

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Elementare Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus

Thompson, Silvanus Phillips

Tübingen, 1897

Kapitel III. Elektrische Ströme

KAPITEL III.

ELEKTRISCHE STRÖME.

XIII. VORLESUNG: *Einfache Volta'sche Elemente.*

157. Es wurde bereits in der 4. Vorlesung erwähnt, dass die Elektrizität aus einem geladenen Körper durch einen beliebigen Leiter, wie z. B. durch einen Draht oder einen angefeuchteten Faden wegfließt. Wenn man nun durch irgend eine Vorrichtung dafür sorgen könnte, dass dem Körper ebensoviel Elektrizität zugeführt würde, wie aus ihm wegfließt, so würde man einen kontinuierlichen **Strom** erhalten. Ein solcher Strom fließt stets durch einen leitenden Draht, falls seine beide Enden auf ungleichen elektrischen Potentialen erhalten werden, gerade so wie ein Wärmestrom durch einen Metallstab fließt, wenn seine Enden auf ungleichen Temperaturen erhalten werden, indem die Wärme stets von dem Ende mit höherer Temperatur nach dem Ende mit geringerer Temperatur strömt. Wir wissen nicht, in welcher Richtung der Strom in einem Drahte fließt, aber es ist zweckmässig anzunehmen, dass die Elektrizität vom + Ende zu dem — strömt, oder mit andern Worten: dass ein elektrischer Strom in der Richtung vom hohen Potential zum niedrigen fließt. Es ist klar, dass ein solcher Strom beide Enden auf dasselbe Potential zu bringen strebt. Um einen kontinuierlichen Strom zu erhalten, muss man einen geschlossenen Stromkreis haben. Man hat den »Strom« bisweilen als einen doppelten aufgefasst, indem die + Elektrizität in der einen

Richtung und die — Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung fließen soll. Der einzige Beweis, welcher diese ganz überflüssige Annahme unterstützt, ist die Thatsache, dass sich bei der Zersetzung von Flüssigkeiten durch den Strom die Atome theils an der Stelle ansammeln, wo der Strom in die Flüssigkeit eintritt, theils an der Stelle, wo derselbe aus der Flüssigkeit austritt.

Die elektrische Menge, welche von einem Strome weiter geführt wird, ist dem Strome und der Zeit, während welcher er fließt, proportional. Die praktische Stromeinheit heisst *Ampère* (vergl. Art. 202 und 249). Die elektrische Menge, welche durch einen Strom von einem *Ampère* in einer Sekunde weiter geführt wird, heisst eine *Ampère-Sekunde* oder ein *Coulomb*. Eine *Ampère-Stunde* ist gleich 3600 Coulomb. Bezeichnet C die Anzahl der Ampère, t die Anzahl der Sekunden, während welcher der Strom fließt, und Q die Anzahl der hiebei weiter geführten Coulomb, so haben wir die Formel:

$$Q = C \cdot t$$

Die Ströme heissen *kontinuierlich*, wenn sie ohne Unterbrechung in derselben Richtung fließen. Sie heissen *Wechselströme*, wenn sie fortwährend in bestimmten Intervallen ihre Richtung umkehren, indem sie den Stromkreis zuerst in dieser, dann in der entgegengesetzten Richtung durchfließen. Kontinuierliche elektrische Ströme, wie wir sie soeben beschrieben haben, werden gewöhnlich durch *Volta'sche Elemente* oder durch *Batterien* solcher Elemente oder auch durch Dynamomaschinen erzeugt, obschon es noch andere Mittel zur Erzeugung von Strömen giebt, welche später erwähnt werden sollen. Wechselströme werden durch besondere Wechselstrommaschinen erzeugt, von denen später (Art. 465) die Rede sein soll.

158. Die Entdeckungen Galvani's und Volta's. Die Entdeckung elektrischer Ströme datiert seit *Galvani*, einem Arzte in Bologna, welcher um das Jahr 1786 eine Reihe merkwürdiger und wichtiger Beobachtungen über die konvulsivischen Bewegungen anstellte, die der »Rückschlag« (Art. 29) und andere elektrische Entladungen an einem Froschschenkel hervorbringen.

Hierbei machte er dann die Entdeckung, dass es nicht notwendig sei, zur Hervorbringung dieser Erscheinungen eine elektrische Maschine zu benutzen, sondern dass ein ähnliches konvulsives Zucken in dem Froschschenkel hervorgerufen wurde, wenn er zwei ungleiche Metalle, z. B. Eisen und Kupfer, mit einem Nerv resp. einem Muskel und dann mit einander in Berührung brachte. Galvani glaubte, dass diese Erscheinung eine Folge der vom Froschschenkel selbst erzeugten Elektrizität sei. Dagegen wies *Volta*, Professor an der Universität zu Pavia, nach, dass die Elektrizität nicht von dem Muskel oder dem Nerv, sondern von der Berührung der ungleichen Metalle herrühre. Wenn zwei Metalle, welche beide mit der Luft oder einem andern oxydierenden Medium in Berührung sind, zur gegenseitigen Berührung gebracht werden, so wird die Oberfläche des einen Metalls +, die des andern — elektrisch, wie bereits am Ende der 7. Vorlesung festgestellt wurde. Obgleich die Ladungen sehr schwach sind, bewies *Volta* ihre Existenz auf doppelte Weise.

159. Die Volta'sche Säule. *Volta's* zweiter Beweis war weniger direkt, aber desto überzeugender. Er wies nach, dass, wenn mehrere solcher Berührungen ungleicher Metalle derart stattfinden, dass ihre elektrischen Wirkungen sich summieren, dieselben im Verhältnis der Anzahl der Berührungen kräftiger sind. Zu dem Zwecke konstruierte er den Apparat, welcher zu Ehren des Entdeckers den Namen **Volta'sche Säule** erhielt. (Fig. 88). Dieselbe wird in folgender Weise aufgebaut: Auf eine Zinkplatte wird eine Kupferplatte gelegt, so dass sie einander berühren, dann auf die Kupferplatte ein mit Salzlösung getränkter Flanellappen oder ein Stück Löschpapier, dann ein zweites Plattenpaar von Zink und Kupfer, und so weiter, so dass jedes Plattenpaar der Säule von dem folgenden durch einen feuchten Leiter getrennt ist. Eine solche *Säule* erzeugt dann, wenn sie aus einer Reihe solcher Plattenpaare besteht, eine hinreichende Elektrizitäts-

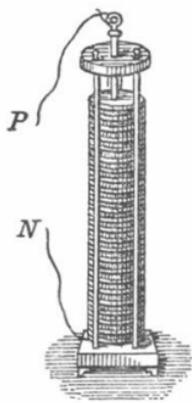


Fig. 88.

menge, um einen empfindlichen Schlag zu geben, wenn man die oberste und die unterste Scheibe oder die sie verbindenden Drähte gleichzeitig mit den nass gemachten Fingern berührt. Wird ein einzelnes Plattenpaar zur Berührung gebracht, so wird die eine Platte bis zu einem gewissen Grade schwach + elektrisch, die andere — elektrisch, oder mit andern Worten, es besteht zwischen ihnen eine gewisse elektrische Potentialdifferenz (vergl. Art. 260). Werden aber mehrere Plattenpaare auf die angegebene Weise zusammengefügt, so dass die aufeinanderfolgenden Paare durch feuchte Leiter getrennt sind, so wird die Potentialdifferenz zwischen der ersten Zinkscheibe und der letzten Kupferscheibe im Verhältnis der Anzahl der Plattenpaare vergrößert; denn jetzt summieren sich alle aufeinanderfolgenden kleinen Potentialdifferenzen.

160. Der Becherapparat. Eine andere von Volta erfundene Zusammenstellung ist sein *Becherapparat*. Derselbe besteht aus einer Anzahl von Bechern (Fig. 89), welche sämtlich

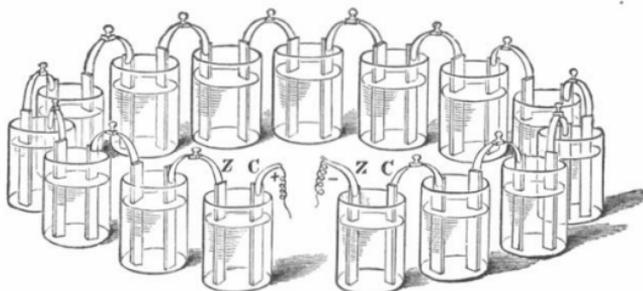


Fig. 89.

mit Salzlösung oder verdünnter Säure angefüllt sind. In diese tauchen eine Anzahl halb aus Zink, halb aus Kupfer zusammengelöteter Metallstreifen, und zwar derart, dass das Zink eines Streifens in den einen Becher, und das Kupfer desselben Streifens in einen zweiten Becher taucht. Die Potentialdifferenz zwischen dem ersten und letzten Becher ist dann wieder der Anzahl der Metallstreifen proportional. Dieser Apparat ist kräftig genug, um eine elektrische Glocke zu läuten, deren Drähte an dem ersten Zinkstreifen und dem letzten Kupferstreifen befestigt sind,

obschon der Apparat sich für diesen Zweck wenig eignet. Den elektrischen Vorgang bei diesem Apparate macht man sich am besten klar, wenn man die Erscheinungen eines einzelnen Bechers oder *Elementes* studiert.

161. Einfaches Volta'sches Element. In einen Glaskrug giesse man etwas Wasser, mit welchem etwas Schwefelsäure oder eine andere oxydierende Säure vermischt ist (Fig. 90).

Dann tauche man zwei getrennte, reine Metallstreifen in die Flüssigkeit, einen von Zink Z und einen von Kupfer C. Dieses Element liefert einen kontinuierlichen elektrischen Strom, welchen man durch einen Draht fließen lassen kann, dessen Enden mit den beiden Metallstreifen in Verbindung stehen. So lange der Strom fließt, bemerkt man, dass der Zinkstreifen allmählich verbraucht wird; und daher

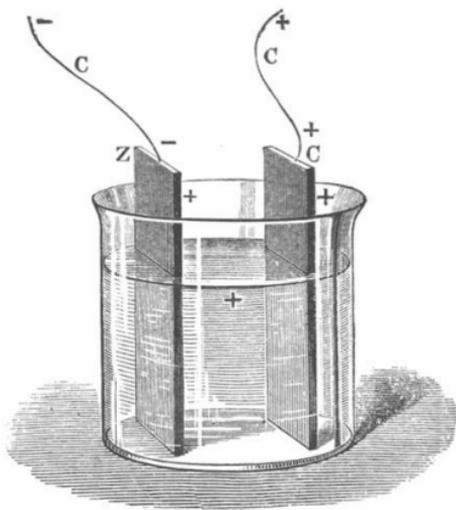


Fig. 90.

rührt in der That die Energie, welche erforderlich ist, den Strom durch das Element und den damit verbundenen Draht zu treiben. Man kann daher das Element als eine Art von chemischem Schmelzofen betrachten, in welchem Brennmaterial verbraucht wird, um den Strom zu treiben. Das Zink ist die Feuerung¹⁾, die Säure ist die Nahrung, während das Kupfer nur eine metallische Hand ist, welche in das Element taucht, um den Strom aufzusammeln, ohne sich dabei chemisch zu ändern. Bevor man die Metallstreifen durch einen Draht verbindet, zeigt das Elektrometer keine merkliche Potentialdifferenz zwischen dem Kupfer und dem Zink an; da ersteres nur das

1) Zink verbrennt bekanntlich in Sauerstoffgas mit blauer Flamme unter Wärmeabgabe. Zinkfolie lässt sich leicht entzünden.

Potential an einer Stelle in der Luft oder einem andern oxydierenden Medium ausserhalb des Zinks oder Kupfers, und nicht die Potentiale der Metalle selbst misst. Das Zink löst sich auf und treibt einen Strom zum Kupfer, während dieses sich weniger stark auflöst und einen Strom in entgegengesetzter Richtung treibt. Das Zink selbst hat ein Potential, welches ungefähr 1,86 Volt höher ist, als das der es umgebenden oxydierenden Media (vergl. Art. 484); während das Potential des Kupfers nur circa 0,81 Volt höher ist, da das Kupfer nicht so leicht oxydiert. Zwischen dem Kupfer und dem Zink besteht also eine latente Potentialdifferenz von circa 1,05 Volt; hierdurch entsteht aber erst dann ein Strom, wenn eine metallische Berührung stattfindet. Berühren sich die Metallstreifen, oder werden dieselben durch ein Paar Metalldrähte verbunden, so strömt die Elektrizität sofort durch die Säure vom Zink zum Kupfer, wie die Pfeile in der Figur es andeuten, und der Strom kehrt durch den Metallschliessungsbogen vom Kupfer zum Zink zurück. Ein kleiner Teil des Zinks wird gleichzeitig aufgelöst, indem das Zink seine latente Energie in dem Masse verliert, wie seine Atome sich mit der Säure verbinden. Diese Energie wird dadurch verbraucht, dass eine elektrische Entladung durch die Säure hindurch nach dem Kupferstreifen bewerkstelligt wird, und von dort durch den Draht nach dem Zinkstreifen zurück. Der Kupferstreifen, von dem der Strom seinen Weg durch den *äussern* Verbindungskreis beginnt, heisst der *positive Pol*, und der Zinkstreifen der *negative Pol*. Werden zwei Kupferdrähte an die Enden der beiden Metallstreifen befestigt, so fliesst allerdings kein Strom, so lange die beiden Drähte getrennt sind, doch findet man, dass der mit dem Zink verbundene Draht negativ, und der mit dem Kupfer verbundene positiv elektrisch ist, da das Zink das *Bestreben* hat, zu oxydieren und die Elektrizität durch das Element hindurch vom Zink zum Kupfer zu treiben. Dieser Zustand ist in Figur 90 durch die + und — Zeichen angedeutet; und diese Potentialverteilung führte einige zu der Ansicht, dass die Verbindungsstelle des Zinks mit dem Kupferdrahte der Ausgangspunkt des

Stromes sei. Allein der wirkliche Ausgangspunkt liegt im Elemente an der Zinkoberfläche, wo der chemische Prozess die Energie liefert; denn von dieser Stelle verbreiten sich durch die Flüssigkeit gewisse elektro-chemische Kräfte (welche im 11. Kapitel ausführlicher behandelt sind), infolge deren die Potentialdifferenz beständig erneuert wird. Gleichzeitig bemerkt man, dass an der Oberfläche der Kupferplatte kleine Blasen von Wasserstoffgas erscheinen. Diese beiden Vorgänge dauern so lange wie die Drähte verbunden sind und einen geschlossenen Kreis bilden. Das metallische Zink können wir als einen Vorrat von Energie betrachten. Wir wissen, dass dasselbe beim Verbrennen in Sauerstoff oder Luft diesen Vorrat von Energie als Wärme abgibt. Wird dasselbe auf diesem rein chemischen Wege in einem Elemente verbrannt, so tritt seine Energie nicht als Wärme, sondern als elektrische Energie auf, d. h. als Energie eines elektrischen Stromes, der durch eine elektromotorische Kraft getrieben wird.

162. Wirkungen des Stromes. Den Strom selbst kann man nicht durch den Schliessungsdraht fließen *sehen*; um daher zu beweisen, dass ein einzelnes Element oder eine Verbindung mehrerer einen Strom erzeugt, muss man einige der *Wirkungen* kennen, welche durch Ströme hervorgebracht werden können. Diese Wirkungen sind verschiedener Art. Ein durch einen dünnen Draht fließender Strom erhitzt denselben; fließt er in der Nähe einer Magnetnadel, so wird dieselbe durch ihn abgelenkt; fließt er durch Wasser oder andere Flüssigkeiten, so werden dieselben zersetzt; und endlich, fließt der Strom durch lebende Körper oder irgend einen empfindungsfähigen Teil derselben, so erzeugt er gewisse Empfindungen. Diese thermischen, magnetischen, chemischen und physiologischen Wirkungen sollen in besondern Vorlesungen behandelt werden.

163. Volta'sche Batterie. Vereint man mehrere solcher einfachen Elemente, indem man die Zinkplatte des einen mit der Kupferplatte des folgenden verbindet, und so weiter, so erhält man eine grössere Potentialdifferenz zwischen dem

»Kupferpole« an dem einen Ende und dem »Zinkpole« an dem andern Ende der Reihe. Werden daher die beiden Pole durch einen Draht verbunden, so entsteht ein stärkerer elektrischer Strom, als wenn man bloss ein Element benutzt. Eine solche Vereinigung Volta'scher Elemente heisst eine Volta'sche **Batterie** ¹⁾. Es giebt verschiedene Methoden, die Elemente einer Batterie aufzustellen, von denen besonders folgende zwei erwähnt werden müssen. Verbindet man die Elemente wie in Fig. 89 oder Fig. 91 hinter einander, so spricht man von einer Aufstellung *in Reihen*. Es ist üblich, ein Element symbolisch in der Weise darzustellen, dass eine kurze dicke Linie die Zinkplatte, und eine lange dünne Linie die Kupfer-(oder Kohle-) Platte bedeutet. Fig. 91 stellt



Fig 91



Fig. 92.

z. B. 4 in Reihen aufgestellte Elemente dar. Bei dieser Anordnung liefern sie denselben Strom, d. h. dieselbe Anzahl von Ampère, wie ein einfaches Element, aber sie geben diesen Strom mit der 4-fachen elektromotorischen Kraft, d. h. mit der 4-fachen Anzahl von Volt.

Die andere Methode, die Elemente aufzustellen, besteht darin, alle Zinkplatten einerseits und alle Kupfer-(oder Kohle-) Platten andererseits mit einander zu verbinden. Man nennt die Elemente dann *parallel geschaltet* oder »auf Quantität« verbunden. Bei dieser Anordnung haben sie keine grössere elektromotorische Kraft als ein einzelnes Element. Alle Zinkplatten wirken zusammen wie eine grosse Zinkplatte, und ebenso alle Kupferplatten. Allein

1) Einige Schriftsteller nennen sie Galvani'sche Batterie, zu Ehren Galvani's; doch das Verdienst gebührt jedenfalls Volta. Die in Strömen fließende Elektrizität wird bisweilen Volta'sche Elektrizität genannt oder Galvani'sche Elektrizität oder oft auch Galvanismus; doch unterscheidet sie sich, wie wir sehen werden, von der Reibungselektrizität oder irgend einer andern Elektrizität nur graduell, und beide Arten können durch Drähte fließen und Eisen magnetisieren und chemische Verbindungen auflösen.

sie liefern mehr Strom. Fig. 92 zeigt 4 parallel geschaltete Elemente, welche 4 mal so viel Strom liefern als ein einziges Element.

164. Elektromotorische Kraft. Der Ausdruck »*elektromotorische Kraft*« wird gebraucht, um diejenige Kraft zu bezeichnen, welche die Elektrizität von einer Stelle zur andern führt oder zu führen strebt. Zur Abkürzung werden wir dieselbe bisweilen durch E.M.K. bezeichnen¹⁾. In diesem besondern Falle ist sie offenbar eine Folge der Potentialdifferenz und derselben proportional. Gerade so, wie eine *Niveaudifferenz* in Wasserröhren einen *Druck* erzeugt, und letzterer einen Strahl, sobald der Hahn geöffnet wird, ebenso erzeugt eine *Potentialdifferenz elektromotorische Kraft*, und diese einen *Strom*, sobald der Schliessungsbogen vollständig ist, um die Elektrizität durchströmen zu lassen. Elektromotorische Kraft kann daher bisweilen passend als eine Potentialdifferenz bezeichnet werden und *umgekehrt*; doch darf der Leser den Unterschied nicht vergessen. Die Einheit der E.M.K. heisst *Volt* (vergl. Art. 349).

165. Volta's Gesetze. Volta zeigte (Art. 79), dass die Potentialdifferenz zweier sich (in Luft) berührender Metalle nur von der Substanz derselben, nicht von ihrer Grösse, noch von der Grösse der Berührungsstelle abhängt. Er zeigte auch, dass, wenn sich mehrere Metalle berühren, die Potentialdifferenz zwischen dem ersten und letzten der Reihe dieselbe ist, wie in dem Falle, wo sich die beiden unmittelbar berühren. Einige quantitative Angaben der Untersuchungen von Ayrton und Perry finden sich in Art. 80. Bei einer Reihe von Elementen ist jedoch die Sache

1) Der Anfänger darf »*elektromotorische Kraft*« oder diejenige Kraft, welche die Elektrizität zu bewegen strebt, nicht mit elektrischer »*Kraft*« verwechseln, d. h. jener Kraft, mit welcher die Elektrizität die Materie zu bewegen strebt. Newton hat ein für allemal den Begriff »*Kraft*« virtuell als dasjenige definiert, das die Materie bewegt oder zu bewegen strebt. Wird die Materie von einem Magnet bewegt, so sprechen wir ganz richtig von magnetischer Kraft; ebenso von elektrischer Kraft, wenn die Materie von der Elektrizität in Bewegung gesetzt wird. Aber die E.M.K. ist etwas ganz anderes, und überhaupt keine »*Kraft*«, denn sie wirkt nicht auf die Materie, sondern auf die Elektrizität und strebt diese zu bewegen.

anders, als bei einer blossen Reihe von Metallen. Wenn man die Zinkplatten und Kupferplatten der Elementenreihe alle in derselben Reihenfolge aufstellt, so dass sie alle elektromotorische in derselben Richtung erregen, so ist die Kräfte *gesamte elektromotorische Kraft der Reihe gleich derjenigen eines Elements, multipliziert mit der Anzahl der Elemente.*

Bisher haben wir bloss Zink und Kupfer als Bestandteile einer Batterie erwähnt; doch kann man zwei beliebige Metalle dazu benutzen. Die E.M.K. eines Elements hängt von der *Differenz* der beiden Metalle ab. Wollte man ein Element aus zwei Zinkplatten konstruieren, so würde man keinen Strom erhalten, denn jede der beiden Platten würde sich auflösen und mit derselben Stärke einen Strom zur andern senden. Dasjenige Element besitzt die grösste elektromotorische Kraft, oder wirkt am »stärksten«, zu welcher man 2 Metalle nimmt, welche die grösste Differenz bei ihrer chemischen Verbindung mit der Säure zeigen, oder welche in der »Kontakt-Reihe«, Art. 80, am weitesten von einander entfernt sind. Zink und Kupfer eignen sich in dieser Beziehung sehr gut; Zink und Silber würden, abgesehen von den Kosten, noch besser sein. Für kräftigere Batterien ist eine Zusammenstellung von Zink und Platin oder von Zink und Kohle vorzuziehen. Dasjenige Metall, durch welches der Strom in die Flüssigkeit eintritt, heisst die *Anode*; es ist diejenige Platte, welche sich auflöst. Das Metall, bei welchem der Strom das Element verlässt, heisst die *Kathode*; diese löst sich nicht auf, und erhält in vielen Fällen einen Niederschlag auf ihrer Oberfläche.

166. Widerstand. Dieselbe elektromotorische Kraft erzeugt jedoch nicht in allen Fällen einen Strom von derselben *Stärke*. Die Stromstärke hängt nicht allein von der Kraft ab, welche die Elektrizität durch den Schliessungskreis zu treiben strebt, sondern auch von dem **Widerstande**, auf welchen dieselbe während des Fliessens trifft und den sie zu überwinden hat. Wenn man die Elemente mit Sand oder Sägespähne zum Teil verstopft (wie dies bisweilen bei den sogenannten Säge-

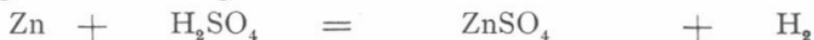
späne-Batterien geschieht, um sie brauchbar zu erhalten) oder wenn der Draht, welcher den Schliessungskreis vollständig macht, sehr lang oder sehr dünn ist, so geht die Wirkung zum Teil verloren, und der Strom ist schwächer, obgleich die E.M.K. unverändert ist. Die Analogie mit den Wasserröhren kann auch hier zu Hilfe genommen werden. Der Druck, welcher das Wasser durch Röhren treibt, ist von der Niveaudifferenz zwischen der Cisterne, aus welcher das Wasser fliesst, und dem Gefäss, bis zu welchem es fliesst, abhängig; allein die Wassermenge, welche durch die Röhren hindurchfliesst, hängt nicht allein vom Drucke, sondern auch von dem Widerstande, auf den sie trifft, ab. Denn ist die Röhre sehr dünn oder mit Sand oder Sägespänen verstopft, so fliesst das Wasser nur langsam durch.

Die Metalle leiten den elektrischen Strom im allgemeinen gut; ihr Widerstand ist gering; doch dürfen Drähte aus Metall nicht zu dünn, noch zu lang sein, da sonst ihr Widerstand zu gross, und sie dann nur einen schwachen Strom durchlassen. Die Flüssigkeiten in der Batterie leiten bei Weitem nicht so gut, wie die Metalle; auch bieten verschiedene Flüssigkeiten verschiedene Widerstände. Reines Wasser hat überhaupt kein Leitungsvermögen, und ist für die schwache Elektrizität der Volta'schen Batterie fast ein vollkommener Isolator, obgleich es für die hochgespannte Reibungselektrizität ein guter Leiter ist, wie wir gesehen haben. Wasser, in welchem Salz oder Salpeter aufgelöst ist, ist ein guter Leiter, desgleichen verdünnte Säuren, obschon konzentrierte Schwefelsäure ein schlechter Leiter ist. Den Widerstand der Flüssigkeit in den Elementen kann man nötigenfalls dadurch verringern, dass man grössere Metallplatten anwendet und dieselben näher zusammenrückt. Gase sind schlechte Leiter; daher kommt es, dass die Wasserstoffblasen, welche sich während der Wirksamkeit des Elementes an die Kupferplatte ansetzen, den innern Widerstand des Elementes vermehren, indem sie die wirksame Oberfläche der Platten verkleinern.

XIV. VORLESUNG: *Chemische Vorgänge im Elemente.*

167. Mit der Erregung eines elektrischen Stromes durch ein Volta'sches Element sind stets chemische Vorgänge im Elemente verbunden. Eins der Metalle muss wenigstens leicht oxydierbar sein, und die Flüssigkeit muss so beschaffen sein, dass sie auf das Metall einwirken kann. Die Erfahrung lehrt denn auch, dass Zink und die andern Metalle, welche an dem elektropositiven Ende der Kontakt-Reihe (vergl. Art. 80) stehen, oxydierbar sind, während die elektronegativen Körper — Kupfer, Silber, Gold, Platin und Kohle — weniger leicht oxydieren; die letzten drei widerstehen sogar der Einwirkung jeder Säure. Es lässt sich nicht nachweisen, dass ihr elektrisches Verhalten eine Folge ihres chemischen Verhaltens ist; ebensowenig ist umgekehrt ihr chemisches Verhalten eine Folge ihres elektrischen. Wahrscheinlich entspringen beide aus einer gemeinsamen Quelle (vergl. Art. 80 und Art. 484).

Taucht man ein Stück ganz reines Zink allein in verdünnte Schwefelsäure, so wird dasselbe von der Säure nicht angegriffen. Doch das gewöhnliche käufliche Zink ist nicht rein, und wird aufgelöst, wenn man es in verdünnte Schwefelsäure taucht, indem zahlreiche Wasserstoffblasen von der Oberfläche des Metalls aufsteigen. Schwefelsäure ist ein zusammengesetzter Körper, bei dem jedes Molekül aus einer bestimmten Gruppe von Atomen besteht, nämlich aus 2 Atomen Wasserstoff, 1 Atom Schwefel, und 4 Atomen Sauerstoff: oder symbolisch: H_2SO_4 . Der chemische Prozess, bei dem das Zink sich mit dem Radikal der Säure verbindet und der Wasserstoff ausscheidet, lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken:



Zink und Schwefelsäure geben schwefelsaures Zinkoxyd und Wasserstoff. Das bei diesem Prozesse gebildete schwefelsaure Zinkoxyd bleibt in der Flüssigkeit aufgelöst.

Wenn man nun eine Platte *reines* Zink und eine Platte von

einem weniger leicht oxydierenden Metall — Kupfer oder Platin oder am besten Kohle (die harte Kohle aus den Gasretorten) — nebeneinander in den die Säure enthaltenden Becher taucht, so geht kein wahrnehmbarer chemischer Prozess vor, so lange man den Stromkreis noch nicht geschlossen hat, entweder dadurch, dass man die beiden Platten durch einen Draht verbindet oder dadurch, dass man sie zur unmittelbaren Berührung bringt. Sobald jedoch der Kreis vollständig geschlossen ist, beginnt der Strom zu fließen, und die chemischen Prozesse treten ins Leben, indem sich das Zink in der Säure auflöst und die Säure ihren Wasserstoff in Gestalt von kleinen Blasen ausscheidet. Man bemerkt jedoch, dass diese Wasserstoffblasen sich weder an der Zinkplatte, noch in der Flüssigkeit entwickeln, sondern *an der Oberfläche der Kupferplatte* (resp. der Kohlenplatte). Diese scheinbare Ueberführung des Wasserstoffgases durch die Flüssigkeit von der Oberfläche der Zinkplatte nach der Oberfläche der Kupferplatte, wo dasselbe auftritt, ist höchst bemerkenswert. Die sinnreiche Theorie, welche Grotthuss zur Erklärung dieser Erscheinung aufstellte, ist in der 37. Vorlesung: über Elektrochemie, auseinandergesetzt.

Diese chemischen Prozesse dauern so lange wie der Strom fließt. Das in jedem Becher verbrauchte Zink ist der Elektrizitätsmenge proportional, welche durch den Schliessungsbogen während der Thätigkeit der Batterie hindurchströmt. Die Menge des entwickelten Wasserstoffgases ist dem verbrauchten Zink und auch der Stromstärke proportional. Nachdem die Säure auf diese Weise das Zink in sich aufgelöst hat, wirkt sie nicht mehr als ätzendes Auflösungsmittel; sie ist »getötet« worden, wie die Arbeiter sagen, denn sie ist in schwefelsaures Zink verwandelt. Die Batterie hört deshalb auf zu wirken, entweder wenn alles Zink aufgelöst ist oder wenn die Säure erschöpft ist, d. h. wenn sie vollständig in schwefelsaures Zink verwandelt ist. Starke Zinkplatten halten lange Zeit vor, aber die Säuren müssen oft erneuert und die verbrauchte Flüssigkeit ausgegossen werden.

168. Lokale Wirkung. Ist der Schliessungsbogen nicht

vollständig, so kann der Strom nicht fließen, und man sollte erwarten, dass ein chemischer Prozess nicht stattfände, solange die Batterie keinen Strom erzeugt. Das unreine Zink jedoch, wie solches im Handel vorkommt, bleibt in der Säure nicht unangetastet, sondern ist in steter Auflösung begriffen und scheidet beständig Wasserstoffblasen aus. Diese sogenannte **lokale Wirkung** erklärt sich auf folgende Weise: Die fremden Beimischungen im Zink bestehen aus Zusätzen von Eisen, Arsenik und andern Metallen. Gesetzt, es befände sich irgendwo an der Oberfläche ein Eisenteilchen, das mit der Säure in Berührung kommt. Dasselbe verhält sich dann wie die Kupferplatte einer Batterie gegen die Zinkteilchen in ihrer Umgebung, denn es wird dadurch eine lokale Potentialdifferenz an der Stelle, wo metallische Berührung stattfindet, erzeugt und infolge dessen auch ein lokaler Strom, welcher von den Zinkteilchen durch die Säure zu dem Eisenteilchen fließt, und auf diese Weise findet ein stetiger Verbrauch des Zinks statt, sowohl wenn der Schliessungsbogen der Batterie geschlossen, als auch wenn er offen ist.

169. Amalgamisierung des Zinks. Wir wissen jetzt, weshalb ein Stück gewöhnliches Zink, wie es im Handel vorkommt, angegriffen wird, wenn es mit einer Säure in Berührung kommt. Infolge der metallischen Zusätze in demselben tritt an seiner ganzen Oberfläche eine lokale Wirkung ein. Um dieselbe zu beseitigen, und um das Aufzehren des Zinks zu verhüten, so lange die Batterie nicht in Thätigkeit ist, ist es gebräuchlich, die Oberfläche der Zinkplatten mit Quecksilber zu **amalgamieren**. Zu diesem Zwecke muss die zu amalgamierende Platte gereinigt werden, indem man sie in eine Säure taucht, dann giesst man ein Paar Tropfen Quecksilber auf die Oberfläche der Platte und reibt dieselben mit einem leinenen Lappen in die Platte ein. Das Quecksilber verbindet sich mit den Zinkteilchen an der Oberfläche der Platte und bildet ein breiiges Amalgam. Die Eisenteilchen lösen sich in dem Quecksilber nicht auf, sondern treten an die Oberfläche, von wo sie durch die sich bildenden Wasserstoffblasen schnell hinweggeführt wer-

den. Da sich das Zink dieses breiigen Amalgams in der Säure auflöst, so verbindet sich der Quecksilberüberzug mit neuen Zinkteilchen und bietet der Flüssigkeit auf diese Weise eine stets reine glatte Oberfläche dar.

Eine neuere, bessere Methode besteht darin, dem geschmolzenen Zink, bevor dasselbe in Platten oder Stäbe gegossen wird, ungefähr 4% Quecksilber beizumischen. Sind die Zinkplatten einer Batterie gut amalgamiert, so dürfen sich keine Wasserstoffblasen entwickeln, so lange der Schliessungsbogen offen ist. Trotzdem findet während der Thätigkeit der Batterie stets eine kleine, zerstörende, lokale Wirkung statt. Jacobi fand, dass während am + Pole sich 1 Teil Wasserstoffgas bildete, am — Pole 33,6 Teile Zink aufgelöst wurden, anstatt der 32,5 Teile, welche das chemische Aequivalent des Wasserstoffes ausmachen.

170. Polarisation. Die Wasserstoffblasen, welche an der Oberfläche der Kupferplatte frei werden, setzen sich an derselben in grosser Zahl fest und bilden an ihrer Oberfläche einen Ueberzug; daher wird in kurzer Zeit der wirksame Teil der Oberfläche der Kupferplatte bedeutend verkleinert. Wird ein einfaches Element oder eine Batterie von Elementen in Thätigkeit gesetzt, um einen Strom zu erzeugen, so stellt sich heraus, dass die Stromstärke nach wenigen Minuten, ja schon nach einigen Sekunden ganz bedeutend nachlässt und sogar fast ganz aufhört. Diese unmittelbare Abnahme der Stromstärke, die man mit einem Galvanometer und einem Paar in Säure getauchter Zink- und Kupferplatten beobachten kann, ist fast ausschliesslich die Folge des Ueberzuges von Wasserstoffblasen, welche sich an dem Kupfer-Pole festsetzen. Eine in diesem Zustande befindliche Batterie heisst „polarisiert“.

171. Wirkungen der Polarisation. Der Ueberzug von Wasserstoffblasen beeinträchtigt die Stromstärke des Elements in doppelter Weise:

1) Er schwächt den Strom durch den vermehrten *Widerstand*, welchen er demselben bietet, denn Gasblasen sind schlechte Leiter, und

2) er schwächt den Strom dadurch, dass er eine entgegengesetzte *elektromotorische Kraft* in's Leben ruft; denn der Wasserstoff ist ein fast ebenso leicht oxydierbarer Körper, wie Zink, besonders wenn er frisch entwickelt ist (oder in statu nascendi ist) und er ist elektropositiv, da er in der Reihe des Art. 80 oben steht. Daher erzeugt der Wasserstoff selbst eine Potentialdifferenz, welche einen Strom entsendet, welcher die entgegengesetzte Richtung des wahren Zink-Kupfer-Stromes hat. Ein Element, bei welchem infolge der Polarisation die Stromstärke schnell abnimmt, ist zur Verrichtung von Arbeit innerhalb eines geschlossenen Stromkreises nicht tauglich.

Es ist daher von grosser Wichtigkeit, diese Polarisation zu beseitigen, denn sonst würden die von Batterien erzeugten Ströme nicht konstant sein.

172. Mittel gegen innere Polarisation. Man hat verschiedene Mittel angewendet, um die Polarisation der Elemente zu verringern oder zu verhindern. Diese Mittel sind entweder mechanischer oder chemischer oder elektrochemischer Natur.

1) *Mechanische Mittel.* Werden die Wasserstoffgasblasen einfach von der Oberfläche des + Poles abgewischt, so wird der durch sie verursachte Widerstand verringert. Wenn man mittelst einer Röhre Luft in die Säure-Lösung bläst oder die Flüssigkeit umrührt oder dieselbe durch passend angebrachte Heber in steter Bewegung hält, so wird der Widerstand ebenfalls kleiner. Ist die Oberfläche rauh oder mit Spitzen versehen, so sammeln sich die Gasblasen leichter an den Spitzen und werden schnell nach der Oberfläche geführt und so unschädlich gemacht. Dieses Mittel wurde bei dem **Smee'schen Elemente** angewendet, welches aus einer Zinkplatte und einer platinirten Silberplatte bestand, die in verdünnte Schwefelsäure tauchten; von der Silberplatte, deren Oberfläche auf diese Weise mit einem rauhen Ueberzuge von fein zerteiltem Platin bedeckt war, lösten sich die Wasserstoffgasblasen leicht ab; trotzdem nimmt der Strom einer Batterie von Smee'schen Elementen nach wenigen Minuten bedeutend ab.

2) *Chemische Mittel.* Wird der Säure ein stark oxydierender Körper beigefügt, so vernichtet derselbe die Wasserstoffgasblasen, während dieselben noch in der Entwicklung begriffen sind, und verhindert auf diese Weise sowohl den erhöhten innern Widerstand, als auch die entgegengesetzte elektromotorische Kraft. Solche Körper sind: doppelt chromsaures Kali, Salpetersäure und Chlorkalk (sogenannter Bleichkalk).

3) *Elektrochemische Mittel.* Es ist beim Gebrauch doppelter Becher, wie sie in der nächsten Vorlesung beschrieben werden, möglich, den Apparat derart einzurichten, dass ein festes Metall, z. B. *Kupfer*, an statt der Wasserstoffblasen, an der Stelle, wo der Strom die Flüssigkeit verlässt, ausgeschieden wird. Dieser elektrochemische Umsatz verhindert jegliche Polarisation.

173. Fundamentalgesetze der chemischen Wirkung im Elemente. Wir wollen diesen Abschnitt damit beschliessen, die beiden Fundamentalgesetze der chemischen Wirkung im Elemente anzugeben:

1) *Die chemische Wirkung in einem Elemente ist der Elektrizitätsmenge, welche durch dasselbe hindurchströmt, proportional, oder mit andern Worten, ist der Stärke des durch dasselbe gehenden Stromes proportional.*

Ein Strom von 1 Ampère, der eine Sekunde lang durch das Element fliesst, bewirkt, dass 0,00033698 g Zink in der Säure aufgelöst und 0,00010384 g Wasserstoffgas ausgeschieden werden.

2) *Die chemische Wirkung ist in jedem Elemente einer Batterie, welche aus einer Reihe von Elementen besteht, gleich gross.*

Auf das erste dieser Gesetze wurde Faraday geführt, als er Volta's Kontakttheorie zu widerlegen versuchte. Er sah voraus, dass es mit dem Prinzip von der Erhaltung der Energie nicht vereinbar wäre, dass eine blosser Kontaktkraft die Quelle eines kontinuierlichen Stromes sein sollte; daher schrieb er den Strom chemischen Wirkungen zu, welche ihm an Quantität proportional waren. Wie die Ansichten Volta's und Faraday's in Einklang gebracht werden können, wurde im letzten Abschnitt des Art. 80 angedeutet. Diese Gesetze beziehen sich

nur auf die nützliche chemische Wirkung, ohne Rücksicht auf den Verlust durch lokale Wirkungen der Nebenströme, welche eine Folge der fremdartigen Bestandteile des Metalls sind.

XV. VORLESUNG: *Volta'sche Elemente.*

174. Ein gutes Volta'sches Element sollte alle oder die meisten der folgenden Bedingungen erfüllen:

- 1) Seine elektromotorische Kraft muss gross und konstant sein.
- 2) Sein innerer Widerstand muss gering sein.
- 3) Es muss einen konstanten Strom liefern, und deshalb frei von Polarisation sein, ohne sich schnell abzunutzen, und ohne zu häufige Erneuerung der Säure zu erfordern.
- 4) Es muss vollständig ruhen, wenn der Schliessungsbogen offen ist.
- 5) Es muss billig und aus dauerhaftem Material sein.
- 6) Es muss leicht zu handhaben sein und darf keine ätzenden Dünste ausströmen.

Allen diesen Bedingungen genügt jedoch kein einziges Element, und das eine Element eignet sich besser zu diesem Zwecke, das andere zu jenem. Will man z. B. durch einen langen Draht telegraphieren, so ist ein bedeutender innerer Widerstand in der Batterie von keinem grossen Nachteil; während zur Erzeugung eines elektrischen Lichtes ein grosser innerer Widerstand durchaus vermieden werden muss. Die elektromotorische Kraft einer Batterie hängt von dem Material des Elementes und von der Anzahl der mit einander verbundenen Elemente ab, und man kann daher eine grosse E.M.K. dadurch erzielen, dass man das rechte Material wählt und eine grosse Anzahl von Elementen verbindet. Der Widerstand innerhab des Elementes lässt sich dadurch vermindern, dass man recht grosse Platten wählt, dieselben nahe aneinander stellt, so dass die Dicke der zwischen ihnen befindlichen Flüssigkeitsschicht so klein als möglich wird, und dass man gut leitende Flüssigkeiten aussucht.

175. Klassifikation der Elemente. Von den unzähligen Formen einer Batterie, welche bisher konstruiert worden sind, können nur die von hervorragender Bedeutung beschrieben werden. Man kann die Batterien in zwei Klassen einteilen, in solche mit einer und in solche mit 2 Flüssigkeiten oder Elektrolyten. Eine bessere Einteilung ist jedoch die des Art. 172, wo man die Mittel berücksichtigt, welche eine Polarisation verhindern.

Erste Klasse: Elemente mit mechanischer Depolarisation
(und einer Flüssigkeit).

Das einfache Volta'sche Element mit seinen Zink- und Kupferplatten wurde bereits beschrieben. Je grösser die Kupferplatte ist, desto länger wird die Polarisation vermieden. Cruickshank kam auf den Gedanken, die Platten aufrecht in einen Trog zu stellen, da hierdurch eine kräftigere Batterie gewonnen würde. Dr. Wollaston schlug vor, eine Kupferplatte von doppelter Grösse zu benutzen, die so umgebogen war, dass sie die Zinkplatte von beiden Seiten eng umgab, da auf diese Weise der Widerstand verringert wurde und das Wasserstoffgas sich auf eine grössere Fläche verteilte. Smee ersetzte, wie wir gesehen haben, die Kupferplatte durch platinisiertes Silber, und Walker schlug vor, an Stelle von Kupfer, resp. Silber harte Kohlenplatten zu gebrauchen, da dies billiger wäre und gleichzeitig die elektromotorische Kraft erhöhte. Die rauhe Oberfläche erleichtert das Entweichen des Wasserstoffgases. Rührt man solche Elemente um, oder hebt man ihre Kathodeplatte kurze Zeit aus der Flüssigkeit heraus, so wird ihre Kraft zum Teil wieder hergestellt.

Zweite Klasse: Elemente mit chemischer Depolarisation.

Bei diesen Elementen wendet man ausser der verdünnten Säure, (oder einem andern *Erreger*, der das Zink auflöst) noch ein stärkeres chemisches Agens als *Depolarisator* an. Als Depolarisatoren sind besonders folgende in Gebrauch: Salpetersäure, Lösungen von Chromsäure, von doppeltchromsaurem Kali oder Natron, von salpetersaurem Kali oder von Eisenchlorür; Chlor,

Brom, Braunstein, Schwefel, Bleisuperoxyd, Mennige, Kupferoxyd.

Die meisten dieser Substanzen würden jedoch bei einem Zink-Kupferelemente das Kupfer ebensowohl wie das Zink angreifen. Deshalb kann man sie nur bei einem Zink-Kohlen- oder Zink-Platin-Elemente anwenden. Salpetersäure greift auch das

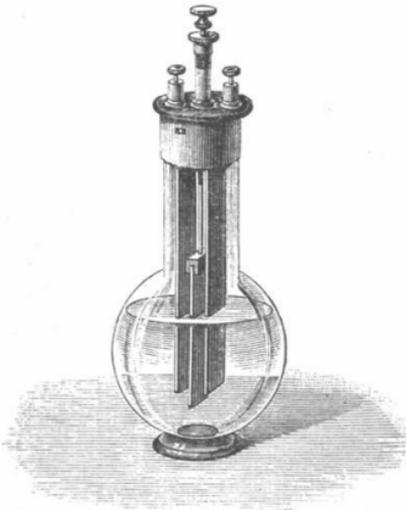


Fig. 93.

Zink an, wenn der Schliessungsbogen offen ist. Deshalb kann man dieselbe nicht in einem und demselben Becher mit der Zinkplatte gebrauchen. Bei dem von Poggendorf erfundenen Chromsäure-Element thut man doppeltchromsaures Kali zu der Schwefelsäure. Dieses Element wird höchst zweckmässig als »Flaschen-Element« eingerichtet (Fig. 93), bei welcher eine Zinkplatte die Anode ist, während ein Paar Kohlenplatten zu beiden Seiten des Zinks an ihrem obern Ende zu einer

Kathode verbunden sind. Da diese Lösung auf das Zink einwirkt, auch wenn der Schliessungsbogen offen ist, so befestigt man die Zinkplatte an einem Stabe, an welchem sie aus der Flüssigkeit herausgehoben werden kann, wenn das Element nicht in Thätigkeit sein soll. Um diese Manipulation überflüssig zu machen, hat man den Depolarisator von der Flüssigkeit, in welche das Zink taucht, getrennt. Bei flüssigen Depolarisatoren geschieht dies durch Anwendung eines innern *porösen Bechers*. Solche porösen Becher aus Thon oder Pergamentpapier gestatten dem elektrischen Strome den Durchgang, während sie die Flüssigkeiten gesondert erhalten. In der einen Abteilung befindet sich das Zink in verdünnter Säure, in der andern Kohle (oder Platin) umgeben von dem Depolarisator. Bei Anwendung fester Depolarisatoren, wie Braunstein, Kupferoxyd etc. müssen dieselben die Kathode berühren. Alle festen Depolarisatoren wirken langsam.

Dritte Klasse: Elemente mit elektrochemischer Depolarisation.

Wenn ein lösbares Metall in eine Lösung seines eigenen Salzes getaucht wird, z. B. Zink in schwefelsaures Zinkoxyd, oder Kupfer in schwefelsaures Kupferoxyd, so ist eine bestimmte E.M.K. zwischen ihm und seiner Lösung vorhanden, das Mass seines Bestrebens sich aufzulösen. Wird ein Strom vom Metall zur Lösung gesandt, so löst sich das Metall zum Teil auf. Wird jedoch der Strom von der Lösung zum Metall gesandt, so wird eine grössere Menge des Metalls aus der Lösung ausgeschieden. Allein so lange die chemische Beschaffenheit der Metallfläche und der Flüssigkeit unverändert ist, ist die E.M.K. an der Oberfläche konstant. Daraus folgt, dass die E.M.K. eines Elements, bei welchem jedes Metall in einer Lösung seines eigenen Salzes steht, und diese beiden Lösungen durch eine poröse Scheidewand getrennt sind, sich niemals ändert. Die Anode polarisiert nicht an der Stelle, wo sie sich in der Flüssigkeit auflöst, und die Kathode polarisiert nicht, da sie nur einen Ueberzug von ihrer eigenen Beschaffenheit erhält. Diese elektrochemische Methode zur Verhütung der Polarisation wurde von Daniell erfunden. Sie ist von wesentlicher Bedeutung nicht allein für das Daniell-, sondern auch für das Clark-Element und noch für andere. Zur Erzielung eines vollkommen konstanten Stromes sollten die beiden Salze dieselbe Säure haben, beide z. B. Schwefelsäure oder beide Chlorsäure.

176. Das Daniell'sche Element. Jedes Element der Daniell'schen Batterie besteht aus einem innern und einem äussern Becher, die durch eine poröse Scheidewand getrennt sind, damit die Flüssigkeiten der beiden Becher sich nicht mit einander vermischen. Der äussere Becher (Fig. 94) besteht gewöhnlich aus Kupfer und dient gleichzeitig als Kupferplatte. In demselben steht ein cylindrischer Becher von unglasiertem

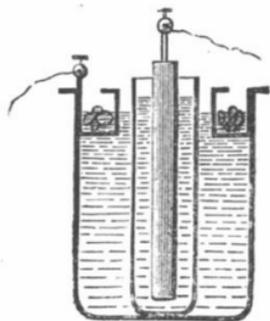


Fig. 94.

porösen Porzellan, eine sogenannte Thonzelle (ein Becher von Pergament oder auch Löschpapier thut dieselben Dienste) und hierin ein amalgamierter Zinkstab als Anode. Die Flüssigkeit des innern Bechers ist verdünnte Schwefelsäure oder schwefelsaures Zinkoxyd; die des äussern ist eine gesättigte Kupfervitriollösung; ausserdem enthält ein durchlöcherter Fach am Rande des Bechers einige kleine Krystalle desselben Körpers, damit sie sich auflösen und das, was während der Thätigkeit der Batterie verbraucht wurde, ersetzen können.

Ist der Stromkreis geschlossen, so löst sich das Zink in der verdünnten Säure auf, und wird zu schwefelsaurem Zinkoxyd, während Wasserstoff frei wird. Dieses Gas erscheint jedoch *nicht* in Blasen an der Oberfläche des Kupferbechers, denn da der innere Becher porös ist, so erstrecken sich die molekularen Vorgänge (durch welche die frei gewordenen Atome des Wasserstoffes, wie Fig. 94 veranschaulichen soll, durch die Säure getrieben werden) durch die Poren des innern Bechers und dort werden in der Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd die Wasserstoffatome gegen Kupferatome umgetauscht, so dass sich reines Kupfer, und nicht Wasserstoff an der äussern Kupferplatte absetzt. Chemisch können diese Prozesse in 2 Stufen dargestellt werden:



Zink und Schwefelsäure geben schwefelsaures Zinkoxyd und Wasserstoff.

Und ferner:



Wasserstoff und schwefelsaures Kupferoxyd geben Schwefelsäure und Kupfer.

Der Wasserstoff ist gleichsam auf elektro-chemischem Wege während des Kreislaufs der Umbildungen in Kupfer verwandelt, und während so das Zink sich auflöst, nimmt das Kupfer zu, die verdünnte Schwefelsäure verwandelt sich allmählich in schwefelsaures Zinkoxyd, und das schwefelsaure Kupferoxyd in Schwefelsäure. Benutzt man eine Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd, so kommen die Wasserstoffatome nicht weiter in Betracht, indem auf chemischem Wege Kupfer für Zink umgetauscht wird.

Es findet also so lange keine Polarisation statt, wie die Kupfer-
vitriollösung genügend gesättigt ist, und das Element ist sehr
konstant, obgleich nicht durchwegs so konstant wie Clark's
Normal-Element, welches in Art. 183 beschrieben ist, weil kleine
Änderungen in der elektromotorischen Kraft dadurch eintreten,
dass die Zusammensetzung der zweiten Flüssigkeit sich ändert.
Nimmt man Schwefelsäure, welche mit 12 Teilen Wasser ver-
dünnt ist, so beträgt die E.M.K. 1,178 Volt, dagegen 1,07 Volt,
wenn man konzentriertes schwefelsaures Zinkoxyd anwendet;
1,1 Volt bei einer halbkonzentrierten Lösung von schwefelsaurem
Zinkoxyd und 1,1 Volt oder noch weniger bei den gewöhnlichen
Elementen, die mit Wasser oder verdünnter Säure gefüllt sind.
Infolge ihrer Beständigkeit hat diese Batterie, in einer geeigneten
flachen Form aufgebaut (Fig. 98), vielfache Anwendung in der
Telegraphie gefunden.

177. Das Grove'sche Element. Wilhelm Grove erfand
ein Element, welches sich durch grössere E.M.K. sowohl, als
auch durch kleinern innern Widerstand vor dem Daniell'schen
Elemente auszeichnet. Bei dem Grove'schen Elemente hat man
einen äussern Becher von glasiertem Porzellan oder *Ebonit*,
welcher eine amalgamierte Zinkplatte und verdünnte Schwefel-
säure enthält. In dem innern porösen Becher dient als nega-
tiver Pol ein Stück Platinblech, welches in konzentrierte Sal-
petersäure taucht. Bei diesem Elemente findet keine Polari-
sation statt, denn der Wasserstoff, welcher durch die Auflösung
des Zinks in verdünnter Schwefelsäure frei wird, zersetzt bei
seinem Durchgange durch die Salpetersäure, um nach dem
Platinpole zu gelangen, die Salpetersäure und wird selbst oxy-
diert, so dass Wasser und die roten Dämpfe der Untersalpeter-
säure entstehen. Dieses Gas ruft jedoch keine Polarisation her-
vor, denn da dasselbe in Salpetersäure sehr leicht löslich ist,
so bildet es weder einen Ueberzug auf der Platinplatte, noch
erregt es, wie der Wasserstoff, eine entgegengesetzte elektro-
motorische Kraft mit dem Zink. Den Grove'schen Elementen
kann man eine flache Form geben, indem man das Zink so

umbiegt, dass es den platten, porösen Becher auf beiden Seiten umgiebt. Dadurch wird der innere Widerstand, der ohnehin schon wegen der guten Leitungskraft der Salpetersäure gering ist, noch kleiner. Deshalb liefert das Grove'sche Element 3 bis 4 Stunden lang einen kräftigen, gleichmässigen Strom. Die E.M.K. eines Elementes, beträgt circa 1,9 Volt. Ein einzelnes Element bringt einen 2 bis 3 Zoll langen, dünnen Platindraht sofort zum Rotglühen, oder treibt eine kleine elektro-magnetische Maschine. Um grössere Wirkungen zu erzielen, muss man eine Anzahl von Elementen zu einer »Kette« verbinden, indem man das Platin eines Elementes mit dem Zink des nächst folgenden verbindet. 50 solcher Elemente, von denen jedes ungefähr $\frac{1}{4}$ Liter Flüssigkeit enthält, genügen vollständig, um ein elektrisches Licht zu erzeugen, wie in der 39. Vorlesung auseinandergesetzt werden wird.

178. Das Bunsen'sche Element. Das nach Bunsen benannte Element ist eine Modifikation des Grove'schen, und

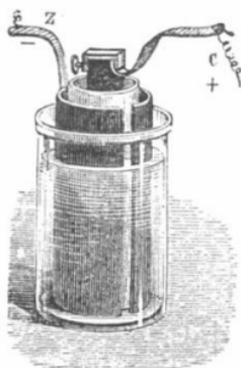


Fig. 95.

wurde auch ursprünglich von Grove vorgeschlagen. In dem Bunsen'schen Elemente ist das kostspielige¹⁾ Platinblech durch einen Stab oder eine Platte aus harter Kohle ersetzt. Eine cylindrische Form des Elements zeigt Fig. 95. Die Potentialdifferenz für eine Zink-Kohlen-Kombination ist etwas grösser, als für eine solche von Zink-Platin, was von Vorteil ist; aber das Bunsen'sche Element ist schwer in Ordnung zu halten; auch ist es schwierig, eine gute Berührung zwischen

der rauhen Oberfläche der Kohle und dem Kupferbügel herzustellen, welcher die Kohle des einen Elements mit dem Zink des nächstfolgenden verbindet. Das obere Ende der Kohle

1) Ein Gramm Platin kostet mehr als eine Mark, nahe halb so viel wie Gold; während man einen Zentner Gaskohle für eine Kleinigkeit bekommt, oft für die blosse Mühe, sie aus den Gasretorten loszuhaben.

wird bisweilen, damit die Säure nicht aufsteigt, mit Paraffinwachs getränkt und mit Kupfer galvanotypiert. Fig. 96 veranschaulicht die gewöhnliche Art, eine Kette von fünf solchen

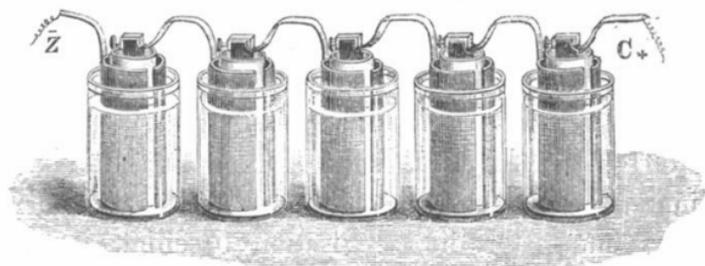


Fig. 96.

Elementen zusammenzustellen. Die Bunsen'sche Batterie liefert für längere Zeit einen kontinuierlichen Strom als die niedrigen Grove'schen Elemente, wegen der grösseren Quantität Säure, welche die cylindrischen Becher enthalten ¹⁾. Bei diesen Elementen gebraucht man häufig statt der Salpetersäure Chromlösungen, indem man einer Lösung aus doppeltchromsaurem Kali oder Natron noch starke Schwefelsäure hinzufügt. Lösliche Depolarisatoren in Gestalt von Chrompulvern werden in der Weise hergestellt, dass man starke Schwefelsäure erhitzt und dann allmählig gepulvertes doppeltchromsaures Natron einrührt. Die teigige Masse lässt man hierauf abkühlen und pulverisiert dieselbe.

179. Leclanché's Element. Um elektrische Klingelzüge und Telephone in Betrieb zu setzen, und teilweise auch zum Telegraphieren gebraucht man ein von Leclanché erfundenes Zink-Kohle-Element, bei welchem die erregende Flüssigkeit nicht verdünnte Säure, sondern eine Salmiaklösung ist. In dieser löst sich das Zink auf und bildet Chlorzinkammonium, während Ammoniakgas und Wasserstoffgas am Kohlen-Pole frei werden.

1) Callan konstruierte eine grosse Batterie, in welcher Gusseisen als + Pol in starker Salpetersäure stand, während die Zinkplatten in verdünnte Schwefelsäure getaucht waren. Das Eisen wird unter diesen Umständen von der Säure nicht angegriffen, sondern befindet sich in einem sogenannten »passiven Zustande«. Seine Oberfläche scheint alsdann mit einer Schicht von magnetischem Superoxyd oder Sauerstoff überzogen zu sein.

Der Depolarisator ist schwarzes Mangansuperoxyd, welches in Verbindung mit gepulverter Kohle die Kathode umgiebt. Man thut dasselbe entweder in einen porösen Becher oder fügt sie als zusammengeballtes Stück bei. Das Mangansuperoxyd scheidet den Sauerstoff allmählich aus. Benutzt man das Element zur Erzeugung eines kontinuierlichen Stromes auf längere Zeit, so nimmt die Kraft des Elements infolge der Ansammlung der Wasserstoffblasen ab; überlässt man dann dasselbe sich selbst, so gewinnt es wieder seine frühere Stärke, indem das Hyperoxyd nach und nach die Polarisation beseitigt. Da das Element in anderer Beziehung völlig konstant ist, und Monate oder Jahre lang nicht erneuert zu werden braucht, so eignet sich dasselbe vorzüglich zu häuslichen Zwecken. Es hat den Vorteil, dass es keine ätzenden Säuren enthält. Von diesem Elemente sind viele Millionen in Gebrauch, besonders da, wo der Strom nur kurze Zeit fließt, und der Schliessungsbogen für gewöhnlich offen bleibt. Fig 97 zeigt 3 zu einer Kette verbundene Elemente

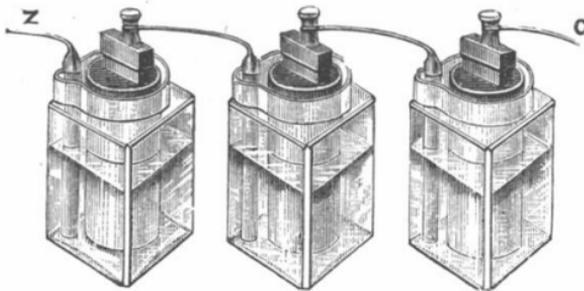


Fig. 97.

von Leclanché. Walker benutzte Schwefel statt des Manganoxyds. Niaudet verwendete als Depolarisator sog. Bleichkalk, welcher reichliche Mengen von Chlor und Sauerstoff enthält. Auch lässt sich statt des Salmiaks gewöhnliches Salz verwerten. Eine Modifikation des Leclanché'schen Elements sind die transportablen Elemente, bei denen der Erreger nicht verschüttet werden kann. Der innere Raum des Elements wird mit einer schwammigen Masse oder auch mit Pariser Pflaster angefüllt, in

dessen Poren die Salmiaklösung sitzen bleibt. Diese Elemente sind als *Trocken-Elemente* bekannt.

180. Das Lalande'sche Element. Dieses Element gehört der zweiten Klasse an. Es hat als Depolarisator Kupferoxyd, welches mit einer Kathode aus Kupfer oder Eisen mechanisch verbunden ist. Die Anode ist Zink und die erregende Flüssigkeit eine 30prozentige Lösung von Aetzkali, in welcher das Zink sich auflöst, Zinkkali bildend, während das metallische Kupfer in einen körnigen Zustand an der Kathode übergeht. Das Element hat nur 0,8 bis 0,9 Volt E.M.K., liefert aber einen grossen und konstanten Strom.

181. De la Rue's Batterie. De la Rue hat ein vollkommen konstantes zur 3. Klasse gehöriges Element konstruiert, bei welchem die beiden Metalle Zink und Silber sind. Das Zink taucht in Zinkchlorür, und das Silber ist von geschmolzenem Silberchlorür umgeben. In dem Masse wie das Zink sich auflöst, sammelt sich metallisches Silber an der Kathode, gerade wie Kupfer im Daniell'schen Elemente. De la Rue konstruierte eine kolossale Batterie von mehr als 11,000 kleinen Elementen. Die Potentialdifferenz zwischen der ersten Zinkplatte und der letzten Silberplatte dieser ungeheuern Batterie betrug über 11,000 Volt, und doch sprang vom + Pole zum negativen erst in einer Entfernung von weniger als 0,5 cm ein Funke über. Bei 8040 Elementen betrug die Funkenlänge nur 0,2 cm.

182. Gravitationselemente. Statt einen porösen Becher zu gebrauchen, um die beiden Flüssigkeiten auseinander zu halten, ist es in dem Falle, wo die eine Flüssigkeit schwerer ist, als die andere, auch möglich, den Apparat so einzurichten, dass die schwerere Flüssigkeit die untere Schicht des Bechers bildet und die leichtere auf derselben schwimmt. Solche Apparate heissen *Gravitationselemente*; doch ist die Trennung niemals vollkommen, da die schwere Flüssigkeit infolge der Diffusion allmählich nach oben steigt. Die Anordnung des Daniell'schen Elementes als Gravitationselement rührt von Meidinger, Minotto, Callaud und Kelvin her. Von Siemens wurde das Daniell'sche

Element so abgeändert, dass die beiden Flüssigkeiten durch Gazezeug getrennt wurden. Die »Sägemehl-Batterie« von Kelvin ist eine Daniell'sche Batterie, bei welcher die Becher mit Sägemehl gefüllt sind, um dieselben vor Zerstörung zu schützen und sie bequem transportieren zu können.

183. Clark's Normal-Element. Ein Normal-Element, dessen E.M.K. noch konstanter ist, als diejenige des Daniell'schen, wurde von Latimer Clark erfunden. Dieses Element, welches heutzutage als internationales Normalelement angesehen wird, hat eine Anode aus reinem Zink in einer konzentrierten Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd, während die Kathode reines Quecksilber ist, auf welchem eine Masse von schwefelsaurem Quecksilberoxyd schwimmt. Fig. 98 zeigt die Aufstellung

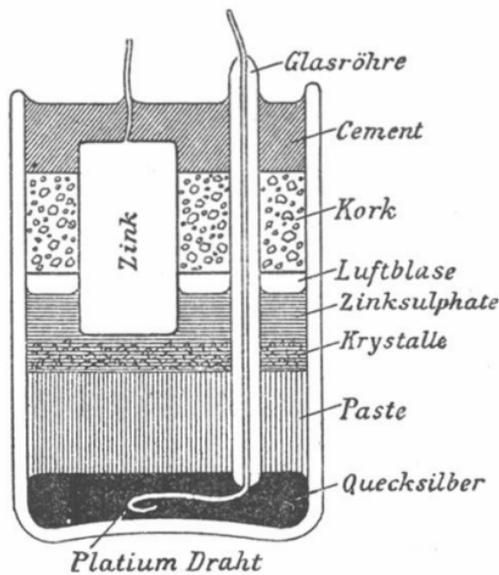


Fig. 98.

eines Clark'schen Elements in natürlicher Grösse. Seine E.M.K. beträgt 1,434 Volt bei 15° C.

Weston benutzt eine Anode von Kadmium, welches in schwefelsaures Kadmium eintaucht. Die E.M.K. des so modifizierten Elements beträgt nach ihm bei gewöhnlicher Temperatur 1,025 Volt.

v. Helmholtz benutzte Quecksilberchlorür und Zinkchlorür, anstatt der Sulphate. Nach Carhart ändert sich je nach der Verdünnung des Zinkchlorürs die E.M.K. dieses Elements.

184. Die folgende Tabelle giebt die elektromotorischen Kräfte der aufgezählten Elemente an;

Name des Elements.	Anode	Erreger	Depolari- sator	Kathode	Anzahl der Volt.
1. Klasse.					
Valta (Wollaston etc.)	Zink	H_2SO_4	fehlt	Kupfer	1,0 bis 0,5
Smee	Zink	H_2SO_4	fehlt	Platinisier- tes Silber	1,0 bis 0,5
Law	Zink	H_2SO_4	fehlt	Kohle	1,0 bis 0,5
2. Klasse.					
Poggendorff (Grenet, Fuller etc.)	Zink	H_2SO_4	$K_2Cr_2O_7$	Kohle	2,1
Grove	Zink	H_2SO_4	HNO_3	Platin	1,9
Bunsen	Zink	H_2SO_4	HNO_3	Kohle	1,9
Leclanché	Zink	NH_4Cl	MnO_2	Kohle	1,4
Lalande	Zink	KHO	CuO	Kohle	0,8
Upward	Zink	$ZnCl_2$	Cl	Kohle	2,0
Fitch	Zink	NH_4Cl	$KClO_3 +$ $NaClO_3$	Kohle	1,1
Papst	Eisen	Fe_2Cl_6	Fe_2Cl_6	Kohle	0,4
Obach (trocken)	Zink	NH_4Cl in $CaSO_4$	MnO_2	Kohle	1,46
3. Klasse.					
Daniell (Meidinger, Minotto etc.)	Zink	$ZnSO_4$	$CuSO_4$	Kupfer	1,07
De la Rue	Zink	$ZnCl_2$	AgCl	Silber	1,42
Marié Davy	Zink	$ZnSO_4$	Hg_2SO_4	Kohle	1,4
Clark (Normal)	Zink	$ZnSO_4$	Hg_2SO_4	Quecksilber	1,434
Weston	Kadmium	$CdSO_4$	Hg_2SO_4	Quecksilber	1,025
v. Helmholtz	Zink	$ZnCl_2$	Hg_2Cl_2	Quecksilber	1,0
4. Klasse.					
Akkumulatoren (Planté, Faure etc.)	Blei	H_2SO_2	PbO_2	Blei	2,1 bis 1,85

185. Stromstärke. Der Leser darf die Ziffern der obigen Tabelle nicht mit der Stärke des Stromes verwechseln, welchen die verschiedenen Elemente liefern; der Strom hängt, wie in der 13. Vorlesung bemerkt wurde, sowohl von dem inneren *Widerstande* der Elemente und von dem Widerstande ihres Schliessungsbogens, als auch von ihrer E.M.K. ab. Die E.M.K. eines Elementes ist von der Grösse desselben unabhängig und wird nur durch die gewählten Substanzen und die Beschaffenheit derselben bestimmt. Der Widerstand hängt von der Grösse des Elements ab, von der Leitungsfähigkeit der Flüssigkeit, von der Dicke der Flüssigkeitsschicht, welche der Strom durchdringen muss u. s. w.

Die exakte Definition für die **Stromstärke** ist die folgende: *Die Stromstärke ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche in einer Sekunde durch einen Querschnitt des Schliessungsbogens hindurchfliesst* ¹⁾.

Nehmen wir an, dass während 10 Sekunden 25 *Coulomb* Elektrizität durch einen Schliessungsbogen fliessen, so beträgt die Durchschnittsstärke jenes Stromes innerhalb jener Zeit $2\frac{1}{2}$ *Coulomb* pro Sekunde, oder $2\frac{1}{2}$ *Ampère*. Die gewöhnliche Stromstärke beim Telegraphieren auf weite Strecken beträgt nur 0,005 bis 0,01 *Ampère*.

Wenn in t Sekunden die Elektrizitätsmenge Q durch den Schliessungsbogen fliesst, so findet man die Stromstärke C für jene Zeit nach der Formel:

1) Die Ausdrücke »stark, gross und intensiv«, welche in Bezug auf Ströme gebraucht werden, bezeichnen genau dasselbe. In frühern Zeiten, als das Ohm'sche Gesetz noch nicht richtig erkannt war, pflegten die Elektriker von »Massenströmen« und »Intensitätsströmen« zu sprechen; mit dem erstern Ausdruck bezeichneten sie einen Strom, der durch einen Schliessungsbogen floss, dessen Widerstand sowohl innerhalb, wie ausserhalb der Batterie sehr gering war; und mit dem letztern Ausdrücke bezeichneten sie einen Strom, der von einer grossen elektromotorischen Kraft erzeugt wurde. Die Ausdrücke waren bequem, sollten jedoch vermieden werden, da sie zu Missverständnissen führen.

$$C = \frac{Q}{t}$$

(vergl. Art. 157).

Die Gesetze, welche die Stromstärke in einem Stromkreise bestimmen, wurden zuerst von Dr. G. S. Ohm angegeben, welcher sie im folgenden Gesetze zusammenfasste:

186. Das Ohm'sche Gesetz. *Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt und dem Widerstande des Stromkreises umgekehrt proportional*, oder mit andern Worten, alles, was die E.M.K. des Elements vergrössert, erhöht die Stromstärke, während alles, was den Widerstand erhöht (entweder den innern Widerstand in den Elementen selbst oder den Widerstand der äussern Drähte des Schliessungsbogens), die Stromstärke verringert. Dies lässt sich durch folgende Formel ausdrücken:

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

wo E die Anzahl der Volt, W die Anzahl der Ohm des Schliessungsbogens und J die Anzahl der Ampère bedeutet.

Beispiel: Einen Strom zu bestimmen, der bei einer E.M.K. von 20 Volt und bei einem Widerstande von 5 Ohm fliesst.

$$20 : 5 = 4 \text{ Ampère.}$$

(Genaueres über das Ohm'sche Gesetz findet sich in der 33. Vorlesung).

Das Ohm'sche Gesetz sagt nichts über die Energie des Stromes. Diese ist sowohl dem Strome als auch der ihn treibenden E.M.K. proportional (vergl. Art. 430).

187. Widerstand und Aufstellung der Elemente.

Die innern Widerstände der aufgezählten Elemente sind nun sehr von einander verschieden und richten sich ausserdem nach der Grösse derselben. Im allgemeinen können wir sagen, dass der Widerstand eines Daniell'schen Elementes ungefähr das 5fache desjenigen eines Grove'schen Elementes von gleicher Grösse beträgt. Das Grove'sche Element besitzt also sowohl eine grössere E.M.K. als auch einen geringern innern Widerstand. Dasselbe liefert in der That bei einem kurzen dicken

Drahte einen circa 8mal stärkern Strom als ein Daniell'sches Element von gleicher Grösse.

Wir können demnach die Stärke einer Batterie auf doppelte Weise vergrössern:

- 1) indem wir ihre E.M.K. erhöhen,
- 2) indem wir ihren innern Widerstand verringern.

Da die elektromotorische Kraft eines Elementes durch das dazu verwandte Material bestimmt wird, so ist das einzige Mittel, die gesamte E.M.K. einer Batterie aus gegebenem Material zu erhöhen, dies, dass man die Anzahl der zu einer Kette vereinigten Elemente vergrössert. Im Telegraphendienst ist es üblich, 2 bis 300 der niedrigen Daniell'schen Elemente auf diese Weise zusammen zu ketten; und sie werden gewöhnlich in trog-

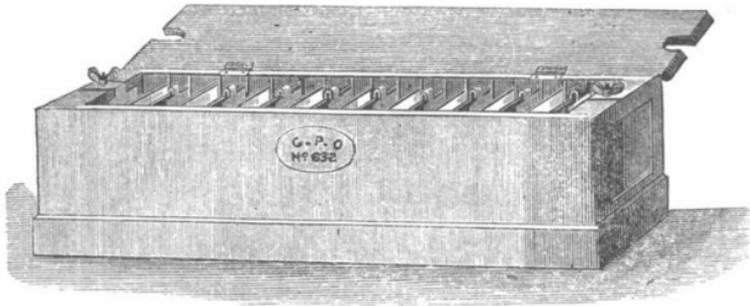


Fig. 99.

ähnlichen Kasten aufgestellt, welche eine Reihe von 10 Elementen enthalten, wie Fig. 99 zeigt.

Um den innern Widerstand eines Elementes zu verringern, kann man folgende Mittel anwenden:

1) Man kann die Platten näher zusammenstellen, so dass der Strom eine weniger dicke Flüssigkeitsschicht zu durchsetzen hat.

2) Man kann grössere Platten nehmen, da dem Strome dann gewissermassen mehr Wege durch die Flüssigkeitsschicht geboten sind.

3) Man kann die Zinkplatten mehrerer Elemente mit einander verbinden, so dass sie gleichsam eine grosse Zinkplatte bilden, und ebenso die Kupferplatten. Auf diese Weise ver-

bundene Elemente nennt man »parallel geschaltet«, oder »auf Quantität« verbundene Elemente, zum Unterschiede von der Anordnung der Elemente in einfachen Reihen. Nehmen wir z. B. an, dass vier gleiche Elemente auf diese Weise verbunden sind, so hat der Strom eine 4mal so grosse Anzahl von möglichen Wegen, auf denen er durch die Flüssigkeit vom Zink zum Kupfer gelangen kann; daher ist dann der innere Widerstand des ganzen Apparates nur der vierte Teil von dem eines einzelnen Elementes. Aber die E.M.K. der 4 Elemente ist dann nicht grösser, als diejenige eines einzigen Elementes.

Es ist höchst wichtig zu beachten, dass die Stromstärke auch durch die Widerstände der Drähte des äusseren Schliessungsbogens beeinflusst wird; und wenn der äussere Widerstand ohnehin schon gross ist, wie z. B. beim Telegraphieren auf grosse Entfernungen, so nützt es wenig, den innern Widerstand zu verringern, da derselbe bereits bedeutend geringer ist, als der Widerstand der Drahtlinie. Es ist im Gegenteil vorteilhaft, die Anzahl der Elemente der Kette zu erhöhen, obgleich jedes Element den gesamten innern Widerstand etwas vermehrt.

Beispiel: Hat die Drahtlinie einen Widerstand von 1000 Ohm, und benutzt man 5 Elemente, jedes mit einer E.M.K. von 1,1 Volt und einem innern Widerstande von 3 Ohm, so beträgt der Strom nach dem Ohm'schen Gesetze: $5,5 : 1015 = 0,0054$ Ampère. Benutzt man aber 8 Elemente, so wird dadurch allerdings der gesamte Widerstand auf 1040 Ohm erhöht, dagegen steigt die E.M.K. auf 8,8 Volt, und der Strom auf 0,0085 Ampère.

Die E.M.K. der nur eine Flüssigkeit enthaltenden Elemente von Volta und Smee ist als unzuverlässig zu bezeichnen, denn die entgegengesetzt gerichtete E.M.K. der Polarisation tritt so schnell auf, dass die wahre E.M.K. des Elements kaum gemessen werden kann. Die verschiedenen Werte, welche andern Elementen beigelegt werden, finden ihre Erklärung in den verschiedenen Graden der Konzentration der Flüssigkeiten. So wird z. B. bei den zur Telegraphie benutzten Daniell'schen Elementen anfangs bloss Wasser in die die Zinkplatten enthalten-

den Becher gegossen; und ihre E.M.K. ist geringer, als in dem Falle, wo man dem Wasser eine Säure oder schwefelsaures Zink beimischt.

188. Andere Batterieen. Von verschiedenen Physikern sind eine Menge anderer Formen galvanischer Elemente erfunden worden. Unter ihnen finden sich 2 von nur theoretischem Interesse, bei denen man nicht zwei verschiedene Metalle benutzt, welche von derselben Flüssigkeit ungleich erregt werden, sondern zwei Flüssigkeiten, welche auf das Metall einen verschiedenen chemischen Einfluss ausüben. Hier findet keine Berührung verschiedener Metalle statt. Die erste dieser Batterieen erfand der Kaiser Napoleon III. Beide Platten waren von Kupfer und tauchten in Lösungen von verdünnter Schwefelsäure, resp. von Natronlauge, welche durch eine poröse Scheidewand von einander getrennt waren. Die zweite Batterie rührt von Wöhler her; dieselbe besteht nur aus 2 Aluminium-Platten, welche in starke Salpetersäure, resp. Natronlauge tauchen. Upward brachte eine Chlorbatterie in Vorschlag, bestehend aus Zinkstreifen, welche in Zinkchlorür tauchen, und aus Kohlekathoden, welche von zerstoßener Kohle in einem porösen Becher umgeben sind. In die Elemente wird Chlorgas gepumpt, welches von den Flüssigkeiten aufgenommen wird und so als Depolarisator wirkt. Die E.M.K. des Elements beträgt 2 Volt.

Bennet hat jüngst eine wohlfeile und höchst wirksame Batterie beschrieben, bei welcher Eisen und Zink als Metalle, und eine starke Natronlauge als erregende Flüssigkeit Verwendung finden. Alte, mit Eisenfeilspänen gefüllte Fleischbüchsen eignen sich gut als positiver Pol und können die Lösung enthalten. Kleine Zinkstücke, welche in Quecksilber tauchen, das sich in einem innern, niedrigen Porzellanbecher befindet, bilden den negativen Pol. Marié Davy benutzte ein Element, bei dem das Zink in schwefelsaures Zinkoxyd taucht, während die Kohleplatte in einer breiigen Lösung von schwefelsaurem Quecksilberoxyd steht. Ist das Element in Thätigkeit, so sammelt sich an der Oberfläche der Kohle Quecksilber an, so dass das Element thatsächlich ein Zink-Quecksilber Element ist. Dasselbe fand

in Frankreich vor Einführung des Leclanché'schen Elements vielfache Anwendung beim Telegraphieren. Obach's Trockenelement hat einen äussern als Becher dienenden Zinkcylinder, der mit Pariser Pflaster, das in Salmiak getränkt ist, überzogen ist, und eine innere Kohlekathode, die von Mangansuperoxyd umgeben ist, das mit Graphit vermennt ist.

Das in den Vereinigten Staaten gebräuchliche Fitch Element ist ein Zink-Kohle Element, dessen Erreger eine Salmiaklösung ist, welcher chloresaures Kali und chloresaures Natron beige mengt ist.

Pabst benutzte ein Eisen-Kohle Element, dessen Erreger eine Lösung von Eisenchlorür ist. Das Eisen löst sich auf und es bildet sich anfangs Chlor, doch ohne Polarisation, indem die Flüssigkeit sich durch Absorption der in der Luft befindlichen Feuchtigkeit von selbst regeneriert. Das Element ist sehr konstant, hat aber eine geringe E.M.K.

Jablochkoff hat eine Batterie beschrieben, bei welcher Platten aus Kohle und Eisen in geschmolzenem Salpeter stehen. Die Kohle ist hier das elektropositive Element, indem dieselbe in der Flüssigkeit schnell verbraucht wird.

Die Beschreibung der *Sekundär-Batterien* von Planté und Faure und der Grove'schen *Gasbatterie* findet sich Art. 487 und 488.

Beachtung verdient noch die sogenannte *trockene Säule* von Zamboni. Dieselbe besteht aus einer Anzahl von Papierscheiben, welche auf der einen Seite mit Zinkfolie und auf der andern mit Mangansuperoxyd belegt sind. Mehrere 1000 dieser Scheiben sind innerhalb einer Glasröhre über einander geschichtet. Ihr innerer Widerstand ist sehr bedeutend, da der innere Leiter die Feuchtigkeit des Papiers, und diese gering ist; dagegen ist ihre elektromotorische Kraft sehr gross, und eine gute trockene Säule liefert Funken. Es vergehen viele Jahre, ehe das Zink vollständig oxydiert oder das Mangan verbraucht ist. Im Clarendon-Laboratorium zu Oxford befindet sich eine trockene Säule, deren Pole 2 Metallglocken sind; zwischen ihnen hängt eine kleine Messingkugel, welche durch Hin- und Herschwingen

die Elektrizität langsam entladet. Die Glocken läuten fortwährend schon seit mehr als 50 Jahren.

189. Einfluss der Wärme auf Elemente. Wird ein Element erwärmt, so liefert es einen stärkern Strom als bisher. Dies rührt hauptsächlich von dem Umstande her, dass die Flüssigkeiten, wenn sie erwärmt werden, besser leiten, so dass der innere Widerstand des Elementes dadurch geringer wird. Auch bemerkt man beim Erhitzen eine geringe Aenderung in der E.M.K. So steigt z. B. die E.M.K. eines Daniell'schen Elementes um circa $1\frac{1}{2}\%$, wenn dasselbe auf die Temperatur des siedenden Wassers erhitzt wird, während diejenige einer Bichromat-Batterie unter gleichen Umständen um 2% abnimmt. Bei dem Clark'schen Normalelement nimmt die E.M.K. etwas bei steigender Temperatur ab. Seine E.M.K. bei der Temperatur θ lässt sich nach der Formel berechnen:

$$\text{E.M.K.} = 1,434 [1 - 0,00077 (\theta - 15)] \text{ Volt.}$$

XVI. VORLESUNG: *Magnetische Wirkungen des Stromes.*

190. Oersted's Entdeckung. Einen Zusammenhang irgend welcher Art zwischen Magnetismus und Elektrizität hatte man schon längst vermutet. So hatte man beobachtet, dass der Blitz Messer und andere Gegenstände aus Stahl magnetisiert; doch waren fast alle Versuche, diese Wirkungen durch kräftige elektrische Ladungen oder dadurch hervorzubringen, dass man elektrische Ströme durch Stahlstäbe schickte, fehlgeschlagen¹⁾. Um das Jahr 1802 entdeckte Romagnosi in Trient, dass eine Volta'sche Säule einen Einfluss auf die Magnetnadel ausübt. Der wahre Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität blieb unentdeckt.

1) Bis zu dieser Stelle der Vorlesungen ist von keinem Zusammenhange zwischen Elektrizität und Magnetismus die Rede gewesen, obgleich wir uns schon mit jener wie mit diesem beschäftigt haben. Derjenige Leser, welcher sich nicht daran erinnert, ob eine elektrische Ladung einen Magnet affiziert oder nicht, möge das in Art. 99 Gesagte wieder durchlesen.

Im Jahr 1819 zeigte Oersted aus Kopenhagen, dass ein Magnet sich rechtwinklig zu einem Drahte zu stellen strebt, durch welchen ein elektrischer Strom geführt wird. Er fand auch, dass die Richtung, nach welcher sich die Nadel aus ihrer gewöhnlichen Lage wendet, ob nach der rechten oder linken Seite, von der Lage des den Strom führenden Drahtes abhängt — ob sich derselbe oberhalb oder unterhalb der Nadel befindet — und von der Richtung, in welcher der Strom durch den Draht fließt.

191. Oersted's Versuch. Es genügt ein sehr einfacher Apparat, um den Fundamentalversuch zu wiederholen. Man lasse eine Magnetnadel auf einer Spitze balancieren (Fig. 100)

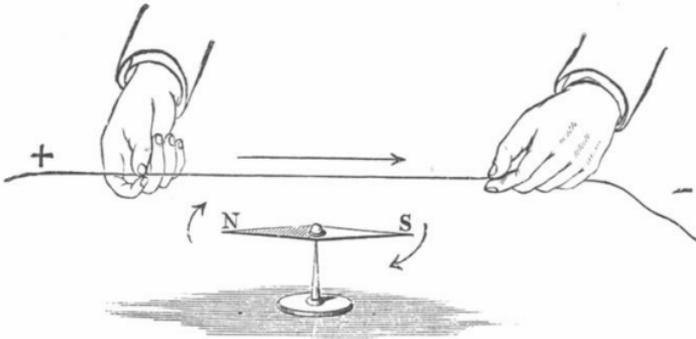


Fig. 100.

und halte über dieselbe und parallel zu ihr einen starken Kupferdraht, dessen eines Ende mit dem einen Pole einer Batterie von 1 bis 2 Elementen in Verbindung steht. Mit dem andern Ende des Drahtes berühre man alsdann den andern Pol der Batterie. Sobald der Schliessungsbogen vollständig ist, fließt ein Strom durch den Draht und die Nadel wird sogleich aus ihrer Lage abgelenkt. Fließt der Strom durch den Draht *oberhalb* der Nadel in der Richtung von Norden nach Süden, so wird der nordsuchende Pol der Nadel nach Osten abgelenkt; fließt der Strom in dem Drahte von Süden nach Norden, so wird derselbe Pol der Nadel nach Westen abgelenkt. Wird jedoch der Draht *unter* die Nadel gehalten, so sind die Ab-

lenkungen umgekehrt, d. h. durch einen von Norden nach Süden fließenden Strom wird der nordsuchende Pol nach Westen abgelenkt.

192. Ampère's Regel. Um diese Ablenkungen dem Gedächtnisse einzuprägen, hat Ampère folgende seltsame, aber sehr brauchbare Regel aufgestellt: *Man nehme an, dass ein Mensch in dem Drahte mit dem Strome schwimmt, und dass er sein Gesicht der Nadel zukehrt, so wird der nordsuchende Pol der Nadel nach links abgelenkt.* Mit andern Worten: Die Ablenkung des nordsuchenden Pols einer Magnetnadel, welche von dem Leiter aus betrachtet wird, ist nach der linken Seite des Stromes gerichtet.

Für gewisse besondere Fälle, wo ein *fester* Magnetpol auf einen *beweglichen* Strom wirkt, ist folgende *Umkehrung der Ampère'schen Regel* sehr bequem. Man nehme an, dass ein Mensch in dem Drahte mit dem Strome schwimmt, und dass er längs der Richtung der Kraftlinien des Magnetpols blickt (d. h. wie die Kraftlinien verlaufen, vom Pole weg, wenn es der nordsuchende, zum Pole hin, wenn es der südsuchende ist), dann wird er und mit ihm der leitende Draht nach *links* abgelenkt.

193. Korkzieher-Regel. Zweckmässiger ist folgende von Maxwell angegebene Regel. *Die Richtung des Stromes und die der resultierenden magnetischen Kraft verhalten sich ebenso, wie die Umdrehung und die fortschreitende Bewegung eines gewöhnlichen (rechts gewundenen) Korkziehers.* In Fig. 101 möge der Kreis die Strom-



Fig. 101.

richtung darstellen, dann giebt der Pfeil die Richtung der resultierenden magnetischen Kraft an. Der Vorteil dieser Regel besteht darin, dass sie im umgekehrten Falle ebenfalls anwendbar ist. Wenn der Pfeil die Richtung des Stromes in einem geradlinigen Drahte angiebt, so giebt der Kreis die Richtung der resultierenden magnetischen Kraft um denselben herum an.

194. Galvanoskop. Wenn ein Strom *unterhalb* der Nadel in der einen Richtung und dann *oberhalb* derselben in entgegen-

gesetzter Richtung geführt wird, indem man den Draht umbiegt (Fig. 102), so ergibt eine einfache Ueberlegung, dass die Kräfte, welche die beiden Teile des Stromes auf die Nadel ausüben, dieselbe Richtung haben. Denn ist a der nord-suchende und b der südsuchende Pol der schwebenden Nadel, so ist der Strom in dem untern Teile des Drahtes bestrebt, die Nadel so zu drehen, dass sich a dem Beobachter nähert, während b zurückgeht; und der oberhalb fließende Strom, welcher ebenfalls den nordsuchenden Pol nach links ablenkt, strebt in gleicher Weise a nach dem Beobachter zu treiben, und b von ihm weg. Die Nadel stellt sich nicht genau rechtwinklig zu der Richtung des leitenden Drahtes, sondern bleibt in schiefer Lage stehen. Die richtenden Kräfte des Erdmagnetismus streben die Nadel so zu stellen, dass sie von Norden nach Süden zeigt. Der elektrische Strom strebt dagegen der Nadel die Richtung von Osten nach Westen zu geben. Die Richtung der Resultierenden liegt zwischen diesen Richtungen und hängt von der relativen Stärke der beiden wirkenden Kräfte ab. Ist der Strom sehr stark, so wird die Nadel bedeutend abgelenkt; dieselbe könnte jedoch höchstens um einen rechten Winkel abgelenkt werden, wenn der Strom unendlich stark wäre. Ist jedoch der Strom schwach, im Vergleich zu der richtenden Kraft des Magnetismus, so wird die Nadel nur unbedeutend abgelenkt.

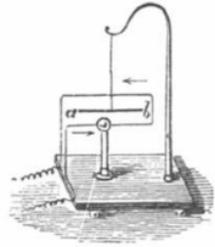


Fig. 102.

Eine solche Vorrichtung kann daher als **Galvanoskop** oder Stromanzeiger dienen; denn die Bewegung der Nadel zeigt die Richtung des Stromes und giebt an, ob derselbe stark oder schwach ist. Dieser Apparat ist indessen zu unempfindlich, um sehr schwache Ströme anzuzeigen. Um ein empfindlicheres Instrument zu erhalten, kann man zwei verschiedene Wege einschlagen: 1) Man kann die wirksame Kraft des Stromes dadurch erhöhen, dass man den Draht mehrere Male um die Nadel herum führt. 2) Man kann die dem Strome entgegengewirkende,

richtende Kraft des Erdmagnetismus durch eine kompensierende Vorrichtung schwächen.

195. Schweigger's Multiplikator. Das erste der obigen Mittel wurde von Schweigger angewandt, welcher einen *Multiplikator* von zahlreichen Drahtwindungen konstruierte. Ein passender Rahmen aus Holz, Metall oder Ebonit wird zur Aufnahme des Drahtes zubereitet; dieser letztere muss jedoch »isoliert«, d. h. mit Seide, Baumwolle oder Guttapercha umwickelt werden, damit die einzelnen Windungen der Rolle einander nicht berühren. Innerhalb dieses Rahmens, welcher kreisförmig oder elliptisch sein oder, was gebräuchlicher ist, die Form eines Rechtecks haben kann, wie in Fig. 103, wird die Nadel aufgehängt, wobei der Rahmen so gestellt wird, dass die Drahtwindungen im magnetischen Meridiane liegen. Je grösser die Anzahl der Windungen ist, um so kräftiger ist die Ablenkung des Magnets, welche ein und dieselbe Elektrizitätsmenge bei ihrem Durchfliessen durch die Windungen hervorruft. Ist jedoch der Draht dünn, oder die Anzahl der Draht-

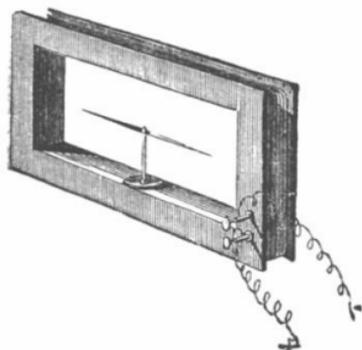


Fig. 103.

windungen sehr gross, so kann der Widerstand, welchem die strömende Elektrizität begegnet, die Stärke des Stromes bedeutend beeinträchtigen. Der Leser wird die Wichtigkeit dieser Bemerkung begreifen, wenn er das Kapitel über das Ohm'sche Gesetz gelesen hat. Cumming von Cambridge scheint zuerst zur *Messung* des Stromes eine Rolle gebraucht zu haben, welche eine auf einer Spitze schwebende Nadel umgiebt. Ihm verdanken wir den Ausdruck *Galvanometer*.

196. Astatiche Verbindungen. Die richtende Kraft, welche der Erdmagnetismus auf eine Magnetnadel ausübt, kann durch eine der beiden folgenden Methoden reduziert oder beseitigt werden:

- a) Häüy's Methode: Anwendung eines *kompensierenden Magnets*.

Hält man einen gewöhnlichen, langen Stabmagnet horizontal in den magnetischen Meridian, doch so, dass sein nordsuchender Pol nach Norden gerichtet ist, so veranlasst derselbe eine über oder unter ihm schwebende Magnetnadel, sich mit ihrem südsuchenden Pol nach Norden einzustellen. Befindet sich der Stabmagnet in unmittelbarer Nähe der Nadel, so kann er die richtende Kraft der Erde überwinden und die Nadel veranlassen, sich umgekehrt wie gewöhnlich einzustellen. Befindet er sich in grösserer Entfernung, so kann derselbe die richtende Kraft der Erde bloss schwächen. In einer bestimmten Entfernung wird der Magnet diese Kraft gerade aufheben, so dass die Nadel dann neutral ist. Von dieser Anordnung zur Schwächung der richtenden Kraft der Erde macht man beim Spiegel-Galvanometer (Fig. 115) Gebrauch, bei welchem der oben angebrachte Magnet, welcher gekrümmt ist und in beliebiger Höhe befestigt werden kann, ein Mittel gewährt, dem Apparate den gewünschten Grad von Empfindlichkeit zu verleihen, indem man den Magnet höher oder tiefer stellt.

b) Nobili's Methode: Anwendung eines *astatischen Paares*

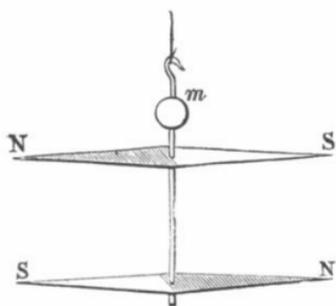


Fig. 104.

von Magnetnadeln. Werden zwei magnetisierte Nadeln von gleicher Stärke und Grösse durch einen dünnen Messing- oder Aluminiumdraht in umgekehrter Ordnung mit einander verbunden (Fig. 104), so wird der Kraft, welche die eine Nadel in den magnetischen Meridian zu stellen strebt, von der auf die andere Nadel wirkenden

Kraft genau das Gleichgewicht gehalten. Folglich bleibt dieses Nadelpaar in jeder ihm gegebenen Stellung stehen, und ist vom Erdmagnetismus unabhängig. Eine solche Verbindung ist unter dem Namen **astatisches Paar** bekannt. In der Praxis ist es jedoch schwierig, ein vollkommen astatisches Paar herzustellen, da es nicht leicht ist, zwei Nadeln bis zu genau demselben Grade zu magnetisieren; auch ist es schwierig, sie ganz genau parallel zu

einander zu befestigen. Ein solches astatisches Paar wird sofort durch einen Strom abgelenkt, welcher durch einen um eine

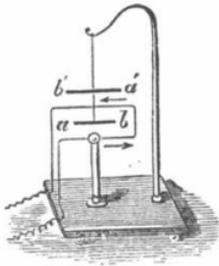


Fig. 105.

der Nadeln gerollten Draht fließt; denn wie Fig. 105 zeigt, dreht der Strom, welcher oberhalb der einen Nadel und unterhalb der andern fließt, beide in demselben Sinne, da sie sich bereits in umgekehrter Lage befinden. Man kann sogar noch weiter gehen und den Draht um beide Nadeln führen, indem man den Draht um die obere Nadel

im entgegengesetzten Sinne, wie um die untere Nadel windet.

Nobili wandte ein astatisches Nadelpaar in Schweigger's Multiplikator an und konstruierte auf diese Weise einen höchst empfindlichen Apparat, das *astatische Galvanometer* (Fig. 112). Die Beschreibung der besonderen Galvanometerformen, welche zur Strommessung geeignet sind, findet sich in der nächsten Vorlesung.

197. Erzeugung eines magnetischen Feldes durch einen Strom. Fließt ein Strom durch einen Kupferdraht, so ist derselbe im Stande, wie Arago fand, Eisenfeilspähne anzu ziehen, so lange der Strom durch ihn hindurchfließt. Diese Eisenfeilspähne stellen sich rechtwinklig zum Drahte und haften rings um denselben, fallen jedoch ab, sobald der Schliessungskreis unterbrochen wird. Es wird also rings um den den Strom leitenden Draht ein magnetisches Feld erzeugt, und es ist von Wichtigkeit, zu untersuchen, in welcher Weise die Kraftlinien in diesem Felde verteilt sind.

Angenommen, der Punkt in der Mitte von Fig. 106 stelle den Querschnitt des Drahtes vor, und der Strom hätte die Richtung vom Leser zum Papier. Dann ist nach der Ampère'schen Regel eine darunter gehaltene Magnetnadel bestrebt, sich in die angegebene Lage einzustellen, mit ihrem N-Pole nach links weisend¹⁾. Eine Nadel oberhalb des Drahtes stellt der

1) Wenn der Leser irgend welcher Schwierigkeit begegnet, die Ampère'sche Regel auf diesem und die folgenden Fälle anzuwenden, so sollte er genau an folgender Vorstellung festhalten. Der mit »in« markierte Punkt möge

Strom in die entgegengesetzte Lage. Eine Nadel zur Rechten des Stromes stellt sich rechtwinklig zum Strome (d. h. in die Ebene des Papiers), mit ihrem N-Pole nach unten gerichtet, während der N-Pol einer Nadel zur Linken nach oben gerichtet sein würde. In der That würde der N'-Pol um den Kon-

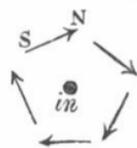


Fig. 106.

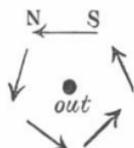


Fig. 107.

duktor in demselben Sinne gedreht werden, in welchem sich die Zeiger einer Uhr bewegen; während der S-Pol im entgegengesetzten Sinne gedreht werden würde. Fließt der Strom umgekehrt, d. h. in der Richtung zum Leser, so dass er aus der Ebene des Papiers heraustritt, wie in Fig. 107, so würden die Bewegungen gerade in umgekehrter Weise erfolgen. Daraus scheint zu folgen, dass der nordsuchende Pol eines Magnets sich beständig rings um einen Strom drehen müsste; da es jedoch nicht möglich ist, einen Magnet mit bloss einem Pole herzustellen, und da der südsuchende Pol im entgegengesetzten Sinne getrieben wird, so ist die ganze Wirkung die, dass sich die Nadel in die Richtung einer Tangente an einen den Konduktor einschliessenden Kreis einstellt. Das den Konduktor umgebende Feld besteht in der That aus einer Art magnetischen Stromes, welcher in der Nachbarschaft des Drahtes am stärksten ist. Dies hatte Oersted im Sinne, wenn er von dem »drehenden Einflusse« des elektrischen Stromes auf die Magnetnadel sprach. Das Kraftfeld mit seinen kreisförmigen Linien, welche einen in einem geradlinigen Konduktor fließenden Strom umgeben, lässt sich experimentell mit Eisenfeilspänen auf folgende Weise untersuchen: Man befestigt ein Kartenblatt horizontal

eine Oeffnung im Boden darstellen, in welche der Strom hineinfließt, und in welche der Leser mit dem Kopfe voran hineinfährt. So lange er sich in der Oeffnung befindet, muss er sich so wenden, dass er jeden der Magnete der Reihe nach ansieht, und sich erinnern, dass in jedem Falle der nordsuchende Pol nach seiner Linken abgelenkt wird. Bei Fig. 107 muss er sich vorstellen, als käme er aus der Oeffnung heraus, wo der Strom aus dem Boden ausfließt.

und führt durch eine Oeffnung in demselben einen starken vertikalen Kupferdraht (Fig. 108). Dann sibt man Eisenfeilspäne über das Blatt und sendet einen

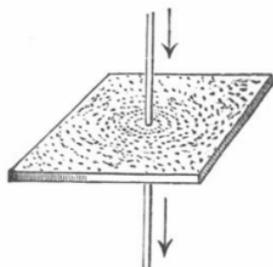


Fig. 108.

starken Strom von 3 bis 4 grossen Elementen durch den Draht. Klopft man dann leise auf das Blatt, so gruppieren sich die in der Nähe des Drahtes befindlichen Späne in konzentrischen Kreisen um denselben. Infolge dieses Feldes können zwei Konduktoren eine Fernwirkung auf

einander ausüben. Fliessen beide Ströme in derselben Richtung, so haben ihre magnetischen Felder das Bestreben sich zu verschmelzen und die resultierende Spannung im Medium hat eine Anziehung derselben zur Folge. Fliessen die Ströme in entgegengesetzter Richtung, so findet infolge der Spannungen des umgebenden magnetischen Feldes eine Abstossung derselben statt (vergl. Art. 384).

Bekanntlich wird zur Erzeugung eines magnetischen Feldes Energie verbraucht. Wird ein Strom durch einen Draht geschickt, so wächst das magnetische Feld um denselben, und die Energie der Batterie wird zum Teil hierauf verwandt, während der Strom wächst. Dass elektrische Ströme nicht *sofort* bis zu ihrer schliesslichen Stärke anwachsen, hat seinen Grund mit in der Reaktion des umgebenden magnetischen Feldes. Kein Strom kann ohne letzteres fließen. In der That ist das, was wir schlechthin einen elektrischen Strom *in* einem Drahte nennen, nichts anderes als dieses äussere magnetische Feld.

198. Aequivalente magnetische Schale: Ampère's Theorem. Für viele Zwecke ist die folgende Vorstellungsweise von der magnetischen Wirkung elektrischer Ströme geeigneter als die vorhergehende. Man verbinde die Enden einer Batterie durch einen Schliessungsdraht, welchen man, wie in Fig. 109, an einer Stelle zu einer Schlinge umbiegt. Dann ergibt sich, dass der ganze von der Schlinge begrenzte Raum magnetische Eigenschaften besitzt. Wir wollen annehmen,

dass der Strom in unserer Figur, von oben gesehen, in derselben Richtung durch die Schlinge fließt, wie die Zeiger einer Uhr sich bewegen; eine im Drahte schwimmend gedachte Person, welche stets nach dem Mittelpunkte der Schlinge sieht,

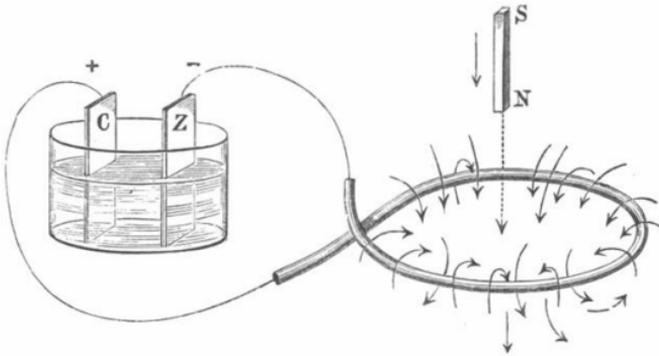


Fig. 109.

würde mit dem linken Arme nach unten zeigen. Folglich würde nach der Ampère'schen Regel ein N-Pol nach unten durch die Schlinge getrieben werden, ein S-Pol dagegen nach oben. In der That verhält sich der von der Schlinge des Drahtes begrenzte Raum wie eine *magnetische Schale* (vergl. Art. 118), welche an ihrer oberen Seite südsuchenden Magnetismus und an ihrer untern Seite nordsuchenden Magnetismus enthält. In jedem Falle lässt sich darthun, dass *ein geschlossener Volta'scher Bogen gleichbedeutend ist mit einer magnetischen Schale, deren Ränder mit dem Stromkreis zusammenfallen*, wobei die Stärke der Schale derart ist, dass die Anzahl ihrer Kraftlinien gleich der Anzahl der Kraftlinien ist, welche von dem im Bogen fließenden Strome herrühren. Der Stromkreis wirkt auf einen Magnet anziehend oder abstossend, und wird selbst von einem Magnet angezogen oder abgestossen, genau so, wie sich eine äquivalente magnetische Schale verhalten würde. Auch wirkt auf den Stromkreis selbst, wenn er in ein magnetisches Feld gebracht wird, dieselbe Kraft wie auf seine äquivalente magnetische Schale.

199. Maxwell's Regel. Professor Clerk Maxwell, welcher diese Methode entwickelte, stellte folgende elegante Regel auf,

um die gegenseitige Wirkung eines Stromes und eines in seiner Nähe befindlichen Magnets zu bestimmen. *Auf jeden Teil des Schliessungsbogens wirkt eine Kraft, welche ihn so zu richten strebt, dass derselbe innerhalb seiner Begrenzung die grösstmögliche Anzahl von Kraftlinien einschliesst.* Ist der Schliessungsbogen fest und der Magnet beweglich, so ist die auf den Magnet wirkende Kraft ebenfalls derart, dass sie die Anzahl der durch den Schliessungsbogen gehenden Kraftlinien zu einem Maximum zu machen sucht. (Vergl. auch Art. 344.) Dies ist nur ein besonderer Fall eines allgemeinen Gesetzes, welches für jedes elektromagnetische System gilt, nämlich: *Jedes elektromagnetische System ist bestrebt, eine solche Stellung einzunehmen, dass die magnetischen Linien, welche durch den erregenden Schliessungsbogen führen, zu einem Maximum werden.* (Art. 374.)

200. De la Rive's schwimmende Batterie. Die vorstehenden Bemerkungen lassen sich experimentell mit Hilfe einer kleinen schwimmenden Batterie darthun. Eine Zinkplatte

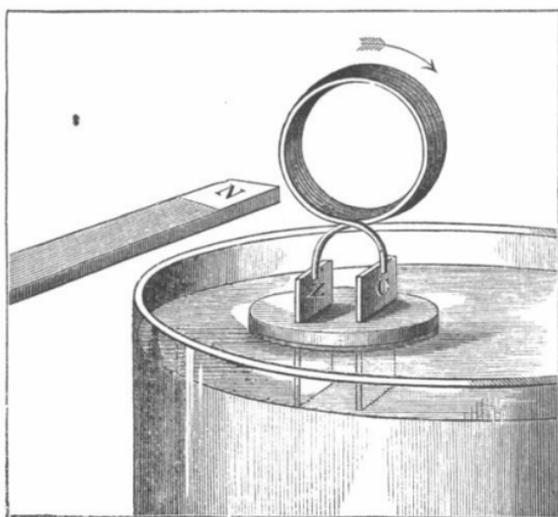


Fig. 110.

und eine Kupferplatte (Fig. 110) werden parallel zu einander in einem grossen Korke befestigt und ihre oberen Enden durch eine kreisförmig gebogene Rolle aus bewickeltem Kupferdrahte verbunden. Beide Platten schwimmen auf einer mit verdünnter

Schwefelsäure gefüllten Schale. Wird dem Ringe der eine Pol eines Stabmagnets genähert, so wird derselbe angezogen oder abgestossen, je nachdem es ein N-Pol oder S-Pol ist. Der schwimmende Schliessungsbogen bewegt sich derart, dass die durch den Ring führenden magnetischen Linien ein Maximum werden. Wird der S-Pol des Magnets derjenigen Seite des Ringes genähert, welche als ein Südsuchender Pol wirkt (d. h. derjenigen Seite, durch welche der Strom in der Richtung der Bewegung eines Uhrzeigers fliesst), so stösst er dieselbe ab. Wird der Pol mitten in den Ring gehalten, so wird die Batterie kräftig abgestossen, schwimmt fort und wendet sich so, dass sie dem S-Pole des Magnets ihre nordsuchende Seite zukehrt. Dann wird diese angezogen und die Batterie bewegt sich derart, dass die Mitte des Magnets sich innerhalb des Ringes befindet, in welcher Lage möglichst viele Kraftlinien die Ringfläche durchkreuzen.

Es lässt sich auch nachweisen, dass zwei von elektrischen Strömen durchflossene Schliessungsbögen einander anziehen und abstossen, gerade wie 2 magnetische Schalen es thun würden.

In der 31. Vorlesung über Elektromagnete wird gezeigt werden, wie man ein Stück Eisen oder Stahl magnetisieren kann, wenn man dasselbe mit einem spiralförmig gewundenen Drahte umgiebt und durch diesen einen Strom schickt.

201. Stromstärke im magnetischen Maße. Wenn ein Strom auf diese Weise auf einen in seiner Nähe befindlichen Magnetpol wirkt, so ist die von ihm ausgeübte Kraft f der Stromstärke i , der Stärke m des Magnetpols und der Länge l des benutzten Drahtes proportional; dagegen umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes r des Magnetpols vom Schliessungsbogen, oder $f = \frac{i l m}{r^2}$ Krafteinheiten. Ist der Draht in Gestalt eines Kreises um den Magnetpol geführt, so ist $l = 2 \pi r$ und $f = \frac{2 \pi i}{r} \cdot m$ Krafteinheiten. Nimmt man ferner an, dass der Radius des Kreises = 1 cm und die Stärke des

Magnetpols gleich einer Einheit ist, so ist die Kraft, welche der Stromstärke i entspricht, $\frac{2 \pi i}{1} \times 1 = 2 \pi i$ Krafteinheiten.

Damit also ein Strom von der Stärke i eine Kraft von i Einheiten auf den Einheitspol ausübt, muss man sich denken, dass der Strom nur $\frac{1}{2\pi}$ tel des Kreises durchfließt, oder einen Bogen, dessen Länge gleich dem Radius ist.

202. Einheit der Stromstärke. Man sagt, ein Strom habe die Stärke einer »absoluten« Einheit, wenn derselbe beim Durchfließen eines Drahtes von einem Zentimeter Länge, der einen Bogen eines Kreises von 1 cm Radius bildet, auf einen Magnetpol von der Stärke 1, welcher sich im Mittelpunkte des Bogens befindet, eine Krafteinheit ausübt. Die praktische Einheit »eines Ampère« beträgt nur den 10. Teil dieser theoretischen Einheit. (Vergl. auch Art. 349). Ist der Draht nicht gewunden, sondern gerade und beliebig lang, so ist die Kraft, welche der durch ihn fließende Strom auf einen Pol von der Stärke m in einem benachbarten Punkte P ausübt, dem einfachen Abstände (nicht dem Quadrate desselben) umgekehrt proportional, und

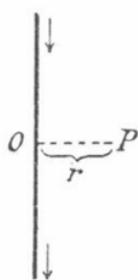


Fig. III.

der Pol ist bestrebt, sich rechtwinklig zu stellen sowohl in Bezug auf den Draht als auch in Bezug auf die Linie OP. In Fig. III ist der absteigende Strom, gemäss der obigen Korkzieherregel, bestrebt, einen in P befindlichen N-Pol nach dem Beschauer hin zu bewegen. Hat der Strom eine Stärke von i Ampère, so ist die auf einen Pol von m Einheiten ausgeübte Kraft

$$f = \frac{2m i}{10r} \text{ Krafteinheiten.}$$

Beispiel: Stromstärke = 60 Ampère; Polstärke = 200 Einheiten
Abstand = 2 cm; mithin $f = 1200$ Krafteinheiten; oder wenn wir durch $g = 981$ dividieren, circa 1,22 Gramm.

XVII. VORLESUNG: *Von den Galvanometern.*

203. Mit dem Ausdrucke **Galvanometer** wird ein Apparat bezeichnet, mit welchem man die Stärke elektrischer Ströme durch ihre elektromagnetische Wirkung misst. Es giebt 2 Arten Galvanometer: 1) solche, bei denen der Strom in einer festen Drahtspule fließt und eine auf einer Spitze schwebende Magnetnadel zur Ablenkung bringt und 2) solche, bei denen der Strom in einer beweglichen Spule fließt; letztere schwebt zwischen den Polen eines feststehenden Magnets und wird dadurch in Drehung versetzt. Es giebt noch einen dritten Apparat, (zum Unterschiede *Elektrodynamometer* genannt, cfr. Art. 389) bei welchem sowohl der bewegliche als auch der feststehende Teil aus Spulen besteht. Diese letzteren Apparate werden besonders bei Wechselströmen benutzt. Die einfache, in Art. 194 beschriebene Vorrichtung wurde ein »Galvanoskop« oder *Stromanzeiger* genannt; dieselbe konnte aber füglich nicht »Galvanometer«¹⁾ oder *Strommesser* genannt werden, da ihre Angaben nur qualitativ und nicht quantitativ waren. Die Angaben der Nadel gewährten keine genau Kenntnis von der Stärke des durch den Apparat fließenden Stromes. Ein gutes Galvanometer muss die wesentliche Bedingung erfüllen, dass die Stromstärke durch seine Angaben in zuverlässiger Weise wirklich *gemessen* wird. Auch sollte dasselbe für die zu messenden Ströme eine hinreichende Empfindlichkeit besitzen. Das Galvanometer, welches zur Messung sehr kleiner Ströme tauglich ist (etwa eines Stromes von nur 1 bis 2 Milliontel eines *Ampère*), ist zur Messung sehr starker Ströme, wie dieselben zur Erzeugung des elektrischen Lichtes oder zur galvanischen Versilberung gebraucht werden, nicht ge-

1) Bisweilen nennt man diese Apparate noch »Rheoskop« und »Rheometer«. Ein Stromunterbrecher wird häufig ein »Rheotom« genannt, und der in Fig. 129 abgebildete Kommutator oder Stromwender heisst in einigen Büchern »Rheotrop«. Doch sind diese Ausdrücke jetzt nicht mehr gebräuchlich.

eignet. Starke Ströme erfordern dicke Drähte, und es genügt eine Rolle mit nur wenigen Windungen. Sollen sehr schwache Ströme eine Ablenkung der Nadel bewirken, so müssen sie bis 1000mal um dieselbe zirkulieren, und die Rolle muss eine ebenso grosse Anzahl von Windungen haben; doch kann der Draht sehr dünn sein. Befindet sich in dem Schliessungsbogen des zu messenden Stromes schon ein grosser Widerstand (wie z. B. ein mehrere Meilen langer Telegraphendraht), so ist ein Galvanometer mit kurzer, aus nur wenigen Drahtwindungen bestehender Rolle unbrauchbar, und man muss ein Galvanometer mit einer Rolle anwenden, wo viele Drahtwindungen um die Nadel geführt sind. Den Grund hiefür findet man später (Art. 403). Hieraus ergibt sich, dass verschieden konstruierte Instrumente nötig sind, je nach der Art der Untersuchung; bei allen ist jedoch erforderlich, dass sie eine quantitative Messung zulassen und dass sie für den zu messenden Strom hinreichend empfindlich sind, ohne dass eine zu starke Erwärmung des Drahtes stattfindet.

204. Methoden der Hemmung. Bei allen Galvanometern ist eine hemmende Kraft erforderlich, gleichviel ob der Magnet oder die Rolle beweglich ist; denn sonst würde der schwächste Strom den Zeiger vollständig umdrehen. Soll der stärkere Strom eine grössere Ablenkung bewirken als der schwächere, so muss eine Kraft thätig sein, welche die Ablenkung zu verkleinern strebt. Solche Kräfte sind:

a) Der Erdmagnetismus. Wird die Nadel auf eine Spitze gestellt oder an einen Faden aufgehängt, so ist der Erdmagnetismus bestrebt, dieselbe wieder in den magnetischen Meridian zu ziehen. Diese Methode ist bei Galvanometern mit beweglichen Nadeln sehr gebräuchlich.

b) Die Torsion eines Drahtes. Der bewegliche Teil tordiert bei seiner Drehung den zur Aufhängung benutzten Draht, der sich dann zu detordieren strebt, und zwar mit einer Kraft, welche gleichzeitig mit dem Ablenkungswinkel zunimmt. Diese Methode ist bei Galvanometern mit beweglichen Rollen gebräuchlich.

c) Schwerkraft. Wenn die Nadel sich in einem Zapfenlager, innerhalb einer vertikalen Ebene bewegt, wird sie an dem einen Ende mit einem Gewicht belastet.

d) Permanenter Magnet. Um einen Nadelapparat unabhängig von seiner Lage zu machen, kann man denselben mit einem kräftigen äussern Stahlmagnet kombinieren, welcher die Nadel auf Null zurück bewegt.

e. Bifilare Aufhängung. Wird eine Nadel oder eine Rolle an zwei parallelen Fäden aufgehängt, so strebt dieselbe infolge der Schwerkraft in ihre Anfangslage zurückzukehren. Damit der Apparat recht empfindlich ist, muss man die hemmende Kraft so viel wie möglich abschwächen.

205. Methoden der Beobachtung. Beim Gebrauch eines Galvanometers lassen sich folgende Methoden der Beobachtung anwenden:

a) Methode der Ablenkung. Der Winkel, um welchen der bewegliche Teil (Nadel oder Rolle) abgelenkt wird, wird mittels eines Index oder eines reflektierten Lichtstrahls auf einer Skala abgelesen, nachdem der bewegliche Teil zur Ruhe gekommen ist.

b) Torsionsmethode. Der bewegliche Teil wird mittels eines Drahtes an einer Torsionsscheibe aufgehängt, welche so lange gedreht wird, bis der Index wieder auf Null steht. Die hemmende Kraft hält dann der ablenkenden Kraft das Gleichgewicht. Diese Methode, welche von Ohm herrührt, ist sehr zuverlässig und wird bei dem Elektrodynamometer von Siemens angewendet.

c) Methode der ersten Schwingung. Anstatt so lange zu warten, bis der bewegliche Teil zur Ruhe kommt, kann man die erste Schwingung beobachten. Diese Methode, welche bei plötzlichen Entladungen oder bei vorübergehenden Strömen allein anwendbar ist, heisst die *ballistische* Methode (vergl. Art. 213). Wird der bewegliche Teil in seiner Bewegung nicht gehemmt, so ist die erste durch einen Batteriestrom hervorgebrachte Schwingung gerade doppelt so gross, wie die schliessliche Ablenkung.

d) Oscillationsmethode. Anstatt der Ablenkung kann man auch die Schwingungszeit der Nadel beobachten, wobei die

Rolle rechtwinklig zum magnetischen Meridian einzustellen ist. Bei dieser Methode ist der Erdmagnetismus in Anschlag zu bringen (vergl. Art. 133).

e) Methode der Verstärkung. Bei sehr schwachen Strömen wendet man häufig eine Methode an, wobei man dadurch eine messbare Schwingung erzielt, dass man in dem Augenblicke, wo die Nadel den Nullpunkt passiert, den Strom umkehrt. Bisweilen benutzt man hierbei einen rotierenden Kommutator von besonderer Konstruktion, damit die auf einander folgenden Impulse sich gegenseitig verstärken.

f) Null-Methoden. In vielen Fällen wendet man Kombinationen an (Wheatstone's Brücke, Differentialgalvanometer etc.) und zwar in der Weise, dass kein Strom durch das Galvanometer fließt, wenn die Bedingungen des elektrischen Gleichgewichts erreicht sind. Solche Methoden, welche meistens gemein zuverlässig sind, sind unter dem Namen Null-Methoden bekannt. Bei ihnen sind empfindliche Galvanometer anwendbar, ohne dass die Graduierung ihrer Skala von grosser Bedeutung ist.

206. Nobili's astatisches Galvanometer. Der von Nobili konstruierte Apparat besteht aus einem astatischen Nadel-

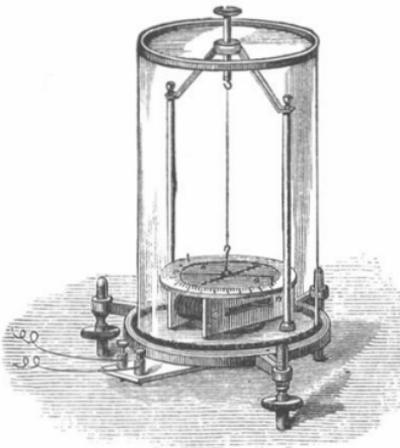


Fig. 112.

paar, welches sehr empfindlich aufgehängt ist, und zwar so, dass die untere Nadel zwischen einer Drahtrolle schwebt, welche auf einen Rahmen von Elfenbein gewunden ist (Fig. 112). Dieser Apparat war lange Zeit eine beliebte Form eines empfindlichen Galvanometers. Da die Nadeln desselben vom Erdmagnetismus unabhängig sind, so stellen sie sich entsprechend der Torsion des dünnen Drahtes, an welchem

sie aufgehängt sind. Den Rahmen, über welchen die Rolle gewunden ist, muss man ganz genau parallel zu den Nadeln auf-

stellen. Drei Schraubenfüsse dienen dazu, die Grundfläche des Instruments horizontal zu stellen. Ein gläsernes Gehäuse schützt gegen Luftströmungen. Wird ein Strom durch die Drahtrollen geschickt, so bewegen sich die Nadeln zur Rechten oder Linken über einem graduierten Kreise. Sind die Ablenkungen *gering* (d. h. weniger als 10 bis 15 Grad), so sind dieselben fast genau der Stärke der sie erzeugenden Ströme proportional. Bewirkt z. B. ein Strom eine Ablenkung von 6° , so ist derselbe annähernd 3mal so stark wie ein Strom, welcher die Nadel bloss um 2° ablenkt. Dieses näherungsweise giltige Verhältnis verliert jedoch seine Richtigkeit, wenn die Ablenkung mehr als 15 bis 20° beträgt. Denn in diesem Falle wirkt der Strom auf die Nadel nicht mehr so vorteilhaft, da ihre Pole sich dann nicht mehr innerhalb der Rollen befinden, sondern an der Seite über dieselben hinausragen, und da überdies die Nadel zu der auf sie wirkenden Kraft schief steht, so wird erstere nur noch von einem Teile der Kraft abgelenkt, entgegen der richtenden Kraft des Aufhängedrahtes; der andere Teil der Kraft bewegt die Nadel der Länge nach, was hier nicht in Betracht kommt. Man kann jedoch das Galvanometer »*kalibrieren*«, d. h. man kann durch besondere Messungen oder durch Vergleichung mit einem Normalapparat feststellen, welche Stromstärke einer gewissen Ablenkung entspricht. Nimmt man z. B. als schon bekannt an, dass eine Ablenkung von 32° an einem besondern Galvanometer durch einen Strom von $\frac{1}{100}$ Ampère erzeugt wird, dann erzeugt ein Strom von jener Stärke an jenem Apparate *stets* dieselbe Ablenkung, vorausgesetzt, dass die hemmende Kraft sich nicht zufällig geändert hat.

207. Die Tangentenbussole. Aus den oben angeführten Gründen ist es unmöglich, ein Galvanometer zu konstruieren, bei welchem der (in Graden gemessene) *Winkel*, um welchen die Nadel abgelenkt wird, für alle Grössen der Stromstärke proportional ist. Möglich dagegen ist es, ein sehr einfaches Galvanometer zu konstruieren, bei welchem die *Tangente* des Ablenkungswinkels der Stromstärke genau proportional ist. Das

Wesentliche aller Tangentenbussolen ist, dass die Rolle im Verhältniss zur Nadel sehr gross ist. Fig. 113 zeigt eine für

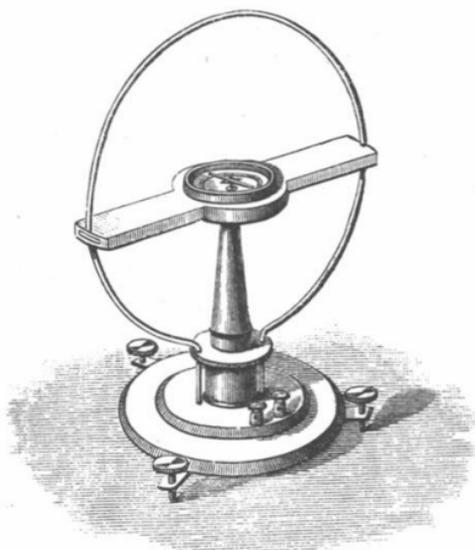


Fig. 113.

starke Ströme geeignete Form der **Tangentenbussole**. Die Rolle dieses Apparates besteht aus einem einfachen Ringe von dickem Kupferdrahte, dessen Durchmesser 25 bis 40 cm beträgt. Im Mittelpunkte wird eine magnetisierte, nicht mehr als 2—3 cm lange Stahlnadel leicht beweglich aufgehängt, welche gewöhnlich noch mit einem leichten Zeiger aus Aluminium versehen ist. Der Apparat wird eingestellt, indem man die Ebene des Drahtkreises in den magnetischen Meridian stellt, so dass also die kleine Nadel sich in der Ebene der Rolle befindet. Das »Feld«, welches ein durch den Kreis fliessender Strom erzeugt, ist im Mittelpunkte und in der Nachbarschaft desselben sehr gleichmässig, und die Kraftlinien sind dort wirklich senkrecht zur Ebene der Rolle. Dies gilt aber nicht von andern Stellen innerhalb des Kreises, da die Kraft weder gleichmässig, noch senkrecht wirkt, ausgenommen *in der Ebene* der Rolle und *in ihrem Mittelpunkte*. Bei der geringen Grösse der Nadel sind ihre Pole nie weit vom Mittelpunkte entfernt, und gelangen daher niemals an Stellen, wo die magnetische Kraft unregelmässig

ist¹⁾. Jede magnetische Kraft, welche der Strom in der Rolle auf die Nadel ausübt, wirkt senkrecht zur Ebene des Kreises und deshalb rechtwinklig zum magnetischen Meridian. Nun wurde in Art. 137 bewiesen, dass die magnetische Kraft, welche rechtwinklig zum Meridian wirkt und an einer Magnetnadel die Ablenkung δ erzeugt, gleich der horizontalen Kraft des Erdmagnetismus an jenem Orte ist, multipliziert mit der *Tangente* des Ablenkungswinkels. Daher lenkt ein in der Rolle fließender Strom die Nadel um einen Winkel ab, *dessen Tangente der Stromstärke proportional ist*.

Beispiel. Angenommen, eine Batterie erzeugte an einem Tangenten-Galvanometer eine Ablenkung von 15° , und eine zweite stärkere Batterie eine Ablenkung von 30° . Die Stromstärken verhalten sich dann nicht wie 15 zu 30, sondern wie $\tan 15^\circ$ zu $\tan 30^\circ$. Diese Werte hat man einer trigonometrischen Tafel zu entnehmen, und man findet alsdann, dass das Verhältnis der Stromstärken wie 0,268 zu 0,577 ist, oder annähernd wie 10 zu 22. Oder allgemeiner: Wenn der Strom C die Ablenkung δ und C' die Ablenkung δ' erzeugt, so ist:

$$C : C' = \tan \delta : \tan \delta'.$$

Um das Nachschlagen in einer Tabelle zu ersparen, werden auf der Kreisskala des Apparates bisweilen die Tangentenwerte statt der Bogengrade verzeichnet. Man ziehe eine Tangente OT an den Kreis (Fig. 114) und trage auf dieser Linie von O aus mehrere gleiche Teile ab und verbinde die Teilpunkte mit dem Mittelpunkte. Auf diese Weise wird der Kreis in eine Anzahl

1) Um die Gleichmässigkeit des Feldes mit Sicherheit zu erhalten, schlug Gaugain vor, die Nadel in einem Punkte der Achse der Rolle aufzuhängen, dessen Entfernung vom Mittelpunkte gleich dem halben Radius der Rolle wäre. Die Anordnung von v. Helmholtz, bestehend in 2 parallelen Rollen, die symmetrisch auf beiden Seiten der Nadel sind, ist besser; und ein Galvanometer aus 3 Rollen, von denen die mittlere grösser, als die beiden andern ist, so dass alle drei etwa in der Oberfläche einer Kugel liegen, in deren Zentrum sich die kleine Nadel befindet, ist der geeignetste Apparat zur Erzielung eines gleichmässigen Feldes im Mittelpunkte.

Sektoren zerlegt, von denen die dem Punkte O zunächst liegenden fast gleich sind, welche jedoch immer kleiner werden, je

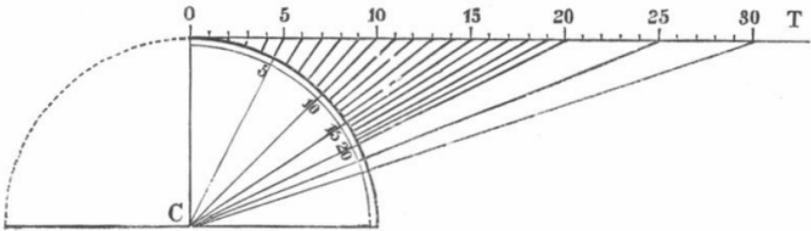


Fig. 114.

mehr man sich von O entfernt. Diese ungleichen Sektoren entsprechen gleichen Zunahmen der Tangente. Wäre die Skala auf diese Weise angefertigt, so wären die Ablesungen den Tangenten proportional. Es ist jedoch schwieriger, einen Bogen mit Genauigkeit in Tangentenlinien, als in gleiche Grade zu teilen; deshalb wendet man diese allerdings bequeme Einteilung nicht an, wenn es sich um grosse Genauigkeit handelt.

208. Absolute Strommessung mit der Tangentenbussole. Mit Hilfe der Tangentenbussole lässt sich die Stärke eines Stromes in »absoluten« Einheiten angeben, wenn die »Konstanten« des Apparates bekannt sind. Die Tangente des Ablenkungswinkels giebt (vergl. Art. 137) das Verhältnis der vom Strome herrührenden magnetischen Kraft zur horizontalen Komponente des Erdmagnetismus an. Beide Kräfte wirken auf die Nadel und sind in *gleicher* Weise von dem magnetischen Moment der Nadel abhängig, welches wir deshalb in diesem Falle nicht zu kennen brauchen. Wir wissen, dass die vom Strome im Mittelpunkte der Rolle ausgeübte Kraft dem Produkte aus der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus und der Tangente des Ablenkungswinkels proportional ist. Diese beiden Grössen erhält man aus den Tafeln, und aus ihnen berechnen wir den absoluten Wert des Stromes wie folgt: Es möge r den (in Zentimetern gemessenen) Radius der Galvanometer-Rolle bedeuten; die gesamte Länge derselben ist dann $2r\pi$ (wenn sie bloss aus einer Windung besteht). Der Abstand aller Teile der

Rolle vom Mittelpunkte ist natürlich $= r$. Aus unserer Definition für die Einheit der Stromstärke (Art. 202) folgt, dass die (in Kraftereinheiten gemessene) Kraft im Mittelpunkte gleich

$$i \cdot \frac{2\pi r}{r^2} = i \cdot \frac{2\pi}{r} = H \cdot \text{tang } \delta \text{ ist,}$$

folglich:
$$i = \frac{r}{2\pi} \cdot H \cdot \text{tang } \delta.$$

Die Grösse $\frac{r}{2\pi}$ heisst der »Reduktionsfaktor« des Galvanometers und wird mit G bezeichnet. Folglich ist der Wert des Stromes in absoluten (elektromagnetischen) Einheiten ¹⁾, $i = \frac{H}{G} \cdot \text{tang } \delta.$

Die Konstante G giebt die Stärke des Feldes an, welches im Zentrum der Rolle durch die Stromeinheit erzeugt wird.

209. Die Sinus-Bussole. Der Nachteil der soeben beschriebenen Tangentenbussole besteht in ihrer geringen Empfindlichkeit, da die Rolle im Vergleich zur Nadel notwendigerweise sehr gross ist und sich deshalb in grösserer Entfernung von derselben befindet. Ein Galvanometer mit einer kleinern Rolle oder einer grössern Nadel würde man als Tangentengalvanometer nicht gebrauchen können, obgleich seine Empfindlichkeit eine grössere sein würde. *Jedes* empfindliche Galvanometer, bei welchem die Nadel durch den Erdmagnetismus gerichtet wird, lässt sich jedoch als **Sinusbusssole** gebrauchen, vorausgesetzt, dass der Rahmen, auf welchen die Drahtwindungen gewickelt sind, sich um eine durch den Mittelpunkt gehende Achse drehen lässt. Ist der Apparat in dieser Weise konstruiert, so wendet man folgende Methode der Strommessung an: die Rolle wird zunächst der Nadel (d. h. also dem magnetischen Meridiane) parallel gestellt; alsdann schickt man einen Strom

1) Aus den Artikeln 202 und 349 geht hervor, dass die praktische Einheit des Stromes, welche wir »ein Ampère« nennen, nur den zehnten Teil einer »absoluten« Einheit im Zentimeter-Gramm-Sekunden-System beträgt.

hindurch, welcher eine Ablenkung erzeugt; die Rolle selbst wird nun in demselben Sinne gedreht, bis dieselbe mit der Nadel wieder parallel steht. In dieser Lage wirken zwei Kräfte auf die Nadel, nämlich die richtende Kraft des Erdmagnetismus, welche in der Richtung des magnetischen Meridians wirkt, und dann diejenige Kraft, welche der durch die Rolle fließende Strom ausübt, und welche die Pole der Nadel um einen rechten Winkel zu drehen strebt. In der That hat man hier ein Kräftepaar, welches genau dem Kräftepaar des Erdmagnetismus das Gleichgewicht hält. In der Vorlesung über die magnetischen Kraftgesetze (Art. 136) ergab sich nun, dass, wenn eine Nadel abgelenkt wird, das Moment des Kräftepaares dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional ist. Wird deshalb bei der Sinusbussole die Rolle so weit gedreht, dass die Nadel ihr wieder parallel ist, so ist *die Stromstärke in der Rolle dem Sinus des Winkels proportional, um welchen die Rolle gedreht wurde*¹⁾.

210. Das Spiegel-Galvanometer. Ist ein Galvanometer von grosser Empfindlichkeit erforderlich, so müssen die beweglichen Teile sehr leicht und klein sein. Um die Bewegungen einer sehr kleinen Nadel zu übersehen, muss man einen *Zeiger* irgend welcher Art benutzen. In der That ist es beim Tangentialgalvanometer üblich, an der kurzen, starken Nadel einen feinen, unbiegsamen Zeiger aus Aluminium zu befestigen. Eine weit bessere Methode besteht darin, an der Nadel einen sehr leichten Spiegel von mit Silber belegtem Glase anzubringen, mit

1) Wer die Stärke zweier Ströme vergleichen will, hat hier wieder eine Tafel der natürlichen Sinus nötig. Nehmen wir an, dass beim Strom C die Rolle um einen Winkel θ gedreht werden muss, und bei einem zweiten Strome C' um θ' , so ist:

$$C : C' = \sin \theta : \sin \theta'.$$

Es wird natürlich vorausgesetzt, dass der Apparat mit einer Skala versehen ist, auf welcher man den Winkel, um welchen die Rolle gedreht wurde, in Graden ablesen kann. Man kann hier auch in Fällen, wo es sich um blosser Näherungswerte handelt, den Kreis statt in Bogengrade in Teile teilen, welche gleichen Zunahmen des Sinus entsprechen.

Hilfe dessen ein Lichtstrahl nach einer Skala reflektiert werden kann, so dass die geringste Bewegung der Nadel vergrößert sichtbar gemacht wird. Die *Spiegelgalvanometer*, welche Kelvin zum Zwecke des Signalisierens durch unterseeische Kabel erfand, sind beachtenswerte Beispiele dieser Art Apparate. Fig. 115 zeigt die allgemeine Einrichtung dieses Apparates. Der

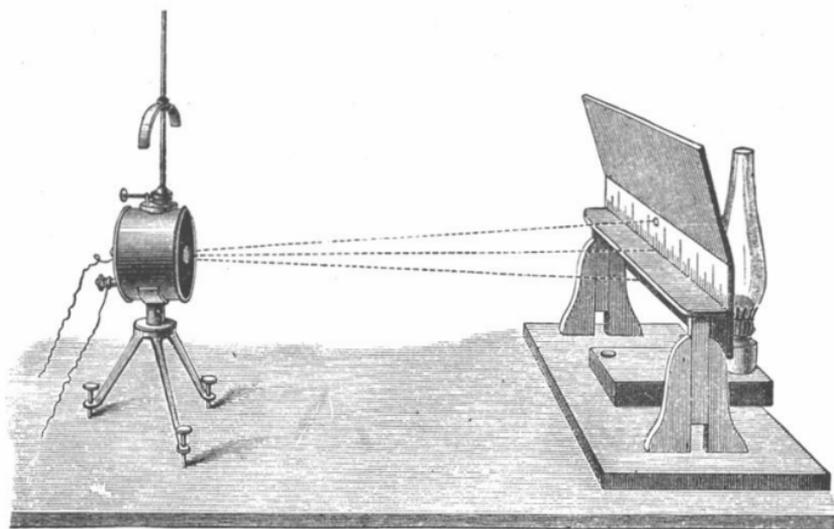


Fig. 115.

Hauptbestandteil des Galvanometers ruht auf drei Schraubfüßen, durch welche derselbe senkrecht gestellt werden kann. Der Magnet besteht aus einer oder mehreren kleinen Stückchen einer Uhrfeder aus Stahl, welche auf der Rückseite eines leichten konkaven Glasspiegels von der ungefähren Grösse eines 10-Pfennig-Stücks befestigt sind. Dieser Spiegel hängt an einem einfachen Seidenkokonfaden innerhalb der Rolle, und ein gekrümmter Magnet, welcher dem Erdmagnetismus entgegenwirken oder die Nadel richten soll, wird an einer vertikalen Stütze oberhalb der Rolle befestigt. Eine weitere Abbildung des aufgehängten Spiegels und der Magnete zeigen Fig. 116 und 117. Dem Galvanometer gegenüber befindet sich die Skala. Ein Lichtstrahl von einer Petroleum-Lampe geht durch eine enge Oeffnung

unter der Skala und fällt auf den Spiegel, welcher ihn nach der

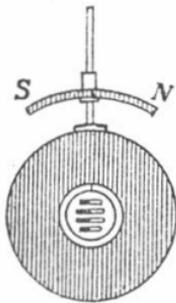


Fig. 116.

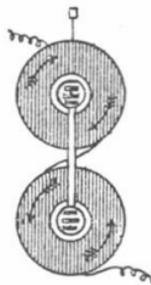


Fig. 117.

Skala zurückwirft. Der Spiegel ist schwach konkav und liefert einen scharf begrenzten Lichtfleck, wenn die Skala um die Brennweite des Spiegels von diesem entfernt ist. Der *richtende* Magnet setzt den Experimentierenden in den Stand, den reflektierten Lichtfleck auf den Nullpunkt

der Skala fallen zu lassen. Der schwächste durch das Galvanometer fließende Strom hat zur Folge, dass der Lichtfleck nach links oder rechts verschoben wird. Der schwache Strom, welcher erzeugt wird, wenn man die Spitze einer Messingnadel und eine Stahlnadel (die durch Drähte mit den Enden des Galvanometers verbunden sind) in einen Tropfen Salzwasser taucht, verschiebt den Lichtfleck sogleich über die Skala. Bei Anwendung eines starken Kalklichtes lässt sich die Bewegung der Nadel 1000 Personen zu gleicher Zeit sichtbar machen. Für noch empfindlichere Arbeiten kann man ein astatisches Nadelpaar anwenden, bei welchem jede Nadel von einer besondern Rolle umgeben, und der Spiegel an einer der Nadeln befestigt ist. Fig. 117 zeigt ein Diagramm dieser Form, mit 2 Spulen, welche so gewickelt sind, dass der Strom in entgegengesetzter Richtung hindurchgeht. Hat der Apparat 4 Spulen, 2 vor und 2 hinter dem schwebenden Nadelpaar, und hat jede Spule ungefähr 3 Kilometer Draht von circa 0,025 mm Dicke, so lässt sich noch die Ablenkung eines Stromes sichtbar machen, welcher 50,000 Millionen mal schwächer ist als ein Ampère.

211. Galvanometer mit aufgehängter Rolle. Dieselben sind von Sturgeon (1836), Varley (1860) und andern benutzt worden, und ihr Prinzip findet sich auch bei Kelvin's Heberschreiber. Das bekannteste Galvanometer dieser Art ist das von D'Arsonval (Fig. 118). Zwischen den Polen eines zusammengesetzten permanenten Stahlmagnets von U-förmiger Gestalt

schwebt an einem sehr dünnen gewalzten Silberdrahte eine offene Rolle, deren Draht sehr dünn ist und auf ein leichtes Gestell von rechteckförmiger Gestalt gewickelt ist. Der Strom wird durch die Aufhängedrähte der Rolle zugeführt und wieder zurückgeführt. Innerhalb der aufgehängten Rolle befindet sich ein von hinten gestützter Cylinder aus weichem Eisen, der das magnetische Feld verstärkt. Die vertikalen Teile der Rolle hängen frei in den beiden engen Oeffnungen, wo das magnetische Feld sehr kräftig ist. Die Kraft, welche die Rolle zu drehen strebt, ist dem Strome, der Anzahl der Windungen und der Intensität des magnetischen Feldes proportional; folglich wird der Apparat sehr empfindlich, wenn man einen recht kräftigen Magnet benutzt. Die Elastizität des Aufhängedrahtes kontrolliert die Stellung der Rolle, und strebt sie in ihre ursprüngliche Lage zurückzuführen. Diese Galvanometer sind von dem erdmagnetischen Felde unabhängig, noch werden sie durch benachbarte Magnete beeinflusst, so dass man sie in vielen Fällen benutzen kann, wo andere Galvanometer unbrauchbar sind. Einige sind mit einem Index und einem Zifferblatt versehen, oder, was gebräuchlicher ist, sie tragen an der Rolle einen Spiegel, welcher einen Lichtstreifen reflektiert.

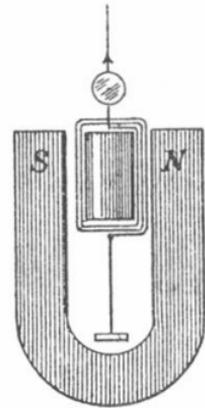


Fig. 118.

In jüngster Zeit haben Ayrton und Mather ein Galvanometer mit aufgehängter Rolle konstruiert (Fig. 119). Letztere wird hier aus einer länglichen Schlinge gebildet, welche an ihren Seiten keine Oeffnung hat. Folglich lassen sich die Magnetpole sehr nahe an einander bringen; dieselben sind aus einer Anzahl flacher Stahlmagnete von nahezu kreisförmiger Gestalt zusammengesetzt, welche über einander aufgeschichtet sind. Ein solcher Apparat, mit Spiegel und Skala

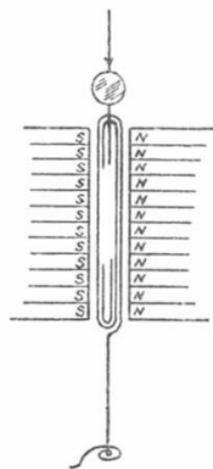


Fig. 119.

versehen, lässt noch die Ablenkung eines Grades erkennen, wenn der Strom 90,000,000 mal schwächer als 1 Ampère ist.

Starke Ströme darf man nicht durch sehr empfindliche Galvanometer schicken, denn wenn dieselben auch nicht verdorben werden, sind doch die Ablenkungen der Nadel zu gross, um eine genaue Messung zu gestatten. In diesem Falle gebraucht man ein *Nebengeleis*, d. h. die Drahtwicklung der Rolle wird so eingerichtet, dass der grössere Teil des Stromes an dem Galvanometer vorbeigeht und nur ein kleiner Teil des Stromes wirklich durch die Rolle des Apparats fliesst. Der Widerstand des Nebengeleises muss zum Widerstande des Apparates ein bekanntes Verhältnis haben, entsprechend dem in Art. 404 angeführten Satze über verzweigte Ströme.

212. Das Differential-Galvanometer. Zum Zwecke der Vergleichung zweier Ströme wird häufig ein Galvanometer angewendet, bei welchem die Rolle aus *zwei* getrennten Drähten besteht, welche neben einander aufgewickelt sind. Werden zwei gleiche Ströme in entgegengesetzten Richtungen durch diese Drähte gesandt, so bewegt sich die Nadel nicht. Sind die Ströme jedoch ungleich, so wird die Nadel durch den stärkern Strom abgelenkt, und zwar mit einer Kraft, welche der *Differenz* der Stärke beider Ströme entspricht.

213. Das ballistische Galvanometer. Um die Stärke von solchen Strömen zu messen, welche nur sehr kurze Zeit dauern, wendet man Galvanometer an, bei denen die Nadel eine verhältnissmässig grosse Schwingungsdauer hat. Dies ist der Fall bei langen oder schweren Nadeln; auch kann man die Nadeln mit Bleigewichten beschweren. Da die Nadel langsam schwingt, so summieren sich gleichsam die verschiedenen Impulse, welche der kurz dauernde Strom in den einzelnen Momenten ausübt. *Der Sinus des halben Winkels des ersten Ausschlages der Nadel ist der durch die Rolle geflossenen Elektrizitätsmenge proportional.* Auf diese Weise lässt sich die Ladung eines Kondensators messen, indem man denselben durch ein ballistisches Galvanometer entladet. (Art. 413).

214. Methoden der Dämpfung; aperiodische Galvanometer. Damit die Nadel nicht längere Zeit hin und her schwingt, benutzt man verschiedene Mittel, um die Bewegung zu *dämpfen*, nämlich:

1) Dämpfung durch die Luft. — Eine an der Nadel befestigte leichte Fahne stösst gegen die Luft und dämpft dadurch die Bewegung. Bei Spiegelapparaten dämpft der Spiegel selbst, besonders wenn derselbe von einem engen Gehäuse umgeben ist.

2) Dämpfung durch Oel. — Eine Fahne taucht in Oel.

3) Magnetische Dämpfung. — Schwingt die Nadel in der Nähe einer Kupferkugel oder innerhalb derselben, so kommt sie bald in Ruhe, infolge der im Kupfer induzierten Wirbelströme (vergl. Art. 452). Diese Ströme dämpfen die Bewegung der aufgehängten Rolle bei Instrumenten dieser Art.

Die Schwingungsperiode lässt sich dadurch reduzieren, dass man das Gewicht und die Hebelarmlänge der beweglichen Teile vermindert, so dass ihr Trägheitsmoment kleiner wird. Dasselbe lässt sich auch (auf Kosten der Empfindlichkeit des Apparates) durch Verstärkung der hemmenden Kräfte verringern. Ein Apparat, welcher so gedämpft wird, dass er zur Ruhe kommt, ohne eine periodische Schwingung vollführt zu haben, heisst ein *aperiodischer* Apparat.

215. Voltmeter oder Potentialgalvanometer. Vorfertigt man ein Galvanometer mit einer Rolle von sehr langem, dünnen Drahte von grossem Widerstande, so fliesst nur ein ganz geringer Teil des Stromes hindurch; doch ist derselbe stets der Potentialdifferenz proportional, welche an den beiden Enden seines Schliessungsbogens auftritt. Ein derartiges Galvanometer, mit einer geeigneten Skala versehen, giebt die Anzahl der Volt zwischen seinen Enden an. Es giebt mancherlei Formen dieser Galvanometer; alle stimmen darin überein, dass sie eine Rolle von hohem Widerstande haben, bisweilen mehrere tausend Ohm. Das in Art. 211 beschriebene Galvanometer mit aufgehängter Rolle liefert ein vortreffliches Voltmeter. Weston's Voltmeter, welches in Amerika eine weite Verbreitung gefunden hat, ge-

hört dieser Klasse an; seine Rolle schwebt leicht auf einer Spitze und wird durch eine Spiralfeder gehemmt. Jedes empfindliche Spiegelgalvanometer lässt sich als Voltmeter verwenden, man braucht nur seinem Schliessungsbogen äusserlich einen genügend grossen Widerstand hinzuzufügen. Es giebt auch noch andere Voltmeter, welche auf elektrostatischen Wirkungen beruhen. Dieselben sind eine Art Elektrometer und sollen im Artikel 285 beschrieben werden. Cardew's Voltmeter ist von der obigen Art von Instrumenten verschieden, und besteht aus einem langen dünnen Platindrahte von hohem Widerstande, welcher sich beim Erwärmen ausdehnt, wenn derselbe quer mit einem Schliessungsbogen verbunden wird. Alle Voltmeter verwendet man als *Nebengeleise* quer zwischen den beiden Stellen, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll. Dieselben werden niemals in den Schliessungsbogen einrangiirt, wie dies bei Amperometern der Fall ist.

216. Amperometer. Ein Galvanometer, dessen Skala in der Weise graduiert ist, dass sein Index direkt die Zahl der durch die Rolle fliessenden Ampère angiebt, heisst ein *Amperometer*. Diese Instrumente wurden im Jahre 1879 von Ayrton und Perry zu praktischem Gebrauch eingeführt. In der Folgezeit sind noch viele andere Arten erfunden worden. Die In-

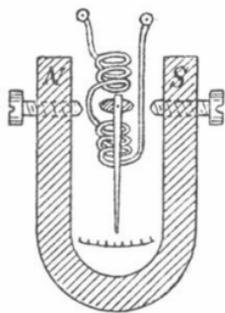


Fig. 120.

strumente von Ayrton und Perry sind transportabel und aperiodisch, und die Nadel, welche die Gestalt eines Ovals hat (Fig. 120), befindet sich zwischen den Polen eines kräftigen permanenten Magnets, durch welchen ihre Richtung bestimmt wird, so dass sie unabhängig vom Erdmagnetismus ist. Infolge einer besondern Form der Polenden, der Nadel und der Rollen sind die Winkelab-

lenkungen der Stärke des ablenkenden Stromes proportional. Diese Amperometer werden mit kurzen Rollen von sehr geringem Widerstande und weniger Drahtwindungen angefertigt. Ayrton

und Perry konstruierten auch Voltmeter von ähnlicher Form, jedoch mit langen Rollen von hohem Widerstande.

Unter den zahlreichen im Handel vorkommenden Formen von Amperometern giebt es auch solche, welche weder einen Magnet noch einen Eisenkern haben, und welche auf der Kraft beruhen, die eine feste und eine bewegliche, vom Strome durchflossene Rolle auf einander ausüben. Von ihnen wird in Art. 389 die Rede sein; dieselben eignen sich sowohl für Wechselströme wie für kontinuierliche. Zu dieser Art gehört Siemen's Elektro-dynamometer, sowie Kelvin's Wagen.

Andere Apparate beruhen auf den magnetischen Eigenschaften des vom Strome beeinflussten Eisens. Hierzu gehören die Instrumente von Schuckert (Fig. 121). Ein auf der Achse einer offenen Rolle schwebender Zeiger trägt einen leichten Streifen aus weichem Eisen, dessen Querschnitt *B* ist. Ein zweiter Streifen *A* ist innerhalb der Rolle befestigt. Indem der Strom um die Rolle fließt, magnetisiert er diese Streifen, und letztere stossen sich ab. Die hemmende Kraft ist hier die Schwerkraft.

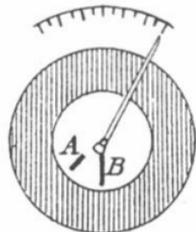


Fig. 121.

XVIII. VORLESUNG: *Von den durch Induktion erzeugten Strömen.*

217. Im Jahre 1831 machte Faraday die Entdeckung, dass in einem geschlossenen Stromleiter sich dadurch Ströme erregen lassen, dass man in seiner Nähe Magnete bewegt oder dass man den Stromleiter durch ein magnetisches Feld führt; und er vervollständigte diese Entdeckung noch, indem er feststellte, dass ein Strom von veränderlicher Stärke in einem geschlossenen in seiner Nähe befindlichen Stromleiter einen sekundären Strom induzieren kann. Solche Ströme, die durch Magnete oder andere Ströme erzeugt werden, heißen **Induktionsströme** und die Entstehung dieser induzierten Ströme durch einen Magnet oder einen Strom wird **elektromagnetische Induk-**

tion¹⁾ genannt. Auf diesem Principe beruhen die modernen *Dynamomaschinen*, welche auf mechanischem Wege elektrische Ströme erzeugen, sowie die *Induktionsrollen*, die Wechselstrom-*Transformatoren* und andere Apparate.

218. Von den durch einen Magnet erzeugten Induktionsströmen. Wird eine Rolle aus isoliertem Drahte zu

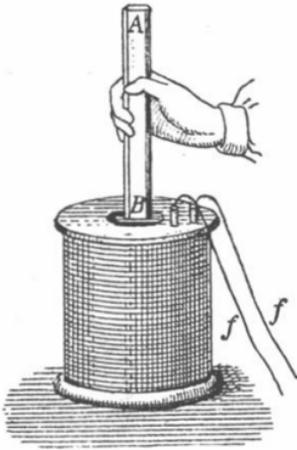


Fig. 122.

einem Stromkreise mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden, und wird ein Magnet schnell in die Oeffnung der Rolle geschoben (wie in Fig. 122), so beobachtet man einen vorübergehenden Strom, welcher den Stromkreis durchfließt, während der Magnet in die Rolle geschoben wird. So lange der Magnet ruhig in der Rolle steckt, induziert derselbe keine Ströme. Wird derselbe jedoch rasch aus der Rolle herausgezogen, so beobachtet man einen zweiten vorübergehenden

Strom, welcher in einer dem ersten Strome entgegengesetzten Richtung fließt. Der induzierte Strom, welcher durch das Hineinstecken des Magnets erzeugt wurde, ist ein *entgegengesetzt* gerichteter Strom, d. h. er fließt in entgegengesetzter Richtung von demjenigen Strome, der den Magnet mit seiner vorhandenen Po-

1) Der Leser darf diese elektromagnetische Induktion nicht mit der Erscheinung der elektrostatischen Induktion einer elektrischen Ladung durch eine andere Ladung (siehe Vorlesung III) verwechseln; letztere hat mit elektrischen Strömen nichts zu thun. In früheren Zeiten, als man von der Identität der von verschiedenen Quellen herrührenden Elektrizitäten (Art. 241) noch nichts wusste, wurde diejenige Elektrizität, welche der Bewegung von Magneten entsprang, Magneto-Elektrizität genannt. Für die meisten Zwecke sind die Ausdrücke magneto-elektrisch und elektromagnetisch gleichbedeutend. Die Erzeugung der Elektrizität durch Magnetismus und des Magnetismus durch Elektrizität sind in der That zwei verschiedene Operationen; doch sind beide in demjenigen Zweige der Wissenschaft enthalten, welcher Elektromagnetismus genannt wird.

larität erzeugen würde. Der induzierte Strom, der durch das Herausnehmen des Magnets veranlasst wurde, ist ein *gleich gerichteter* Strom.

Ob die Rolle nach dem Magnet hin bewegt wird, oder ob der Magnet nach der Rolle hin bewegt wird, ist für den Erfolg vollständig dasselbe. Je schneller die Bewegung vor sich geht, um so stärker sind die induzierten Ströme. Der Magnet wird bei diesem Gebrauche nicht schwächer, denn die wahre Quelle der erzeugten elektrischen Energie ist die bei der Bewegung verbrauchte mechanische Energie.

Ist der Schliessungsbogen nicht geschlossen, so entsteht kein Strom; doch ruft die relative Bewegung von Rolle und Magnet elektromotorische Kräfte ins Leben, welche Ströme zu erzeugen *bestrebt* sind. Faraday machte die weitere Entdeckung, dass diese Wirkungen mit dem magnetischen Felde, welches den Magnet umgibt, im Zusammenhange stehen. Er zeigte, dass keine Wirkung erzielt wurde, wenn der Stromkreis die unsichtbaren magnetischen Linien des Magnets nicht durchschneidet.

219. Von den Induktionsströmen, welche durch Ströme erzeugt werden. Faraday führte auch den Nachweis, dass die Annäherung oder Entfernung eines Stromes in einem benachbarten geschlossenen Stromleiter einen Strom induzieren kann. Der hierher gehörige Versuch lässt sich zweckmässig mit dem Apparate Fig. 123. anstellen. Eine Rolle isolierten

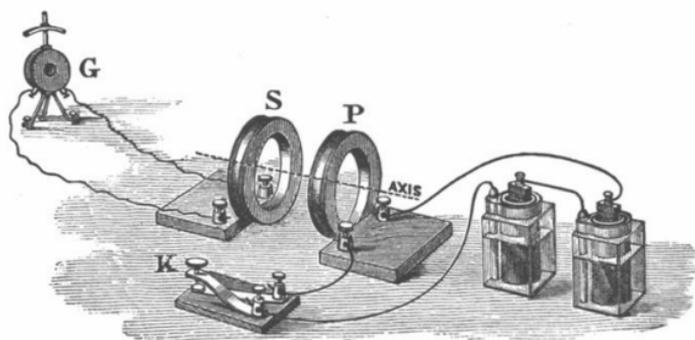


Fig. 123.

Drahtes *P* wird mit einer Batterie von 2 bis 3 Elementen zu einem Stromkreise verbunden, der sich mittelst eines Schlüssels *K* öffnen oder schliessen lässt. Eine zweite Rolle *S*, die mit

der ersten nicht in Verbindung steht, wird durch Drähte mit einem empfindlichen Galvanometer G verbunden. Wir wissen (Art. 197), dass eine Drahtrolle, in welcher ein Strom fließt, wie ein Magnet wirkt. Es ergibt sich, dass ein vorübergehender Strom in S induziert wird, wenn der Strom in P zirkuliert und dabei die Rolle plötzlich nach S hin bewegt wird. Wenn P schnell von S wegbewegt wird, so bemerkt man in dem zweiten Stromkreise einen neuen vorübergehenden Strom. Der erste dieser beiden vorübergehenden Ströme ist ein »entgegengesetzt gerichteter«, während der zweite ein »gleichgerichteter« ist (d. h. ein solcher, der um die Rolle S in derselben Richtung fließt, wie der Batteriestrom in der Rolle P). Die Rolle P heisst die *primäre* Rolle und der in ihr fließende Strom der *primäre* Strom. Die andere Rolle S heisst die *sekundäre* Rolle und die in ihr induzierten, vorübergehenden Ströme nennt man bisweilen Sekundärströme.

Stellt man nun P nahe an S , und drückt auf den Schlüssel K , um den primären Strom zirkulieren zu lassen, so bemerkt man, dass in dem Augenblicke, wo der Strom in P einströmt, in S ein vorübergehender inverser Strom entsteht. Das Entstehen des Stromes hat dieselbe Wirkung, als wenn die vom Strome durchflossene Rolle P schnell nach S bewegt wird. *Unterbricht* man den Batteriestrom, so lange die primäre Rolle dicht an der sekundären steht, so hat man dieselbe Wirkung, als wenn die primäre Rolle schnell wegbewegt wird. *Schliesst* man den Batteriestrom, so lange die primäre Rolle dicht an der sekundären steht, so hat man dieselbe Wirkung, als wenn die primäre Rolle schnell heran bewegt wird.

So lange ein konstanter Strom durch den primären Stromleiter geht, werden in dem sekundären Stromleiter keine Ströme induziert, vorausgesetzt, dass beide Stromleiter nicht in *relativer Bewegung* zu einander sind; ein Bewegen des sekundären Stromleiters gegen den primären hat jedoch dieselbe Wirkung, wie ein Bewegen des primären Stromleiters gegen den sekundären, und umgekehrt.

Wir können diese Resultate in folgender Tabelle veranschaulichen:

Durch einen	werden in dem sekundären Stromleiter vorübergehende <i>entgegengesetzt gerichtete</i> Ströme induziert	werden in dem sekundären Stromleiter vorübergehende <i>gleichgerichtete</i> Ströme induziert
Magnet	Bei der Annäherung	Bei der Entfernung
Strom	Bei der Annäherung oder beim Beginn oder bei wachsender Stromstärke.	Bei der Entfernung oder beim Aufhören oder bei abnehmender Stromstärke.

220. Fundamental-Gesetze über Induktion. Wenn wir berücksichtigen, dass jeder von einem Strome durchflossene Stromleiter ein besonderes magnetisches Feld hat, dessen Kraftlinien durch den Stromkreis führen (Art. 197 und 384), so erkennen wir, dass die im vorhergehenden Artikel angegebenen Thatsachen in folgende Fundamentalgesetze zusammengefasst werden können:

1) *Eine Abnahme der Anzahl der Kraftlinien, welche durch einen Stromkreis führen, erzeugt in demselben einen Strom in der positiven Richtung (d. h. einen »gleich gerichteten« Strom); während eine Zunahme der Anzahl der Kraftlinien, welche durch den Stromkreis gehen, in demselben einen Strom in der negativen Richtung erzeugt (d. h. einen inversen Strom).*

Hier nehmen wir an, dass die positive Richtung längs der Kraftlinien diejenige Richtung ist, nach welcher ein freier N.-Pol sich bewegen würde, und dass die positive Richtung im Stromleiter dieselbe Richtung ist, nach welcher der Strom fließen muss, um die magnetische Flut zu vermehren. (Vergl. die Korkzieherregel, Art. 193).

2) *Die gesamte induzierte elektromotorische Kraft, welche in einem geschlossenen Stromleiter thätig ist, ist der Abnahme der Anzahl von Kraftlinien proportional, welche durch den Stromkreis gehen.*

Nehmen wir zunächst an, N_1 sei die Anzahl der Kraftlinien, welche durch den Stromkreis hindurchgehen und nach einem

sehr kurzen Zeitabschnitt t sei die Zahl gleich N_2 geworden, dann ist die gesamte induzierte elektromotorische Kraft

$$E = \frac{N_1 - N_2}{t}.$$

Nach dem Ohm'schen Gesetze ist $C = \frac{E}{R}$, folglich

$$C = \frac{N_1 - N_2}{R \cdot t}.$$

Ist $N_2 > N_1$, und findet eine Zunahme der Anzahl der Kraftlinien statt, so ist $N_1 - N_2$ eine negative Grösse, so dass C mit negativem Vorzeichen auftritt, ein Beweis, dass der Strom entgegengesetzt gerichtet ist. Eine Rolle mit 50 Drahtwindungen, welche 1000 Linien durchschneiden, leistet dasselbe, wie eine Rolle mit 5 Windungen, welche 10,000 Linien durchschneiden, oder mit einer Windung, welche 50,000 Linien durchschneidet.

Um eine E.M.K. gleich der eines einzigen Daniell'schen Elements zu induzieren, ist erforderlich, dass 110 Millionen Linien pro Sekunde durchschnitten werden. Da derartig grosse Zahlen unbequem sind, so hat man die Einheit der E.M.K., das Volt, dazu gewählt, um den Durchschnitt von 100 Millionen Linien pro Sekunde auszudrücken.

Beispiel. Angenommen, die Anzahl der magnetischen Linien nimmt in 0,02 Sekunden von 800,000 auf 0 ab, also um 40 Millionen pro Sekunde, dann beträgt die induzierte E.M.K. für jene Zeit 0,4 Volt.

Dies wichtige Gesetz können wir uns noch klarer machen, indem wir Fig. 124 betrachten. Nehmen wir an, ABCD sei

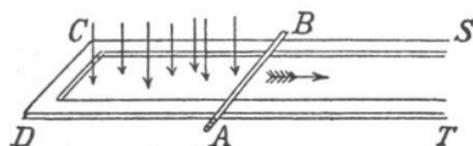


Fig. 124.

ein Stromleiter, von welchem das Stück AB längs DA und CB nach S und T gleiten kann. Die vertikalen Pfeile mögen vertikale Kraftlinien

in einem gleichmässigen magnetischen Felde darstellen und (wie bei den vertikalen Komponenten der Kraftlinien der Erde auf der nördlichen Halbkugel) die Richtung angeben, nach

welcher sich ein N-Pol, falls derselbe frei wäre, bewegen würde. Die positive Richtung dieser Kraftlinien geht daher vertikal nach unten durch den Stromleiter. Wenn nun AB nach ST mit gleichförmiger Geschwindigkeit gleitet, so schneidet AB in jeder Sekunde eine bestimmte Anzahl von Kraftlinien, und in jeder Sekunde kommt eine gewisse Anzahl zu der totalen Summe der Kraftlinien hinzu, welche durch den Stromleiter gehen. Ist N_1 die Anzahl im Anfange, und N_2 diejenige am Ende eines Stromleiters, so ist $N_1 - N_2$ eine negative Grösse und in dem Stromkreise ist eine elektromotorische Kraft vorhanden, deren Richtung durch das gleitende Stück von A nach B geht. Es muss noch hervorgehoben werden, dass alle diese Induktionserscheinungen in Wirklichkeit magnetischer Natur sind. Bei dem Versuche mit den beiden Rollen P und S sind es die magnetischen Linien der Rolle P, welche bei ihrem Durchgange durch die Rolle S die induzierte E.M.K. ins Leben rufen. Dies lässt sich noch durch folgenden weitem Versuch beweisen. Man lege einen Eisenstab, ein Schüreisen oder noch besser ein Bündel von Eisendrähten in die Richtung der punktierten Linie, so dass seine Enden durch P und S hindurchgehen. Infolge seiner grossen magnetischen Permeabilität wird derselbe dazu beitragen, die magnetischen Linien von P durch S zu leiten und er wird in dieser Lage die Wirkung bedeutend verstärken. In der That, ist ein Eisenkern vorhanden, so sind, selbst wenn der Abstand zwischen P und S mehrere Zentimeter beträgt, die Induktionserscheinungen beim Schliessen und Oeffnen des Stromes ebenso stark, als wenn kein Eisenkern benutzt wird und P sich dicht bei S befindet.

221. Richtung der induzierten E.M.K. Der Bequemlichkeit halber hat man bestimmte Regeln aufgestellt, welche über die Richtungsverhältnisse zwischen dem Magnetismus, der Bewegung und der induzierten E.M.K. Aufschluss geben. Von diesen Regeln

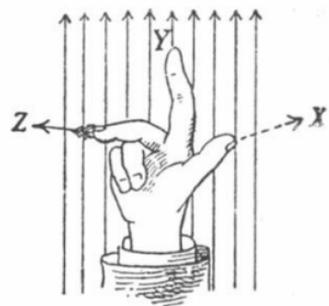


Fig. 125.

ist die Fleming'sche am bekanntesten: *Man halte den Zeigefinger der rechten Hand (Fig. 125) in die Richtung der magnetischen Linien und den Daumen in die Richtung der Bewegung; hält man dann den Mittelfinger rechtwinklig sowohl zum Daumen als zum Zeigefinger, so giebt derselbe die Richtung der induzierten E.M.K. an.*

Eine andere oft gebrauchte Regel ist ein Seitenstück zu der von Ampère: *Man denke sich in einem Konduktor eine Figur derart schwimmend, dass sie nach der positiven Richtung der Linien sieht. Wird dann der Konduktor und die Figur nach rechts bewegt, so schwimmt letztere mit dem durch diese Bewegung induzierten Strome; wird die Figur nach ihrer Linken bewegt, so ist der Strom gegen sie gerichtet.*

222. Faraday's Scheibenmaschine. Faraday konstruierte verschiedene magneto-elektrische Maschinen. Eine derselben besteht aus einer Kupferscheibe

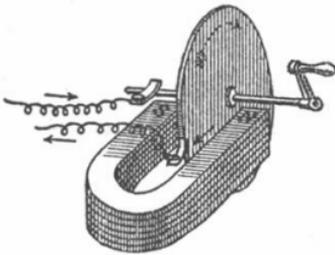


Fig. 126.

selben besteht aus einer Kupferscheibe (Fig. 126), welche zwischen den Polen eines Stahlmagnets rotiert. Der Strom fließt von der Achse zum Rande oder umgekehrt, je nach der Drehungsrichtung. Derselbe wird durch Drähte mit Gleitkontakten weiter geführt. Bei andern Maschinen werden Rollen aus

Kupferdraht derart gewickelt, dass magnetische Linien durchschnitten werden. Dasselbe Prinzip der Induktion wird bei den modernen *Dynamo-elektrischen Maschinen* verwendet (Vorl. 42). In jedem Falle wird Kraft gebraucht, um die Bewegung zu erzeugen. Es sind durchweg Vorrichtungen, um mechanische Energie in elektrische Energie umzusetzen.

223. Faraday's Ring; Prinzip der Transformation.

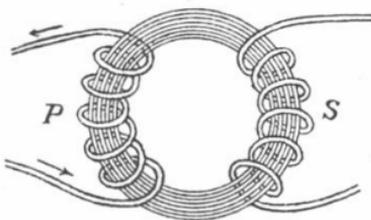


Fig. 127.

Einer der ersten Versuche Faraday's war folgender: Er wickelte auf einen eisernen Ring von ungefähr 20 cm Durchmesser (Fig. 127) zwei isolierte Drähte *P* und *S*, und verband *P* mit einem Batteriestrome, *S* mit einem Galvanometer. Jedesmal,

wo der in P fließende Strom geschlossen oder unterbrochen wurde, entstanden in S Sekundärströme. In der That, die in P fließenden Ströme magnetisieren den eisernen Ring und die durch P erzeugten magnetischen Linien gehen durch S und rufen hier Induktionsströme ins Leben. Wird S als primäre Rolle benutzt, so wirkt P als sekundäre: die Induktion zwischen P und S ist eine *gegenseitige*. Der Faraday'sche Ring mit seinen beiden auf einen geschlossenen eisernen Kreis gewundenen Rollen kann als der eigentliche Typus aller *Transformatoren* oder *Induktionsrollen* betrachtet werden. Faraday benutzte auch einige Induktionsrollen, bei denen die beiden Rollen A und B (Fig. 128) über einander um einen geraden cylinderförmigen Eisenkern C gewickelt waren.

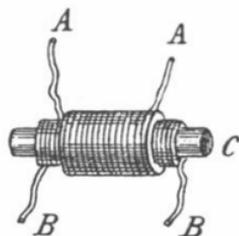


Fig. 128.

Bei allen Transformatoren verhalten sich die elektromotorischen Kräfte, welche in der Sekundärrolle erzeugt werden, zu den im primären Schliessungsbogen benutzten, nahezu wie die Zahl der Windungen der beiden Rollen. Hat z. B. die primäre Rolle 100 Windungen und die sekundäre 2500, so ist die E.M.K. in dem sekundären Schliessungsbogen nahezu 25mal grösser als die des primären. Durch geeignete Wahl der Anzahl der Windungen, lässt sich die E.M.K. nach oben oder nach unten transformieren.

224. Die Induktionsrolle. Um enorm hohe elektromotorische Kräfte zu erzeugen, welche Funken durch grosse Zwischenräume senden können, was gewöhnliche Batterien, falls sie unter 100 Volt haben, unmöglich leisten können, benutzt man mit Vorteil das Prinzip der Transformation. Um solche Funkenentladungen zu erzeugen, bedient man sich des in Fig. 129 abgebildeten Instruments, welches von Callan, Sturgeon, Ruhmkorff und Andern vervollkommnet worden ist. Dieses Instrument heisst der *Induktionsapparat* oder das *Induktorium*. Der Induktionsapparat besteht aus einer zylinderförmigen Spule, welche einen zentralen Eisenkern umschliesst. Diesen Eisenkern umgeben eine

kurze, innere oder »primäre« Rolle aus dickem Drahte und eine äussere »sekundäre« Rolle, welche aus mehreren tausend Windungen eines sehr feinen, in seinen einzelnen Teilen sehr sorgfältig isolierten Drahtes besteht. Der primäre Stromleiter wird mit den Polen einer aus mehreren kräftigen Grove'schen oder Bunsen'schen Elementen bestehenden Batterie verbunden, und

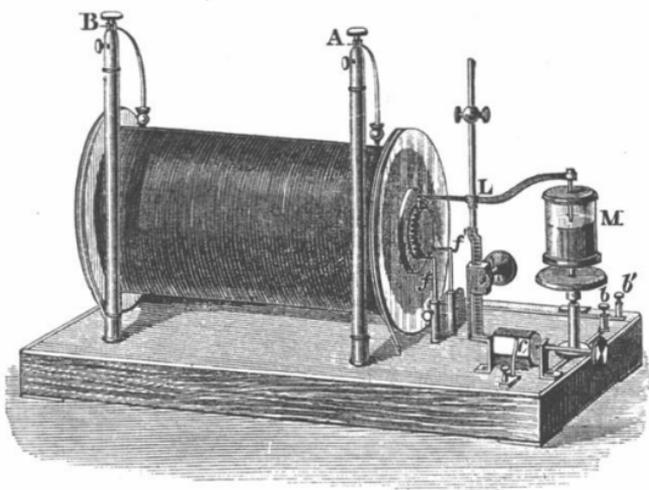


Fig. 129.

ausserdem werden noch ein Unterbrecher und ein Kommutator oder Schlüssel eingeschaltet. Der Unterbrecher hat den Zweck, den Strom der primären Rolle in rascher Aufeinanderfolge zu unterbrechen und wieder zu schliessen. Dies hat zur Folge, dass jedesmal, wenn der Stromleiter geschlossen wird, in der äussern »sekundären« Spirale ein momentaner entgegengesetzt gerichteter Strom induziert wird, und jedesmal, wenn der Strom unterbrochen wird, ein kräftiger momentaner gleich gerichteter Strom. Da die Anzahl der magnetischen Linien, welche bei jedem Schliessen resp. Unterbrechen erzeugt resp. vernichtet werden, dieselbe ist, so sind die beiden elektromotorischen Impulse einander gleich; bei Anwendung eines Kondensators hat jedoch der Strom beim Schliessen einen bedeutenden Bruchteil von Zeit zum Anwachsen nötig, während er beim Unterbrechen sofort aufhört. Im Verhältnis werden daher beim Unterbrechen viel mehr magnetische Linien durchschnitten als beim Schliessen.

Die induzierten elektromotorischen Kräfte dauern länger beim Schliessen, sind jedoch schwächer und sind zum Funkenstrom nicht genügend. Die beim »Unterbrechen« induzierten Ströme treten als glänzender Funkenstrom zwischen den einander genäherten Enden der sekundären Rolle auf. Die primäre Rolle wird aus starkem Drahte verfertigt, um starke magnetisierende Ströme leiten zu können, und besteht aus wenigen Windungen, damit der Widerstand nicht zu gross wird und damit eine Selbst-Induktion des primären Stromes auf sich selbst vermieden wird. Der zentrale Eisenkern hat den Zweck, durch seine grosse magnetische Permeabilität die Anzahl der Kraftlinien zu vermehren, welche durch die Rollen gehen; er besteht gewöhnlich aus einem Bündel dünner, von einander isolierter Drähte, um die Induktionsströme zu vermeiden, welche in demselben zirkulieren würden, wenn derselbe ein solider Stab wäre, und welche die Schnelligkeit seiner Magnetisierung oder Entmagnetisierung verlangsamen würden. Die sekundäre Rolle besteht aus vielen Windungen, um den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion zu vergrössern; und da die elektromotorische Kraft der induzierten Ströme Tausende von Volt beträgt, so ist ihr Widerstand von keiner Bedeutung, und man kann dieselbe aus dem dünnsten Drahte verfertigen, der sich noch bequem winden lässt. Bei Spottiswoode's Riesen-Induktionsapparate (welcher einen Funken von über 1 Meter Länge in der Luft liefert, wenn 30 Grove'sche Elemente wirken), enthält die sekundäre Spirale einen 280 Meilen langen Draht von 340,000 Windungen, und bieten einen Widerstand von mehr als 100,000 Ohm.

Die Unterbrecher der Induktionsspiralen sind gewöhnlich sogenannte selbstthätige. Der Foucault'sche Unterbrecher, welcher in Fig. 128 mitabgebildet ist, besteht aus einem Messingarme L, welcher einen in eine Quecksilberschale M tauchenden Platindraht trägt. Jedesmal wenn der Eisenkern der Rolle magnetisiert wird, zieht derselbe ein Stück Eisen am Ende des Armes L an, und dadurch wird der Platindraht aus dem Quecksilber gezogen und der Strom dann unterbrochen. Durch eine Feder wird der

Arm wieder in die ursprüngliche Lage zurückgezogen, nachdem der Eisenkern beim Oeffnen des Stromleiters seinen Magnetismus wieder verloren hat. Bei kleinen Rollen besteht der Unterbrecher gewöhnlich aus einem dünnen Stahlstabe, welcher eine Platinspitze berührt und der beim Durchgange des Stromes durch die Anziehung des Eisenkernes zurückgezogen wird. Auf diese Weise schliesst und unterbricht er den Stromleiter, indem er wie der Hammer einer gewöhnlichen elektrischen Glocke hin und her schwingt.

Mit der primären Rolle ist gewöhnlich ein kleiner *Kondensator* verbunden, welcher aus Zinnfolie und paraffiniertem Papier besteht, die abwechselnd über einander geschichtet sind. In diesen Kondensator fliesst der Strom jedesmal ab, wenn der Stromleiter unterbrochen wird. Der Kondensator hat den Zweck, den entgegengesetzt gerichteten Strom beim Schliessen zu unterdrücken und die direkte E.M.K beim Unterbrechen zu verstärken. Die Funken sind länger und nehmen bloss einen Weg. Der Kondensator bewirkt dies durch seine als elektrische *Resonanz* bekannte Wirkung (vergl. Art. 512).

225. Ruhmkorff's Kommutator. Um den Batterie-Strom nach Belieben unterbrechen oder seine Richtung umkehren zu

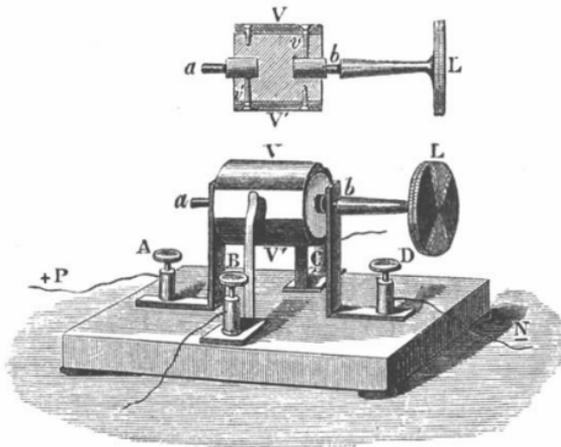


Fig. 130.

können, konstruierte Ruhmkorff den in Fig. 130 abgebildeten

Kommutator oder Stromwender. Bei diesem Apparate sind die Batteriepole durch die Enden der Achse eines kleinen Zylinders von Elfenbein oder Ebenholz mit zwei Metallblättern V und V' verbunden, welche so gedreht werden können, dass sie mit 2 vertikalen Federn B und C in Berührung kommen, welche mit den Enden der primären Rolle in Verbindung stehen. Es giebt noch zahlreiche andere Formen des Kommutators; eine derselben, welche als Schlüssel in der Telegraphie häufig verwendet wird, ist in Art. 493 abgebildet.

226. Lichtwirkungen des Induktions-Funken. Das Induktorium liefert eine rasche Aufeinanderfolge von Funken, an denen alle Wirkungen der Funkenentladung studiert werden können. Diese Funken unterscheiden sich bloss graduell von den Funken der Reibungselektriermaschine oder der Leydener Flasche. (Vergl. Vorl. 24: die Erscheinungen der Entladung).

Einen grossen Nutzen gewährt das Induktorium bei der Untersuchung einer Entladung durch Glasgefässe oder Röhren, welche mit verdünnter Luft erfüllt sind. Fig. 131 veranschaulicht einen der zahlreichen schönen Versuche, wo der Funke sich in dem verdünnten Gase zu glänzenden Lichtflächen ausdehnt, und »Streifen« und andere komplizierte Erscheinungen auftreten.

227. Induktionsströme, welche durch den Erdmagnetismus erzeugt werden. Es ist nicht schwierig, vom Erdmagnetismus induzierte

Ströme zu erhalten. Eine Rolle aus dünnem Drahte, welche mit einem empfindlichen Galvanometer in Verbindung steht,

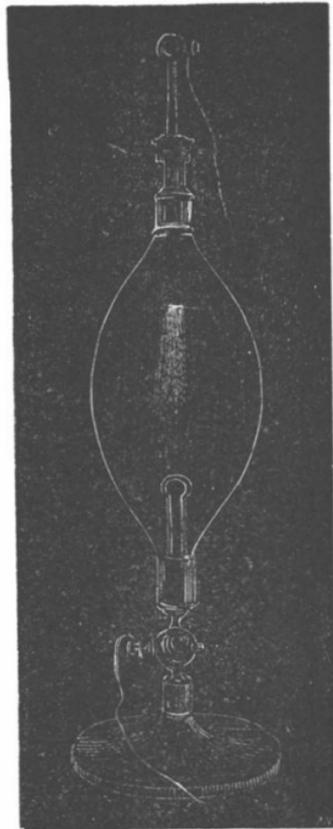


Fig. 131.

durchschneidet beim raschen Umkehren die Kraftlinien des Erdmagnetismus und wird infolge dessen von einem Strome durchflossen.

Faraday benutzte in der That diese Methode, um die Richtung und Anzahl der Kraftlinien zu bestimmen. Wird eine kurze Spirale mit einem empfindlichen Galvanometer zu einem Stromkreise verbunden, welches eine schwere Nadel von grosser Schwingungsdauer hat, und wird die kurze Spirale, welche sich in einem magnetischen Felde befindet, plötzlich um 180° gedreht, so durchschneidet sie alle Kraftlinien, welche durch ihre eigene Fläche hindurchgehen, zweimal und der sinus des halben Winkels der ersten Schwingung (vergl. Art. 413) ist der Anzahl der geschnittenen Kraftlinien proportional; denn bei einer langsam schwingenden Nadel ist die gesamte Elektrizitätsmenge, welche durch die Rollen fliesst, gleich der Summe aller einzelnen Mengen, welche die starken oder schwachen induzierten Ströme liefern, die während des schnellen Prozesses des Schneidens der Kraftlinien im Stromleiter fliessen; und die kleine Spirale wirkt daher als eine *magnetische Versuchs-Platte*.

Wird der Stromleiter parallel mit sich selbst durch ein gleichförmiges magnetisches Feld bewegt, so treten keine Induktionsströme auf, denn es werden genau so viel Kraftlinien bei der Bewegung nach der einen Seite durchschnitten, als auf der andern Seite zurückbleiben. Ebenso entsteht kein Strom, wenn ein Draht parallel mit sich selbst einer Kraftlinie entlang geführt wird; auch wirkt keine mechanische Kraft auf den Draht, wenn er neben einer solchen Linie liegt und ein Strom durch denselben geschickt wird.

228. Erdströme. Die in Vorl. 12 erwähnten Schwankungen des Erdmagnetismus ändern die Anzahl der Kraftlinien, welche durch die Telegraphendrähte führen, und induzieren also in ihnen Störungen, welche unter dem Namen von »Erdströmen« bekannt sind. Zur Zeit eines magnetischen Sturmes haben die Erdströme in den britischen Telegraphendrähten, wie nachgewiesen ist, eine Stärke von 40 Milli-Ampère erreicht, ein Strom, der die gewöhnlichen Arbeitsströme an Stärke übertrifft. Schwache

Erdströme werden täglich beobachtet und sind ihrem Charakter nach mehr oder weniger periodisch.

XIX. VORLESUNG: *Chemische Wirkungen des Stromes.*

229. Leitungsfähigkeit der flüssigen Körper. Ausser den chemischen Wirkungen innerhalb der Elemente einer Batterie, welche stets die Stromerzeugung begleiten, giebt es noch chemische Wirkungen, welche ausserhalb der Batterie vor sich gehen, wenn der Strom durch gewisse Flüssigkeiten geschickt wird. Die Flüssigkeiten lassen sich in 3 Klassen einteilen: 1) *diejenigen, welche überhaupt nicht leiten*, wie z. B. Terpentin und viele Oele, besonders Petroleum; 2) *diejenigen, welche leiten, ohne dabei zersetzt zu werden*, wie Quecksilber und andere geschmolzene Metalle, welche ebenso leiten, wie feste Metalle; 3) *diejenigen, welche zersetzt werden, wenn sie einen Strom leiten*, nämlich die verdünnten Säuren, Lösungen von metallischen Salzen, und gewisse geschmolzene Verbindungen fester Körper.

230. Zersetzung des Wassers. Im Jahre 1800 machten Carlisle und Nicholson die Entdeckung, dass sich der Volta'sche Strom durch Wasser leiten lässt und dass derselbe bei seinem Durchgange einen Teil der Flüssigkeit in ihre gasförmigen Bestandteile zerlegt. Diese Gase erschienen als Blasen an den Enden der Drähte, welche den Strom in die Flüssigkeit und aus derselben heraus leiteten; und zwar erschienen *Sauerstoffgasblasen* an der Stelle, wo der Strom in die Flüssigkeit eintrat, und *Wasserstoffgasblasen* dort, wo derselbe die Flüssigkeit verliess. Es stellte sich alsbald heraus, dass eine grosse Zahl anderer Flüssigkeiten, besonders verdünnte Säuren und Lösungen metallischer Salze, auf ähnliche Weise zersetzt werden konnten, wenn man einen Strom durch dieselben sandte.

231. Elektrolyse. Diesem Zersetzungsprozesse einer Flüssigkeit mit Hilfe eines elektrischen Stromes gab Faraday den Namen **Elektrolyse** (d. h. elektrische Analyse); und diejenigen

Körper, welche auf diese Weise zersetzt oder elektrolysiert werden können, nannte er **Elektrolyte**.

Die Drahtenden, welche nach und von der Batterie führen, heißen **Elektroden**; zur Unterscheidung nennt man das Ende, durch welches der Strom eintritt, die **Anode**, und das, an welchem er austritt, die **Kathode**. Das Gefäß, in welchem sich eine zu zersetzende Flüssigkeit befindet, heisst eine *elektrolytische Zelle*.

232. Die Elektrolyse des Wassers. Um auf die Zersetzung des Wassers zurückzukommen, so können wir zunächst bemerken, dass vollkommen reines Wasser nicht zu leiten scheint, doch wird sein Widerstand durch Beimischung einiger Tropfen Schwefelsäure oder Salzsäure sehr verkleinert. Der in Fig. 132

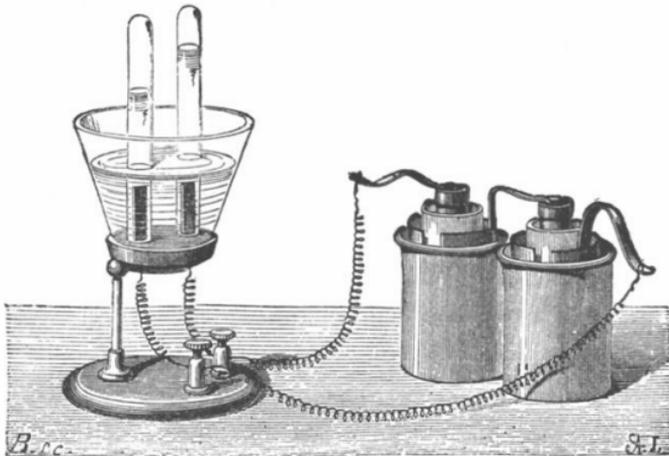


Fig. 132.

veranschaulichte Apparat ist für diesen Zweck geeignet. Die Pole einer Batterie von 2 Elementen (die in der Figur sind Bunsen'sche) stehen mit 2 aus Streifen von Platinblech bestehenden Elektroden in Verbindung, welche in ein mit angesäuertem Wasser gefülltes Gefäß führen. Zwei an ihrem einen Ende geschlossene Röhren, welche vorher mit Wasser angefüllt und dann umgekehrt wurden, nehmen die an den Elektroden entwickelten Gase auf. Platin ist andern Metallen, wie Kupfer oder Eisen, als Elektrode vorzuziehen, da es weniger leicht oxydiert und jeder Säure wider-

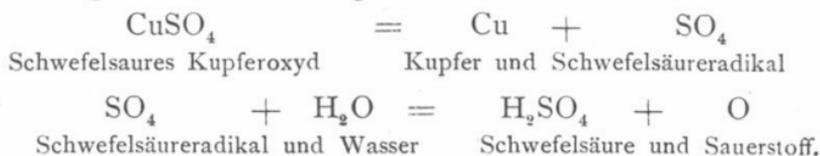
steht. Man findet, dass sich an der Kathode fast genau zweimal so viel Wasserstoffgas (dem Volumen nach) bildet, als Sauerstoff an der Anode. Diese Thatsache stimmt mit der bekannten chemischen Zusammensetzung des Wassers überein, welches durch Verbindung dieser beiden Gase im Verhältnis von zwei Volumenteilen des erstern mit einem des letztern entsteht. Die Volumina der entwickelten Gase verhalten sich jedoch nicht genau wie 2 zu 1, denn einmal wird ein kleiner Teil des Wasserstoffes von der Oberfläche des Platins absorbiert oder »okkludiert«, während ein beträchtlicher Teil des Sauerstoffes — ungefähr 1 Prozent — in der dichteren allotropischen Form des *Ozons* ausgeschieden wird, welches weniger Raum einnimmt und im Wasser auch etwas löslich ist. Ist eine hinreichende Menge der Gase entwickelt und angesammelt, so können dieselben untersucht werden; der Wasserstoff dadurch, dass man seine Brennbarkeit zeigt, der Sauerstoff dadurch, dass man durch denselben einen glimmenden Holzspan zur Flamme entfacht. Werden beide Gase in einer und derselben Röhre aufgefangen, so ergibt sich, dass das Gasgemisch die wohlbekannte Explosiv-Eigenschaft des Knallgasés hat. Die chemische Zersetzung wird durch folgende Gleichung ausgedrückt:



233. Elektrolyse des schwefelsauren Kupferoxyds.

Als zweites Beispiel wollen wir die Elektrolyse einer Lösung des bekannten blauen Vitriols oder des schwefelsauren Kupferoxyds betrachten. Werden einige Krystalle dieses Körpers im Wasser aufgelöst, so erhält man eine blaue Flüssigkeit, welche durch den Strom eines einzigen Elements einer gewöhnlichen Batterie zwischen 2 Elektroden von Platinblech ohne Schwierigkeit elektroanalysiert werden kann. Die chemische Formel für schwefelsaures Kupferoxyd ist CuSO_4 . Das Resultat der Elektrolyse ist die Zersetzung desselben in metallisches Kupfer, welches die Kathode als feine Schicht überzieht, und in das Radikal der Schwefelsäure, ein leicht zersetzbares Gemisch aus Schwefel

und Sauerstoff, auf welches sofort das Wasser reagiert und mit ihm Schwefelsäure und Sauerstoff bildet. Dieser Sauerstoff wird in Gestalt von Blasen an der Anode frei. Die chemischen Veränderungen lassen sich folgendermassen ausdrücken:



Auf diese Weise wird, solange der Strom fliesst, der Flüssigkeit beständig Kupfer entzogen und an der Kathode abgesetzt und die Flüssigkeit wird immer mehr zur Säure. Beim Gebrauche kupferner Elektroden statt solcher von Platin, wird kein Sauerstoff an der Anode ausgeschieden, dagegen löst sich die Kupferanode selbst in der Flüssigkeit auf, und zwar in genau demselben Verhältnis, in welchem das Kupfer der Flüssigkeit an der Kathode abgesetzt wird.

234. Anion und Kathion. Die Atome, welche auf diese Weise von einander geschieden und von dem Strome unmerkbar nach den Elektroden geführt und dort abgesetzt werden, sind offenbar zweierlei Art: die einen gehen zur Anode, die andern zu der Kathode. Faraday nannte die wandernden Atome **Jonen**, und unterschied zwischen **Anion**, welches zur Anode, und **Kathion**, welches zur Kathode geht. Das Anion betrachtet man bisweilen als »elektronegativ«, weil es sich so bewegt, als ob es vom + Pol der Batterie angezogen würde, während das Kathion dann als »elektropositiv« angesehen wird. Wasserstoff und die Metalle sind Kathionen, da sie sich scheinbar *mit* dem Strome bewegen, und da abgesetzt werden, wo derselbe die elektrolytische Zelle verlässt. Zu den Anionen gehören Sauerstoff, Chlor etc. Wenn z. B. Chlorzink elektrolysiert wird, so wird das metallische Zink an der Kathode abgesetzt, während sich an der Anode Chlorgas entwickelt.

235. Quantitative Gesetze der Elektrolyse.

1) *Die Grösse der chemischen Wirkung ist in allen Punkten eines Schliessungsbogens gleich gross.* Werden zwei oder mehr

elektrolytische Becher an verschiedenen Punkten eines Schliessungsbogens angebracht, so ist die Grösse der chemischen Wirkung überall dieselbe, denn dieselbe Elektrizitätsmenge fliesst in derselben Zeit durch jeden Punkt des Schliessungsbogens. Enthalten alle diese Becher angesäuertes Wasser, so wird z. B. in jedem dieselbe Menge Wasserstoff frei, oder enthalten sie eine Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd, so werden in allen gleiche Quantitäten Kupfer abgesetzt. Enthalten einige der Becher angesäuertes Wasser, andere schwefelsaures Kupferoxyd, so sind die Gewichte des Wasserstoffs und des Kupfers nicht gleich, verhalten sich jedoch wie ihre chemischen *Aequivalente*.

2) *Die Menge eines Jon, welche an einer Elektrode in einer bestimmten Zeit ausgeschieden wird, ist der Stromstärke proportional.* Ein Strom von 2 *Ampère* erzeugt genau eine doppelt so grosse chemische Zersetzung, wie in gleicher Zeit ein Strom von 1 *Ampère*.

3) *Die Menge eines Jon, welches in einer Sekunde an einer Elektrode ausgeschieden wird, ist gleich der Stromstärke, multipliziert mit dem »elektrochemischen Aequivalente« des Jon.* Durch den Versuch hat man gefunden, dass der Durchgang eines *Coulomb* Elektrizität durch Wasser 0,000010384 g Wasserstoff frei macht. Folglich macht ein Strom, dessen Stärke = C (*Ampère*), pro Sekunde $C \times 0,000010384$ g Wasserstoff frei. Die Grösse 0,000010384 heisst das *elektro-chemische Aequivalent* des Wasserstoffs. Die »elektro-chemischen Aequivalente« anderer Elemente lassen sich leicht berechnen, wenn ihr chemisches »Aequivalent« bekannt ist. So ist z. B. das chemische Aequivalent¹⁾ des

1) Das chemische »Aequivalent« ist nicht mit dem »Atomgewichte« zu verwechseln. Das Atomgewicht des Kupfers ist 63, d. h. seine Atome sind 63 mal so schwer, als die Atome des Wasserstoffs. Aber in chemischen Verbindungen ersetzt ein Atom Kupfer 2 Atome Wasserstoff, oder ist »gleichwertig« mit ihnen; folglich beträgt das Gewicht des Kupfers, welches einem Atom Wasserstoff »äquivalent« ist, $\frac{63}{2} = 31\frac{1}{2}$. In allen Fällen ist das chemische »Aequivalent« gleich dem Quotienten $\frac{\text{Atomgewicht}}{\text{Wertigkeit}}$. Die obige Tabelle giebt hierüber hinreichend Aufklärung.

Kupfers = 31,59; multipliziert man dies mit 0,000010384, so ergibt sich für das elektro-chemische Aequivalent des Kupfers der Wert 0,0003281 g.

Tabelle der elektrochemischen Aequivalente etc.

	Atomgewicht.	Wertigkeit.	Chemisches Aequivalent.	Elektrochemisches Aequivalent (Gramm pro Coulomb).
Elektropositive Körper :				
Wasserstoff	1	1	1	0,000010384
Kalium	39,03	1	39,03	0,0004053
Natrium	23	1	23	0,0002388
Gold	196,2	3	65,4	0,0006791
Silber	107,67	1	107,67	0,0011181
Kupfer	63,18	2	31,59	0,0003281
Quecksilber	199,8	2	99,9	0,0010374
Zinn	117,8	2	58,9	0,0006116
Eisen	55,9	2	27,95	0,0002902
Nickel	58,6	2	29,3	0,0003043
Zink	64,9	2	32,45	0,00033698
Blei	206,4	2	103,2	0,0010716
Elektronegative Körper ;				
Sauerstoff	15,96	2	7,98	0,00008286
Chlor	35,37	1	35,37	0,0003673
Jod	126,54	1	126,54	0,0013140
Brom	79,76	1	79,76	0,0008282
Stickstoff	14,01	3	4,67	0,00004849

236. Die folgende Gleichung drückt die Regel aus, nach welcher man das Gewicht eines gegebenen Jon findet, welches aus einer elektrolytischen Lösung während einer bekannten Zeit durch einen Strom von bekannter Stärke ausgeschieden wird. Bedeutet C die (nach Ampère gerechnete) Stromstärke, t die

Zeit (in Sekunden), z das elektrochemische Aequivalent und w das (in Grammen ausgedrückte) Gewicht des frei gewordenen Elements, so ist

$$w = z \cdot C \cdot t$$

oder in Worten: *Das Gewicht eines durch Elektrolyse ausgeschiedenen Elements wird gefunden, wenn man sein elektrochemisches Aequivalent mit der Stromstärke und der Zeit, während welcher der Strom fließt, multipliziert.*

Beispiel. Ein Strom von 5 Daniell'schen Elementen geht 10 Minuten lang durch 2 elektrolytische Becher, von welchen der eine eine Silberlösung, der andere angesäuertes Wasser enthält. Eine Tangentenbussole im Schliessungsbogen weist auf eine Stromstärke von 0,5 Ampère. Das Gewicht des ausgeschiedenen Silbers ist dann $0,001118 \times 0,5 \times 10 \times 60 = 0,3354$ g, und das Gewicht des im zweiten Becher entwickelten Wasserstoffes $0,000010384 \times 0,5 \times 10 \times 60 = 0,003115$ g.

237. Voltameter. Das zweite der obigen Gesetze, wonach die Grösse der in einer bestimmten Zeit frei gewordenen Ionen der Stromstärke proportional ist, wird nach seinem Entdecker bisweilen als das *Faraday'sche Gesetz* bezeichnet. Faraday wies nach, dass dasselbe ein Mittel gewährt, die Stärke von Strömen auf chemischem Wege zu messen. Einen elektrolytischen Becher, welcher so eingerichtet war, dass man die Stromstärke durch die Grösse der vom Strome hervorgebrachten chemischen Wirkung messen konnte, nannte er ein **Voltameter**.

238. Wasser-Voltameter. Der in Fig. 132 veranschaulichte Apparat kann passend ein Wasser-Voltameter genannt werden, vorausgesetzt, dass die zur Ansammlung der Gase dienenden Röhren geteilt sind, so dass die entwickelten Mengen gemessen werden können. Das Gewicht jedes gemessenen Kubikzentimeters Wasserstoff (bei einer Normaltemperatur von 0° C und einem Drucke von 760 mm) beträgt 0,00008988 g. Hat man also die Anzahl der Kubikzentimeter gefunden, welche in einer gegebenen Zeit durch einen Strom von unbekannter Stärke entwickelt werden, so kann man die Stromstärke berechnen,

indem man zunächst das Volumen auf Gewicht reduziert und dann durch das Produkt aus der Zeit und dem elektrochemischen Äquivalente dividiert. Jedes *Coulomb* Elektrizität macht bei seinem Durchgange 0,1155 cbcm Wasserstoff und 0,0577 cbcm Sauerstoff frei. Werden diese Gase zusammen in einem *Mischungsgas-Voltameter* aufgefangen, so erhält man für jedes durchgehende *Coulomb* Elektrizität 0,1732 cbcm von dem entwickelten Gasmenge. Um 9 g Wasser zu zersetzen, d. h. um 1 g Wasserstoff und 8 g Sauerstoff frei zu machen, sind 96,302 *Coulomb* erforderlich, welche mit einer E.M.K. von mindestens 1,47 Volt durch die Flüssigkeit geschickt werden müssen (vergl. Art. 482).

239. Kupfer- und Silbervoltameter. Wenn schwefelsaures Kupferoxyd zwischen 2 Kupferelektroden elektrolysiert wird, so löst sich, wie oben erwähnt wurde, die Anode langsam auf, während sich an der Kathode eine Schicht von einer gleichen Quantität Kupfer ansammelt. Ein *Coulomb* Elektrizität setzt 0,0003281 g ab; und um ein Gramm abzusetzen, müssen im Ganzen 3048 *Coulomb* durch die Elektroden fließen. Ein Strom von einem Ampère setzt in jeder Stunde 1,177 g Kupfer oder 4,0248 g Silber ab.

Wenn man eine der Elektroden vor und nach dem Durchgange des Stromes wiegt, so findet man, dass die Zunahme (oder Abnahme) der hindurchgeflossenen Elektrizitätsmenge proportional ist. Im Jahre 1879 schlug Edison, der bekannte Erfinder, vor, diese Methode zu benutzen, um die Elektrizitätsmenge zu messen, welche einem Hause mit elektrischer Beleuchtung zugeführt sei; indem ein kleines Kupfervoltameter, welches in dem das Haus versehenden Schliessungsbogen einzuschalten sei, als Elektrizitätsmesser dienen sollte. Verschiedene andere Arten von *Coulombmetern* sind in Vorschlag gebracht worden, mit Uhrwerkzählern, welche integrierende Scheiben umdrehen, oder mit andern mechanischen Vorrichtungen, welche die gesamte vom Strome zugeführte Elektrizitätsmenge summieren.

240. Vergleich der Voltameter und Galvanometer. Sowohl das *Galvanometer*, wie das *Voltameter* haben den Zweck,

die Stromstärke zu messen, das eine auf magnetischem, das andere auf chemischem Wege. Faraday wies nach, dass die magnetischen und chemischen Wirkungen eines Stromes einander proportional sind. Fig. 133 zeigt

einen Stromkreis, welcher so abgezweigt ist, dass der Strom sich teilt, indem ein Teil durch einen Zweig von geringem Widerstande r und ein Teil durch einen solchen von grösserm Widerstande R fliesst. Der Strom fliesst zum grössern Teil durch die Bahn von geringerm Widerstande. Werden 3 Amperometer verwandt, so lässt sich zeigen, dass die Zahl

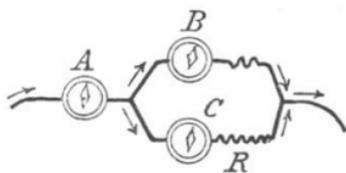


Fig. 133.

der Ampère im Hauptschliessungsbogen gleich der Summe der Ampère in den beiden Abzweigungen ist. In Fig. 134 hat man die 3 Amperometer durch 3 Kupfervoltmeter ersetzt. Das Gewicht des Kupfers, welches in dem im Hauptstromkreise befindlichen Voltmeter A ausgeschieden wird, ist gleich der Summe der Gewichte des in den beiden Abzweigungen bei B und C ausgeschiedenen Kupfers. Das Galvanometer lässt jedoch durch die Stellung der Nadel die Stromstärke in jedem Augenblicke erkennen, und zeigt die Aenderungen der Stromstärke von Moment zu Moment. Beim Voltmeter kann ein veränderlicher Strom die Gasblasen oder die Kupferatome in diesem Augenblicke schnell, und im nächsten langsam frei machen, aber alle die verschiedenen Mengen werden einfach zu einer totalen Summe vereinigt. In der That giebt uns das Voltmeter »das Zeitintegral« des Stromes. Das Voltmeter giebt uns nicht sowohl an, wie *stark der Strom* in einem beliebigen Augenblicke war, sondern vielmehr, *welche Elektrizitätsmenge* im ganzen während des Versuchs durch dasselbe geflossen ist.

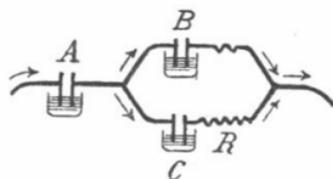


Fig. 134.

241. Chemischer Nachweis für schwache Ströme. Ein sehr schwacher Strom genügt, um in gewissen Körpern eine wahrnehmbare chemische Aenderung hervorzubringen. Werden

ein paar Krystalle des Jodkalium, eines weissen Salzes, in Wasser aufgelöst und darauf etwas Stärke hinzugefügt, so erhält man einen sehr empfindlichen Elektrolyt, welcher an der Anode eine indigoblaue Farbe annimmt, sobald ein sehr schwacher Strom hindurchgeht. Durch die Zersetzung des Salzes wird an der Anode Jod frei, welches auf die Stärke wirkt und mit ihr eine gefärbte Mischung bildet. Taucht man weisses Löschpapier in die präparierte Flüssigkeit, legt dasselbe dann auf die Kathode und berührt es mit der Anode, so kann man auf diese Weise sehr bequem die vom Strome herrührende Färbung prüfen. Eine Lösung von Ferrocyankalium (gelbes Blutlaugensalz) liefert bei der Elektrolyse das bekannte Berliner Blau. Bain machte den Vorschlag, dies bei einem chemischen Schreibtelegraphen zu verwerten, indem die kurzen und langen Ströme, welche von einer Batterie durch die Leitung gesandt würden, auf diese Weise mit blauer Farbe auf einen Streifen präparierten Papiers aufgezeichnet werden könnten, welcher durch ein Uhrwerk am Ende des positiven Drahtes entlang gezogen würde. Faraday zeigte, dass die chemische Färbung eines mit Stärke und Jodkalium angefeuchteten Papierstreifens beim Durchgange jeder Art von Elektrizität hervorgebracht wurde — sei es Reibungselektrizität oder galvanische oder Thermo- oder Magnetelektrizität — selbst durch die Elektrizität des Zitteraals. In der That führte er diese chemische Probe als einen Beweis der Identität der verschiedenen Arten der Elektrizität an.

242. Innere und äussere Wirkungen. In einer der vorhergehenden Vorlesungen wurde nachgewiesen, dass die Grösse der chemischen Wirkung innerhalb der Elemente der Batterie der Stromstärke proportional ist. Daher findet das erste Gesetz des Art. 235 sowohl auf den innerhalb der Batterie befindlichen Teil des Schliessungsbogens Anwendung, als auf den ausserhalb der Batterie befindlichen Teil.

Angenommen, 3 Daniell'sche Elemente werden zur Zersetzung des Wassers in einem Voltameter gebraucht. Während dann 1 Gramm Wasserstoff (11,126 cbcm) und 8 Gramm Sauer-

stoff (5563 cbcm) in dem Voltmeter frei werden, werden in jedem Elemente der Batterie 31,5 g Kupfer abgesetzt und (wenn man den durch lokale Wirkung erzeugten Verlust nicht in Anrechnung bringt) 32,5 g Zink in jedem Elemente aufgelöst.

243. Hieraus geht mit Evidenz hervor, dass die elektrolytische Zelle die Umkehr des Volta'schen Elements ist. Die in dem Volta'schen Elemente verrichtete chemische Arbeit liefert die Energie des Stromes, welchen jenes Element in dem Schliessungsbogen erregt. In der elektrolytischen Zelle wird chemische Arbeit verrichtet, indem die erforderliche Energie von dem elektrischen Strome geliefert wird, welchen eine selbstständige Batterie oder eine andere Quelle in den Becher entsendet. Angenommen, ein Strom von der Stärke C würde durch ein Element geschickt, dessen E.M.K. = E sein möge und welches in derselben Richtung wirkt wie der Strom fließt. Die Energie, welche der Strom von diesem Elemente pro Sekunde empfängt, ist gleich dem Produkte $C \cdot E$ (vergl. Art. 430) indem die chemische Energie des Volta'schen Elementes in den Stromkreis dort eintritt, wo die chemische Wirkung vor sich geht. In Fig. 135 ist die Stromrichtung durch die Pfeile mit dicken

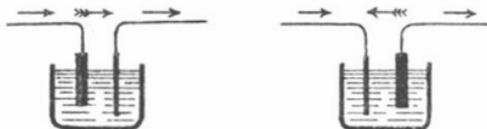


Fig. 135.

Schäften angegeben, und die Richtung der E.M.K. durch den gefiederten Pfeil. Wenn z. B. 10 Ampère durch ein Daniell'sches Element fließen, das eine E.M.K. von 1,1 Volt besitzt, so beträgt die vom Element ausgehende Kraft 11 Watt. Wird jedoch das Element so in den Stromkreis eingeschaltet, dass die E.M.K. des Elementes dem längs des Schliessungsbogens fließenden Strom entgegen ist, (vergl. die rechts befindliche Abbildung der Figur), so ist die Energie pro Sekunde gleich dem negativen Produkte von C und E , indem das negative Vorzeichen anzeigt, dass der Stromkreis Energie verliert, da ein Teil seiner Energie zur Ver-

richtung chemischer Arbeit in dem Elemente verbraucht wird. Wenn der Strom rückwärts durch ein Daniell'sches Element geschickt wird, so kehren sich die chemischen Vorgänge um: das Kupfer wird aufgelöst und das Zink ausgeschieden. Doch sind nicht alle Elemente in ihrer chemischen Wirkung umkehrbar.

Eine Theorie der Elektrolyse und einige Beispiele ihrer Anwendung finden sich in der Vorlesung über Elektrochemie.

XX. VORLESUNG: *Physikalische und physiologische Wirkungen des Stromes.*

244. Molekularwirkungen. Werden metallische Leiter einer fortgesetzten Einwirkung von Strömen unterworfen, so vollziehen sich in ihnen langsame molekulare Veränderungen. Drähte von Kupfer oder Messing werden unter der Einwirkung von Strömen spröde. Während des Durchganges des Stromes durch metallische Drähte nimmt ihre Kohäsion zeitweilig ab; auch scheint eine Abnahme ihres Elastizitätskoeffizienten statt zu finden. Edlund glaubte an gespannten Drähten eine bestimmte Ausdehnung wahrzunehmen, wenn ein Strom durch sie gesandt wurde; doch ist bis jetzt noch nicht zur Genüge nachgewiesen, dass diese Ausdehnung unabhängig von derjenigen Ausdehnung ist, welche eine Folge der Erhitzung des Drahtes ist, die von dem dem Strome gebotenen Widerstande herrührt.

245. Elektrische Osmose. Wird ein starker Strom in gewisse Flüssigkeiten geleitet, um dieselben zu elektrolysieren, und trennt man die Elektroden durch eine poröse Scheidewand, so führt der Strom auf mechanische Weise einen Teil der Flüssigkeit durch die poröse Scheidewand, so dass die Flüssigkeit auf der einen Seite höher steht, als auf der andern. Diese als *elektrische Osmose* bekannte Thatsache ist bei schlecht leitenden Flüssigkeiten, wie Alkohol und Schwefelkohlenstoff, sehr augenscheinlich. Der Durchgang durch die Scheidewand findet in der Richtung des Stromes statt, d. h. die Flüssigkeit steht an der Kathode höher, als an der Anode.

246. Elektrische Destillation. Im engen Zusammenhange mit der vorigen Erscheinung steht die *elektrische Destillation* von Flüssigkeiten. Beccaria beobachtete, dass eine elektrisierte Flüssigkeit schneller verdunstet, als eine unelektrische. Gernez hat neuerdings gezeigt, dass in einer gebogenen, geschlossenen Röhre, welche zwei Teile einer Flüssigkeit enthält, von denen der eine stark +, der andere stark — elektrisch ist, die Flüssigkeit von der + nach der — Seite übergeht. Diese scheinbare Destillation ist nicht eine Folge des Temperaturunterschiedes, noch hängt sie von der Grösse der beeinflussten Oberfläche ab, sondern die Flüssigkeit breitet sich allmählich längs der innern Oberfläche der Glasröhren aus. Schlechte Leiter, wie z. B. Terpentin, verbreiten sich nicht in dieser Weise.

247. Diaphragmen-Ströme. Professor Quinke machte die Entdeckung, dass in einer Flüssigkeit ein Strom entsteht, wenn dieselbe durch ein poröses Diaphragma gepresst wird. Diese Erscheinung lässt sich als die Umkehrung der elektrischen Osmose auffassen. Die E.M.K. des Stromes richtet sich nach dem Drucke und nach der Natur des Diaphragmas. Wurde Wasser bei einem Drucke von einer Atmosphäre durch Schwefel gepresst, so betrug die Potentialdifferenz mehr als 9 Volt. Bei einem Diaphragma von Porzellan oder tierischer Blase betrug die Differenz nur 0,35, resp. 0,01 Volt.

248. Elektro-Kapillarscheinungen. Wenn man eine horizontale, an den Enden nach oben umgebogene Glasröhre mit verdünnter Säure füllt, und in die Mitte der Röhre einen Tropfen Quecksilber bringt, so bewegt sich derselbe, falls ein Strom durch die Röhre geschickt wird, nach dem negativen Pole. Man nimmt an, dass an der Trennungsfläche des Quecksilbers und der Säure in Folge der Elektrolyse sehr geringe Gasmengen frei werden, und die Oberflächenspannung sich hierdurch bedeutend ändert, so dass infolge der Kapillarkräfte eine Bewegung erfolgt. Lippmann, Dewar und Andere haben nach diesem Prinzipie *Kapillar-Elektrometer* konstruiert, bei denen durch den Druck einer Flüssigkeitssäule der Elektro-Kapillarkraft, welche an der

Trennungsfläche des Quecksilbers und der verdünnten Säure ausgeübt wird, das Gleichgewicht gehalten wird. Die Elektro-Kapillarkraft ist annähernd der elektromotorischen Kraft proportional, falls diese ein Volt nicht übersteigt. Fig. 136 zeigt das

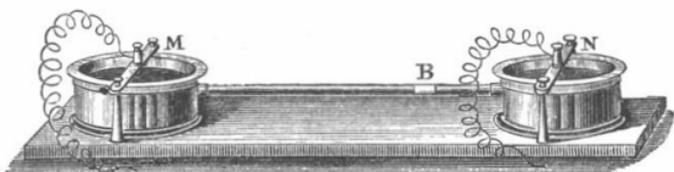


Fig. 136.

Kapillar-Elektrometer von Dewar. Eine Glasröhre liegt horizontal zwischen zwei gläsernen Gefäßen, in welche dieselbe mit ihren Enden einmündet. Die Röhre wird mit Quecksilber gefüllt, welches einen Tropfen verdünnter Säure einschliesst. Als Elektroden dienen Platindrähte, welche in das Quecksilber der Gefäße tauchen. Eine E.M.K. von nur $\frac{3}{10}$ Volt genügt, um eine messbare Verschiebung des Tropfens hervorzubringen. Die Richtung, nach welcher diese Verschiebung stattfindet, hängt von der Richtung des Stromes ab.

249. Physiologische Wirkungen. Wenn Elektrizität durch den menschlichen Körper geleitet wird, so bringt sie in den Nerven gewisse schmerzhaft empfindungen hervor und bewirkt ein unfreiwilliges Zusammenziehen der Muskeln. Die plötzliche Entladung selbst einer geringen Elektrizitätsmenge bei einer auf hohes Potential geladenen Leydener Flasche oder einer Induktionsrolle (s. Fig. 129) veranlasst im Körper eine durchdringende, schmerzhaft *Erschütterung*. Der Strom einiger starken Grove'schen Elemente, welchen man durch den eigenen Körper leitet, indem man die Leitungsenden mit nassen Händen anfasst, verursacht eine ganz andere, unangenehme, stechende Empfindung in Arm- und Schultergelenken, ohne jedoch krampfhaft Kontraktionen zur Folge zu haben, ausgenommen bei nervösen oder schwachen Personen, beim Öffnen oder Schliessen des Stromes. Dieser Unterschied hat darin seinen Grund, dass die Gewebe des Körpers einen sehr beträchtlichen Widerstand bieten, und

dass die Potentialdifferenz im ersten Falle viele tausend Volt betragen kann; folglich kann die in der Leydener Flasche angehäufte Menge, obgleich sie in Wirklichkeit sehr gering ist, doch durch ihre grosse E.M.K. den Widerstand auf einmal überwinden. Obgleich die Batterie in dem Falle, wo sie durch einen guten Leiter hindurchwirkt, in einer Sekunde tausendmal mehr Elektrizität liefert, so kann dieselbe infolge ihrer begrenzten E.M.K. doch nur einen kleinen Bruchteil durch den Körper hindurchschicken, da derselbe einen grossen Widerstand bietet.

Nachdem Cunäus im Jahre 1745 den elektrischen *Schlag* der Leydener Flasche entdeckt hatte, wurden noch viele andere Versuche angestellt. Ludwig XV von Frankreich liess 700 Karthäuser Mönchen, welche sich die Hände gegeben hatten, einen Schlag von einer Batterie Leydener Flaschen erteilen, und erzielte dabei einen wunderbaren Erfolg. Franklin tötete einen Truthahn durch einen Schlag von einer Leydener Flasche.

Im Jahre 1752 machte Sulzer die folgende Beobachtung: »Wenn man 2 Stücke Blei und Silber verbindet, und dieselben dann auf die Zunge legt, so empfindet man einen gewissen *Geschmack*, welcher dem des grünen Vitriols gleicht, während jedes Stück einzeln keine derartige Empfindung hervorbringt.« Diesen *galvanischen Geschmack*, von welchem man damals noch nicht vermutete, dass er mit der Elektrizität in irgend welchem Zusammenhange stände, kann man hervorrufen, wenn man eine Silbermünze auf die Zunge legt und eine Stahlfeder darunter hält, so dass eine metallische Berührung zwischen beiden stattfindet. Denselben Geschmack nimmt man wahr, wenn man die beiden Polenden eines Volta'schen Elements mit der Zunge in Berührung bringt.

Ritter machte die Entdeckung, dass ein schwacher durch den Augapfel gesandter Strom dort dieselbe Empfindung hervorruft, wie ein greller *Lichtblitz*, welcher den Sehnerv plötzlich reizt. Ein stärkerer Strom, welcher mittelst feuchter, an den Batterieenden befestigter Leiter hindurchgeschickt wurde, erzeugte, so lange er zwischen Stirn und Hand floss, eine blaue und grüne

Lichtempfindung. Helmholtz bemerkte bei der Wiederholung dieses Versuchs bloss eine seltsame Farbenempfindung. Dr. Hunter sah Lichtblitze, als er ein Stück Metall unter seine Zunge hielt und dasselbe mit einem zweiten berührte, welches die feuchten Gewebe des Auges berührte. Volta und Ritter hörten musikalische Töne, als sie einen Strom durch ihre Ohren leiteten; und Humboldt fand, dass in den Geruchsorganen eine Empfindung hervorgebracht wurde, wenn ein Strom zwischen der Nasenöffnung und dem Kehldeckel fliesst. Jeder der erwähnten Sinne kann durch den Strom zur Thätigkeit gereizt werden. Der Mensch besitzt keinen besonderen Sinn für die Wahrnehmung elektrischer Kräfte, wie er solche für Licht und Schall besitzt; doch liegt kein Grund vor, weshalb man es für unmöglich halten sollte, dass einige der niedern Tiere mit einem besondern elektrischen Sinne begabt wären.

Der folgende Versuch zeigt die Wirkung schwacher Ströme auf kaltblütige Tiere. Legt man eine Kupfer- oder Silbermünze auf eine Zinkplatte, und lässt eine gewöhnliche Gartenschnecke über letztere kriechen, so zieht dieselbe ihre Fühlhörner ein und rollt ihren Körper zusammen, sobald sie mit dem Kupfer in Berührung kommt. Lässt man sie über zwei Kupferdrähte kriechen, welche man hierauf mit einem schwachen Volta'schen Elemente verbindet, so kündigt sie augenblicklich durch eine ähnliche Zusammenziehung das Entstehen eines Stromes an¹⁾.

250. Muskelzusammenziehung. Im Jahre 1678 zeigte Swammerdam dem Grossherzog von Toskana folgenden Versuch: Wenn man einen Muskel eines Froschschenkels, welcher an einem mit Silberdraht umwickelten Nervenfaden aufgehängt ist, über eine kupferne Stütze hält, so dass sowohl der Nerv, als auch der Draht das Kupfer berühren, so zieht sich der Muskel sofort zusammen. Mehr als ein Jahrhundert später wurde Galvani auf

1) Es ist kaum glaublich, dass ein gewisser Jules Alix einst allen Ernstes ein Telegraphensystem in Vorschlag brachte, welches auf dieser physiologischen Erscheinung basierte.

dieselbe Thatsache aufmerksam, indem er die Beobachtung machte, dass die Schenkel von frisch getöteten Fröschen unter dem Einflusse des »Rückschlages« jedesmal, wenn eine in der Nähe befindliche Elektrisiermaschine entladen wurde, sich krampfhaft zusammenzogen. Unbekannt mit Swammerdam's Versuch, machte er im Jahre 1786 die Entdeckung (auf welche bereits in Art. 158 hingewiesen wurde, da sie schliesslich zur Entdeckung der Volta'schen Säule führte), dass, wenn Nerven und Muskeln mit zwei verschiedenen, sich einander berührenden Metallen in Berührung kommen, eine Zusammenziehung des Muskels stattfindet. Die nach Galvani präparierten Froschschenkel zeigt Fig. 137. Nach-

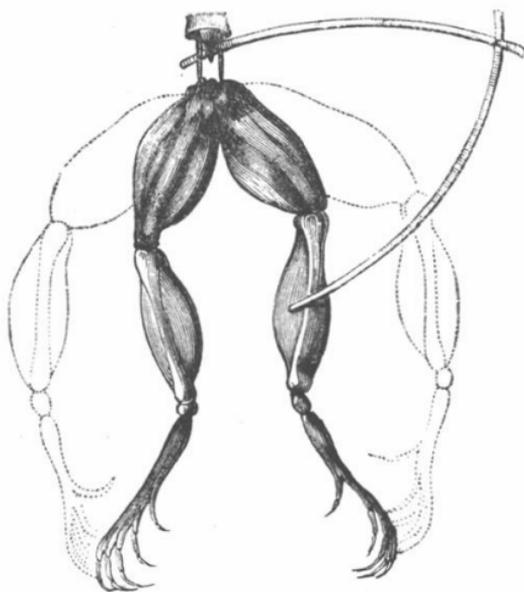


Fig. 137.

dem das Tier getötet ist, werden die Hinterschenkel abgelöst und abgehäutet; die Schenkelnerven und ihre Verbindungen mit den Lendenrückenwirbeln bleiben sitzen. Die Schenkel bewahren ihre zusammenziehende Kraft noch einige Stunden nach dem Tode. Die auf diese Weise präparierten Froschschenkel bilden ein ungemein empfindliches Galvanoskop: an ihnen lassen sich z. B. die sehr schwachen Induktionsströme des Telephons (Vorl. 53) nachweisen, obschon die empfindlichsten Galvanometer

dieselben nur unvollkommen anzeigen. Galvani und Aldini wiesen nach, dass andere Tiere gleiche Wirkungen erleiden. Mit einer aus 100 Plattenpaaren bestehenden Säule experimentierte Aldini an frisch getöteten Schafen, Ochsen und Kaninchen, und fand, dass bei ihnen krampfhaftige Muskelzusammenziehungen stattfinden. Humboldt wies dasselbe bei Fischen nach; und Zanotti, welcher durch einen frisch getöteten Grashüpfer einen Strom schickte, veranlasste ersteren zu seinem gewöhnlichen Zirpen. Aldini, und später Dr. Ure aus Glasgow experimentierten an den Körpern hingerichteter Verbrecher, mit schrecklich anzusehendem Erfolge. Die Gesichtsmuskeln erlitten grässliche Verzerrungen und die Brust hob sich mit der Zusammenziehung des Zwerchfelles. Die kleinen Muskeln, welche an den Wurzeln der Kopfhaare sitzen, scheinen vorzugsweise für elektrische Zustände empfindlich zu sein, da sich die Haare beim Elektrisieren sofort sträuben. Der Widerstand, welchen der menschliche Körper dem Durchgange des elektrischen Stromes entgegensetzt, richtet sich hauptsächlich nach der Trockenheit der Haut. Ist die Haut feucht, so beträgt dieser Widerstand 300 bis 10,000 Ohm. Verschiedene Versuche, welche man in Amerika bei der Hinrichtung von Verbrechern angestellt hat, haben ergeben, dass der Widerstand des menschlichen Körpers im Durchschnitt 2500 Ohm beträgt, und dass 3000 Volt zwischen Kopf und Rückgrat den sofortigen Tod zur Folge hatten.

Ein Strom von circa 20 Milliampère bringt schreckliche Muskelkontraktionen hervor, während ein Strom von 2 Ampère bei seinem Durchgange durch ein wesentliches Organ fast immer verhängnisvoll ist. Die Wirkung des Stromes ist eine zweifache: erstens wirkt er auf die Nerven und verursacht Krämpfe; zweitens zerstört er das Gewebe, sei es durch Verbrennung, sei es durch Elektrolyse, indem er das Blut zerrinnen macht. Um einen durch einen elektrischen Schlag betäubten Menschen wiederzubeleben, hat man dieselben Operationen auszuführen, welche bei Ertrunkenen angewendet werden.

251. Bedingungen der Muskelzusammenziehung.

Um eine Muskelzusammenziehung hervorzurufen, muss der Strom einen Teil des Nervs der Länge nach durchfliessen. In einem frisch präparierten Frosche verursacht der Strom nur momentan eine Zusammenziehung, wenn der Schliessungsbogen geöffnet oder geschlossen wird. Ein schnell unterbrochener Strom veranlasst eine zweite Zusammenziehung, bevor die erste vorüber ist, und der Muskel zeigt auf diese Weise eine fortwährende, dem *Starrkrampfe* gleichende Zusammenziehung. Nach kurzer Zeit verliert der präparierte Frosch einen Teil seiner Empfindlichkeit, und ein direkter Strom (d. h. ein solcher, welcher den Nerv in der Richtung vom Gehirne zum Muskel durchströmt) bringt nur dann eine Wirkung hervor, wenn der Schliessungsbogen geschlossen wird, während ein »umgekehrter« Strom nur dann eine Wirkung hervorbringt, wenn der Schliessungsbogen geöffnet wird. Matteucci, welcher diese Beobachtungen machte, entdeckte auch durch Versuche an lebenden Tieren, dass die Sinnes- und die Bewegungsnerven sich in Bezug auf Leitungsfähigkeit unterscheiden, — ein »direkter« Strom affiziert die Bewegungsnerven, wenn der Schliessungsbogen geschlossen, und die Sinnesnerven, wenn derselbe geöffnet wird, während ein »umgekehrter« Strom den umgekehrten Erfolg hat. Bis jetzt weiss man jedoch noch wenig von den Bedingungen der Leitungsfähigkeit der Nervensubstanz; Nerven leiten besser als Muskelgewebe, Knorpel oder Knochen; das Blut ist jedoch der beste Leiter von allen Bestandteilen des Körpers. Kräftige Ströme elektrolysieren das Blut ohne Zweifel bis zu einem gewissen Grade, indem sie dasselbe und die darin enthaltenen Eiweissstoffe gerinnen machen. Die *zusammenziehende* Kraft, welche von der Einwirkung des Stromes herrührt, scheint eine spezifische Eigenschaft des *Protoplasmas* zu sein, überall, wo dasselbe auftritt. Die Amöben, die niedrigsten, einfachsten Organismen, erleiden Zusammenziehungen. Ritter machte die Entdeckung, dass die *Sinnpflanze* sich beim Elektrisieren öffnet und Burdon Sanderson hat gezeigt, dass diese Eigenschaft sich auch auf andere Pflanzen erstreckt, dass dieselbe sich bei den *fleischfressen-*

den Pflanzen findet, z. B. bei der Venusfliegenfalle (*Dionaea*).

252. Animalische Elektrizität. Obschon Galvani zugab, wenigstens in seinen spätern Schriften, dass die solche Wirkungen hervorbringende Elektrizität von den verwendeten Metallen herühre, bestand er doch auf dem Vorhandensein einer *animalischen Elektrizität*, welche in den Muskel- und Nervengeweben ihren Sitz hätte. Er zeigte, dass sich ohne jede Anwendung von Metallen Zusammenziehungen schon dadurch hervorrufen liessen, dass man einen Nerv an zwei verschiedenen Punkten längs seiner Oberfläche mit einem von einem lebenden Frosch abgeschnittenen Muskelstück berührte; und dass ein metallischer Konduktor, welcher einen Nerv mit einem Muskel verbindet, gleichfalls genügte, um in dem Muskel eine Zusammenziehung hervorzurufen. Galvani und Aldini hielten diese Thatsachen für Widerlegungen der Volta'schen Kontakt-Theorie. Volta betrachtete sie als einen Beweis dafür, dass die Berührung zwischen Nerv und Muskel selbst (wie in dem Falle zweier verschiedenen Metalle) entgegengesetzte elektrische Zustände erzeugte. Später zeigte Nobili, dass, wenn der Nerv und der Muskel des Frosches durch Wasser mit den Enden eines empfindlichen Galvanometers in Verbindung gesetzt werden, ein mehrere Stunden dauernder *Strom* erzeugt wird; er stellte sogar eine Reihe von Froschenkeln zusammen, wie die Elemente einer Batterie, und verstärkte auf diese Weise den Strom. Matteucci zeigte, dass durch den Muskel allein eine elektromotorische Kraft entsteht. Du Bois Reymond hat gezeigt, dass, wenn das Ende eines Muskels quer durchschnitten wird, die Enden der Muskelfasern des Querschnitts negativ und die Seitenflächen derselben positiv sind, und dass diese Potentialdifferenz auch dann einen Strom erzeugt, wenn der Muskel in Ruhe ist. Um dies nachzuweisen, benutzte er ein empfindliches, astatisches Galvanometer mit 20,000 Drahtwindungen; und um Fehler zu vermeiden, welche durch die Berührung der Drahtenden mit den Geweben entstehen könnten, gebrauchte er *unpolarisierbare Elektroden*, welche er sich auf die Weise herstellte, dass er die Enden der Zink-

spitzen in eine gesättigte Lösung von schwefelsaurem Zinkoxyd tauchte. Diese Lösung war in einer feinen Glasröhre enthalten, welche am Ende durch einen porösen Stöpsel von angefeuchtetem Kaolin verschlossen war. Ein nicht verletzter in Ruhe befindlicher Muskel liefert überhaupt keinen Strom. Ein verletzter in Ruhe befindlicher Muskel liefert einen Strom, der von der Schnittstelle zum gesunden Teile fliesst (und darauf durch das Galvanometer zur Schnittstelle zurückkehrt). Ein gesunder, in Thätigkeit befindlicher Muskel liefert einen Strom, der von dem thätigen zum unbeschäftigten Teile fliesst. Du Bois Reymond erhielt Ströme durch seine eigenen Muskeln, indem er die Spitzen seiner Zeigefinger in zwei Schalen mit Salzwasser tauchte, die mit den Enden des Galvanometers in Verbindung standen. Ein plötzliches Zusammenziehen der Muskeln eines Armes erzeugte einen Strom in der Richtung von den zusammengezogenen zu den nicht zusammengezogenen Muskeln. Wie Dewar gezeigt hat, entsteht ein elektrischer Strom im Sehnerv, wenn das Licht auf die Netzhaut des Auges fällt. In der Haut, und besonders in der des Flussaals ist eine E.M.K. thätig, welche von aussen nach innen gerichtet ist.

253. Medizinische Anwendungen. Elektrische Ströme hat man mit Erfolg bei der Wiederbelebung von Personen angewendet, die vom Ertrinken gerettet wurden, da die Zusammenziehung des Zwerchfelles und der Brustmuskeln dazu dient, das Atmen zu beschleunigen. Seit der Entdeckung der Leydener Flasche hat man mannigfache Versuche gemacht, um eine elektrische ärztliche Behandlung zu begründen. Diskontinuierliche Ströme, besonders solche, welche von kleinen Induktionsrollen und magneto-elektrischen Maschinen herrühren, benutzen praktische Aerzte, um die Nerven bei Lähmungen und andern Krankheiten anzuregen. Doch sollte man elektrische Ströme nur mit grosser Vorsicht anwenden, und stets unter der Leitung von regelrecht ausgebildeten Aerzten.

Es ist nicht überflüssig, in dieser Beziehung ernstlich vor den zahlreichen Quacksalbern zu warnen, welche das unkundige

Publikum mit magnetischen und galvanischen »Heilmitteln« täuschen. In vielen Fällen haben diese überall öffentlich bekannt gemachten Betrügereien unberechenbares Unheil angestiftet, und in den sehr wenigen Fällen, wo angeblich ein guter Erfolg zu verzeichnen war, war das Heilmittel wahrscheinlich nicht Magnetismus, sondern Wolle!

Die übliche Dosis bei Anwendung eines Stromes beträgt 2 bis 10 Milliampère. Ein Apparat, welcher solche Ströme nicht liefert, ist zu Heilzwecken unbrauchbar. Kontinuierliche Ströme scheinen bei der Anode eine beruhigende Wirkung auszuüben, welche bei Neuralgie und bei schmerzhaften Anfällen von Wert ist, und bei der Kathode eine erhöhte Reizbarkeit, welche im Falle einer Lähmung von Nutzen ist. Der kontinuierliche Strom wird auch in der Weise verwendet, dass er auf elektrolytischem Wege Geschwülste beseitigt. Wechselströme und gleichgerichtete Ströme, schnell unterbrochen, reizen die Nerven an.