erleiden die Spektrallinien durch Einwirkung eines starken magnetischen Feldes eine Veränderung, die in Zwei- oder Dreiteilung usw. besteht (ZEE-MANNSches Phänomen). Ferner werden stark elektrisierte Dielektrica doppelbrechend (KERR). Umgekehrt gibt es auch Wirkungen des Lichts auf Elektrizität. So wird z. B. der Leitungswiderstand des Selens durch Belichtung verringert, und ultraviolette Strahlen besitzen die Fähigkeit, die Luft zu ionisieren [§ 212], wodurch z. B. eine größere Schlagweite elektrischer Funken erzielt werden kann. Sehr bemerkenswert ist ferner, daß der Quotient aus der elektromagnetischen und der elektrostatischen Einheit der Elektrizitätsmenge der Lichtgeschwindigkeit entspricht [vgl. § 219]. Vor allem ist aber durch die HERTZschen Versuche der direkte Nachweis elektrischer Wellen erbracht und gezeigt worden, daß diese sich genau analog den Lichtwellen verhalten [§ 216].

Auf Grund dieser und noch anderer Tatsachen und Erwägungen ist die von MAXWELL 1865 (also bereits vor den HERTZschen Versuchen) aufgestellte und später von anderen erweiterte elektromagnetische Lichttheorie jetzt ziemlich allgemein angenommen. Hiernach beruht die Fortpflanzung des Lichtes auf Ausbreitung elektrischer bzw. magnetischer Wellen im Äther, die ihrerseits nach den neuesten Anschauungen durch Schwingungen von Elektronen [§ 212] in den leuchtenden Körpern erzeugt werden. Diese Elektronenschwingungen, die durch die hohe Temperatur oder elektrische Einflüsse zustande kommen sollen, wären demnach die eigentliche Ursache der Lichtausstrahlung.

§ 219. **Zusammenstellung der wichtigsten elektrischen Maße.** Man unterscheidet zwei absolute elektrische Maßsysteme [§ 5]. Je nachdem man nämlich die Elektrizität im Zustande der Ruhe betrachtet oder aber von ihren magnetischen Wirkungen ausgeht, erhält man die elektrostatischen oder aber die elektromagnetischen Maße, von denen hauptsächlich die letzteren in Gebrauch sind.

Die elektrostatischen Maße kann man alle ableiten von der elektrostatischen Einheit der Elektrizitätsmenge, deren Definition und Dimension

in § 158 angegeben ist. Hieraus erhält man ohne weiteres die Dimension von Potentialen und Potentialdifferenzen (somit auch der elektromotorischen Kraft) nach der Formel $V = \frac{e}{r}$ [§ 160]; die der Kapazität nach der Formel $\kappa = \frac{e}{V}$ [§ 161]; die der Stromstärke nach der Formel $I = \frac{e}{t}$ [§ 174]; die des Widerstandes nach der Formel $W = \frac{E}{I}$ [§ 176]. Die Resultate der einfachen Rechnungen sind in der zweiten Spalte der unten folgenden Tabelle angeführt.

Die elektromagnetischen Maße lassen sich von der elektromagnetischen Einheit der Stromstärke ableiten, deren Definition und Dimension im § 191 angegeben sind. Hieraus erhält man durch einfache Rechnung die Dimension der Elektrizitätsmenge aus der Formel $I = \frac{e}{t}$ [§ 174], woraus $e = I \cdot t$ folgt; die der elektromotorischen Kraft (bzw. von Potentialen und Potentialdifferenzen) aus der Formel $E = \frac{\text{Effekt}}{\text{Intensität}}$ [§ 179]; die des Widerstandes aus der Formel $W = \frac{E}{I}$ [§ 176], die der Kapazität aus der Formel $\kappa = \frac{e}{V}$ [§ 161]. Die betreffenden Dimensionen sind in der dritten Spalte der unten stehenden Tabelle angegeben.

Da die absoluten Einheiten für die Praxis teils zu klein, teils zu groß sind, hat man noch ein praktisches Maßsystem eingeführt, dessen Einheiten Vielfache bzw. Bruchteile der betreffenden absoluten Einheiten bilden [vgl. auch Seite 2, Anm. 3]. Es sind dies 1 Coulomb für die Elektrizitätsmenge [§ 158], 1 Volt für elektromotorische Kräfte (Potentiale, Potentialdifferenzen) [§§ 160, 173], 1 Ampère für die Stromstärke [§ 174], 1 Ohm für den Widerstand [§ 175], 1 Farad für die Kapazität [§ 161]. Diese praktischen Einheiten, von denen das Ampère und Ohm auch direkt festgelegt sind [§§ 174, 175], sind so beschaffen, daß zwischen ihnen folgende Beziehungen bestehen: 1 Ampère = $\frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}$ [§ 176]. Folglich auch 1 Volt = 1 Ampère \times 1 Ohm, und 1 Ohm = $\frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampère}}$. Ferner 1 Ampère = $\frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Sekunde}}$ [§ 174], und 1 Coulomb = 1 Ampèrsekunde. 1 Farad = $\frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}}$ [§ 161]. 1 Volt-Coulomb = 1 Joule [§ 179]. 1 Volt-Ampère = 1 Watt [§ 179].

In der folgenden Tabelle sind die in Betracht kommenden Größen nochmals übersichtlich zusammengestellt.

Größenart	Elektro- statische Dimension	Elektro- magnetische Dimension	Quotient beider	Praktische Einheiten und ihr Wert in absoluten elektromagnetischen Einheiten
Elektrizitätsmenge	$m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$	$m^{1/2} l^{1/2}$	$\frac{l}{t} = v$	1 Coulomb = 10^{-1} e.-m. E.
Potential (differenz) u. elektromot. Kraft	$m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$	$m^{1/2} l^{3/2} t^{-2}$	$\frac{t}{l} = \frac{1}{v}$	1 Volt = 10^8
Stromstärke	$m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$	$m^{1/2} l^{1/2} t^{-1}$	$\frac{l}{t} = v$	1 Ampère = 10^{-1}
Kapazität	l	$l^{-1} t^2$	$\left(\frac{l}{t}\right)^2 = v^2$	1 Farad = 10^{-9}
Widerstand	$l^{-1} t$	$l t^{-1}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^2 = \frac{1}{v^2}$	1 Ohm = 10^9

Wie aus dieser Tabelle hervorgeht, unterscheiden sich die beiden absoluten elektrischen Maßsysteme durch eine Größe, die einer Geschwindigkeit bzw. einer Potenz derselben entspricht. Diese sog. kritische Geschwindigkeit ist nun, wie viele Messungen ergaben, nahezu gleich der Lichtgeschwindigkeit [vgl. § 218]. Es ist also $v = 300.000 \text{ km pro Sekunde} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm sec}^{-1}$.

Man kann mit Hilfe obiger Tabelle sofort elektrostatische Maße durch elektromagnetische ausdrücken und umgekehrt, wenn man berücksichtigt, daß sich ja die Einheiten einer Größenart in beiden Maßsystemen umgekehrt wie die betreffenden Dimensionen verhalten müssen. So ist z. B. die Dimension der Elektrizitätsmenge im elektrostatischen Maßsystem um $v = 3 \cdot 10^{10}$ mal größer als im elektromagnetischen, folglich die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge um ebensoviel kleiner als die elektromagnetische. D. h. also, die elektromagnetische Einheit der Elektrizitätsmenge entspricht $3 \cdot 10^{10}$ oder 30 Milliarden, und 1 Coulomb $3 \cdot 10^9$ oder 3 Milliarden elektrostatischen Einheiten. In analoger Weise findet man mittels der Tabelle auch den Wert der praktischen Einheiten in elektrostatischen Einheiten. So ist z. B. 1 Volt = $\frac{10^8}{3 \cdot 10^{10}} = \frac{1}{300}$ elektrostatischen Einheiten, oder, anders ausgedrückt, die elektrostatische Einheit des Potentials ist = 300 Volt.

Anhang: Die wichtigsten Definitionen, Gesetze und Formeln.

- Atome? Die denkbar kleinsten Stoffteilchen, unsichtbar, nicht allein existierend.
- Moleküle? Komplexe gleichartiger (bei Elementen) oder verschiedenartiger Atome.
- Aggregatzustände? Fester, flüssiger, gasförmiger Zustand.
- Volumen? Rauminhalt; Raum, den ein Körper einnimmt.
- Dichte? Masse pro Volumen. $D = M : V$.
- Masseneinheit? Massengramm, d. h. Masse eines Kubikzentimeters Wasser von 4°.
- Absolute Maße? Maße, welche eine Größe durch die Einheiten der Länge, Masse, Zeit ausdrücken.
- Bewegungsgesetze? 1. Jeder Körper verharrt in seinem Zustand der Ruhe oder der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern. (Trägheitsgesetz.) 2. Die Änderung der Bewegung ist proportional der einwirkenden Kraft und erfolgt geradlinig zu dieser. (Unabhängigkeitsprinzip.) 3. Wirkung und Gegenwirkung sind gleich. (Wechselwirkungsprinzip.)
- Geschwindigkeit? Weg bezogen auf Zeit. $v = s : t$.
- Beschleunigung? Geschwindigkeitszunahme in der Zeiteinheit. $a = v : t$.
- Bewegungsgröße? Masse mal Geschwindigkeit. $m \cdot v$.
- Kraft? Masse mal Beschleunigung. $F = m \cdot v : t$.
- Krafteinheit? 1 Kilogramm oder Gramm(-gewicht), bzw. 1 Dyne.
- Gewicht? Masse mal Beschleunigung durch Erdanziehung. $P = m \cdot g$.
- Gravitationsgesetz? $F = k \cdot M \cdot m : r^2$.
- Arbeit? Kraft mal Weg. $A = F \cdot s$.
- Arbeitseinheit? 1 Meterkilogramm, bzw. 1 Erg und 1 Joule.
- Effekt? Arbeit in der Zeiteinheit.
- Effekteinheit? 1 Pferdekraft (= 75 Meterkilogramm pro Sekunde), bzw. 1 Sekundenerg und 1 Watt.
- Energie? Fähigkeit, Arbeit zu leisten.
- Kinetische Energie? Arbeitsfähigkeit eines bewegten Körpers. $\frac{1}{2}mv^2$. (Syn. Wucht, lebendige Kraft.)

Handwritten notes:
 1. Arbeit = Kraft · Weg
 2. Wucht = lebendige Kraft
 3. Wucht = $\frac{1}{2}mv^2$