

zwischen vier, kreuzweise miteinander verbundenen, metallischen Quadranten, die zusammen eine Art Schachtel bilden. Wird nun dem einen Quadrantenpaare Elektrizität mitgeteilt, nachdem das andere zur Erde abgeleitet ist, so wird das Aluminiumblättchen abgelenkt, und zwar ist der Ausschlag der mitgeteilten Elektrizitätsmenge proportionall; auch gibt die Richtung zugleich die Art der Elektrizität an.

B. Der elektrische Strom.

a. Entstehung und Gesetze des galvanischen Stromes.

§ 166. **Galvani und Volta.** Am Ende des 18. Jahrhunderts wurde GALVANI von einem Assistenten aufmerksam gemacht, daß Froschschenkel, mit einem Skalpell berührt, jedesmal zuckten, wenn Funken aus dem Konduktor einer 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. VOLTA 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 VOLTA'sche 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.

§ 167. **Gesetze der Kontaktelektrizität.** Die von VOLTA aufgestellte Kontakttheorie lehrt also, daß durch Berührung zweier Metalle, oder eines Metalls mit einer Flüssigkeit, Elektrizität entsteht. Die hierbei tätige elektromotorische Kraft erzeugt nämlich in den betreffenden Körpern, den sog. Elektromotoren, beständig eine Potential- oder Spannungsdifferenz, indem auf einem Körper das Maximum der positiven, im anderen das der negativen Elektrizität entsteht. Verbindet man daher leitend beide Elektromotoren, so strömt die Elektrizität wieder zu den Stellen niederen Potentials [§ 156]; da nun durch die Berührung die Potentialdifferenz stets von neuem entsteht, so kommt ein konstanter Strom dadurch zustande.

Man spricht dann auch von dynamischer, im Gegensatz zu der statischen oder ruhenden Elektrizität. VOLTA teilte nun die Elektromotoren in zwei große Klassen ein. Die der ersten Klasse, zu denen namentlich alle Metalle und Kohle gehören, lassen sich in eine sog. Spannungsreihe so anordnen, daß bei einer Berührung immer das vorangehende Glied positiv, das nachfolgende negativ wird. Die Volta'sche Reihe lautete:

+ 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 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 Elektromotoren erster Klasse ringförmig 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 Elektromotoren zweiter Klasse, zu denen besonders Flüssigkeiten (Säuren und Salzlösungen) gehören, nicht. Die Potentialdifferenz der Endglieder ist also 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, so ergibt sich Folgendes: Die starke positive Elektrizität des unteren Zinkendes geht durch die Flüssigkeit zum Kupfer, und trifft an dessen hervorstehendem Ende mit schwach negativer

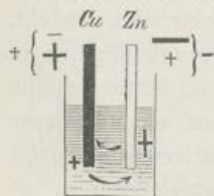


Fig. 109.

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 (Fig. 109). Im allgemeinen wird also bei zwei Metallen das in der VOLTA'schen

Spannungsreihe voranstehende an seinem freien Ende negativ, das weiter hinten stehende positiv elektrisch. Die Spannungsreihen für

Metalle und Flüssigkeiten, die je nach der Flüssigkeit wechseln, sind also im allgemeinen umgekehrt wie die VOLTA'sche Reihe.

§ 168. **Galvanische Elemente.** Die Verbindung zweier Metalle mit einer Flüssigkeit heißt nun 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 der galvanische Strom, der durch die fortwährend wirkende elektromotorische Kraft beständig im Gange erhalten wird, stets nach beiden Richtungen. Spricht man kurzweg von der Richtung des Stromes, so meint man stets die des positiven. Dieser fließt also z. B. in dem 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 Elements, bezw. die Enden der damit verbundenen Drähte, heißen Pole oder Elektroden; diejenige, von welcher der Strom herkommt, beim positiven Strom also die positive, wird Anode (*ἀνά ὀδοῦ*) genannt, die andere Kathode. Durch Vereinigung mehrerer Elemente entsteht eine galvanische Batterie. Die älteste Form derselben ist die Volta'sche 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 etc.

§ 169. **Konstante Ketten.** Die zuerst konstruierten galvanischen Ketten hatten alle den Fehler, daß sie bald immer schwächer wurden. Da nämlich der elektrische Strom in Flüssigkeiten Umsetzungen bewirkt, und sich die Zersetzungsprodukte an den Elektroden abscheiden, so werden diese gewissermaßen von der Flüssigkeit isoliert. So entsteht z. B. durch Zersetzung des Wassers *H* und *O* [cf. § 178]; letzterer wird am Zink abgeschieden und bildet das nichtleitende Zinkoxyd, ersterer überzieht das Kupfer mit einem feinen, ebenfalls nichtleitenden Häutchen. Ja, es entsteht sogar zwischen dem elektropositiven *H* und dem elektronegativen *O* ein neuer Strom, der sog. Polarisationsstrom, der dem ursprünglichen entgegengesetzt fließt und ihn somit schwächen muß. Um diesen Übelstand zu beseitigen, hat man konstante Ketten konstruiert, bei denen jede Elektrode in eine besondere Flüssigkeit taucht; dieselbe hat zugleich die Eigenschaft, die störenden Zersetzungsprodukte zu beseitigen, so daß also die Elektroden hier unpolarisierbar sind. Eins der gebräuchlichsten derartigen Elemente ist das

*Summe
164. 165*

DANIELL'sche. Kupfer taucht hier in Kupfervitriollösung; in diesem Gefäße steht ein mit verdünnter Schwefelsäure gefüllter poröser Tonzylinder, in den das Zink taucht. Hierbei wird das Kupfervitriol zerlegt in Cu und SO_4 . Cu scheidet sich wie alle Metalle (und auch Wasserstoff) an der Kathode ab [cf. § 178], also am Kupfer, da im Elemente der Strom von Zink zum Kupfer geht. Der Rest SO_4 wandert zum Zink, trifft aber unterwegs den durch Zersetzung der H_2SO_4 entstandenen H_2 und vereinigt sich mit ihm wieder zu H_2SO_4 . Der Rest der ursprünglichen Schwefelsäure, SO_4 , geht zum Zink und bildet mit ihm das lösliche $ZnSO_4$. Das definitive Resultat ist also, daß das Zink fortwährend aufgelöst wird, das Kupfer aber durch die Auflagerung von metallischem Cu gewissermaßen wächst. Ähnlich ist der Vorgang auch bei allen anderen konstanten Ketten. Hier sei noch das GROVE'sche Element erwähnt (Zink in Schwefelsäure, Platin in Salpetersäure), das BUNSEN'sche (Zink in Schwefelsäure, Kohle in Salpetersäure) und das VON LECLANCHÉ (Zink in Salmiaklösung, Kohle in Braunstein). Sehr praktisch sind die Trockenelemente, die ebenfalls meist aus Zink und Kohle bestehen. An Stelle der Flüssigkeit enthalten sie aber eine mit einer geeigneten Lösung getränkte mehr oder weniger erhärtete Füllmasse (Gips, Kreide, Ton etc.), deren nähere Zusammensetzung Fabrikgeheimnis ist.

§ 170. **Akkumulatoren.** In neuerer Zeit benutzt man auch den Polarisationsstrom, indem man die Elektroden, an denen sich durch Zersetzung von Wasser H und O abgeschieden haben, durch einen Schließungsdraht verbindet. Der so entstehende Strom hat, wie bereits erwähnt, die umgekehrte Richtung wie der ursprüngliche und dauert natürlich nur solange, bis die an den Elektroden aufgespeicherten Stoffe verbraucht sind. Derartige, von PLANTÉ erfundene, sekundäre Elemente heißen auch Akkumulatoren¹); sie zeichnen sich einmal durch ihre große und sehr konstante elektromotorische Kraft aus und können vor allem zur Aufspeicherung von Kräften dienen, die dann im passenden Augenblicke zur Benutzung bereit sind. Eine Akkumulator-„Zelle“ besteht aus zwei durch Kautschukbänder etc. getrennten Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure, durch welche ein galvanischer Strom geschickt wird. Dabei verbindet sich der entstehende Sauerstoff mit der Anode zu Bleisuperoxyd, der Wasserstoff wird an der Oberfläche der Kathode verdichtet. Eine stärkere Wirkung erzielt man nach FAURE dadurch,

¹ *accumulo* anhäufen.

daß man die mit tiefen Nuten versehenen bzw. gitterförmig durchbrochenen Bleiplatten vorher mit Mennige (Pb_3O_4) bestreicht.

§ 171. **Ohm'sches Gesetz.** Wenn in einem Stromkreise der (positive) Strom vom positiven zum negativen Pol fließt, so kann dies nur geschehen, weil auf dieser Strecke das Potential beständig abnimmt. Es ist ja das positive Potential am positiven Pol am größten, am negativen am kleinsten; für das negative Potential gilt das Umgekehrte. Die Kraft, welche diese Potentialdifferenz schafft, ist eben die ihrem Wesen nach noch unbekanntelektromotorische Kraft (E). Bezeichnet man nun die Elektrizitätsmenge, die in einer Sekunde durch irgend einen Querschnitt geht, also $\frac{e}{t}$, mit Stromstärke oder Stromintensität (I), so ist zunächst klar, daß dieselbe im ganzen Stromkreise gleichgroß sein muß, da sonst eine Stauung der Elektrizität eintreten müßte; es ist genau wie bei einem Flusse, bei dem auch stets durch alle Querschnitte dieselbe Wassermenge in der Zeiteinheit geht. OHM zeigte nun, daß die Stromstärke proportional der elektromotorischen Kraft (oder Potentialdifferenz), umgekehrt proportional dem Widerstande (W) ist,

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

Der Widerstand ist offenbar um so größer, einen je längeren Weg der elektrische Strom zurücklegt, und je schmaler derselbe ist,

$$W = \frac{l}{q} k,$$

worin l die Länge, q den Querschnitt des Leiters, k den spezifischen (gewöhnlich auf Quecksilber bezogenen) Widerstand bedeutet; denn der Widerstand hängt natürlich auch von der Natur des Leiters ab. Der Gesamtwiderstand W setzt sich nun zusammen aus dem Widerstande im Elemente selbst (innerer oder wesentlicher W) w , und dem im Schließungskreise (äußerer oder außerwesentlicher W) w' .

Es ist daher $I = \frac{E}{w + w'}$. Aus dieser Formel ergeben sich wichtige praktische Folgerungen. Will man größere Stromintensität erzielen, 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 einem Elemente, da sie ja von der Größe der Metallplatten unabhängig ist [§ 167]; 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

$$I = \frac{E}{\frac{1}{n}w + w'}. \text{ Ist der äußere Widerstand so gering, daß er vernachlässigt werden kann, so ist also } I = n \frac{E}{w}, \text{ d. h. man erzielt eine } n\text{-fache Intensität.}$$

Ist aber w' 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 $I = \frac{nE}{nw + w'}$. Kann nw gegenüber w' vernachlässigt werden, so ist $I = \frac{nE}{w'}$, d. h. die Intensität wird um das n fache vergrößert. Also bei großem inneren Widerstande schaltet man die Elemente nebeneinander, bei großem äußeren hintereinander. Das Maximum der Stromstärke ist vorhanden, wenn innerer und äußerer Widerstand gleich sind.

§ 172. **Stromverzweigung.** Für Stromverzweigungen gelten die beiden Kirchhoff'schen Gesetze:

1) Die Zweigströme sind zusammen so stark wie der Hauptstrom; sonst müßte ja eine Stauung der Elektrizität stattfinden.

2) In jedem geschlossenenen Kreise ist die Summe aller Produkte aus Stromstärke mit dem dazu gehörigen Widerstand gleich der elektromotorischen Kraft in diesem Kreise.

Es ist dies eine Verallgemeinerung des Ohm'schen Gesetzes.

Betrachten wir zunächst den einfachsten Fall, der in Fig. 110 dargestellt ist.

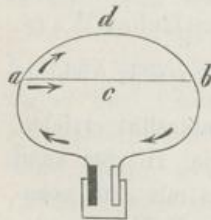


Fig. 110.

Da zwischen den Punkten a und b eine bestimmte Potentialdifferenz herrscht, die von dem Wege ganz unabhängig ist, eine Potentialdifferenz aber als direkte Folge der elektromotorischen Kraft dieser proportional ist, so ist nach § 171 die Stromintensität

$$\text{in } acb = \frac{\text{Potentialdifferenz } ab}{\text{Widerstand } acb},$$

$$\text{in } adb = \frac{\text{Potentialdifferenz } ab}{\text{Widerstand } adb}.$$

Daraus folgt, daß in Verzweigungen die Stromstärken sich umgekehrt wie die Widerstände verhalten. Hierauf beruht z. B. der Stöpselrheostat.¹

Derselbe besteht aus einer Anzahl breiter Messingplatten (Fig. 111), die in bestimmten Abständen stehen und durch dünne Drähte verbunden sind. Werden zwischen sie dichtanschließende Messingstöpsel eingeschaltet, so geht wegen des geringeren Widerstandes der größte Teil des Stromes durch sie und behält eine große Intensität. Wird aber ein Stöpsel herausgenommen, so muß der Strom durch den betreffenden Drahtkreis fließen, wodurch seine Intensität sehr geschwächt wird. Dieser Apparat dient daher zu Abstufung der Stromstärke und Messung von Widerständen.

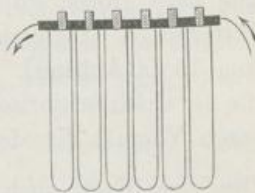


Fig. 111.

Verbindet man die beiden Stromzweige in Fig. 110 noch durch einen Draht, so erhält man die sogenannte Wheatstone'sche Brücke (Fig. 112). Wie aus den Pfeilen sofort hervorgeht, kreuzen sich in der Brücke cd zwei Ströme; daher kann man durch eine geeignete Anordnung bewirken, daß in der Brücke selbst kein Strom herrscht. Da dies aber nur möglich ist, wenn in c und d gleiches Potential herrscht, so verhalten sich wieder die Stromstärken in ac und ad umgekehrt wie ihre Widerstände $\frac{i_1}{i_3} = \frac{w_3}{w_1}$; ebenso ist $\frac{i_2}{i_4} = \frac{w_4}{w_2}$.

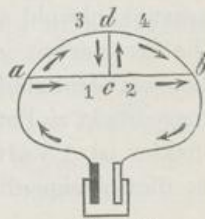


Fig. 112.

Wenn nun in der Brücke kein Strom herrschen soll, so kann man sich diesen Draht fortgenommen denken. Dann muß $i_1 = i_2$ und $i_3 = i_4$ sein, weil ja in demselben Stromkreise stets dieselbe Intensität herrscht.

Es ist mithin auch $\frac{w_3}{w_1} = \frac{w_4}{w_2}$. Daraus folgt $w_1 : w_2 = w_3 : w_4$. Unter dieser Bedingung herrscht also in der Brücke kein Strom. Umgekehrt kann man daraus, wenn in der Brücke kein Strom herrscht, was ja durch ein Galvanometer [§ 179] leicht nachzuweisen ist, den Widerstand eines eingeschalteten Körpers berechnen, wenn die drei anderen Widerstände, resp. ein Widerstand und das Verhältnis der beiden anderen, bekannt ist.

¹ ῥέω fließen, ἵστημι zum Stehen bringen, also Rheostat = Widerstandsapparat.

Um den Widerstand von Flüssigkeiten mittels der Brückenmethode zu messen, muß man Wechselströme [§ 184] 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 solange tönt, wie ein Strom durch die Brücke geht.

§ 173. **Elektrische Maße.** Die in der Praxis benutzten elektrischen Maßeinheiten, die zum Teil bereits erwähnt wurden, sind alle nach großen Physikern benannt und unterscheiden sich von den betreffenden absoluten Maßen durch positive oder negative Potenzen von 10 [s. Anhang]. So heißt die Einheit der Intensität 1 Ampère, die der elektromotorischen Kraft, des Potentials, der Spannung 1 Volt¹ (nach VOLTA), die des Widerstandes 1 Ohm. Man kann daher das OHM'sche Gesetz auch schreiben: $1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}$. Als Widerstandseinheit benutzt man auch die Siemens-Einheit (*S. E.*), die dem Widerstande einer 1 m langen Quecksilbersäule von 1 qmm Querschnitt bei 0° entspricht. $1 \text{ Ohm} = 1,06 \text{ S. E.}$ Ferner ist zu erwähnen die Einheit der Elektrizitätsmenge, 1 Coulomb, und die der Kapazität, 1 Farad (nach FARADAY). Die Einheit der Stromenergie oder der Stromarbeit ist 1 Volt-Coulomb [§ 156] und wird auch 1 Joule genannt, obwohl sie eigentlich diesem nur äquivalent ist [s. Anhang]. Die Stromarbeit in 1 Sekunde heißt Stromeffekt [§ 13]. Derselbe ist also = Potentialdifferenz \times Elektrizitätsmenge pro Sekunde oder anders ausgedrückt = Potentialdifferenz \times Stromstärke. Die Einheit des Stromeffektes ist 1 Volt-Ampère und wird auch 1 Watt genannt, obwohl sie diesem eigentlich nur äquivalent ist [s. Anhang].

b. Wärme-, Licht- und chemische Wirkungen.

§ 174. **Joule'sches Gesetz.** Da zur Erzeugung des elektrischen Stromes Arbeit notwendig ist, ergibt sich aus dem Gesetze von der Erhaltung der Energie, daß der Strom auch seinerseits Arbeit leisten kann [cf. § 156]. Seine mannigfachen Wirkungen teilt man gewöhnlich ein in solche innerhalb und außerhalb des Stromkreises. Zu ersteren gehört die Erwärmung, welche eintritt, wenn der Strom durch Leiter, besonders Metalle und Kohle, geht. JOULE fand nun, daß in der Zeiteinheit die dabei entstehende Wärme proportional dem Widerstande und dem Quadrate der Intensität ist,

$$Q = J^2 W.$$

¹ Die elektromotorische Kraft eines Daniell-Elementes beträgt ca. 1 Volt, die eines Bleiakкумуляtors ca. 2 Volt.