universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Lehrbuch der Physik für Mediziner und Biologen

Lecher, Ernst

Leipzig [u.a.], 1912

V. Elektrizität

urn:nbn:at:at-ubi:2-5552

V. Elektrizität.

1. Elektrostatik.

Fundamentalbegriffe.

544. Ponderomotorische Wirkungen elektrisierter Körper. Viele Körper erlangen durch Reibung die Eigenschaft, andere Körper anzuziehen. Schon im Altertume bemerkte man diese Erscheinung an einem fossilen Harze aus der ältesten Tertiärzeit (Bernstein, „Elektron", daher der Name „Elektrizität"). Hat man Bernstein, Siegellack oder dgl. mit einem trockenen Tuche gerieben, so zieht der geriebene Körper leichte Papierschnitzel und ähnliches an. Diese Anziehung ist eigentlich schon eine komplizierte Erscheinung (§ 574).

Die geriebenen Körper erfahren sonst keine physikalischen Änderungen; Gewicht, Farbe, Temperatur (nach kurzer Zeit) usw. sind ungeändert geblieben. Die geriebenen Körper erhalten nur die merkwürdige Eigenschaft, Bewegungen anderer Körper hervorzubringen, sie zeigen ponderomotorische Wirkungen, welche wir der sog. Elektrizität (einem Fluidum?) zuschreiben, die durch Reiben auf dem Stabe entstanden ist. Den Stab selbst nennt man elektrisiert oder elektrisch geladen.

545. Harz- und Glaselektrizität. Wir reiben einen Harzstab *H* mit einem Felle und hängen ihn an zwei Fäden so auf, wie Fig. 354 zeigt. Nähern wir dem Ende dieses Stabes einen zweiten geriebenen Harzstab, so dreht er sich weg, er wird abgestoßen; nähern wir ihm aber einen mit Seide geriebenen Glasstab, so wird er von diesem angezogen.

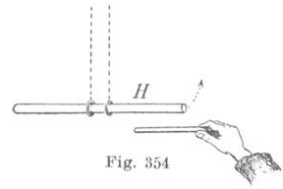


Fig. 354

Sämtliche Körper zeigen nun, nachdem sie in passender Weise und unter gewissen Vorsichtsmaßregeln gerieben wurden, entweder ein Verhalten wie der Harzstab oder aber ein solches wie der Glasstab.

Wir finden also zwei Arten von Elektrizitäten, eine Harzelektrizität und eine Glaselektrizität, wobei der Versuch zeigt, daß gleichnamig geladene Körper (Harz und Harz, Glas und Glas) sich abstoßen, hingegen ungleichnamige (Glas und Harz) sich anziehen.

546. Reibungselektrizität bei Tieren. Daß die Haare des Menschen beim Kämmen oft elektrisch werden, ist bekannt. Auch die Haare und Federn der Tiere werden sowohl durch gegenseitige Reibung als auch durch Reibung am Schnabel oder beim Fluge durch Reibung an der Luft elektrisch, wodurch wahrscheinlich eine für Wärmeschutz und Trockenhaltung zweckmäßige Ausrichtung der Pelzhaare und des Federkleides erfolgt.

547. Elektroskop. Ein vertikaler Metallstab *a* trägt oben eine Metallkugel *k* und nach unten hängen an ihm zwei kleine, sehr leicht bewegliche Aluminiumblättchen *b* (Fig. 355). Wenn man die Kugel *k* mit einer Bürste reibt, so wird die Kugel elektrisiert; die beiden Aluminiumblättchen *b* gehen auseinander, wie dies in der Zeichnung angedeutet ist. Wir ersehen daraus, daß die durch die Reibung der Kugel erzeugte Elektrizität durch den Stab *a* von *k* bis in die Aluminiumblättchen *b* hinuntergegangen sein muß, die, gleichnamig elektrisiert, einander abstoßen. Eine passende Anordnung vorausgesetzt, bleiben diese Blättchen dauernd auseinander gespreizt. Man nennt eine solche Vorrichtung ein Elektroskop. (Näheres § 576.)

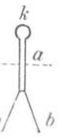


Fig. 355.

548. Leiter und Isolator. Wird die geladene Kugel *k* mit einem ungeriebenen und trockenen Siegellack- oder Glasstabe berührt, so übt das keinen Einfluß auf die Blättchen aus. Berührt man hingegen *k* mit einem von der Hand gehaltenen Metallstabe oder feuchten Glasstabe, so gehen die Blättchen rasch zusammen, ein Zeichen dafür, daß sie wieder unelektrisch geworden sind. Die Ladung von *k* ist auf dem Wege Stab, Hand, menschlicher Körper zur Erde abgeflossen. Wir können diesbezüglich alle Substanzen in zwei Gruppen einteilen, in solche, welche Elektrizität nicht durchlassen: Nichtleiter oder Isolatoren, z. B. Harz, Glas usw., und in solche, welche Elekektrizität durchlassen: Leiter, z. B. alle Metalle, viele Flüssigkeiten und auch alle Isolatoren, welche an der Oberfläche oder im Innern Wasser enthalten, z. B. feuchtes Glas.

Lebendes Gewebe, der menschliche Körper, auch die festen Stützsubstanzen, wie Knochen, Knorpel, enthalten Wasser und leiten.

Unsere Vorrichtung in Fig. 355 muß isoliert befestigt sein, damit die Elektrizität, welche durch das Reiben mit der Bürste entstanden ist, darauf bleibt. Die punktierte Linie stelle (auch in den folgenden Figuren) diese Isolation vor.

549. Luft und Feuchtigkeit. Die Luft ist gewöhnlich ein vorzüglicher Isolator; Feuchtigkeit ändert nichts daran. Der Irrtum, daß feuchte Luft die Elektrizität leite, entstand dadurch, daß bei großer Feuchtigkeit sich auf vielen Gegenständen, z. B. Glas, Wasserdampf niederschlägt und daß diese längs der Oberfläche der Isolatoren hinführende Wasserhaut die Elektrizität ableitet. Um dies zu vermeiden, überzieht man solche Isolatoren

mit nicht hygroskopischen Substanzen (Schellak, Paraffin) und hält sie womöglich einige Grade wärmer als die Lufttemperatur, wodurch jede Kondensation unmöglich wird.

Luft kann aber in verschiedener Weise leitend gemacht werden, so z. B. durch die Nähe einer Flamme, durch ultraviolette, Röntgen-Strahlung usw. Es genügt, unserer Kugel k eine Bunsenflamme auf einige Zentimeter zu nähern, um das geladene Elektroskop ziemlich rasch zu entladen. Über diese Leitfähigkeit der Luft werden wir später noch einige Male zu sprechen haben (z. B. § 754).

550. Konvektion von Elektrizität. Will man Elektrizität von irgendeiner großen Kugel A auf einen anderen entfernten Leiter bringen, so kann dies in doppelter Weise geschehen.

Man berührt die große Kugel A mit einer kleinen Kugel r, „Probekugel", die man mittels eines isolierenden Stieles s hält (Fig. 356 I). Es geht durch Leitung etwas Elektrizität aus A nach r und man kann dann die Kugel r samt ihrer Ladung wegtragen und letztere durch Berührung mit der Elektroskopkugel k in das Elektroskop überführen (Fig. 356 II). Diese Operation kann man mehrere Male wiederholen, indem man abwechselnd die große Kugel A und das Elektroskop k mit der Probekugel r berührt. Jedesmal wird etwas Elektrizität von der großen Kugel weggenommen und in das Elektroskop gebracht. (Ein wenigstens teilweiser ähnlicher Vorgang wäre der, daß man Wasser aus einer großen gefüllten Wanne mittels eines kleinen Glases in ein Waschbecken überfüllt.)

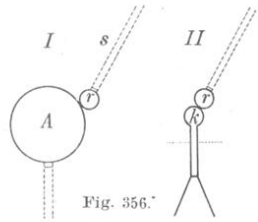


Fig. 356.

Man nennt einen derartigen Vorgang, bei dem die Elektrizität gleichzeitig mit dem geladenen Körper bewegt wird, Konvektion der Elektrizität.

551. Leitung von Elektrizität. Man kann aber oft bequemer in anderer Weise Elektrizität von der großen Kugel A in die kleine Elektroskopkugel k überführen, indem man einen isolierten (Isolation an beiden Enden punktiert gezeichnet) Leitungsdraht ll (Fig. 357) gleichzeitig mit diesen beiden Kugeln in Berührung bringt. In diesem Falle ist der Transport der Elektrizität von A nach k durch Leitung erfolgt. Die Elektrizität ist durch den Draht ll von A nach k geflossen (geradeso wie Wasser von einem Orte höheren Druckes

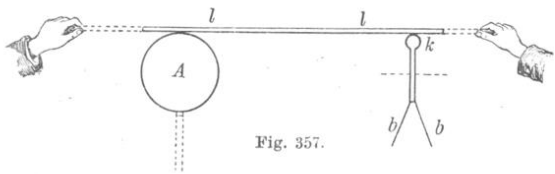


Fig. 357.

zu einem Orte kleineren Druckes fließt. Nur geschieht der Ausgleich der Elektrizität ungleich viel rascher, fast momentan).

552. Wir haben es immer dann mit elektrostatischen Phänomenen, mit **Elektrostatik**, zu tun, wenn die Elektrizität im Gleichgewichte und in Ruhe ist, wenn also kein Strömen stattfindet. Selbstverständlich ist jede Veränderung einer elektrostatischen Verteilung immer mit einer Bewegung oder einem Strömen der Elektrizität verbunden.

553. Harz- und Glaselektrizität heben sich auf. Nehmen wir zwei große isolierte Kugeln A und B; die eine sei mit Glas-, die andere mit Harzelektrizität geladen.

Zuerst füllen wir mit unserer kleinen Probekugel r das Elektroskop durch Konvektion von A her mit Glaselektrizität. Bei jeder neuen Füllung wird die Divergenz der Aluminiumblättchen größer. An dieses mit Glaselektrizität gefüllte Elektroskop bringen wir dann mittels der kleinen Probekugel r aus der mit Harzelektrizität gefüllten Kugel B Harzelektrizität. Da bemerken wir, daß jetzt bei jeder neuen Berührung die durch die Glaselektrizität entstandene Divergenz der Blättchen immer kleiner und kleiner wird und schließlich auf Null gebracht werden kann.

Diese Tatsache lehrt uns, daß Glas- und Harzelektrizität, in entsprechender Menge zusammengebracht, sich gegenseitig aufheben, und man hat daher für diese beiden Elektrizitäten das Zeichen + und − eingeführt, wobei die Auswahl eine ganz willkürliche war. Man nannte auf gut Glück (eigentlich wäre es umgekehrt besser gewesen, z. B. § 773) die Glaselektrizität positiv und die Harzelektrizität negativ.

Dabei war es von vornherein wahrscheinlich, daß es sich beim Reiben nicht um Neuerschaffung von Elektrizität, sondern nur um eine Störung eines Gleichgewichtes handeln dürfte. Hat man nämlich beim Reiben des Harzstabes den reibenden Pelz (der ein Leiter ist) sorgfältig isoliert, so läßt sich zeigen, daß mit der negativen Elektrisierung des Harzes gleichzeitig der Pelz positiv geworden ist. Diese Versuche mit den feinsten Methoden in verschiedener Weise durchgeführt, ergaben, daß stets, und zwar nicht nur beim Reiben, sondern überall, wo Elektrizität entsteht, gleich große positive und negative Elektrizitätsmengen auftreten. Man kann somit von einem Gesetz der Erhaltung der Elektrizität in der Weise sprechen, daß die im Weltall vorhandene Elektrizitätsmenge unverändert bleibt und daß immer einer Anhäufung der Elektrizität an einer Stelle eine Verminderung an einem anderen Orte entsprechen muß.

554. Sitz der elektrischen Ladung. Wenn wir mit unserer Probekugel r die Elektrizität von einer größeren geladenen Kugel wegnehmen und an das Elektroskop bringen, so erhalten wir stets denselben Elektroskopausschlag, wo immer wir auch an die große Kugel die Probekugel r anlegen.

Daraus ergibt sich, daß die Elektrizität auf einer geladenen Kugel nach allen Seiten hin ganz gleichmäßig verteilt ist.

Nehmen wir hingegen statt der Kugel einen Körper, der nach einer Seite hin eine stärkere Krümmung, eine spitzere Form hat (Fig. 358), so wird durch einmaliges Berühren mit der Probekugel von der spitzen Stelle *s* viel mehr Elektrizität weggehen als vom Punkte *t*. An der Spitze sitzt also mehr elektrische Ladung als an den übrigen Stellen.

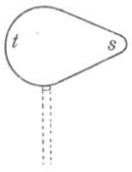


Fig. 358.

Bei einem hohlen Metallgefäß *G* (Fig. 359) läßt sich mit der Probekugel leicht zeigen, daß sich im Innern *I* keine Spur einer Ladung findet, wenn auch das Gefäß stark geladen ist, man also außen in *II* große Ladungen findet.

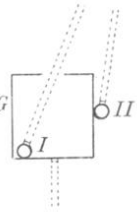


Fig. 359.

Steht eine Person im Innern eines noch so stark elektrisch geladenen Drahtkäfigs, so wirkt auf sie keine wie immer geartete elektrische Kraft ein.

Die elektrische Ladung sitzt nur an der Oberfläche der Leiter, nie in ihrem Innern. Die Verteilung an der Oberfläche ist bei einer Kugel eine gleichmäßige, bei allen anderen Körpern drängt sich die Ladung immer an jenen Stellen zusammen, die aus dem übrigen Körper spitzig hervorragen.

Wenn die Elektrizität ein Fluidum ist, dessen einzelne Teilchen sich abstoßen, so ist das alles selbstverständlich. Diese Teilchen fliehen sich so weit als möglich, können aber aus dem Körper nicht heraus, drängen sich also sprungbereit an die Oberfläche, möglichst weit weg von allen anderen Teilchen. Ragt daher eine Spitze über die Kugeloberfläche in den Raum hinaus, werden viele Teilchen, von der Gesamtmasse abgestoßen, sich an dieser Spitze zusammendrängen. Die Elektrizität auf einer Kugel wirkt nach außen so, als wäre sie (nur eine Fiktion!) im Mittelpunkt vereint.

Quantitative Grundlagen.

555. Gesetz von Coulomb. Quantitativ wurde die ponderomotorische Wirkung elektrischer Mengen von Coulomb 1785 untersucht.

Bringt man zwei kleine, gleich große, an isolierenden Stielen befestigte geladene Metallkügelchen zur Berührung, so wird die Ladung auf die zwei Kugeln sich ganz gleichmäßig verteilen; es ist ja alles symmetrisch und durchaus nicht einzusehen, warum die eine Kugel mehr Elektrizität haben sollte als die andere. Bringt man nun die Kugeln auseinander, so enthält jede dieselbe Elektrizitätsmenge, z. B. *e*. Man kann mit einer empfindlichen Wage die gegenseitige Abstoßung der je mit *e* geladenen Kugeln im absoluten Maße (Dynen) messen. Indem man die Entfernung der beiden Kugeln variiert, kann man den Einfluß dieser Entfernung finden.

Um aber auch den Einfluß wechselnder Elektrizitätsmengen der Beobachtung zu unterziehen, muß man imstande sein, die beiden Kugeln beliebig, aber

in bekannter Weise laden zu können. Dazu bedient man sich folgenden einfachen Kunstgriffes. Von den beiden Kugeln war jede mit $+ e$ geladen. Leitet man jetzt die eine zur Erde ab, wodurch ihre Ladung Null wird, und bringt die beiden Kugeln wieder zusammen, so wird sich jetzt das $+ e$ der einen auf alle zwei Kugeln verteilen müssen und jede derselben wird auch nach Aufhebung der Berührung mit $+ e/2$ geladen sein. Eine Wiederholung dieses Prozesses gibt uns die Ladung $+ e/4$ usw.

Man findet, daß

$$\text{Kraft} = \gamma \frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

Hier bedeuten e_1 und e_2 die aufeinanderwirkenden Elektrizitätsmengen, r ihre Entfernung in cm, γ hingegen einen Proportionalitätsfaktor. Wenn wir für e_1 und e_2 auch noch das entsprechende Zeichen der Ladung $+$ oder $-$ einführen, so lautet dies Gesetz:

Die anziehende oder abstoßende Kraft ist direkt proportional dem Produkte der beiden Elektrizitätsmengen und umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung.

Diese Reziprozität des Entfernungsquadrates finden wir überall, wo eine Wirkung nach allen Seiten des Raumes sich gleichmäßig ausbreitet (siehe Gravitation oder Magnetismus oder Licht).

556. Elektrostatisches Maßsystem. Noch haben wir nichts darüber gesagt, in welchen Einheiten wir die Elektrizitätsmengen messen. Unser e_1 und e_2 ist ganz unbestimmt, d. h. wir können größere oder kleinere Elektrizitätsmengen als Einheit annehmen. Nun erscheint es als das einfachste, diese Wahl so zu treffen, daß $\gamma = 1$ wird; dann lautet das Coulomb'sche Gesetz: Kraft (in Dynen) $= e_1 e_2 / r^2$.

Setzen wir hier sowohl die einander gleichen Elektrizitätsmengen als auch die Entfernung gleich 1, so können wir folgende Definition aussprechen: Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist jene, welche eine gleichgroße Einheit in der Entfernung 1 cm mit der Kraft von 1 Dyne abstößt. Indem wir γ gleich 1 setzen, haben wir eine folgenschwere Wahl getroffen. Da aus der Elektrizitätsmenge späterhin andere Elektrizitätsgrößen (Potential, Stromstärke, magnetische Kraft usw.) sich ableiten, haben wir für das weitere Gebiet gebundene Marschroute; wir messen dann alles nach dem elektrostatischen Maßsystem. Diese elektrostatische Elektrizitätseinheit ist sehr klein.

557. Wie man (§ 38) statt mit Erg mit 10^7 Erg oder 1 Joule usw. in den meisten Fällen bequemer rechnet, so mißt man im „praktischen" Maßsystem mit einer Elektrizitätsmenge von $3 \cdot 10^9$ elektrostatischen Einheiten oder einem Coulomb.

Im **„praktischen" Maßsystem** nennt man die Einheit der Elektrizitätsmenge „Coulomb". Wir kommen auf die Bedeutung dieser Größe noch oft zurück.

558. Oberflächendichte. Wir sahen (§ 554), daß die Verteilung einer bestimmten Elektrizitätsmenge auf einer Leiteroberfläche sehr ungleich sein kann. Nennen wir die Elektrizitätsmenge pro Flächeneinheit oder besser das Verhältnis Elektrizitätsmenge auf einer sehr kleinen Fläche zu dieser Fläche die Oberflächendichte der elektrischen Ladung, so können wir die Ergebnisse des § 554 auch dahin formulieren, daß diese Dichte auf einer Kugel überall gleich ist, auf Spitzen aber gewaltig ansteigt. Wird diese elektrische Ladungsdichte irgendwo zu groß, so tritt Entladung in die isolierende Umgebung hinein unter Lichterscheinungen, Glimmlicht, Funken usw. ein. Wir kommen noch oft darauf zurück.

559. Dielektrizitätskonstante. Bisher haben wir stillschweigend angenommen, daß die beiden aufeinander wirkenden Kügelchen beim Coulomb'schen Versuche sich in Luft befinden (oder im Vakuum, was die Resultate nur in minimaler Weise ändert).

Befinden sich die Kügelchen aber in einem anderen Isolator, so ist die Kraftwirkung eine schwächere, z. B. in Terpentinöl nur halb so groß.

Das Coulomb'sche Gesetz lautet vollständig:

$$\text{Kraft (Dynen)} = \frac{1}{\varepsilon}\gamma\frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

Dieses ε heißt die Dielektrizitätskonstante des betreffenden Isolators. Darum nennt man einen Isolator auch ein Dielektrikum. Diese Konstante ist bei Luft gleich 1, für Terpentinöl 2 usw. (Weiteres über die Dielektrizitätskonstante §§ 581 u. 584.)

560. Da bei einer elektrostatischen Anziehung oder Abstoßung das umgebende isolierende Medium, wie wir eben sahen, von Einfluß ist, so muß diese ponderomotorische Wirkung auf einer physikalischen Veränderung des isolierenden Zwischenmediums beruhen (Faraday 1854). Man nennt den Raum, in welchem elektrostatische Kräfte auftreten, **elektrostatisches** oder elektrisches **Feld.** Dieses elektrische Feld im umgebenden Isolator ist eine unzertrennliche Begleiterscheinung der Ladung des Leiters und sie ist vorhanden, ob nun ein zweiter anzuziehender oder abzustoßender Körper da ist oder nicht.

Intensität eines elektrischen Feldes oder Feldstärke in irgendeinem Punkte ist gleich der Kraft in Dynen, die an diesem Punkte auf die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge ausgeübt wird.

561. Lichtäther. Da die isolierende Umgebung auch ein Vakuum sein kann, also ein Raum, in welchem sich keine gewöhnliche Materie befindet, so kommen wir zu dem Widerspruche, daß wir eine Veränderung an einem Orte voraussetzen, wo sich eigentlich nichts befindet. Nun zwangen uns aber auch die Lichterscheinungen, für solche Vakua einen hypothetischen Stoff zu supponieren, den sog. Lichtäther und es liegt daher nahe,

daß wir ebendemselben Äther auch die Aufgabe zuteilen, durch gewisse physikalische Veränderungen ein elektrisches Feld zu erzeugen. Während der Äther im gewöhnlichen Zustande ohne jede Struktur ist, bekommt er eine solche um den geladenen Körper herum.

562. Zur Charakterisierung dieser Struktur eignen sich die **„Kraftlinien“**. Wir nennen eine elektrische Kraftlinie jene Richtung, in der die elektrische Kraft wirkt (oder genauer: die von diesen Richtungen als Tangenten eingehüllten Kurven). Im Innern des elektrostatisch geladenen Leiters wirkt keine Kraft, oder anders gesagt, alle Kräfte heben sich auf; da sind auch keine Kraftlinien.

Für den Außenraum ist das Kraftlinienbild, wenn wir eine einzige geladene Kugel haben, sehr einfach. Die Kraftlinien Fig. 360 gehen selbstverständlich von dieser (schwarz gezeichneten) Kugel nach allen Seiten in gleicher Weise, also radial weg. Fig. 360 stellt nur ein schematisches Bild dar, da ja die Linien auch nach vorne und hinten gehen. Wäre die Kugel statt positiv negativ geladen, so wäre nur die (Pfeil-)Richtung zu ändern. Wo elektrostatische Kraftlinien anfangen, soll immer (willkürlich!) positive Ladung, wo sie enden, negative Ladung sitzen.

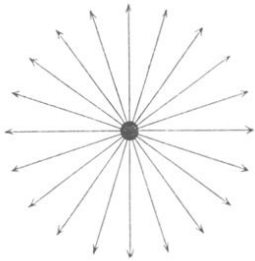


Fig. 360.

Haben wir hingegen zwei Kugeln, welche gleichnamig geladen sind, so zeichnet man die Kraftlinien für jede einzelne dieser Kugeln für sich und findet dann in jedem Punkte des Außenraums die resultierende Kraftrichtung nach

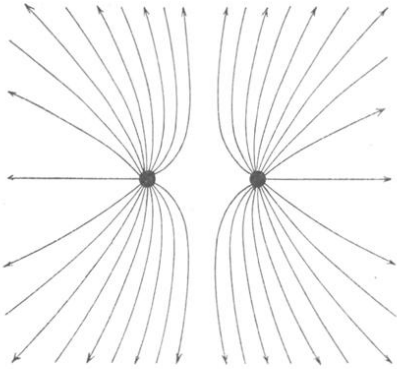


Fig. 361.

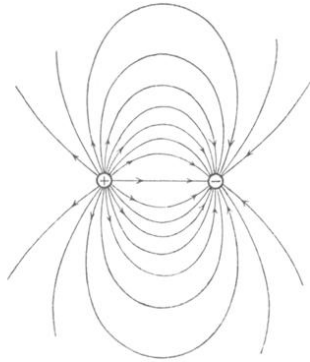


Fig. 362.

dem Kräfteparallelogramm. Diese Kraftlinienstruktur hat die Form von Fig. 361. Sind die zwei Kugeln hingegen ungleichnamig geladen, so gibt Fig. 362 das betreffende elektrische Feld. Auch diese Kraftlinien gehen

natürlich nicht nur in einer Ebene; wir müssen uns auch die Kurven der Figg. 361 u. 362 nach allen Seiten in den Raum hinaus denken und zwar symmetrisch gegen die horizontalen Verbindungslinien der Kugelmittelpunkte.

In Fig. 362 werden die beiden Kugeln ponderomotorisch gegeneinander gezogen. Wenn wir das auf die Wirkung des Feldes zurückführen, so können wir die Sache auch so auffassen, als ob die einzelnen Kraftlinien die Tendenz hätten, sich zu verkürzen. Es besteht ein Verkürzungszug längs der Kraftlinien. In Fig. 361 stoßen sich die beiden Kugeln ab. Denken wir uns auch hier die Wirkung als gegenseitige Beeinflussung der Kraftlinien, so müssen wir sagen, daß parallel verlaufende Kraftlinien einander abstoßen. Es besteht ein Querdruck (Querpressung) senkrecht zu den Kraftlinien. (Die Kraftlinien gleichen gespannten Kautschukschnüren, die sich gegenseitig abstoßen.) Solche Zug- und Druckkräfte im Äther gleichen den in Fig. 50 besprochenen Zug- und Druckkräften in einem gedrückten (oder gespannten) elastischen Körper.

563. Kraftliniendichte. Eine wichtige Eigenschaft der elektrischen Kraftlinien ersehen wir besonders aus Fig. 360. In der Nähe der wirkenden Kugel ist die Kraftwirkung sehr groß, und dort sind die Kraftlinien am dichtesten. Je weiter wir von der Kugel weggehen, desto schwächer wird die Kraft, und desto weniger dicht sind die Kraftlinien. Es ergibt also die Dichte der Kraftlinien ein Maß für die Stärke der Kraft, wenn man die Kraftlinien in bestimmter Zahl einzeichnet. Dabei ist aber nicht zu übersehen, daß solche Linien insofern nur Symbole sind, als die Veränderungen im Äther nicht an die einzelnen mathematischen Linien gebunden sind, sondern auch die Orte um die Linien herum, d. h. also den Zwischenraum zwischen den Linien ausfüllen. Darum spricht man auch eigentlich genauer von Kraftröhren.

564. Wenn wir einen elektrisierten Körper in einem elektrostatischen Felde, d. h. in einem von elektrischen Kraftlinien durchsetzten Raume bewegen, so werden wir Arbeit leisten müssen oder Arbeit gewinnen. Wir finden den mathematischen Ausdruck dieser Energie, indem wir den Weg mit der in die Wegrichtung fallenden Kraftkomponente multiplizieren. Bewegen wir daher einen elektrisierten Körper immer senkrecht zu den Kraftlinien, so wird die Kraftkomponente und daher auch die Arbeit gleich Null sein. Denken wir uns dementsprechend Flächen, die senkrecht auf den Kraftlinien stehen, sog. **Potentialflächen,** so können wir auf diesen einen elektrisierten Körper ohne jegliche Arbeit bewegen. Wenn wir diese Potentialflächen in den früher dargestellten Kraftbildern z. B. in Fig. 360 einzeichnen, so erhalten wir

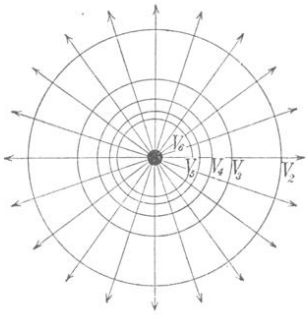


Fig. 363.

Fig. 363. Man sieht, daß diese ganz analog der in § 101, Fig. 55 gegebenen Niveaufläche ist. Zeichnen wir in Fig. 361 die Potentialflächen ein, so erhalten wir eine Zeichnung identisch mit Fig. 56. Was die Niveauflächen für die Gravitation, sind die Potentialflächen für die elektrostatischen Wirkungen.

Es ist selbstverständlich, daß alle diese Flächen nur Fiktionen sind. Es handelt sich zunächst ja nur um Punkte in der Luft oder in einem anderen Isolator oder im leeren Raume, aber sie ergeben für viele Erscheinungen des einschlägigen Gebietes ein sehr bequemes Hilfsmittel.

565. Potential. Man kann natürlich beliebig viele solche Potentialflächen konstruieren. Um aber ein bequemes Einteilungsprinzip zu erhalten, wählen wir die Distanz der einzelnen Niveauflächen nach einer genau bestimmten Definition. Der elektrisierte Körper, den wir bewegen, sei geladen mit der Einheit der Elektrizität (in beliebigem Maße gemessen), und es sei, um diesen Versuchskörper von einer Potentialfläche zur nächsten zu bringen, stets eine Arbeitseinheit (in demselben Maße gemessen) notwendig. Die Potentialkurven in Fig. 363 V_6, V_5 usw. sind nach dieser Definition gezeichnet. Wenn wir also einen Körper z. B. von der Potentialfläche V_5 auf die Potentialfläche V_6 bringen wollen, brauchen (oder gewinnen) wir eine Arbeitseinheit. Ebenso von V_4 auf V_5 usw.

Um die Elektrizitätseinheit aus unendlicher Distanz bis zur Potentialfläche V_6 zu bringen, haben wir daher die Arbeit von sechs Arbeitseinheiten zu leisten, falls der Körper mit dem Zentralkörper gleichnamig elektrisiert ist; im entgegengesetzten Falle würden wir diese Arbeit gewinnen, da ja dann Anziehung an Stelle der Abstoßung herrschte. Diese sechs Arbeitseinheiten heißen dann das Potential des Punktes V_6.

Dabei ist natürlich (analog den Betrachtungen in § 101) der Weg gleichgültig. Es kommt nur immer der Anfangs- und der Endpunkt in Betracht. Ebenso ist es gleichgültig, ob die betreffende Elektrizitätsmenge durch Konvektion oder durch Leitung an den betreffenden Platz geschafft wird.

Im „elektrostatischen" Maßsystem mißt man die Arbeit in Erg; um also die elektrostatische Elektrizitätseinheit von V_5 auf V_6 zu bringen, oder von V_4 auf V_5 usw., ist je ein Erg nötig. Will man die elektrostatische Elektrizitätseinheit aus der Unendlichkeit nach V_6 bringen, braucht man 6 Erg. Das elektrostatische Potential von V_6 ist 6.

Im praktischen Maßsystem mißt man die Arbeit in Joule; um also die praktische Elektrizitätseinheit 1 Coulomb von V_5 auf V_6 zu bringen oder von V_4 auf V_5 usw., ist je 1 Joule nötig. Will man 1 Coulomb aus der Unendlichkeit nach V_6 bringen, braucht man 6 Joule; das Potential von V_6 heißt dann 6 Volt, wo Volt (oder V) der Name für die Potentialeinheit des „praktischen" Maßsystemes ist.

Statt Potential gebraucht man oft den Ausdruck Spannung, statt Potentialdifferenz den Ausdruck elektromotorische Kraft.

Um einen jederzeit rasch faßbaren Begriff mit dem Zeichen V quantitativ zu verbinden, wollen wir uns merken, daß ein Volt ungefähr gleich ist der Potentialdifferenz oder Spannungsdifferenz an den Polen eines Daniellelementes (s. § 619).

Wir verstehen also unter Potential eines Punktes im Raume jene Arbeit (potentielle Energie), welche wir gewinnen (oder verlieren), wenn wir die Einheit der Elektrizität aus unendlich großer Entfernung bis an diesen Punkt heranbringen.

566. Potential eines Leiters. Aus den oben angestellten Überlegungen ergibt sich, daß die Potentialflächen immer näher aneinander rücken, je näher wir an den Zentralkörper herankommen. (Sie werden in der Nähe der Kugel so dicht, daß sie in Fig. 363 nicht mehr gezeichnet werden konnten.) Das folgt aus dem Coulomb'schen Gesetz, wonach die Kraft hier auch immer größer wird. Es ergibt sich ferner, daß die letzte Niveaufläche die Oberfläche der leitenden Zentralkugel sein muß; wenn ich die geladene Versuchskugel längs der Oberfläche herumbewege, habe ich keine Kraft zu überwinden und leiste keine Arbeit.

Dieser Satz läßt sich verallgemeinern und lautet dann so: Die Oberfläche eines statisch geladenen Körpers ist stets eine Potentialfläche. Wenn ich von irgendeinem geladenen Körper einen Draht zu irgendeinem Meßapparat z. B. Elektroskop führe, so fließt Elektrizität z. B. nach k Fig. 357 und es wird rasch, wenn nur alles gut isoliert ist, elektrisches Gleichgewicht eintreten. Der geladene Körper A und das Elektroskop k haben dann dasselbe Potential.

567. Umgekehrt kann, falls auf einem Leiter Potentialdifferenzen existieren, kein andauerndes Elektrizitätsgleichgewicht bestehen; die Elektrizität fließt von Orten höheren Potentials zu Orten niederen Potentials. Dieses Fließen der Elektrizität heißt **elektrischer Strom.** Solche Erscheinungen gehören nicht mehr in das Gebiet der Elektrostatik.

Analogien sind: Wasserströmungen oder Gasströmungen oder Wärmeströmungen infolge von Höhen- bzw. Druck- bzw. Temperaturdifferenzen.

568. Das **Potentialgefälle im Isolator,** d. i. die Potentialdifferenz pro cm, kann in der Nähe eines geladenen Körpers sehr groß werden, weil die Potentialflächen da knapp nebeneinanderliegen; das geschieht ganz besonders in der Nähe von Spitzen. Übersteigt dieses Potentialgefälle im Isolator eine gewisse Größe, so findet Entladung des geladenen Körpers durch Funken usw. statt (§ 757).

569. Potentialmessung. Das Potential ist eine Arbeitsgröße. Bewegen wir statt einer Einheit der Elektrizitätsmenge eine $n$fache Elektri-

zitätsmenge, so wird natürlich die Bewegungsarbeit in allen Beispielen n mal so groß. Da nun diese Bewegungsarbeit von der wirkenden Kraft abhängt, so kann man die Kraft zwischen zwei Ladungen nicht nur durch das Coulomb'sche Gesetz, d.h. durch diese zwei Elektrizitätsmengen selbst, sondern auch (mathematisch viel bequemer) durch die Potentiale dieser wirkenden Körper ausdrücken. Bisher sagten wir: „die Abstoßung der zwei Blättchen in unserem Elektroskop (Fig. 355) hängt ab von der Ladung dieser Blättchen". Nun aber wollen wir lieber dasselbe so ausdrücken: „die Abstoßung unserer Elektroskopblättchen hängt ab von ihrem Potential"; ein einfacher, für jedes Elektroskop konstanter Faktor („Kapazität" dessen Bedeutung § 580 klar werden soll), ergibt den Zusammenhang zwischen Elektrizitätsmenge und Potential. Daß ein Elektroskop Ladungen anzeigt, wußten wir; jetzt ist klar, daß ein Elektroskop eigentlich Spannungen oder Potentiale mißt.

Elektrostatische Influenz.

570. Kraftlinienmodell. Eine Messingkugel von etwa 3 cm Durchmesser sei auf einem langen isolierenden Glasstabe befestigt. An dieser Kugel seien Streifen aus leichtem Papier (sog. Seidenpapier) von etwa 40 cm Länge und 1 cm Breite mit dem einen Ende so angeklebt, daß sie lose, als Büschel, herabhängen. Wenn nun die Kugel stark elektrisiert wird, so geht Elektrizität zum Teil auf die schwach leitenden Papierstreifen, welche dann ungefähr in der radialen Richtung der Kraftlinien nach allen Seiten hin sich sträuben.

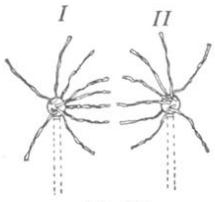


Fig. 364.

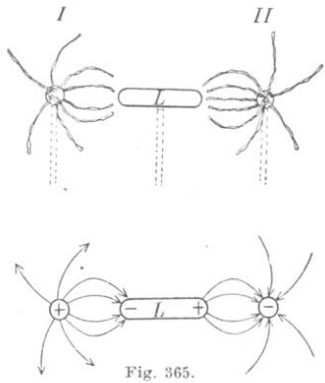
Nähert man zwei solche gleichnamig elektrisierte Papierbüschel einander, so sieht man ganz deutlich, wie bei Annäherung die Streifen voneinander zurückweichen. Die Papierstreifen ahmen Fig. 361 nach.

Umgekehrt werden, wenn die beiden Büschel ungleichnamig elektrisiert sind, die Papierstreifen sich gegeneinander zuwenden, so wie dies Fig. 364 darstellt; die Papierstreifen ahmen Fig. 362 nach.

571. Influenzmodell. Wir wollen nun die beiden ungleichnamig elektrisierten Büschel I und II soweit auseinanderschieben, daß sie sich kaum beeinflussen, daß also in jedem Papierbüschel die Streifen in fast radialer Richtung auseinander gehen. Bringt man nun (Fig. 365 oben) einen isolierten, länglichen Metallkörper L zwischen I und II, so sehen wir, wie er von beiden Seiten her die Papierstreifen anzieht.

Die Kraftlinien, die also ohne Anwesenheit von L in weitem Bogen von der + Kugel I auf die — Kugel II übergegangen sind, drängen sich jetzt in der dargestellten Weise gegen den Metallkörper L hin. Eine große

Anzahl der von der positiv geladenen Kugel ausgegangenen Kraftlinien mündet jetzt an dem einen Ende von L und es muß (Fig. 365 unten), da an dieser Fläche Kraftlinien verschwinden, hier negative Elektrizität sich befinden. Dafür erscheinen am anderen Ende von L Kraftlinien, die daselbst austreten; es muß also an dieser Fläche positive Elektrizität vorhanden sein.

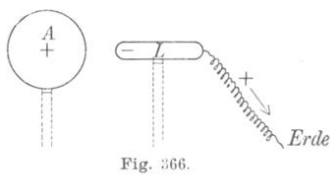


572. Wenn wir in ein elektrostatisches Feld einen isolierten Leiter bringen, so treten an seinen beiden Enden Elektrizitäten auf, d. h. es ist das Gleichgewicht der Elektrizität in dem ursprünglich unelektrischen Leiter durch bloße Wirkung von außen, durch elektrostatische **Influenz**, verändert worden. Die gleichnamige Elektrizität wird so weit als möglich abgestoßen und die ungleichnamige angezogen.

Die Kraftlinien einer einzigen positiv geladenen Kugel (Fig. 360) enden irgendwo an den Wänden oder an den Gas- und Wasserröhren des Experimentierraumes. Dort tritt die influenzierte negative Elektrizität auf, in ihrem Betrage gleich der influenzierenden positiven.

In dem Momente, wo man die influenzierende Kugel entlädt, wird durch Vereinigung der influenzierten Elektrizitätsmengen das alte Gleichgewicht im influenzierten Körper hergestellt werden. Wenn man daher dauernde Elektrisierung durch Influenz erzeugen will, muß man diese Wiedervereinigung unmöglich machen, was in der verschiedensten Weise geschehen kann. Wir wollen zwei typische Fälle herausgreifen:

1. Es sei eine Kugel A positiv geladen und wir hätten einen isolierten Leiter L im elektrischen Felde dieser Kugel. Die negative Elektrizität wird angezogen, und die positive so weit als möglich abgestoßen. Wenn ich nun irgendwo an L (Fig. 366) einen zur Erde führenden Leiter (meine Hand oder einen mit der Erde verbundenen oder „geerdeten“ Draht) anlege, so wird die positive Elektrizität in die Erde abgestoßen. Es ist also durch diese Influenzierung ein fast momentaner, in die Erde gehender, elektrischer Strom entstanden. Würde man nun A entladen oder entfernen, so würde dieser Strom durch den Draht wieder auf L zurückfließen. Wenn man aber die Erdleitung unterbricht, bevor man die Kugel A entfernt oder bevor man sie entlädt, so kann dieses Rückströmen nicht mehr stattfinden und L bleibt



dauernd negativ geladen. Das ist Elektrisierung durch Influenz und Ableitung.

2. Wenn A wieder positiv elektrisiert ist und wir zwei isolierte Leiter L_1 und L_2, die in Kontakt miteinander sind (Fig. 367), in das elektrische Feld bringen, so wird die negative Elektrizität nach L_1 gezogen und die positive nach L_2 abgestoßen. Entfernen wir nun L_1 und L_2 voneinander, so bleibt, auch wenn wir L_1 und L_2, die ja jetzt getrennt sind, aus dem elektrischen Felde wegbringen, L_1 negativ und L_2 positiv geladen. Das ist Elektrisierung mittels Trennung der influenzierten Körper im elektrischen Felde.

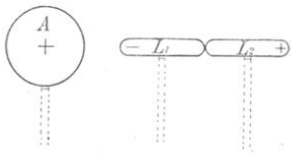


Fig. 367.

573. Spitzenwirkung. Es sei (Fig. 368) der Körper L durch die positive Kugel A elektrostatisch influenziert, wobei aber an dem Punkt a eine spitze Metallnadel gegen den influenzierenden Körper hin befestigt ist. Dann wird sich die negative Elektrizität auf diese Spitze zusammendrängen und es werden infolge der erreichten großen Spannung von dieser Spitze negativ elektrisierte Staubteilchen, ev. sogar kleinste Metallsplitter (und Atomsplitter: Elektronen § 770) in der Richtung gegen A wegfliegen. Mit diesen Teilchen fliegt aber auch negative Elektrizität weg, die die große Kugel etwas entlädt. Der Körper L wird sehr rasch nur mehr positive Elektrizität enthalten. Es sieht also aus, als ob die Spitze positive Elektrizität aus der Kugel ansaugte entsprechend der Spannung, die in a herrscht.

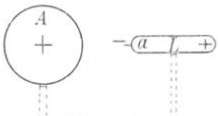


Fig. 368.

Dieses Abströmen der Elektrizität von Spitzen ist mit Lichterscheinungen verbunden; an der Spitze zeigt sich ein Lichtpunkt (Glimmlicht). Von dieser Spitze wird auch Luft weggeblasen: elektrischer Wind.

574. Anziehung unelektrischer Leiter. Wir sagten § 544, daß die Anziehung unelektrischer Körper eigentlich eine komplizierte Erscheinung sei. Wenn nämlich irgendein Leiter sich in einem elektrischen Felde befindet, zieht er zunächst die Kraftlinien in sich hinein; er wird also durch Influenz an jenem Teile, der dem elektrisierten Körper zugekehrt ist, die entgegengesetzte Elektrizität haben wie dieser und diese influenzierenden und influenzierten Elektrizitäten ziehen sich nun an, da die in den Körper hineinmündenden Kraftlinien die Tendenz haben, sich zu verkürzen.

575. Anziehung von Isolatoren. Es werden aber auch Isolatoren angezogen, wenn auch im allgemeinen viel schwächer. Wäre in einem Isolator das elektrische Fluidum absolut unbeweglich, so könnte auch keine Influenzierung in ihm eintreten und der Isolator würde daher keine Wirkung im elektrischen Felde erfahren. Nun tritt aber durch elektrische Ein-

wirkung auch im Isolator eine Veränderung ein. Die Elektrizität ist innerhalb sehr kurzer Strecken (vielleicht innerhalb des Molekels) verschiebbar. Durch Influenzierung tritt ein ganz kurzer „Verschiebungsstrom“ in der Richtung der elektrischen Kraftlinien auf. Die Kraftlinien gehen durch den Isolator hindurch und schieben in jedem Molekel die positive Elektrizität an das eine und die negative an das andere Ende eines jeden Molekels, aber nicht weiter. Machen wir aus einem Isolator ein längliches Stäbchen, das wir in seinem Schwerpunkt an einem Faden horizontal drehbar aufhängen, so wird dieser Isolator durch ebendiese Influenzierung in die Richtung elektrischer Kraftlinien sich einstellen.

576. Elektroskophülle. Die kleine Elektroskopvorrichtung, die wir § 547 geschildert haben, wäre in dieser einfachen Form recht unzuverlässig. Wenn wir das Instrumentchen z. B. positiv geladen haben, so gehen die Kraftlinien von den Aluminiumblättchen weg und enden irgendwo an den Wänden des Saales, wo die der positiven entsprechende, gleich große negative Ladung sitzen muß. So oft der Experimentator mit seiner Hand in die Nähe kommt, würden die Kraftlinien sich ev. nach dieser Richtung hin wenden und eine Vergrößerung des Ausschlages (durch Anziehung von der Hand her) verursachen. Der Ausschlag der Blättchen würde also bei ein und derselben Ladung sehr variieren. Darum bringt man von vornherein um die Blättchen herum eine Metallwand an, wie dies Fig. 369 darstellt. Der Ausschlag hängt natürlich nicht allein vom Potential der Blättchen, sondern auch vom Potential der Hülle h ab. Hat z. B. die Hülle ein negatives und die Blättchen ein positives Potential, so erfolgt nicht nur starke gegenseitige Abstoßung der Blättchen, sie werden überdies noch durch das negative Feld der Hülle auseinander gezerrt. Hätten hingegen z. B. Hülle und Blättchen dasselbe Potential, so erfolgte kein Ausschlag. Es läßt sich im allgemeinen leicht experimentell und mathematisch zeigen, daß der Ausschlag von der Potentialdifferenz zwischen Hülle und Blättchen abhängt.

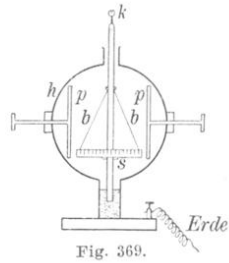


Fig. 369.

577. Erdpotential. Wird die Hülle dauernd zur Erde abgeleitet, so besitzt sie das Erdpotential, welches wir gewöhnlich, trotzdem die Erde selbst auch eine Ladung und ein Potential hat, als Nullpotential bezeichnen, da ja bei unseren Laboratoriumsversuchen die in die große Erdkugel abgestoßenen Ladungen in unendliche Entfernungen rücken. Es ist das also ein willkürlicher Nullpunkt.

578. Elektrometer. Das in Fig. 369 dargestellte Exner'sche Elektroskop mißt Spannungen (gegen Erde) von etwa 60—500 V. Der Ausschlag wird an der Skala s abgelesen, welche sich vor den Blättchen b be-

findet; die zwei Platten p werden bei Nichtgebrauch zusammengeschoben, um bb zu schützen.

Im Prinzip ähnlich, aber mit gleichsam schwererem Blättchen ist das Braunsche Elektrometer (Fig. 370). Es besteht aus nur einem beweglichen Arm a, der von einer feststehenden Platte b abgestoßen wird. Meßbereich 200 bis 5000 V.

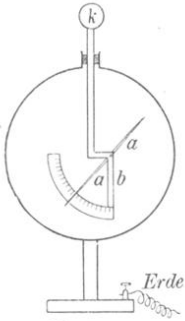


Fig. 370.

Für kleinere Spannungen sind die verschiedensten Formen konstruiert worden.

Thomson's Quadrantenelektrometer mißt hinunter bis zu 0,01 V und weniger. Fig. 371 gibt ein Schema dieses vielfach verwendeten Apparates; h ist der obere Hartgummideckel eines (nicht gezeichneten) viereckigen Glasgefäßes. Vier Metallsäulen 1, 2, 3 und 4 durchsetzen diesen Isolator und tragen im Innern des Kastens je eine horizontale Metallplatte I, II, III und IV, die in Fig. 372 (von oben gesehen und gegen Fig. 371 vergrößert) separat gezeichnet sind. Über diesen „Quadranten", die durch schmale Luftspalten voneinander getrennt sind, hängt in etwa 1 mm Höhe eine sehr leichte, in Fig. 372 licht gezeichnete, Aluminiumnadel a an einem dünnen Silberdrähtchen e, dessen oberstes Ende in der Glasröhre g befestigt ist. An demselben Drahte hängt der Ablesespiegel S. Die Nadel kann also horizontale Torsionschwingungen ausführen, wobei ein in Paraffinöl eintauchender Glaskörper n die Dämpfung besorgt.

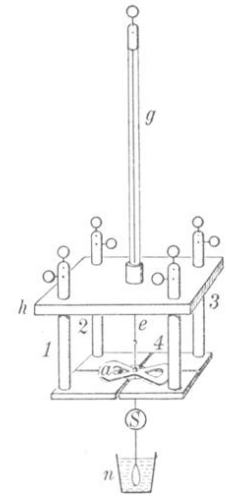


Fig. 371.

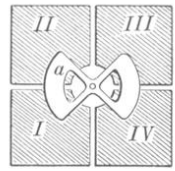


Fig. 372.

Man verbindet e mit einer z. B. positiven Elektrizitätsquelle von 100 bis 200 V, so daß also auch die Nadel a dauernd positiv geladen wird. Dann verbindet man durch einen (nicht gezeichneten) Draht die gegenüberliegenden Quadranten I und III untereinander und dauernd mit der Erde; des ferneren verbindet man auch II und IV und leitet sie zunächst zur Erde ab; so ist alles symmetrisch, die Nadel bleibt in Ruhe. Nimmt man aber für II und IV dann statt dieser Erdverbindung eine Verbindung mit einem, z. B. positiv geladenen Körper, so wird die durch das starke Hilfspotential geladene Nadel a sowohl vom positiven II als auch vom positiven IV abgestoßen und dreht sich. Die Ausschläge sind dem in II, IV angelegtem Potential proportional.

579. Hydrostatische Analogie der Kapazität. Den Begriff Kapazität soll uns eine hydrostatische Analogie näher rücken. Zwei Wassergefäße, eines ein schmaler, das andere ein breiter Zylinder, werden je mit der gleichen Wassermenge gefüllt; die Höhe des Wassers wird dann sehr

verschieden sein. Allgemeiner können wir sagen, daß für verschiedene Zylindergefäße, der Quotient $\frac{\text{Wassermenge}}{\text{erreichte Höhe}}$ sehr verschieden sein wird, und wir könnten von diesem Quotienten als eine Art Wasserkapazität sprechen. (Dieser Ausdruck wird nie gebraucht.)

Analog ist es mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge, die wir auf irgendeinen Körper bringen. Wenn man auf zwei verschieden große Kugeln je dieselbe Elektrizitätsmenge bringt, so wird das Potential auf der kleinen Kugel ein großes werden, auf der großen Kugel aber ein viel kleineres: man wird, um letztere Kugel zu demselben Potential aufzuladen, eine größere Elektrizitätsmenge brauchen.

580. Das Verhältnis $\frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{erreichtes Potential}}$ nennt man die **Kapazität** des betreffenden Körpers

Wenn man mit einer kleinen Probekugel eine große elektrisierte Kugel berührt (Fig. 356), erlangt die kleine Kugel das Potential der großen, da die beiden in leitender Verbindung stehen. Die Elektrizitätsmenge, die auf die kleine Probekugel übergeht, hängt ab von der Kapazität dieser Probekugel, wird also eine ganz bestimmte sein. Bringt man nun die so geladene Probekugel in Berührung mit einem Elektroskop, so gehen die Blättchen ein wenig auseinander. Macht man aber denselben Konvektionsversuch mit einer anderen, etwas größeren Probekugel, so geht auf diese Kugel viel mehr Elektrizität über, weil ihre Kapazität eine größere ist; berührt man das Elektroskop mit dieser größeren Kugel, so gehen nun die Blättchen viel weiter auseinander. (Ganz analog wäre der Fall, wenn man aus einer vollen Badewanne das eine Mal mit einem kleinen Gläschen, das andere Mal mit einem großen Glase Wasser in einen Meßzylinder überfüllte.)

Die Kapazität ist bei Kugeln direkt proportional dem Radius.

Die Kapazität wird im elektrostatischen Maßsysteme durch dieselbe Zahl ausgedrückt wie der Kugelradius, so daß eine Kugel, die z. B. 15 cm Durchmesser hat, auch eine Kapazität von 15 cm besitzt. Im praktischen Maßsystem ist die Kapazitätseinheit einer Kugel mit 1 cm Radius viel zu klein; man nimmt eine Kugel von 9×10^{11} cm Radius, deren Kapazität man ein „Farad" nennt. (Der millionste Teil heißt Mikrofarad.)

Im praktischen Maßsystem ist die Kapazitätseinheit ein „Farad" und es ist

Elektrizitätsmenge (in Coul) = Potential (in V) mal Kapazität (in Far).

Die Berechnung der Kapazität nicht kugelförmiger Leiter ist meist kompliziert.

Die Kapazität hängt nicht nur ab von der Form und Größe des Körpers,

sondern auch von seiner Umgebung. Diese Umgebung kommt in zweierlei Weise in Betracht:

581. Isolatoreinfluß. Wenn ein geladener Leiter sich nicht in Luft, sondern z. B. in Terpentinöl befindet, ist seine ponderomotorische Wirkung (§ 559) nur halb so groß. Es ist also auch die Arbeit, die man beim Nähern der gleichnamigen Elektrizitätseinheit zu leisten hat, halb so groß, oder das Potential des Körpers ist ohne Ladungsänderung auf die Hälfte gesunken. Oder allgemein: Dieselbe Elektrizitätsmenge erzeugt auf einem Leiter in einem Medium, dessen Dielektrizitätskonstante ε ist, ein Potential, das ε mal kleiner ist als in Luft, d. h. die Kapazität eines Leiters ist direkt proportional der Dielektrizitätskonstante des umgebenden Isolators.

582. Nachbarschaft geerdeter Körper. Wenn man in die Nähe eines geladenen Leiters A einen zweiten, geerdeten Leiter B bringt, so wird auf B influenzierte ungleichnamige Elektrizität sitzen. Die ponderomotorische Wirkung von A auf irgendeinen fernen Körper wird durch die entgegengesetzte Wirkung von B geschwächt; die Arbeit beim Nähern der Einheitsmenge oder das Potential wird kleiner. Oder allgemein: Die Kapazität eines Leiters wird durch die Nachbarschaft von anderen, geerdeten Leitern größer.

583. Plattenkondensator. Wenn ich z. B. eine mit einem Elektroskop verbundene Platte a (Fig. 373) positiv lade, so sitzt an der Platte a und am Elektroskop eine bestimmte Elektrizitätsmenge, und der Winkel des Elektroskopausschlages gibt ein Maß des erreichten Potentials. Nähere ich nun der Metallplatte a die geerdete Platte b, so fallen die Blättchen etwas zusammen, ein Beweis, daß das Potential gesunken ist. Da aber wegen der Isolierung von a keine Elektrizität weggehen kann, so muß durch die Annäherung von b die Kapazität von a vergrößert worden sein. Je mehr ich b an a annähere, desto mehr steigt die Kapazität, desto kleiner wird der Ausschlag des Elektroskopes. Entferne ich b wieder, so tritt der alte Zustand ein.

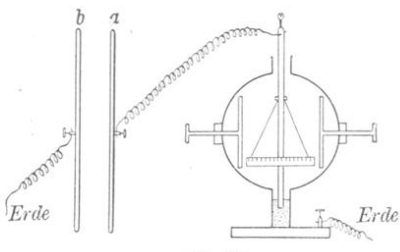


Fig. 373.

Die Kraftlinien, die von a, solange es allein ist, nach allen Seiten des Raumes gehen, rücken bei allmählicher Annäherung von b immer mehr in den Raum zwischen a und b. Die Elektrizität drängt sich auf der b gegenüberliegenden Fläche zusammen, wodurch gleichsam Platz für neue Elektrizität geschaffen und so eine Kapazitätsvergrößerung erreicht wird. Dies „Zusammenrücken“ des elektrischen Fluidums veranlaßte den Namen Kon-

densator. Bringt man b immer näher an a, so wird die Kapazität immer größer, und zwar fast genau umgekehrt proportional der Plattendistanz. Würde diese Null, so müßte die Kapazität unendlich werden; lange vorher aber würde die Dichte der positiven Elektrizität auf a und die der influenzierten negativen auf b so groß, daß Funkenentladungen einträten. Um solche Entladungen zu verhüten, schiebt man zwischen diese Platten feste Dielektrika, bringt sie ev. auch in Öl oder in verdichtete Luft, wodurch der Funkenaustritt erschwert wird.

Dabei ergibt sich ein weiterer Vorteil. Wenn die beiden Platten in einem Medium mit großer Dielektrizitätskonstante sind, steigt nach § 581 die kondensierende Wirkung. Da das elektrische Feld fast nur im Raum zwischen a und b entsteht, bringt man das Dielektrikum nur an diese Stelle; man schiebt zwischen a und b eine Platte aus Glas oder Hartgummi od. dgl.

584. Die Zahlen, die angeben, um wieviel die Kapazität durch Ersatz des isolierenden Mediums Luft durch Hartgummi oder Öl u. dgl. verstärkt wird, sind gleich der **Dielektrizitätskonstante** dieses Hartgummis oder dieses Öles usw. (§ 559).

Die Dielektrizitätskonstante ist von:

Vakuum	Luft	Hartgummi	Glas	Schwefel	Wasser
1	1,0006	2,8	4—10	3,5—4,6	81.

Die Dielektrizitätskonstante ist bei verschiedenen Glassorten verschieden; bei manchen Kristallen (z. B. Schwefel) hängt sie von der Kraftrichtung im Kristalle ab.

585. Kapazitätskasten. Will man bei kleiner Ausdehnung große Kapazität herstellen, werden eine Reihe von Metallplatten, durch Glimmer oder paraffiniertes Papier oder aber auch durch Öl getrennt, abwechselnd so wie in Fig. 374 angeordnet, wobei die positiven Schichten unter sich und ebenso die negativen Schichten unter sich verbunden sind. Man erhält dann ein kleines Kästchen mit zwei Anschlußstellen und die Kapazität solcher Kondensatoren kann leicht die einer Kugel von einigen 10000 m Radius erreichen. Oft sind mehrere Kapazitätsgrößen zur beliebigen Auswahl in einem einzigen Kasten vereinigt.

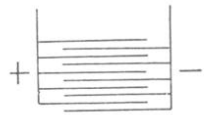


Fig. 374.

586. Legt man an einen gewöhnlichen Plattenkondensator größere Spannungsdifferenzen, 1000 V und mehr, an, so erfolgt ein Durchschlagen der isolierenden Platten durch einen Funken. Für solche große Spannungen benützt man **Leydnerflaschen** (Fig. 375a), dicke Glaszylinder g, innen und außen mit Staniol $s_1 s_2$ überzogen. Solche Flaschen werden bis zu Spannungen von 20000 V und mehr verwendet. Ihre Kapazität ist natürlich kleiner als die eines Glimmerkondensators.

Man nennt die Zusammenschaltung mehrerer Flaschen eine Flaschenbatterie. Man kann Flaschen parallel (Fig. 375b) oder in Serie (Fig. 375c) schalten. Fig. 375b wirkt wie eine Leydnerflasche mit doppelt so großen Belegungsflächen, während in Fig. 375c sich die Spannung auf beide Flaschen verteilt; wenn die einzelne Flasche also z. B. 20000 V Spannung, ohne durchgeschlagen zu werden, aushält, kann man die Anordnung Fig. 375c bis auf 40000 V aufladen.

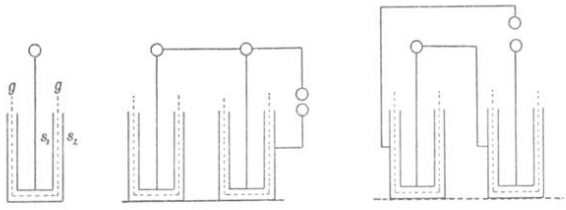


Fig. 375.

587. Kapazität des menschlichen Körpers. Da die umgebenden geerdeten Leiter die Kapazität aller isolierten Körper bedeutend ändern, sind auch die Angaben über die Kapazität des menschlichen Körpers sehr schwankend und eigentlich wertlos.

588. Elektrophor. Wenn man eine ebene Harzplatte stark reibt oder mit einem Fuchsschwanze peitscht, so wird diese negativ elektrisch. Eine dann daraufgelegte isolierte Metallplatte (Fig. 376) wird die Harzplatte nur an wenigen Punkten berühren, an denen dann direkt negative Elektrizität in die Metallplatte überströmt. Dies ist aber nur ein nebensächlicher Effekt. An allen anderen Stellen der Fläche, wo keine Berührung eintritt, bleibt die negative Elektrizität an der Harzplatte sitzen und zieht in der Metallplatte influenzierte positive Elektrizität an. Da die Metallfläche und die Harzfläche sehr nahe aneinander sind, ist diese Anziehung eine sehr kräftige. Die influenzierte gleichnamige Elektrizität wird abgestoßen. Berührt man nun die Metallplatte, während sie aufliegt, mit dem Finger, so wird die negative, abgestoßene Elektrizität zur Erde fließen; nach Entfernung des Fingers haben wir dann nur mehr an der unteren Fläche der Metallplatte die durch Influenz angezogene positive Elektrizität, welche durch die an der gegenüberstehenden oberen Fläche des Harzkuchens sitzende negative Ladung gebunden ist. Hebt man jetzt die Metallplatte vom Harzkuchen weg, so wird diese gebundene Elektrizität im Metall frei, da die Kapazität sehr verkleinert und die Spannung hierdurch erhöht wird. Aus dem abgehobenen Deckel kann man mit dem Fingerknöchel kräftige Funken ziehen.

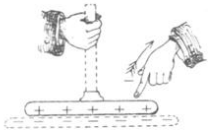


Fig. 376.

589. Ladungsenergie des Elektrophors. Diesen Vorgang: Auflegen, Ableiten, Aufheben, kann man beliebig oft wiederholen und

erhält so ganz beträchtliche Elektrizitätsmengen, die wir z. B. in Leydnerflaschen aufspeichern können. Dabei bleibt theoretisch die Ladung der Harzplatte ganz ungeändert und es entsteht die Frage, woher die Energie der elektrischen Ladungen, die sich ja in kräftigen Funken oder sonst irgendwie äußert, herstammt. Wenn ich die Metallplatte auf eine unelektrisierte Harzplatte auflege und entferne, so wird beim Herunterbewegen Arbeit gewonnen werden und ebendieselbe Arbeit werde ich wieder aufwenden müssen, um die Platte in die alte Entfernung zu bringen. Anders ist es aber beim Elektrophor. Ich werde dann beim Abheben, beim Wegziehen der positiv geladenen Platte von der negativen Harzplatte eine größere Arbeit leisten müssen, als ich beim Herunterbewegen gewinne, und diese Arbeitsdifferenz ist das Äquivalent der elektrischen Ladung.

590. Influenzmaschinen. Dieselbe Wirkung erhalten wir auch dann, wenn wir die Metallplatte von der Seite her auf die Harzplatte schieben, ohne dieselbe zu berühren; wenn wir nur im Momente, wo sie genau gegenüber der Harzplatte steht, für die Ableitung der abgestoßenen Elektrizität sorgen, werden wir stets nach Entfernung der Metallplatte die gewünschte Ladung auf ihr erhalten. Solche Maschinen, die aus einer Reihe von Elektrophoren auf einer rotierenden Glasscheibe zusammengesetzt sind, nennt man Influenzmaschinen.

Das vereinfachte Prinzip einer solchen Maschine, der Wimshurst-Maschine, gibt Fig. 377. An einer rotierenden Glasscheibe sind Staniolstreifen s geklebt (in der Zeichnung sind statt etlicher 30 nur 8 gezeichnet). Ein feststehender, vertikaler, metallischer Ausgleicher A verbindet zwei gegenüberliegende dieser Staniolsektoren, weil er in Spitzen endigend nach § 573 die Elektrizität aufsaugt. Hinter der Glasscheibe befindet sich eine zweite, fixe Glasscheibe mit gleich vielen Sektoren. Betrachten wir nur einen, den obersten Staniolsektor t dieser hinteren Scheibe (der wie die hintere Scheibe selbst etwas zu groß und punktiert gezeichnet ist). Es sei t (irgendwie von außen her) negativ elektrisiert, wie der Harzkuchen im Elektrophor. In dem obersten Sektor s, der dem t gerade gegenübersteht, wird die positive Elektrizität angezogen und die negative durch A nach dem diametral gegenüberstehenden untersten Sektor s abgestoßen.

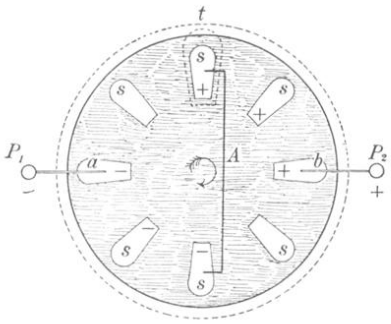


Fig. 377.

Beim Drehen in der gezeichneten Pfeilrichtung, wobei A ruhig bleibt, verläßt also der oberste Sektor s die höchste Stelle positiv geladen, der unterste Sektor s die tiefste Stelle aber negativ geladen. Diese + bzw. — Elektrizität

wird mittels schleifender, horizontal feststehender Metallpinsel b und a (oder mittels senkrecht gegen die Fläche stehender Spitzen) abgenommen und fließt zu P_2 und P_1, den Polen der Influenzmaschine.

Das gezeichnete System besteht also gleichsam aus 8 Elektrophordeckeln s und einem Harzkuchen t.

Um das Modell zu vervollständigen, müßte die hintere Scheibe auch acht Sektoren t haben und in entgegengesetzter Richtung rotieren. Es wirken dann auch die vorderen Sektoren s auf die hinteren t, wenn noch einige Hilfsverbindungen angebracht werden.

Wenn eine Influenzmaschine Elektrizität liefert, muß man immer Arbeit aufwenden, um die positiv geladenen Sektoren von den negativ geladenen wegzuziehen; es verwandelt sich also hier mechanische Energie in elektrische.

Das Potential zwischen den beiden Polen einer Influenzmaschine kann bis 100 000 V und mehr betragen, so daß selbst bei einer gegenseitigen Polentfernung von 20 cm und mehr kräftige Funken überspringen.

591. Einschaltung von Kondensatoren. Wenn wir die Influenzmaschine in einem bestimmten Tempo drehen und die Pole P_1 und P_2 einander nahe bringen, springt z. B. jede Sekunde je ein Funke über. Schaltet man nun parallel zur Funkenstrecke P_1P_2 (Fig. 378) einen Kondensator K, so muß die aus der Maschine zu P_1 hinfließende Elektrizität nicht nur den Pol P_1 laden, sondern auch den Kondensator füllen. Darum werden nun die Funken seltener, aber heller und kräftiger. Es geht jetzt in jedem einzelnen Funken viel mehr Elektrizität über, weil sich der Kondensator immer mit entlädt. Das Funkenpotential, die Spannungsdifferenz von P_2 und P_1 beim Funkenüberschlagen, ist aber in beiden Fällen gleich.

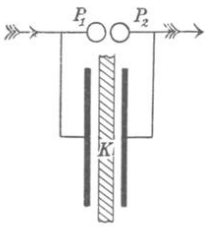


Fig. 378.

Diese Influenzmaschinen, die in den mannigfachsten Typen gebaut werden, haben die alten Reibungselektrisiermaschinen, in denen die Elektrizität durch Reiben einer Glasscheibe an Lederbacken erzeugt wurde, ganz verdrängt; letztere besitzen wohl nur mehr historischen Wert.

592. Unter **Franklinisation** versteht man die — immer seltener werdende — medizinische Verwendung solcher Influenzmaschinen. „Elektrische Douchen oder Brausen" sind zahlreiche Spitzen, von welchen hochgespannte Elektrizität gegen den Patienten ausströmt. Im „elektrostatischen Luftbad" hingegen steht der elektrisierte Patient auf einer isolierenden Unterlage (Sträuben der Haare, Hautspannung usw.). Viele der hier medizinisch angegebenen Verfahren sind physikalisch unverständlich und beruhen wohl nur auf Suggestivwirkungen.

2. Elektrochemie.

Chemische Folgen elektrischer Vorgänge.

593. Die **Elektrochemie** behandelt alle chemischen, d. h. stofflichen Veränderungen, die mit elektrischen Prozessen vereint auftreten, also alle elektrischen Vorgänge, welche chemische Veränderungen, und alle chemischen Vorgänge, welche elektrische Veränderungen bewirken, z. B. Stromzersetzung, elektrische Elemente[1]) usw.

Bei vielen elektrochemischen Prozessen treten kleine Potentialdifferenzen (1 bis 2 V), aber verhältnismäßig sehr große Elektrizitätsmengen auf (umgekehrt wie in Elektrostatik).

594. Elektrolytische Zersetzung. Verbindet man die beiden Pole einer Influenzmaschine (oder irgendeiner anderen Elektrizitätsquelle) durch einen Leiter, so durchfließt diesen ein „elektrischer Strom". Ist der durchströmte Leiter eine Flüssigkeit, so zeigt sich meist eine chemische Zersetzung; Flüssigkeiten, welche nur unter solchen chemischen Zersetzungen den Strom leiten können, heißen Elektrolyten. Fig. 379 zeigt die beiden Enden der metallischen Zuleitung, A und K, die „Elektroden", und zwar heißt A, die Eintrittsstelle des Stromes in die Flüssigkeit, die „Anode" und die Austrittsstelle K die „Kathode". Wir werden dieselben Bezeichnungen beim Durchgang der Elektrizität durch Gase wieder treffen. Die Elektroden können Drähte oder Platten von den verschiedensten Formen sein.

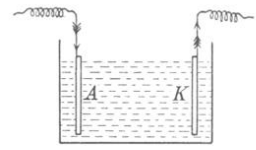


Fig. 379.

Die elektrolytischen Zersetzungen finden immer nur an den Elektroden statt. Es sei z. B. in Fig. 379 als Elektrolyt eine wässerige Lösung von Kupferchlorid $CuCl_2$ und als Elektroden Kohlenstäbe verwendet. Dann finden wir an der Anode Chlor, das in Gasform entweicht, und an der Kathode Kupfer, das diese Elektrode allmählich mit metallischem Kupfer überzieht. Aus wässerigen Lösungen von Metallsalzen führt der Strom das Metall immer zur Kathode (in der Stromrichtung). Man kann so die verschiedensten Metalle aus den Lösungen ihrer Salze durch Elektrolyse herausbekommen.

Auch viele geschmolzene Salze sind Elektrolyten. Geschmolzene

1) Gewöhnlich spricht man von „galvanischen" Elementen und auch der Titel dieses ganzen Abschnittes könnte „Galvanismus" lauten, da die Entwickelung dieses Gebietes auf eine Entdeckung Galvani's (1799) zurückgeht, die er selbst allerdings nicht richtig zu deuten vermochte; erst Volta erkannte das Wesentliche dieser Erscheinung; die Engländer gebrauchen hier oft den Ausdruck „Voltaismus".

Metallchloride liefern Chlor an der Anode und das Metall an der Kathode. So entdeckte H. Davy (1807) die Metalle der Alkalien.

595. Die **technische Verwendung** dieser Tatsachen ist mannigfaltig, z. B.:

Gewinnung von Metallen aus Lösungen oder Schmelzen (Magnesium u. bes. Aluminium, Kupferraffination usw.).

Überziehen von festen Leitern mit beliebigen Metallen, „Galvanostegie" (Vergolden, Versilbern usw.). Hier wäre besonders die Vernickelung für viele physikalische und medizinische Instrumente zu erwähnen.

Solche metallische Überzüge können auch so hergestellt werden, daß man sie nachher ablösen kann. Die „Galvanoplastik" liefert so plastische Abdrücke irgendwelcher leitender oder oberflächlich leitend gemachter Formen.

596. In vielen Fällen werden aber die Bestandteile der gelösten Substanz nicht direkt ausgeschieden, sondern es kommt zu **sekundären chemischen Prozessen.** Nehmen wir z. B. eine sehr verdünnte wässerige Lösung von Kaliumsulfat K_2SO_4, so wird das Metall 2K an der Kathode frei werden und SO_4 an der Anode. Beide können aber für sich in Wasser nicht bestehen und wie das Kalium an der Kathode frei wird, bildet es nach der Formel

$$2K + 2H_2O = 2KOH + H_2,$$

Kaliumhydroxyd und freien Wasserstoff. Ersteres geht in Lösung, letzterer entweicht. SO_4 kann an der Anode gleichfalls nicht bestehen und wird nach der Formel

$$2H_2O + 2SO_4 = 2H_2SO_4 + O_2$$

Schwefelsäure bilden, die in Lösung geht, und Sauerstoff, der aufsteigt.

597. Wasserzersetzung. Wenn wir also durch eine Kaliumsulfatlösung den Strom durchleiten, so sieht es so aus, als ob das Wasser zerlegt würde. Es steigt ein bestimmtes Gasvolumen Sauerstoff an der Anode und ein doppelt so großes Gasvolumen Wasserstoff an der Kathode in die Höhe. Ähnliches geschieht, wenn wir den Strom durch eine Lösung von Schwefelsäure H_2SO_4 durchleiten, 2H gehen zur Kathode und entweichen dort als Wasserstoff, H_2, indes das SO_4 an der Anode als H_2SO_4 in Lösung geht und O_2 frei wird. Die Zersetzung des angesäuerten Wassers durch den Strom ist also eigentlich keine Zersetzung des Wassers, sondern eine Zersetzung der im Wasser gelösten Schwefelsäure. Durch absolut reines Wasser ginge der Strom überhaupt nicht hindurch.

598. Dissoziationstheorie. Wir werden alle diese elektrolytischen Erscheinungen qualitativ und quantitativ am besten überblicken, wenn wir

zuerst ein theoretisches Bild dieses Gebietes gewinnen; dann erst wollen wir weitere Folgerungen dieser Theorie an vorhandenem Tatsachenmateriale prüfen.

Löst man irgendeine Säure, eine Base oder ein Salz, z. B. Kochsalz Na Cl in Wasser, so wird nach Arrhenius (1887) ein von der Konzentration abhängiger Teil dissoziieren. Bei geringer Konzentration dissoziiert eventuell auch alles. Es sind dann in der Flüssigkeit nicht Na Cl-Moleküle, sondern Na-Atome und Cl-Atome; diese Na- und Cl-Atome sind aber keine gewöhnlichen chemischen Atome, jedes Na-Atom ist vielmehr mit einer ganz bestimmten Menge positiver Elektrizität verbunden und jedes Cl-Atom mit ebensoviel negativer Elektrizität.

599. Ionen. Nehmen wir nun an, daß auch das elektrische Fluidum aus Atomen besteht und zwar aus positiven und negativen. Erstere bezeichnen wir mit ⊕, letztere mit ⊖. Dann können wir die Dissoziationshypothese dahin ausdrücken, daß ein Na Cl-Molekel bei Lösung in viel Wasser sich in Na ⊕ und Cl ⊖ spaltet. Diese Verbindung von elektrischen mit körperlichen Atomen (oder Atomgruppen) nennt man Ionen. Das Ion Na ⊕ ist ohne Wirkung auf das H_2O, während das Atom Na die heftigsten Zersetzungen hervorrufen würde. Eine Suppe, die wir salzen, riecht darum nicht nach Chlor, weil das Chlorion Cl ⊖ ganz anders wirkt als das Atom Cl oder das Molekel Cl_2. Solche Dissoziationen finden auch beim Lösen von Säuren und Basen in Wasser statt. Schwefelsäure H_2SO_4 z. B. wird in wässerigen Lösungen sich zersetzen in positive Wasserstoffionen H ⊕ und in negative Ionen HSO_4 ⊖. Nur in sehr verdünnten Lösungen tritt auch ein Zerfall in H ⊕ + H ⊕ + SO_4 ⊖$_2$ ein.

Andere Beispiele wären: Chlorwasserstoff H Cl dissoziiert in positive Wasserstoffionen H ⊕ und negative Chlorionen Cl ⊖, Natriumhydroxyd Na OH dissoziiert in positive Natriumionen Na ⊕ und negative Hydroxylionen OH ⊖; Silbernitrat Ag NO_3 dissoziiert in Ag ⊕ und NO_3 ⊖ usw.

600. Ionenwanderung. Alle diese Dissoziationen finden statt, ohne daß ein elektrischer Strom durch die Flüssigkeit geht. Stellt man aber in eine solche Flüssigkeit zwei Elektroden, von denen die eine mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pole einer Stromquelle (Influenzmaschine oder elektrisches Element) verbunden ist, so muß eine Ionenwanderung eintreten; die negativ geladenen Ionen, z. B. Cl ⊖ oder SO_4 ⊖$_2$ oder OH ⊖ oder NO_3 ⊖ usw., die sog. „Anionen" gehen zur Anode; die positiv geladenen Ionen, meistens Metall- oder Wasserstoffionen, die sog. „Kationen" gehen zur Kathode An diese Elektroden gibt jedes seine elektrischen Atome, ⊕ oder ⊖, ab und wird dadurch wieder zum chemisch wirksamen Atom (oder Atomgruppe).

An der Anode werden also immer negative Elektrizitätsatome ⊖ frei

und an der Kathode positive ⊕. Wie diese Elektrizitätsatome im Metalle weiterwandern oder mit anderen Worten, über das Wesen der metallischen Leitung werden wir § 773 sprechen. Für das Verständnis der elektrolytischen Leitung sei nur folgendes vorweggenommen. Man konnte bisher nur das negative Elektrizitätsatom isolieren und nannte es „Elektron" (§ 747). Das ⊕ aber hat man noch nicht gefunden; vielleicht existiert es gar nicht. Die Dissoziation z. B. des Silbernitrates $AgNO_3$ in $NO_3 \ominus$ und $Ag \oplus$ wäre nach diesem derzeitigen Stand unserer Kenntnisse zu denken: (NO_3 mehr einem Elektron), d. i. $NO_3 \ominus$, und (Ag weniger einem Elektron), d. i. $(Ag - \ominus)$ oder $Ag \oplus$.

Wir haben also im Elektrolyten bei Stromdurchgang zwei entgegengesetzte, wegen der großen Reibung der Ionen gegen das Wasser sehr langsam ziehende Ionenprozessionen.

Wasser selbst kann, wenn es keine Ionen enthält, Elektrizität nicht leiten, denn in einem Elektrolyten erfolgt das Strömen der Elektrizität nur durch Konvektion mittels Jonen, nicht durch Leitung.

601. Die Dissoziationstheorie findet eine wichtige Stütze in der schon erwähnten Tatsache, daß der **osmotische Druck in wässerigen Lösungen** stets größer ist, als man nach der Anzahl der Salzmolekel erwarten sollte. Bei sehr wenig konzentrierter Na Cl-Lösung z. B. ist der osmotische Druck doppelt so groß, als der aus der Molekelanzahl berechnete, weil ja jedes Molekel gleichsam in zwei neue Molekel, die Ionen $Na \oplus$ und $Cl \ominus$ zerfallen ist. Bei sehr stark verdünnter Kaliumsulfat K_2SO_4-Lösung ist der osmotische Druck dreimal so groß, weil hier ein Zerfall in $K \oplus + K \oplus + SO_4 \ominus_2$ eintritt. Nach Arrhenius gibt es nur dann erhebliche elektrolytische Leitfähigkeit, wenn osmotischer Druck, daher auch Gefrierpunktserniedrigung und Siedepunktserhöhung experimentell größer gefunden werden, als sich nach der Avogadro'schen Regel und nach der Theorie von van't Hoff ergibt (§ 306).

Aber nicht nur Wasser hat ein derartiges Dissoziationsvermögen, auch eine Reihe von anderen Flüssigkeiten, z. B. Alkohol oder verflüssigtes Ammoniak usw.

Diese Dissoziationskraft ist sehr verschieden, je nach dem Lösungsmittel und dem gelösten Körper. Die Anzahl der ionisierten Molekel ergibt sich entweder aus Beobachtung des osmotischen Druckes oder besser aus der Leitfähigkeit. Die dissoziierende Kraft des Wassers als Lösungsmittel steht unter allen Flüssigkeiten weit obenan (vielleicht wegen der hohen Dielektrizitätskonstante).

602. Ionentheorie in Chemie und Physiologie. Die Ionentheorie spielt auch in der Chemie eine immer größere Rolle. Ostwald und andere zeigten nach verschiedenen Methoden, daß viele chemische Erscheinungen von dem Dissoziationsgrade abhängig sind. So hängt z. B. die früher so rätselhafte Stärke

einer Säure oder Base von ihrem Dissoziationsgrade ab; starke Säuren (Salzsäure, Schwefelsäure) und starke Basen (Natriumhydroxyd) dissoziieren besonders stark. Die anorganische Chemie wässeriger Lösungen ist im wesentlichen eine Chemie der darin enthaltenen Ionen. Besonders in der analytischen Chemie werden viele Erscheinungen qualitativ und auch quantitativ leichter verständlich.

Die kornblumenblaue Farbe aller verdünnten Kupfersalzlösungen z. B. entsteht, weil in allen diesen Lösungen positive Kupferionen sind. Ferner sind nach dieser Theorie alle Sulfatlösungen mit Baryumsalz zu $BaSO_4$ fällbar, weil überall dieselben negativen SO_4-Ionen da sind. Ebenso sollen alle Chininsalze bitter schmecken, weil das positive Chininion so schmeckt; in allen salizylsauren Salzen wirkt vielleicht das negative Salizylsäureion, in allen Blausäuresalzen das negative Cyanion usw. Wenn alle ungiftigen Na-Salze unabhängig von der Art des sauren Radikals bei Muskelerregungen gleich wirken, soll dies immer vom positiven Natriumnion herrühren usw. Von vielen Chemikern aber wird diese eben an einigen Beispielen dargestellte Spezivität der Ionenwirkung als zuweitgehend angefochten.

603. Wasserstoff und Hydroxyl-Ionen. Durch Wasser gehen nur bei hohen Potentialdifferenzen, also bei großem elektrischem Druck minimale Elektrizitätsmengen durch; solche Verhältnisse ließen uns Wasser für elektrostatische Experimente (§ 549) als Leiter erscheinen. Im Vergleich aber mit Salzlösungen leitet reines Wasser kaum. Aber selbst diese schlechte Leitung verlangt die Anwesenheit von Ionen; es sind immer einige wenige Wassermolekel in positive Wasserstoff-Ionen $H\oplus$ und in negative Hydroxyl-Ionen $HO\ominus$ dissoziiert.

604. Das in § 596 geschilderte elektrolytische Auftreten von Säuren an der Anode und Alkali an der Kathode findet in wässerigen Lösungen von den meisten Salzen der Alkalien statt und wird in der **„chirurgischen Elektrolyse“** verwendet, um Haare oder Muttermale, Nasenpolypen, Strikturen usw. zu entfernen, indem man entsprechend geformte Elektroden an die Haut legt oder in die Nase, Harnröhre usw. einführt. Die um die Anodensonde herum entstandene saure Flüssigkeit wirkt koagulierend und blutstillend, indes das an der Kathodensonde auftretende Alkali die Gewebe zum Quellen bringt und verflüssigt. Macht man eine dieser Elektroden (an beliebiger Körperstelle) groß, so ist ihre Wirkung gegen die der Sonde verschwindend.

605. Faraday's Gesetze. Lange vor Aufstellung der Dissoziationshypothese hatte Faraday (1833) schon experimentell seine Fundamentalgesetze der Elektrolyse entdeckt.

1. Die an den Elektroden ausgeschiedenen Stoffmengen ein und desselben Elektrolyten sind den durchgegangenen Elektrizitätsmengen proportional.

2. Die durch gleiche Elektrizitätsmengen abgeschiedenen Stoffmengen verhalten sich bei verschiedenen Elektrolyten wie

die Äquivalentgewichte der abgeschiedenen Stoffe. „Äquivalentgewicht" ist jene Gewichtsmenge, welche sich mit 1 Atom H zu verbinden oder 1 Atom H in einer Verbindung zu ersetzen vermag. Diese Zahl ist gleich $\frac{\text{Atomgewicht}}{\text{Wertigkeit}}$; es ist also eine Verhältniszahl wie das Atomgewicht. Für Sauerstoff ist diese Zahl z. B. 8, weil in H_2O auf 1 H nur 8 O kommen.

Unter „Grammäquivalent" hingegen versteht man das Äquivalentgewicht in g. Für O wäre dies also 8 g.

Beide Gesetze von Faraday sind, wie wir sehen werden, nach Arrhenius unmittelbar selbstverständlich.

Zunächst ist klar, daß, wenn immer die gleiche Anzahl positiver und negativer Jonen an den Elektroden abgeschieden werden, dieselben Elektrizitätsmengen durch einen Elektrolyten gegangen sind.

Wenn wir z. B. durch eine wässerige Silbernitratlösung ($Ag\,NO_3$) verschieden starke Ströme hindurchgehen lassen, so wird, so oft ein Ion Ag ⊕ an die Kathode kommt, gleichzeitig mit der Elektrizitätsmenge ⊕ auch ein Atom Ag abgeschieden. Wie viele Atome Ag auch an der Kathode landen, es muß immer die Anzahl der auftretenden positiven Elektrizitätsatome gleich sein der Anzahl der niedergeschlagenen Atome. Das entspricht dem ersten Gesetz.

606. Silbervoltameter. Darum können wir auch durch die Abscheidung eines Metalles, z. B. Silber, die hindurchgegangene Elektrizitätsmenge messen. Man nimmt einen Platintiegel, gefüllt mit wässeriger Silbernitratlösung, als Kathode; die Anode ist ein eintauchendes Silberröhrchen, unten mit Zeug umwickelt, um ein Abfallen von Metall zu verhindern. Die Gewichtszunahme des Platintiegels ist dem durchgegangenen Strom proportional und kann direkt zur Bestimmung seiner Stärke benützt werden.

607. Stromstärke, Ampère. Wir wollen die pro sek durch irgendeinen Querschnitt des Leiters fließende Elektrizitätsmenge als „Stromstärke" (oder „Stromintensität") bezeichnen. (Es wäre das analog den Sekundenlitern einer Wasserleitung, eine Art Sekunden-Elektrizitätsmenge.)

Man nennt im „praktischen Maßsystem" jene Stromstärke, welche in einer Stunde 4 g Ag ausscheidet (genauer 4,025) ein Ampère oder A. In einer Sekunde scheidet derselbe Strom $\frac{4{,}025\ \text{g}}{60 \times 60}$ oder 0,001118 g Ag aus. Diese Zahl, von F. und W. Kohlrausch und Lord Rayleigh auf das genaueste bestimmt, liefert also die Definition der gebräuchlichen praktischen Stromeinheit, des „Ampère".

Wenn 1 A genau eine sek fließt, so nennt man die durchflossene Elektrizitätsmenge ein „Coulomb" Dieses Coul ist (§§ 557, 580 usw.) im

„praktischen Maßsystem“ die Einheit der Elektrizitätsmenge. Fließt ein konstanter Strom von n A während t sek, so ist eine Elektrizitätsmenge von $n \cdot t \cdot$ Coul oder nt Ampère Sekunden durch jeden Querschnitt des Leiters gegangen.

Die eben gegebene Definition ist eine Folge vieler und tiefgehender praktischer und theoretischer Überlegungen. Sie ermöglicht eben das für den praktischen Gebrauch ungemein bequeme „praktische“ Maßsystem.

608. Valenzladung. Nach der Definition des A sind, um 108 g Silber (Atomgewicht 108) abzuscheiden, $\frac{108}{0{,}001118}$ A sek nötig, d. h. ca. 97000 Coul. Hier liefert jedes ⊕, das an der Kathode landet, ein Atom Ag.

Elektrolysiert man, um ein anderes Beispiel anzugeben, eine wässerige Kupfersulfatlösung ($Cu\,SO_4$), so sind die Kationen hier Cu ⊕⊕, weil das Kupfer zweiwertig ist, d. h. je 2 ⊕ liefern an der Kathode ein Kupferatom (Atomgewicht 64) ab; ein ⊕ liefert also gleichsam nur ein halbes Atom, während beim einwertigen Silber jedes ⊕ ein ganzes Atom liefert. Geht also dieselbe Elektrizitätsmenge zuerst durch eine $Ag\,NO_3$ und dann durch eine $Cu\,SO_4$ Lösung hindurch, so langen natürlich in beiden Fällen gleich viele ⊕ an ihren Kathoden an. Diese liefern aber pro 97000 Coulomb im ersteren Falle 108 g Ag, im zweiten Falle 64/2 g Cu als Abscheidung.

Darum kann man die beiden Faradaygesetze auch zusammen so aussprechen: 97000 Ampèresekunden (oder Coulomb) liefern an jeder Elektrode je ein Grammäquivalent. 97000 Coul. heißt die Valenzladung.

Obige Zahlen sind abgerundet; je 96540 Ampèresekunden oder Coulomb scheiden ab in g z. B.:

an der Kathode 1,008 Wasserstoff oder 107,93 Silber oder 63,6/2 Kupfer usw.
an der Anode 35,45 Chlor oder 126,85 Jod oder 16,00/2 Sauerstoff usw.

97000 A sek heißt z. B. 97000 A während 1 sek oder 1 A während 97000 sek oder 97 A während 1000 sek usw.

609. Faraday beobachtete die wirklich erfolgten elektrolytischen Ausscheidungen. Erst später (1853—1859) beobachtete Hittdorf, daß bei Stromdurchgang durch Elektrolyten überdies in der Nähe der Elektroden **Konzentrationsänderungen** stattfinden.

Kationen und Anionen sind nie gleich groß und bei gleicher Triebkraft ist daher die Reibung im Wasser verschieden. Die im Elektrolyten gegeneinander ziehenden Ionenwanderungen finden also sehr ungleich rasch statt, während die Ausscheidung an den Elektroden nach Faraday gleich sein muß. Daraus folgt unmittelbar eine Anstauung der leicht beweglichen Ionen auf der einen Seite, wo auch die schwerer beweglichen Ionen im Überschusse zurückbleiben.

Wenn in einem Ballsaale bei einer Kotillonfigur z. B. die Herren rasch gegen eine Tür I eilen, und die Damen langsamer gegen eine gegenüberliegende Tür II, entspräche dies der ungleichen Ionenbeweglichkeit; wenn nun immer gleichzeitig je ein Herr durch I und je eine Dame durch II den Ballsaal verließe, entspräche dies dem Faraday'schen Gesetze, und wenn dadurch auf der Seite I eine Stauung der rasch gegen I geeilten Herren und der Damen, die zu langsam gegen II gegangen sind, eintritt, ergibt sich eine Anhäufung der Paare in der Nähe von I. Analoge Betrachtungen ergeben im Elektrolyten Konzentrationszunahme bei der einen und Konzentrationsabnahme bei der anderen Elektrode.

Man kann aus diesen Konzentrationsänderungen auf die Ionengeschwindigkeit schließen, die nur nach Bruchteilen von cm (je nach Stromstärke und Elektrolyt verschieden) zählt.

610. Physiologische Reizung. Durch Erzeugung von solchen Ionenverschiebungen und Konzentrationsänderungen wirkt nach Nernst der elektrische Strom auf bestimmte Stellen des Organismus. Überschreitet hier die elektrolytisch bewirkte Konzentration eine bestimmte Größe, so wird die Reizschwelle erreicht, es tritt physiologische Wirkung ein (§ 730).

611. Elektrische Kataphorese darf mit Elektrolyse nicht verwechselt werden, wenn auch einige Ähnlichkeit vorhanden ist.

Fig. 380 zeigt eine enge mit Wasser gefüllte Tonröhre t. (Der Übersichtlichkeit wegen ist diese Röhre viel zu weit gezeichnet.) Leitet man hier einen Strom durch, so hebt sich die Flüssigkeit bei K etwas in die Höhe (Quincke). Das geschieht besonders bei Wasser und bei schlecht leitenden Flüssigkeiten. Zur Erklärung dieser Erscheinung stellte Helmholtz die Hypothese auf, daß die Tonröhre durch die Berührung mit Wasser, welches positiv wird, sich negativ ladet. Ein Strom muß dann die positiv geladenen Wasserteilchen in der Stromrichtung weiterschieben, wie dies der Versuch ergibt.

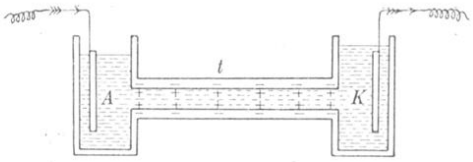


Fig. 380.

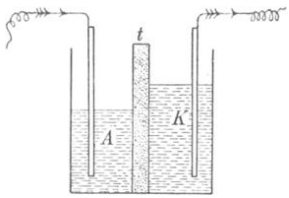


Fig. 381.

Viel auffallender wird die Erscheinung (Fig. 381), wenn wir durch eine poröse Tonplatte t, die gleichsam sehr viele enge horizontale Kapillarröhrchen darstellt, ein mit einer Lösung gefülltes Gefäß in zwei Teile trennen. Hier wird das ganze Lösungsmittel und gleichzeitig das Gelöste durch das Diaphragma in der Stromrichtung hindurchgepreßt, die Flüssig-

keit steht nach kurzer Zeit im rechten Teile höher. Wir haben hier nicht wie bei der Elektrolyse eine gegenseitige Ionenwanderung, sondern eine einseitige Wanderung der gesamten Flüssigkeit.

612. Eine besondere Anwendung der Kataphorese in der Elektrotherapie ergeben die **elektrischen Bäder.** In Fig. 382 ist z. B. A und B eine Porzellanwanne, gefüllt mit irgendeiner Lösung. Der Strom tritt durch die Kohlenplatte K_1 nach A, geht aus der Lösung in den Körper, tritt aus diesem nach B und geht durch die Kohlenplatte K_2 wieder weiter. Bei leitenden Flüssigkeiten überwiegt wohl die elektrolytische Ionenwanderung durch die Haut, bei schlecht leitenden Bädern aber tritt Kataphorese ein, d. h. es geht die ganze Lösung durch die Haut. Man kann so Jod, Quecksilber, Kokain, Radium-Emanation usw. elektrisch dem Organismus zuführen. Die Applikation solcher Bäder ist natürlich auch durch die Beine und in verschiedenen Modifikationen möglich. Man kann aber auch mit aufgesetzten Elektroden arbeiten, die mit in Lösung getränkten Flanellstreifen umwickelt sind.

Fig. 382.

613. Auch **Kolloide** laden sich durch Berühren mit Flüssigkeiten elektrisch. Der Strom schiebt sie also in bestimmter Richtung, d. h. sie **zeigen elektrische Kataphorese.** Das verschiedene Vorzeichen der Ladung ist durch diesen Vorgang selbst leicht zu bestimmen.

Solche Kataphoresen werden wohl bei verschiedenen physiologischen Vorgängen mitspielen. Rote und weiße Blutkörperchen des Menschen wandern je nach der Flüssigkeit, in der sie in Suspension sind, zur Kathode oder Anode; auch der Galvanotropismus, das Einstellen mancher organischer Gebilde in die Stromrichtung, gehört vielleicht in dieses Kapitel.

Beim Vermischen kolloidaler, sog. „Pseudolösungen", fällen sich naturgemäß jene Kolloide zusammen aus, welche entgegengesetzt geladen sind. Man kann Ausfällungen oder Ausflockungen von Kolloiden auch durch Zusatz von entgegengesetzt geladenen Ionen bewirken. Eine Kieselsäuresuspension wird z. B. durch minimalen Zusatz von gut leitender Salzsäure ausgefällt.

Dieses in letzter Zeit gut durchgearbeitete Gebiet der Kolloidchemie ist auch physiologisch von größter Wichtigkeit. Auch in Bakteriensuspensionen, in eiweißhaltigen Flüssigkeiten usw. finden durch andere Kolloide oder durch Elektrolyten Ausflockungen oder Koagulierungen statt. Bei Nerven- und Muskelreizung, bei Wirkung von Immunserum, bei der Wirkung von Toxin und Antitoxin usw. sind wohl überall ähnliche Vorgänge im Spiel.

Elektrische Folgen chemischer Vorgänge.

614. Konzentrationsketten. Denken wir uns eine konzentrierte Salzsäurelösung (H Cl) und darüber eine verdünnte (Fig. 383). Es findet dann eine Diffusion von H Cl nach aufwärts durch das Lösungsmittel H_2O hindurch statt. Nun diffundieren aber, wie wir jetzt wissen, die Ionen. Es gehen hier die rascheren positiven H-Ionen schneller von B nach A als die langsameren negativen Cl-Ionen. A wird so positiv und B, in dem ein Überschuß von negativen Cl-Ionen zurückbleibt, wird negativ. Wenn wir zwei neutrale Elektroden, z. B. Kohlen, a und b einführen, die außen durch einen Leiter L verbunden sind, so fließt dann die positive Ladung der in A überschüssigen H-Ionen durch aLb nach B, die negative Ladung der in B überschüssigen Cl-Ionen durch bLa nach A; dadurch werden die entsprechenden Ionen entladen und gehen in elementares H_2 und elementares Cl_2 über, die entweichen. Ein Strom von konstanter Stärke entsteht durch diesen Vorgang deshalb, weil in jeder Zeiteinheit die gleiche Zahl überschüssiger H-Ionen nach A kommt und auch die gleiche Zahl überschüssiger Cl-Ionen in B zurückbleibt. Der Strom dauert so lange in immer abnehmender Stärke, bis der Konzentrationsunterschied sich immer mehr und mehr ausgeglichen hat. Das Potential von A und B sei P_a und P_b. Es muß sein $P_a > P_b$, weil ja der Strom immer von Orten höheren Potentiales zu Orten niederen Potentiales fließt mit Ausnahme jener Trennungsfläche, wo eben die elektromotorische Kraft wirkt, welche die Potentialdifferenz $P_a - P_b$ immer wieder herstellt. So fließt auch Wasser in einer Leitung stets von höheren Punkten zu tieferen; an einem Punkte aber muß eine Pumpe oder dgl. stehen, welche Wasser wieder in das hochgelegene Reservoir hinaufpumpt. Dieses „Hinaufpumpen" der Elektrizität auf ein höheres Potential besorgt in unserem Falle der Konzentrationsketten die Diffusion.

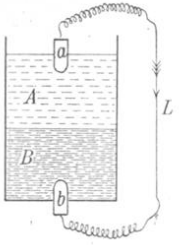


Fig. 383.

In Fig. 383 hätten wir auch die festen Leiter a, L, b durch flüssige Leiter ersetzen können, und man hat in der Tat allein aus Flüssigkeiten Ketten hergestellt, in denen die elektromotorische Kraft nur durch die verschiedenen Diffusionsgeschwindigkeiten erzeugt wird. Die betreffende mathematische Theorie ist besonders von Nernst ausgearbeitet worden und ihre Resultate stimmen mit den Tatsachen überein.

Da im Organismus nirgends metallische Leiter sind, haben solche Konzentrationsströme für die Physiologie die allergrößte Bedeutung. Die elektrischen Ströme, die im Organismus entstehen, müssen durch solche ungleiche Ionenwanderungen veranlaßt sein.

615. Überall, wo Metalle Flüssigkeiten berühren, entstehen elektrische Kräfte, welche nach Nernst sich folgendermaßen erklären lassen:

Wenn ein Metall in eine Flüssigkeit gebracht wird, so gehen von der Oberfläche des Metalles positive Ionen in die Flüssigkeit hinein; befindet sich z. B. ein Zinkstab in verdünnter Schwefelsäure, so entwickelt sich eine **elektrolytische Lösungstension**, d. h. es gehen positive Zinkionen in die Schwefelsäurelösung hinein, welche dadurch positiv elektrisch wird, indes der Zinkstab infolge Abgangs der positiven Elektrizität negativ elektrisch werden muß. Diese Potentialdifferenz zwischen dem negativen Metall und den positiven in der Flüssigkeit befindlichen Metallionen ergibt eine der Lösungstension entgegengesetzte Anziehung; ebenso drückt auch der osmotische Druck diese Ionen zurück. Es wird sich also bald ein ganz bestimmter Gleichgewichtszustand, eine bestimmte Potentialdifferenz zwischen Metall und Flüssigkeit herstellen.

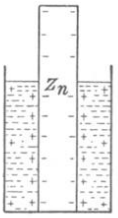


Fig. 384.

Das Metall ist an der Oberfläche negativ geladen; ihm gegenüber sitzt in der Flüssigkeit positive Ladung (Fig. 384). Das Ganze ist eine Art Leydnerflasche, die innen negativ und außen positiv geladen ist. Man nennt eine derartige Erscheinung eine elektrische Doppelschicht.

616. Elektrisches Element. Wenn wir in verdünnte Schwefelsäure einen Zinkstab und einen Kohlenstab tauchen, so wird der Kohlenstab nicht angegriffen, er hat keine Lösungstension, wir haben daher nur eine Potentialdifferenz an der Stelle, wo der Zinkstab mit der Flüssigkeit in Berührung ist. Es wird daher der Zinkstab negativ, indes die positiven Ionen in der Flüssigkeit gegen die Kohle getrieben werden und dort, die Kohle positiv machend, sich entladen. Verbinden wir Zink und Kohle außen mit einem Draht, so fließt positive Elektrizität dauernd durch diesen äußeren Verbindungsdraht von der Kohle zum Zink. Von zwei in eine elektrolytische Flüssigkeit getauchten verschiedenen Metallen liefert jedes eine gegen die Flüssigkeit verschiedene Potentialdifferenz (oder elektromotorische Kraft) an den herausragenden Enden, den Polen, die also auch gegen einander eine Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft (oder Spannung) haben müssen. Eine solche Vorrichtung heißt elektrisches oder galvanisches oder Voltaelement (s. Anm. § 593).

617. Wenn wir durch eine wässerige Zinksulfat-($ZnSO_4$)Lösung mittels zweier Platinelektroden einen Strom leiten, wird die Kathode nach und nach mit Zink überzogen, indes an der Anode Sauerstoff aufsteigt. An diesem Zn-Überzug tritt aber eine Lösungstension ein; es wird eine elektromotorische Kraft in entgegengesetzter Richtung entstehen, die den durchgehenden Strom schwächt und die auch bestehen bleibt, wenn der „polarisie-

rende" Strom ausgeschaltet wird. **Elektrolytische Polarisation** ist also die durch den Strom selbst bewirkte chemische Veränderung der Elektrodenoberflächen, welche eine elektromotorische Kraft in der Gegenrichtung erzeugt.

Ein anderes Beispiel liefern uns zwei Platinelektroden in verdünnter Schwefelsäure. Geht hier ein Strom einige Minuten durch, so überzieht sich die Kathode mit Wasserstoff, die Anode mit Sauerstoff. Der Strom hat auch hier ein in entgegensetzter Richtung wirkendes Element erzeugt, Sauerstoff — Flüssigkeit — Wasserstoff. Der Wasserstoffüberzug des Platins wirkt ganz wie früher der metallische Zn-Überzug.

Daß die Polarisation einen ladenden Strom schwächt, ist ganz natürlich; denn, würde sie ihn verstärken, so ginge das immer weiter so fort, der Strom würde von selbst unendlich groß, was dem Gesetz der Erhaltung der Energie widerspräche.

Die Polarisation spielt bei elektrischen Elementen eine hindernde Rolle. Wenn wir ein Element Zn — H_2SO_4 — C durch einen Draht schließen, so zersetzt der entstehende Strom die eigene Bahn. Dadurch, daß in diesem Element durch die Lösungstension immer neue Zn-Ionen in Lösung übergehen, werden die H-Ionen gegen die Kohle hingedrängt, geben hier ihre positive Ladung ab, Wasserstoff wird zum Teil frei, zum Teil aber wird er von der Kohle absorbiert und schwächt durch die elektromotorische Gegenkraft seiner Lösungstension den Strom. Das Element wird infolge dieser inneren Polarisation immer schwächer, es ist inkonstant.

Bei Konstruktion eines galvanischen Elementes ist diese Polarisation, welche meistens im Auftreten von H_2 besteht, zu verhindern.

618. Zambonisäule. Schaltet man elektrische Elemente so hintereinander, daß immer der positive Pol des einen Elementes mit dem negativen des nächsten verbunden ist, so addieren sich die elektromotorischen Kräfte (siehe weiteres darüber § 648). Man nennt eine solche Zusammenstellung elektrische oder galvanische Batterie, auch galvanische Säule.

Die Zambonisäule besteht aus etwa 1000 bis 2000 Elementen. Man nimmt sog. Gold- und Silberpapier, d. h. Papier mit dünnem Überzug von Kupferbronze, resp. Zinn Diese zwei Bogen werden mit der Papierseite aneinander geklebt und Scheiben mit ca. 3 cm Durchmesser herausgestanzt. Dann legt man diese Scheibchen so aufeinander, daß immer eine Sn-Seite auf der Cu-Seite des vorhergehenden aufliegt. Da jedes Papier immer etwas feucht ist, haben wir viele Elemente (Cu — Feuchtigkeit — Sn) hintereinander geschaltet. Das äußerste Sn ist der negative Pol.

Eine solche Trocken-Säule (Länge etwa 20 cm) kann leicht 400 bis 500 V Spannung liefern. Würde man hier die beiden Endklemmen durch einen Draht verbinden, so würde der auftretende Strom bald durch

die verursachte Polarisation die Säule unbrauchbar machen. Darum darf man diese nur für die Abgabe kleiner Elektrizitätsmengen, z. B. nur für Ladungen kleinerer Kapazitäten verwenden. Wenn man das eine Sn-Ende einer solchen Säule mit der Gasleitung oder noch besser mit der Wasserleitung verbindet, so ist dieser Pol geerdet; er hat das Potential Null. Verbindet man nun den anderen Pol mit der Kugel k eines Elektroskopes, so ladet sich dieselbe bis zur vollen positiven Spannung der Säule. Die Säule pumpt gleichsam Elektrizität aus der Erde ins Elektrometer hinein. Erdet man hingegen den positiven Pol, so gibt der negative Pol dieselbe Spannung, aber negativ; hier pumpt die Säule gleichsam Elektrizität aus dem Elektroskop heraus. (Siehe näheres § 628.)

Auch die Nadel des Quadrantenelektrometers (§ 578) wird mit einer Zambonisäule geladen. Die therapeutische Anwendung solcher kleiner Trockenelemente in Form von „elektrischen Gürteln" u. dgl. beruht auf Täuschung.

619. Konstante Elemente. Will man ein Element nicht nur als Spannungsquelle, sondern für längere Zeit als Stromquelle benützen, muß man für Beseitigung der Polarisation sorgen. Es sind wohl einige Hundert solcher konstanter galvanischer Elemente konstruiert worden. Uns mögen einige Beispiele genügen.

Chromsäureelemente: (Fig. 385) Zn und C in verdünnter H_2SO_4 ist das uns bereits bekannte Element; es sind hier zwei miteinander verbundene C-Platten und in der Mitte eine Zn-Platte, die bei Nichtgebrauch des Elementes bei a aus der Flüssigkeit heraus und hinaufgezogen wird. Dieses Element ist inkonstant, weil der die Kohle gar bald bedeckende Wasserstoff elektromotorisch entgegenwirkt. Löst man aber in H_2SO_4 einige Messerspitzen Chromsäure CrO_3, welche sehr leicht Sauerstoff abgibt, so wird der entstehende Wasserstoff immer wieder rasch wegoxydiert. Für längeren Gebrauch (über zwei Minuten) ungeeignet. Elektromotorische Kraft (oder „Klemmspannung") ist 1,8 V.

Fig. 385.

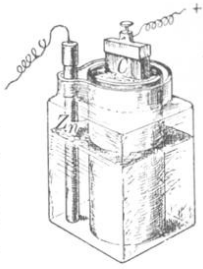


Fig. 386.

Leclanché: (Fig. 386) Zn und C, welch letztere in einem größeren porösen Tongefäß mit einer Mischung von C und MnO_2 (Braunstein) umgeben ist; alles in konzentrierter Salmiaklösung (NH_4Cl). Auch hier gibt das MnO_2 sehr leicht Sauerstoff ab und oxydiert den ankommenden Wasserstoff. Dieses Element wird meistens für elektrische Klingeln verwendet. In neuerer Zeit werden unter dem Namen Beutelelement ganz vorzügliche Elemente dieser Type verkauft; die lange konstant bleibende Klemmspannung ist 1,5 V.

Daniell: (Fig. 387) Zn in verdünnter H_2SO_4 und durch ein Tondiaphragma geschieden Cu in $CuSO_4$-Lösung. Zn sendet durch seine Lösungstension positive Zn-Ionen in die H_2SO_4-Lösung; die positiven H-Ionen werden durch das Diaphragma hindurchgetrieben, drängen die positiven Cu-Ionen zur Cu-Elektrode, welche immer dicker wird, indes die Zn-Elektrode äquivalent abnimmt. Die sehr konstante Klemmspannung ist ca. 1 V (genauer 1,09).

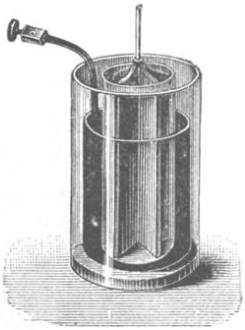


Fig. 387.

In allen bisher geschilderten Elementen geht der Strom im äußeren Leiterkreise immer zum Zn-Pole hin. Zn ist also der negative Pol.

620. Ursprung der Stromenergie. Die Energie des elektrischen Stromes wird hier überall durch die Verbindungswärmen der chemischen Prozesse geliefert. In einem Daniellelemente, das einige Zeit gearbeitet hat, ist Zn zu $ZnSO_4$ geworden; diese Verbindungswärme ist aber nur zum Teile als Stromenergie aufgetreten. Es ist nämlich auch $CuSO_4$ zerlegt worden, da ja Cu ausgeschieden wurde; um diesen Energieverbrauch ist weniger Energie im Stromkreis. Schließlich werden auch alle verschiedenen Lösungswärmen, die übrigens hier klein sind, in Rechnung zu setzen sein: Die Energie des gelieferten Stromes wird also durch die Sulfatierung von Zn geliefert, wobei wir jedoch einen Teil zur Zerlegung des $CuSO_4$, d. h. zur Vermeidung der Polarisation wieder abgeben mußten.

Die hier gültige eine Seite der Wärmegleichung wäre im wesentlichen:

$(Zn + CuSO_4)$	minus	$(Cu + ZnSO_4)$
vor Stromdurchgang		nach Stromdurchgang

wobei aber die Mengen entsprechend ihren Ausscheidungsmassen pro 1 A zu nehmen sind. Diese so gerechnete Wärmeenergie ist genau gleich der beobachteten Stromenergie.

Beim Daniell ist die Sache darum so einfach, weil es ein umkehrbares Element darstellt. Wenn man den Strom, den ein Daniell geliefert hat, in umgekehrter Richtung wieder in dasselbe Element zurücksendet, bildet sich wieder der Anfangszustand heraus. Es gibt aber auch nicht umkehrbare Elemente, die sich bei Stromlieferung erwärmen (oder abkühlen); dann ist natürlich die Stromenergie bei Berechnung der elektromotorischen Kraft um diesen Betrag zu verkleinern (oder zu vergrößern).

621. Zur genauen Eichung von Elektrometern oder anderen Spannungsmeßapparaten bedarf es einer sicher reproduzierbaren, genauen Potentialdifferenz. Früher verwendete man zu diesem Zwecke sorgfältig hergestellte Daniellelemente, jetzt aber sog. **Normalelemente.** Das beste Normalelement ist das Westonelement. Für letzteres ist die Klemmspannung 1,0190 V fast unabhängig von der Temperatur.

Die eine Elektrode (Fig. 388) ist Hg, bedeckt mit einem Gemisch von festem Merkurosulfat Hg_2SO_4 und Kadmiumsulfat $CdSO_4$, der andere negative Pol ist reines Kadmiumamalgam. Als Flüssigkeit dient konzentrierte $CdSO_4$-Lösung. Die Form dieser Elemente ist sehr verschieden; am besten für den Versand sind die von der Westongesellschaft selbst fertiggestellten Elemente, die man noch von der physikalisch-technischen Reichsanstalt in Charlottenburg-Berlin kontrollieren lassen kann. Das Element wird, wie es stärkeren Strom liefert, inkonstant und verdirbt. Es darf also nur zu Ladungen (oder kompensierten Schaltungen § 646) verwendet werden.

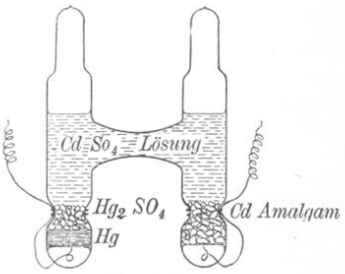


Fig. 388.

Einige wichtige Polarisationserscheinungen.

622. Zn in H_2SO_4. Wenn wir reines Zn in verdünnte H_2SO_4 bringen, so gehen einige Zn-Ionen in Lösung und dann müßte der Prozeß stillstehen, d. h. reines Zn ist in verdünnter H_2SO_4 so gut wie unlöslich. Nun enthält aber käufliches Zn immer Stellen, wo irgendeine Verunreinigung mit geringerer Lösungstension ist. Dann wird ein Strom vom Zink durch die Flüssigkeit zu dieser Verunreinigung gehen und durch das Zink wieder zurück. Dadurch werden die in der Flüssigkeit befindlichen Zn-Ionen nach den Punkten der Verunreinigungen gebracht, und es kann eine neue Lösung des Zinks stattfinden. Nun werden sich die inhomogenen Stellen sehr bald verzinken und der Prozeß müßte aufhören, wenn nicht durch das Dünnerwerden des Zinkkörpers immer wieder neue solche Unreinigkeiten freigelegt würden, wodurch immer wieder neue Lokalströme entstehen. Somit ist reines Zink in verdünnter Schwefelsäure nicht löslich, wohl aber käufliches und die Chemiker setzen darum absichtlich irgendein Metall mit geringerer Lösungstension zu, wenn sie Zink in Schwefelsäure rasch lösen wollen.

Man kann nun diese Lokalströme dadurch vermeiden, daß man das Zink amalgamiert. Das Zink wird zunächst ein wenig in Salzsäure gebracht und dann verreibt man an ihm Quecksilber, das nun an der ganzen Oberfläche in Form von Zinkamalgam haften bleibt. Wir haben dadurch die Zinkoberfläche ganz homogen gemacht und ein derartiger Zinkkörper wird in Schwefelsäure unlöslich sein. Es steigen auch keinerlei Gasblasen auf. Natürlich geht auch dann Zn in dem Momente in Lösung, als Strom durchgeht, aber nur der durchgegangenen Stromintensität entsprechend. Zinkstäbe und Zinkplatten in galvanischen Elementen werden daher immer amalgamiert.

623. Ein **Akkumulator** besteht aus zwei Bleielektroden in verdünnter Schwefelsäure. Um die Oberfläche des Bleis möglichst groß

zu machen, nimmt man gewöhnlich mehrere parallele Bleiplatten für die Kathode und ebenso für die Anode. Diese Bleielektroden selbst bestehen dann überdies aus passend geformten Bleigittern, in deren Zwischenräume mittels starken hydraulischen Druckes ein speziell zu diesem Zwecke bereiteter Bleibrei hineingedrückt wird. Diese Bleipaste ist in den verschiedenen Akkumulatoren je nach dem Patente verschieden. Die chemischen Vorgänge in einem solchen Akkumulator sind ziemlich kompliziert. Im allgemeinen aber wird beim Laden der freiwerdende Sauerstoff an der Anode, der in alle die Poren des im Bleigitter befindlichen schwammartigen Bleisalzes ($PbSO_4$) eindringt, eine starke Oxydation zu PbO_2 bewirken, der Wasserstoff an der Kathode aber eine kräftige Reduktion zu metallischen Pb. Wenn wir einen guten Akkumulator laden, so findet zunächst keine Gasentwickelung statt. Der ganze Wasserstoff wird an der Kathode und der ganze Sauerstoff an der Anode chemisch verarbeitet. Erst nach stundenlangem Durchgehen des Stromes ist dieser Ladeprozeß beendet, was sich dadurch anzeigt, daß jetzt Sauerstoff und Wasserstoff wirklich frei werden und in Form von Gasblasen aufsteigen.

Man hat also durch die Energie des hindurchgeleiteten Ladestromes solche chemische Veränderungen vorgenommen, daß der Akkumulator zu einem kräftigen galvanischen Elemente, einem Sekundärelemente, wurde. Der „geladene" Akkumulator wird dann vom Ladestrome getrennt und man kann nun die aufgenommene Energie in Form eines entgegengesetzt gerichteten Stromes in irgendeine beliebige Drahtleitung hineinsenden. Die Energie, die wir beim Entladen zurückbekommen, beträgt bis zu 90% der ursprünglich durch den Ladestrom hineingesteckten Energie. Die Potentialdifferenz (Klemmspannung) eines vollständig geladenen Akkumulators beträgt 2,6 V. Wenn man ihn dann entladet, sinkt diese Potentialdifferenz verhältnismäßig rasch auf 2 V und bleibt da lange konstant. Sinkt sie unter 1,8 V, so ist dies ein Zeichen, daß der Akkumulator wieder von neuem geladen werden muß. Ein geladener Akkumulator hält die Ladung viele Wochen lang und kann naturgemäß starken Strom für kürzere oder schwachen Strom für längere Zeit liefern.

Akkumulatoren dienen also dazu, elektrische Energie aufzuspeichern.

Der chemische Prozeß beim Laden ist

$$\underset{\text{Anode}}{[PbSO_4 + 2H_2O] + \ominus\ominus SO_4} \qquad \underset{\text{Kathode}}{H_2\oplus\oplus + PbSO_4}$$

daraus wird

$$[2H_2SO_4 + PbO_2] \text{ u. } 2\ominus \qquad 2\oplus \text{ u. } [Pb + H_2SO_4].$$

Beim Laden tritt also auch eine Vermehrung des spezifischen Gewichtes der Flüssigkeit (H_2SO_4 statt H_2O) ein, so daß man den Fortschritt

der Ladung oder Entladung mit einem eingesenkten Aräometer kontrollieren kann. Beim Entladen gelten die gegebenen Formeln in umgekehrter Richtung. Bei starker Ladung, wenn obiger Prozeß vollendet ist, wird an der Kathode Wasserstoff überdies noch physikalisch absorbiert, was den anfänglichen Potentialüberschuß eines frisch geladenen Akkumulators von 0,6 V über den Normalwert 2 V verursacht.

624. Während wir soeben eine Vorrichtung besprachen, die möglichst stark polarisiert, braucht man in der Physiologie Vorrichtungen, welche die Polarisation möglichst vermeiden.

An irgendeinem lebenden Gebilde darf die äußere Stromleitung bei Messungen nie in Metallelektroden enden, da die Polarisationserscheinungen grobe Meßfehler verursachen können. Ob man nun bei physiologischen Messungen einen äußeren Strom dem menschlichen oder tierischen Organismus zuführt oder ob man den im Organismus entstehenden Strom nach außen in ein Meßinstrument ableitet, immer verwendet man **unpolarisierbare Elektroden**, die in einer vielgebrauchten Type in Fig. 389 dargestellt sind.

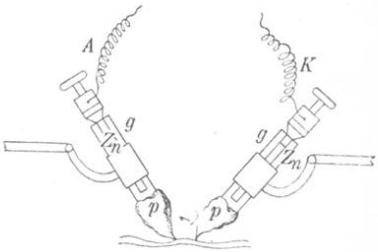


Fig. 389.

Wir haben zwei beiderseits offene Glasröhrchen g, deren unterer Teil geschlossen ist durch einen feinen Ton (oder Pinsel) p, der mit physiologischer Kochsalzlösung angeknetet ist. In jedem Röhrchen ist eine konzentrierte $ZnSO_4$-Lösung, in welche je ein amalgamierter Zinkstab Zn taucht, der dann mit der äußeren Drahtleitung verbunden wird. Bei Besprechung dieser Vorrichtung wollen wir zwei verschiedene Punkte ins Auge fassen, von denen der eine rein physikalischer, der zweite mehr physiologischer Natur ist.

1. Wenn der Strom aus der Zn-Anode A in die $ZnSO_4$-Lösung übertritt, so nimmt er Zn-Ionen in die Lösung, indes andere Zn-Ionen in den Ton hineindringen. Der Zinkstab selbst wird dadurch nur physikalisch verändert, er wird etwas dünner. Eine chemische Veränderung findet aber nicht statt; es kann also auch keine Polarisation eintreten. Umgekehrt werden an den Zinkstab K, der als Kathode dient, Zn-Ionen sich ansetzen und einen Zn-Überzug bilden, dafür treten einige Na-Ionen aus der Kochsalzlösung. Auch hier wird der Zn-Stab nicht chemisch, sondern nur physikalisch verändert. Er wird etwas dicker. (Auch Elektroden aus Cu in $CuSO_4$-Lösung (Daniell) oder aus Ag in $AgNO_3$-Lösung usw. sind unpolarisierbar.)

2. Hätten wir die Weiterleitung in das organische Gebilde durch einen Ton bewerkstelligt, der mit $ZnSO_4$-Lösung geknetet ist, so würde im organischen Gebilde eine Reihe von chemischen Veränderungen vor sich gehen,

die natürlich physiologisch und elektrisch stören würden. Darum ist der Ton mit NaCl-Lösung durchsetzt, welche möglichst genau denselben osmotischen Druck hat, wie das organische Gebilde, also mit diesem isotonisch (§ 291) ist. So bleibt das physiologische Organ beim Ansetzen der Tonspitzen oder eines mit derselben Lösung getränkten Haarpinsels möglichst unverändert.

Bei Fröschen ist die isotonische Konzentration der physiologischen NaCl-Lösung 0,7%, bei Organen von Warmblütern 0,9%, bei Seetieren nimmt man Seewasser, in dem der betreffende Organismus lebt.

Da diese Tonelektroden nicht haltbar sind, hat man auch andere unpolarisierbare Elektroden, z. B. die tagelang wirksamen Hg-Kalomel-Elektroden. Das physikalische Prinzip bleibt dasselbe.

625. Kapillarelektrische Erscheinungen. Die Oberflächenspannung (§ 133) von Quecksilber in verdünnter Schwefelsäure wird, wie ein Versuch zeigt, durch Zusatz von Hg-Salz verkleinert. Wenn man Hg als Elektroden in verdünnter H_2SO_4 verwendet, so ist um diese herum immer Hg-Salz in Lösung. An der Hg-Kathode wird Hg ausgeschieden und die Konzentration des gelösten Hg-Salzes vermindert; die Oberflächenspannung steigt. An der Hg-Anode hingegen wird Hg-Salz in Lösung gehen, wodurch die Oberflächenspannung sinkt.

Ein zu messender Strom fließe (Fig. 390) durch das Quecksilber *a*, durch verdünnte mit Merkurosulfat gesättigte Schwefelsäurelösung *b*, zur Quecksilberoberfläche *c* in der mittleren Glaskapillare und nach *d*. Dadurch ändert sich die Oberflächenspannung des Quecksilbers in *c*, so daß diese Kuppe sich verschiebt. Die Endstellung des Hg tritt fast momentan ein, wobei durch die auftretende Polarisation der Strom unterbrochen wird; es wird also die an *a* und *d* angelegte Potentialdifferenz direkt und rasch gemessen, wobei fast gar kein Strom abfließt. Der Meßbereich eines solchen Kapillarelektrometers geht von etwa 0,001 V (Millivolt) bis etwa 1 V; bei größeren Spannungen tritt störende Gasentwickelung ein. Da die Einstellung von *c* durch ein einfaches Mikroskop gemessen werden kann, so ist der billige und bequeme Apparat für Spannungen unter 1 V, wie sie in der Physiologie meistens vorkommen, sehr geeignet, besonders weil er selbst raschen Potentialänderungen mit nur sehr kurzer Verzögerung folgt. Noch viel prompter arbeitet hier das allerdings viel kompliziertere und teurere Saiten-Galvanometer (§ 690).

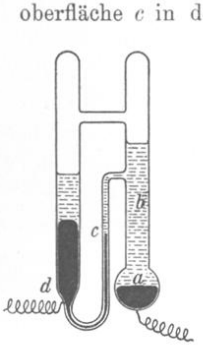


Fig. 390.

Bei den kapillarelektrischen Erscheinungen wird die Energie des elektrischen Stromes in mechanische Bewegung umgesetzt, vielleicht analog wie sich eine elektrische Reizung von Muskeln und Nerven in mechanische Muskelzuckung auslöst. Diese Analogie geht noch weiter, denn die geschilderten Hg-Bewegungen bei Stromzufuhr sind umkehrbar. Ändert man die Oberfläche von Hg in bestimmter Weise, z. B. durch mechanische Verschiebung von *c* im Kapillarelektrometer, so erhält man einen elektrischen Strom.

Pulsierende chemische Reaktionen wurden zu wiederholten Malen beobachtet. Übergießt man Hg mit Wasserstoffsuperoxyd H_2O_2, so zerfällt letzteres viel rascher in Wasser und Sauerstoff als ohne Anwesenheit des Hg. Dieses wirkt nur durch seine Anwesenheit als Katalysator. Unter gewissen Umständen erfolgt nun dieser Zerfall mit rhythmisch sich ändernder Geschwindigkeit. Bredig (1903) hat stundenlang regelmäßige Pulskurven dieser katalytischen O_2-Entwickelung registriert. Geringer Zusatz von Säuren oder Alkalien oder kleine Temperaturänderungen verändern stark die Pulsdauer; nicht pulsierende Systeme können durch elektrische Reizung zum Pulsieren gebracht werden usw., vielleicht Analogien für den Pulsschlag des Herzens.

3. Ohm'sches Gesetz.

Einfacher Leiter.

626. Elektrischer Strom. Wenn wir die beiden Pole einer Influenzmaschine oder einer elektrischen Batterie durch einen Leiter verbinden, so entsteht ein elektrischer Strom, d. h. es wird fortwährend Elektrizität durch diesen Leiter strömen.

In welcher Richtung?

Im Anschluß an die bei der Dissoziationstheorie gemachten Bemerkungen (§ 600) müßten wir eigentlich annehmen, daß im festen Leiter nur die freien, negativen Elektrizitätsatome in einer der gewöhnlichen Stromrichtung entgegengesetzten Richtung gingen (siehe auch § 773), daß also die eigentliche elektrische Strömung in einem Leiter vom negativem zum positiven Pole flösse. Um aber mit den üblichen Bezeichnungen nicht in fortwährenden Widerspruch zu kommen, bleiben wir bei der bisher gebräuchlichen Ausdrucksweise.

Wir nehmen also jetzt an, daß Elektrizität nur vom positiven Pole zum negativen Pole strömt, wo das (auch nur Annahme!) geringere Potential (niedrigere Spannung) ist; ein negativer Strom in entgegengesetzter Richtung wie wir ihn im Elektrolyten hatten, existiere nicht. Diese Vereinfachung ändert an den in diesem Kapitel zu schildernden Erscheinungen nichts. Es würde dasselbe herauskommen, wenn wir zwei in entgegengesetzter Richtung den Leiter durchfließende Ströme annähmen. Es sind nicht physikalische, sondern pädagogische Gründe (Vereinfachung der mathematischen Ableitungen), welche dieses Vorgehen empfehlen.

Betrachten wir einen gut isolierten gleichförmigen Stromleiter (ohne Verzweigung) zwischen zwei Punkten a und b, so sinkt längs der ganzen Leiterstrecke ab der Strom von dem Potential V_a bis V_b, wo V_a das Potential in a und V_b das Potential in b ist. Die Potentialdifferenz $V_a - V_b$ (durch eine Batterie od. dgl. immer wieder von neuem erzeugt) ist das Treibende, die Ursache des Strömens. Es ist klar, daß jene Elektrizitätsmenge, die von der Batterie abfließt, auch wieder zu ihr zurück-

kommen muß. Ein anderes Ab- oder Zufließen von Elektrizität zwischen Draht und Umgebung ist auf dem ganzen gut isolierten Wege ausgeschlossen. Dieselbe Elektrizitätsmenge, die durch den Draht fließt, muß auch, wenn wir in dem unverzweigten Stromkreis irgendwo ein Strommeßinstrument einschalten, durch dieses gehen; letzteres mißt also die Coul pro sek oder die A.

627. Ohm'sches Gesetz für eine Drahtstrecke (1827). Wir betrachten nun einen stromdurchflossenen, überall gleich dicken Leiter. Die Stromstärke hängt ab:

1. von dem Potential der beiden Endpunkte,
2. von den Dimensionen des durchflossenen Drahtes,
3. von seinem Materiale.

Ad 1) Wir sahen Fig. 66, wie der Wasserdruck längs einer wasserdurchströmten Röhre abnimmt. Ganz analoge Verhältnisse finden wir beim elektrischen Strome.

Der überall gleich dicke Draht *abcd* sei stromdurchflossen (Fig. 391, oberer Teil) und wir legen an die beliebigen Punkte *abcd* je ein Elektrometer. Dann werden alle Elektrometer einen Ausschlag zeigen, welcher von *a* nach *d* immer kleiner wird. Genaue Messungen ergeben, daß die Potentialwerte ganz analog dem Wasserdrucke in Fig. 66 gleichfalls in linearer Proportion abnehmen. Wir haben also auch beim elektrischen Strom eine Art von Reibung. Zwischen *d* und dem Pole der Batterie sei ein strommessendes Instrument eingeschaltet. Wir können so das Potentialgefälle und die pro sek durchfließende Elektrizitätsmenge, d. i. die Stromstärke, z. B. *J*, messen.

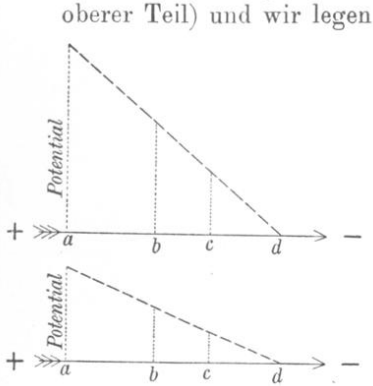


Fig. 391.

Machen wir nun die Spannung in der Batterie kleiner, so werden sämtliche Potentiale fallen, z. B. auf die Hälfte. Wieder ist der Potentialabfall (Fig. 391 unterer Teil) ein linearer, aber die vier Elektrometer zeigen jedes nur halb so viel wie früher. Das Potentialgefälle ist das halbe geworden, und das Strommeßinstrument zeigt uns auch nur die halbe Strommenge an, z. B. $J/2$.

Dieser elektrische Versuch ist ganz genau, er gilt ohne jede Einschränkung. Wenn wir einen bestimmten Leiter haben, so ist die Stromstärke der Potentialdifferenz an seinen Enden proportional. Das Potential bei *a* sei V_a und das bei *d* sei V_d; dann ist J proportional dem $(V_a - V_d)$.

Ad 2) Wir wollen jetzt den Einfluß der Draht-Länge und -Dicke bestimmen. Einen Einfluß der Länge können wir schon aus den bisher ge-

machten Versuchen ableiten. Der ganze Draht $abcd$ sei überall von der Stromstärke J durchflossen. Wenn ich nun nur die Strecke ab betrachte, welche der $n$te Teil der Strecke ad ist, so sehen wir, daß schon der $n$te Teil der Potentialdifferenz, da ja $V_a - V_b = \frac{1}{n}(V_a - V_d)$ ist, hinreicht, um dieselbe Stromstärke zu erzeugen; es ist also J proportional dem

$$\frac{V_a - V_d}{l},$$

wo l die Länge von ad bezeichnet.

Um den Querschnittseinfluß des Leiters zu finden, wollen wir den Draht ad in Fig 391 durch einen Draht aus gleichem Materiale ersetzen, welcher aber nur den halben Querschnitt hat. Wenn wir jetzt dieselbe Potentialdifferenz wie früher nehmen, bekommen wir nur die halbe Strommenge. Unter sonst gleichen Umständen ist also J dem Querschnitte proportional.

Nach den bisher gefundenen Resultaten ist J proportional dem

$$\frac{V_a - V_d}{l} q,$$

wo q der Drahtquerschnitt ist.

Ad 3) Nun ist aber klar, daß sich die Sache auch noch ändern muß, wenn man statt des verwendeten Drahtes einen aus anderem Materiale nimmt. Wir haben also in der abgeleiteten Formel noch einen Faktor hinzuzufügen, welcher vom Materiale abhängt. Derselbe sei λ.

Somit erhalten wir als Schlußresultat

$$J = \lambda \frac{q}{l}(V_a - V_d).$$

Hier nennt man $\lambda q/l$ die Leitfähigkeit der gegebenen Drahtstrecke ad. Der reziproke Wert $l/(\lambda q)$ heißt Widerstand des Drahtes ad oder R_{ad}; dann ist:

$$J = \frac{V_a - V_d}{R_{ad}},$$

d. h. in irgendeiner Drahtstrecke ist

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Potentialdifferenz der Drahtenden}}{\text{Drahtwiderstand}}.$$

$(V_a - V_d)$ ist das Treibende für den elektrischen Strom. Darum heißt es auch die elektromotorische Kraft E, also allgemein:

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

In Fig. 391 ist

$$J = \frac{V_a - V_b}{R_{ab}} = \frac{V_b - V_c}{R_{bc}} = \frac{V_c - V_d}{R_{cd}} = \ldots \frac{V_a - V_d}{R_{ad}},$$

daraus folgt, weil $V_a - V_d = (V_a - V_b) + (V_b - V_c) + (V_c - V_d)$ und $R_{ad} = R_{ab} + R_{bc} + R_{cd}$ ist,

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

d. h. bei direkter Hintereinanderschaltung von verschiedenen elektromotorischen Kräften E und Widerständen R ist die Stromstärke gleich der Summe aller elektromotorischen Kräfte, gebrochen durch die Summe aller Widerstände.

628. Erdleitung des einfachen Stromkreises an einer Stelle. Was geschieht, wenn wir an einer Stelle der sonst gut isolierten Drahtleitung ad eine Erdleitung anbringen? Elektrizität kann an dieser Stelle weder dauernd ab- noch zufließen, da sonst das ganze System immer mehr und mehr negativ oder positiv werden müßte; eine solche Selbstladung ist unmöglich; das Potential an dieser Stelle muß also Null werden. Erdleitung an dem Drahtende gegen den negativen Batteriepol hin macht den ganzen Draht positiv; Erdleitung an dem Drahtende gegen den positiven Batteriepol hin macht den ganzen Draht negativ. Erdleitung in der Drahtmitte macht die erste Hälfte des Drahtes positiv, die zweite Hälfte negativ. In Fig. 392 sind diese drei Fälle übereinander gezeichnet. Das Potentialgefälle und die Stromstärke bleibt ungeändert.

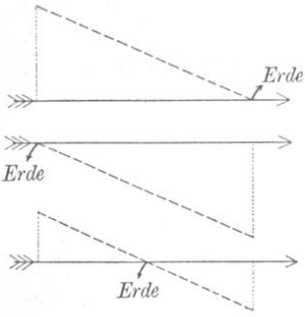


Fig. 392.

629. Stromenergie. Um die Einheit der Elektrizität von einer Potentialfläche zur nächsten zu bringen, brauchen oder gewinnen wir eine Arbeitseinheit — alles in beliebigem, aber identischem Maßsystem gemessen (§ 565). Im „praktischen Maßsystem" messen wir Potentiale nach „Volt", Elektrizitätsmengen nach „Coulomb" und Arbeitseinheiten nach „Joule". Haben wir also zwei Punkte a und b (Fig. 391), deren Potentialdifferenz $(V_a - V_b)$ in V ist, so brauche ich, um 1 Coulomb von V_b nach V_a zu bringen, eine Arbeit, welche in „Joule" gemessen gleich $1(V_a - V_b)$ ist. In Fig. 391 fließt Elektrizität von V_a nach V_b, z. B. 1 Coulomb pro sek oder 1 Ampère; ich gewinne also hier pro sek, in sek Joule oder Watt ausgedrückt, eine Arbeit von $1(V_a - V_b)$. Fließen aber nicht 1 A, sondern nA, so ist die Stromenergie in Watt gleich $n(V_a - V_b)$. Es ist

(Stromstärke in A) mal (Potentialdifferenz in V) = (Stromenergie in Watt).

Man mißt elektrische Energie in Voltampère oder Watt. [Ähnlich ergibt bei einem Wasserfall das Produkt (Wasserliter pro sek) mal (Höhe des Falles in m) die Arbeit in Kilogrammetern].

Beispiel: $(V_a - V_b)$ sei 100 V und es fließen durch ab 20 A; dann

ist die Stromenergie gleich 2000 Watt. Die Stromenergie elektrischer Zentralen wird nach Kilowattstunden (1000 Watt · 60 · 60) verkauft. Eine Kilowattstunde kostet etwa 20 bis 80 Pfennige.

630. Das für ein bestimmtes Drahtstück abgeleitete Ohm'sche Gesetz ergibt uns unmittelbar eine Definition der Widerstandseinheit, des **Ohm,** Θ. Setzen wir in

$$J = \frac{V_a - V_b}{R_{ab}},$$

sowohl $J = 1$ als auch $(V_a - V_b) = 1$, so wird auch R_{ab} zur Einheit. Oder, mit anderen Worten, wir haben den Widerstand 1 Ohm dann, wenn bei 1 V Potentialdifferenz einer beliebig langen Strecke die Stromstärke 1 A hindurchgeht. Wenn also von den Größen A, V, Θ zwei definiert sind, wird die dritte immer durch das Ohm'sche Gesetz

$$A = \frac{V}{\Theta}$$

bestimmt.

Beispiel: Eine Glühlampe mit dem Widerstande 440 Θ kommt an eine Starkstromleitung mit 220 V. Wie groß ist die Stromstärke? $\frac{220}{440} = 0{,}5$ A.

631. Internationale Einheiten. Alle diese „praktischen" Maßeinheiten können aus elektrostatischen (oder elektromagnetischen, § 664) Maßeinheiten abgeleitet werden; es sind bestimmte Vielfache dieser Größen. Darum kann auch jede der drei Größen A, V, Θ für sich allein definiert und auch durch absolute Messungen für sich allein bestimmt werden. Da aber solche absolute Messungen sehr schwierig sind, so hat man provisorisch bei den bis jetzt gewonnenen Meßresultaten Halt gemacht. Wie der Meter nicht genau der 10^7te Teil eines Erdquadranten ist, sondern als die durch event. fernere genauere Messungen nicht mehr zu ändernde Länge eines bestimmten Stabes in Paris definiert wurde, so hat man auch hier internationale Einheiten eingeführt, und zwar:

1. Die Stärke 1 A hat ein Strom, der pro sek 1,118 mg Ag ausscheidet (§ 607).

2. Den Widerstand von 1 Θ hat eine Quecksilbersäule von 1,063 m Länge und 1 mm² Querschnitt bei 0° C.

3. Ein V ist die Potentialdifferenz, welche in einem Widerstande 1 Θ einen Strom von 1 A erzeugt.

Diese Einheiten sind gleich den derzeit besten Meßresultaten der praktischen Einheiten und sollen einstweilen nicht mehr geändert werden.

632. Mnemotechnische Hilfe. Um für diese Größen ungefähr eine Vorstellung bei der Hand zu haben, merke man:

1 Θ ungefähr gleich dem Widerstande eines Quecksilberfadens von 1 mm² Querschnitt und 1 m Länge.

1 V ungefähr gleich der Spannung eines Daniellelementes.

1 A dann, wenn an an den Enden eines stromdurchflossenen Widerstandes 1 Θ eine Potentialdifferenz von 1 V herrscht.

633. Widerstände hintereinander. Wir wollen nun einen elektrischen Versuch analog der Fig. 67 machen. Der Draht ab und cd sei dick, bc dünn (Fig. 393). Die gestrichelte Linie gibt wieder den Verlauf des Potentialgefälles. Die Stromstärke ist in allen 3 Teilen gleich.

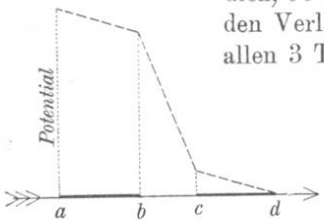


Fig. 393.

$$J = \frac{V_a - V_b}{R_{ab}} = \frac{V_b - V_c}{R_{bc}} = \frac{V_c - V_d}{R_{cd}}.$$

Aus diesen drei Gleichungen ergibt sich, daß, da zu einem kleinen Nenner ein kleiner Zähler gehört und umgekehrt, überall, wo der Widerstand klein ist, auch das Potentialgefälle klein ist; wo der Widerstand groß ist, ist auch das Potentialgefälle groß. Auch hier gilt

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

Wir wollen die Rechnung für die Strecke abc in Fig. 393 durchführen, cd denken wir uns weg. Dazu folgende arithmetische Erinnerung: Wenn $S = v/x = y/z$, so auch $S = (v+y)/(x+z)$, weil $vz = xy$, beiderseits $yz = yz$ hinzuaddiert, $z(v+y) = y(x+z)$ oder $\frac{x+y}{v+z} = \frac{y}{z} = S$. Analog folgt aus

$$J = \frac{V_a - V_b}{R_{ab}} = \frac{V_b - V_c}{R_{bc}} = \frac{(V_a - V_b) + (V_b - V_c)}{R_{ab} + R_{bc}} \quad \text{oder} \quad J = \frac{\Sigma E}{\Sigma R}.$$

Verzweigte Leiter.

634. Kirchhoff's Verzweigungsgesetze (1847). Ein Strom J (Fig. 394) teilt sich bei a in zwei Wege, den Weg 1 oben und den Weg 2 unten, die sich dann bei b wieder vereinigen. Man nennt diese Schaltung von 1 und 2 eine Parallelschaltung (s. § 118). Der Widerstand in den Nebenzweigen sei R_1 und die Stromstärke J_1, bzw. R_2 und J_2.

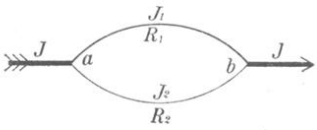


Fig. 394.

1. Es ist $J = J_1 + J_2$, da nirgends in einem gut isolierten Leitungssystem Strom verloren gehen kann; was in a zufließt, muß in b wieder abfließen.

2. Das Potential in a und b sei V_a bzw. V_b, dann ist:

für den Strom 1 . . . . $V_a - V_b = J_1 R_1$,
für den Strom 2 . . . . $V_a - V_b = J_2 R_2$.

Also ist $J_1 R_1 = J_2 R_2$ oder $J_1 : J_2 = R_2 : R_1$, d. h. die Stromstärken der beiden Zweige verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände. Der Strom teilt sich so, daß durch den dickeren Draht mit kleinerem Widerstande mehr Strom fließt.

Bei irgendwelchen komplizierten Stromverzweigungen werden die Kirchhoff'schen Gesetze die folgenden: 1. In jedem Verzweigungspunkte ist die Summe aller (ankommenden und abgehenden) Stromstärken gleich Null. 2. Jede komplizierte Verzweigung kann man immer in einzelne einfache Stromkreise zerlegen; z. B. in Fig. 401 acd oder cbd. In jedem solchen einfach in sich geschlossenen Kreis ist dann $\Sigma J R = \Sigma E$.

Diese beiden Gesetze genügen für alle Fälle. Sie sind der allgemeinste Ausdruck des Ohm'schen Gesetzes.

Die Gesamtleitfähigkeit der Doppelleitung 1 und 2 in Fig. 394 oder auch noch mehrerer weiterer Parallelleitungen ist gleich der Summe der einzelnen Leitfähigkeiten, oder: $\frac{1}{R_{ab}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots = \Sigma \frac{1}{R}$.

Diese Gesetze finden in zahlreichen Schaltungen Anwendung.

635. Oft ist ein zu messender Strom für irgendeinen Meßapparat zu stark; dann leitet man nur einen Teil dieses Stromes durch den Apparat und den Rest im Nebenschlusse vorbei. Solch ein schwächender Nebenschluß heißt **Shunt.**

Es gehe ein Strom durch einen Meßapparat A (Fig. 395); so wie die Zeichnung ist (punktierten Teil weggedacht), fließt also der ganze Strom J durch aAb. Der Widerstand dieser Leitung (mit A) sei R. Eine Kurbel Os läßt sich nun drehen, z. B. in die punktiert gezeichnete Lage, wodurch der Strom J von O aus gleichzeitig zwei parallele Wege hat, den alten OAb und einen Nebenweg, Shunt, z. B. OR_3b. Es sei z. B $R = 999\ \Omega$ und der Widerstand des Shunt gleich $1\ \Omega$, dann fließen vom Hauptstrome durch den Shunt 999 Teile und nur 1 Teil durch den Meßapparat. Die Empfindlichkeit sinkt bis auf $^1/_{1000}$ der normalen. Durch Einschaltung anderer Shunts (andere Kurbeldrehung) erhält man beliebige Empfindlichkeitsverminderungen.

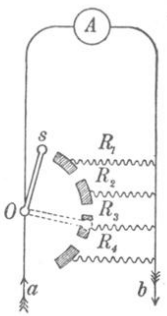


Fig. 395.

Im allgemeinen wird, wenn der Meßinstrumentwiderstand R ist und der Widerstand der Shunts: $^1/_9 R$, $^1/_{99} R$, $^1/_{999} R$ usw., die Empfindlichkeit sein $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$ usw. der normalen.

Man kann also den Meßbereich eines Instrumentes beliebig vergrößern und mit einem empfindlichen Instrument auch sehr starke Ströme messen. In Fig. 395 haben wir fünf Meßbereiche. Je nach der Kurbelstellung haben dann entweder die Ablesungen an einer einzigen Skala verschiedene Be-

deutung oder es sind auch manchmal verschiedene Skalen nebeneinander angebracht, und je nach der Kurbelstellung gilt die eine oder die andere.

Der Mediziner braucht Ströme von einigen Milliampère (1 Milliampère = 0,001 A) bis hinauf zu 20 A und mehr. Mit Hilfe solcher Shunts findet er aber mit einem einzigen Milliampèremeter, das beim direkten Durchleiten von 20 A momentan zerstört würde, sein Auslangen.

636. Stromdichte in ausgedehnten Leitern. Bisher betrachteten wir Drähte, das sind zylinderförmige Leiter und nahmen stillschweigend an, daß der Strom ganz gleichmäßig durch alle Teile des Querschnittes fließe, daß die Stromdichte, d. h. die Zahl der A pro cm^2 Querschnitt, konstant sei. Das war (für Gleichströme) auch vollständig richtig.

Ganz anders ist aber die Sache, wenn wir einen Gleichstrom z. B. in eine Metallplatte an irgendeinem Punkte eintreten und an einem beliebigen anderen Punkte wieder austreten lassen; dann wird die Platte in recht komplizierten Stromlinien durchflossen, wie etwa ein Teich, in dem ein schmaler Wasserstrom an einer Seite einmündet und irgendwo an einer anderen Seite austritt.

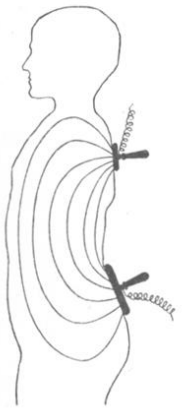


Fig. 396.

Einen solchen Fall haben wir immer, wenn ein elektrischer Strom durch den menschlichen Körper geht. Hier schlägt er natürlich oft sehr verwickelte Wege ein, wie bei elektrischen Bädern oder ganz besonders, wenn ein Strom durch kleine Elektroden eingeleitet wird. Legen wir zwei Metallelektroden an den menschlichen Körper so an, wie dies Fig. 396 zeigt, so sind die Strombahnen ungefähr die dargestellten. Die Stromfäden liegen an der kleinen Elektrode enger, hier ist die Stromdichte größer. Durch Anwendung einer kleinen „Reizelektrode" und einer großen „neutralen" Elektrode kann man infolge dieser Verdichtung der Stromlinien die Stromwirkung für physiologische, diagnostische und therapeutische Anwendung etwas lokalisieren.

Aber selbst unter der Annahme, daß der menschliche Körper ein physikalisch vollständig homogener Leiter wäre, ist eine Berechnung oder geometrische Konstruktion der Stromlinien, wie sie manchmal in physiologischen Werken gegeben wird, unmöglich. Nun ist der menschliche Körper überdies zusammengesetzt aus Teilen verschiedenster Leitfähigkeit und aus Grenzflächen im Innern, wo durch Ionenkonzentration Gegenkräfte auftreten. Es können die Stromlinien hier nur mit Hilfe physiologischer Wirkungen gefunden werden oder durch Einstechen von Hilfssonden und Ableitung eines Zweigstromes in einen Meßapparat mit sehr großem Widerstand.

637. Um beliebig viel und genau bestimmten Widerstand einschalten zu können, nimmt man sog. **„Stöpselrheostaten"** oder **„Widerstands-**

kasten“. Der Strom geht durch eine dicke Messingleiste ab, welche in einzelne Stücke zerschnitten ist, in Fig. 397 z. B. in 6. Die Lücken sind durch Drahtspiralen von bestimmtem Widerstande, z. B. 1, 2, 2, 5 und 10 Θ überbrückt, welche aus verschieden langen und verschieden dicken Drähten gemacht sind. Die Lücken in der Messingleiste ab haben einander gegenüberstehende halbkreisförmige Ausschnitte, in welche konische Metallstöpsel m mit einem Hartgummigriff h hineinpassen. Sind in unserem Beispiel alle fünf Stöpsel fest eingesteckt, so ginge die Gesamtheit des Stromes über die Messingleiste ab. Was den Nebenweg über die Spulen einschlägt, ist nach dem Kirchhoff'schen Gesetze so minimal, daß es vernachlässigt werden kann. Nehme ich aber einen, z. B. den letzten Stöpsel, heraus, wie in Fig. 397, so muß der Strom jetzt durch die Spule 10 Θ; es sind jetzt 10 Θ in den Stromkreis eingeschaltet; nehme ich alle fünf Stöpsel auf einmal heraus, so sind 20 Θ eingeschaltet usw. Man kann in unserer Zeichnung alle ganzzahligen Werte zwischen Null und 20 Θ einschalten.

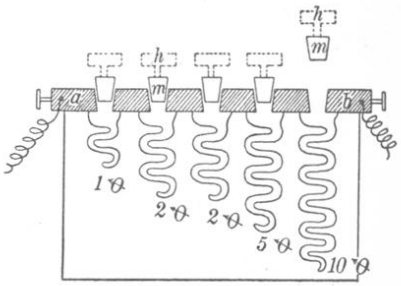


Fig. 397.

Der Meßbereich solcher Präzisionsrheostate kann natürlich viel weiter reichen, als in unserer Zeichnung, z. B. von 0,1 bis 100000 Θ, wobei man, bis auf 0,1 genau, alle Widerstände dieses Bereiches zur Verfügung hat.

Solche für Schwachströme bestimmte Präzisionswiderstände vertragen nur wenig Strom; ein stärkerer Strom würde alles schmelzen und verbrennen. Selbstredend kann man auch für Starkströme, wenn man nur den Draht dick genug nimmt, genaue Widerstandseinheiten gewinnen. Darum ist vor Gebrauch jedes Widerstandsapparates stets darauf zu achten, für welche Maximalstromstärke er gebaut wurde.

In Fig. 397 sind statt einfacher Spiralen Doppelspiralen angedeutet. Man wickelt den gut isolierten Drahtbifilar, so daß der Strom schraubenförmig einmal nach der einen Richtung hinunter und dann in der entgegengesetzten Richtung hinauf geht. Dadurch werden magnetische Wirkungen nach außen (§ 682) und vor allem Selbstinduktion („scheinbarer Widerstand“, § 710) vermieden.

Als Drahtmaterial verwendet man meist eine Kupfer-Nickel-Manganlegierung, Manganin, weil diese Substanz ihren Widerstand bei höheren Temperaturen kaum ändert.

638. Technische Rheostate. In vielen Fällen wird ein Widerstand in einer Leitung nur zur ungefähren Regulierung der Stromstärke einge-

schaltet. Von den vielen Typen dieser Art wollen wir zwei der gebräuchlichsten herausgreifen.

Der Schieberrheostat (Fig. 398) besteht aus einem auf Speckstein oder Marmor schraubenförmig gewickelten Widerstandsdrahte ab. Für Schwachströme ist dieser Draht dünn, für Starkströme dick. Die Einschaltung in die Stromleitung erfolgt bei a und c. Durch Verschieben des Gleitkontaktes s kann man größere oder kleinere Teile von ab einschalten.

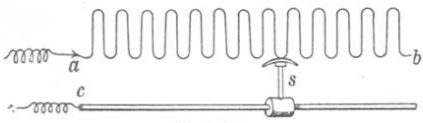


Fig. 398.

Fig. 399 stellt schematisch einen Kurbelrheostaten dar, der im Prinzip dem vorigen gleicht. Der Strom tritt in a ein, durchfließt bei der gezeichneten Kurbelstellung z. B. drei Widerstandsspiralen W und geht durch die Kurbel sO über O zurück. Die Kurbel OsH ist mit dem Handgriff H versehen und kann um den Mittelpunkt O gedreht werden, wodurch der Schleifkontakt s eine beliebige Stelle zwischen a und b einnehmen kann; der von b abgehende Draht hat in dieser Schaltung keine Bedeutung.

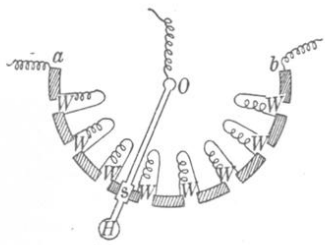


Fig. 399.

In neuerer Zeit ist dieses Prinzip auch mit Erfolg auf Präzisionsrheostate ausgedehnt worden.

639. Anschaltung von Apparaten an den Straßenstrom. Der Straßenstrom, der für Beleuchtung usw. in Gebäude eingeleitet wird, hat eine Spannung von z. B. 100 V, was für manche Verwendungszwecke viel zu groß wäre. Direkt in eine kleine Drahtspule von etwa 3 Ω eingeleitet, ergibt das eine Stromstärke von $\frac{100\ \text{V}}{3\ \Omega}$, d. i. zirka 33 A. Ein solcher Strom würde die kleine Spule bis zum Verbrennen erhitzen. Man kann vor oder hinter der Spule einen sog. Vorschaltwiderstand einschalten, welcher die Stromstärke bis auf das gewünschte Maß dadurch herunter bringt, daß er einen Teil der erzeugten Energie in sich aufnimmt.

Oft aber ist eine Parallelschaltung von Widerstand neben den Apparat, ein Shunt, angezeigter. Zum Betrieb von manchen Apparaten (z. B. kleinen Induktorien) oder für all die zahlreichen medizinischen Anordnungen diagnostischer und therapeutischer Natur (z. B. elektrische Bäder) bedarf man größerer oder kleinerer rasch zu ändernder Spannungen, die durch Anschluß an das städtische Zentralnetz erreicht werden sollen.

Es sei z. B. für eine medizinische Anwendung eines Gleichstromes („Galvanisation") eine Maximalspannung von 30 V vorgeschrieben, die aber von Null ansteigend nur allmählich erreicht werden soll, sog. „Ein-

schleichen des Stromes". Wollte man hier mit Vorschaltwiderstand arbeiten, so müßte zunächst ein unendlich großer Widerstand genommen werden, der allmählich so verkleinert wird, bis an den Elektroden am menschlichen Körper die Potentialdifferenz von 30 V herrschte. Dieser Schlußwiderstand berechnet sich, wenn z. B. der Widerstand des menschlichen Körpers 1000 Ω und die Straßenstromspannung 240 V wäre, zu 7000 Ω, dann wäre der gesamte Widerstand 8000 Ω; die 240 V Anfangsspannung des Straßenstromes sinken in je 1000 Ω um 30 V herunter. Es ist also auch der Spannungsabfall im menschlichen Körper 30 V. Solche große Widerstände zu wickeln wäre schon umständlich; überdies aber würde, wenn eine Elektrode schlecht aufsitzt oder gar von der Haut etwas weggenommen würde, der Widerstand des menschlichen Körpers vergrößert oder gar unendlich groß. Dann würde die Elektrodenspannung bis zum Anfangswert von 240 V anwachsen, was natürlich sehr schädlich wäre.

Man nimmt da sog. „Anschlußapparate". Wir verwenden z. B. den bereits bekannten Schieberrheostat in etwas anderer Schaltung (Fig. 400). Der Straßenstrom von z. B. 240 V Spannung durchfließt den ganzen Rheostaten von a bis b, und es sinkt längs dieser ganzen Strecke ab das Potential ganz regelmäßig herunter (ähnlich wie im Drahte $abcd$ in Fig. 391). Die Potentialdifferenz zwischen a und b in Fig. 400 ist z. B. 230 V, da ja ein Teil des Potentialabfalles schon in den Zuleitungsdrähten stattfindet. Zwischen s und a herrscht also nach der Zeichnung eine Potentialdifferenz von etwa $^1/_2$ 230 V. Schiebt man s ganz gegen a, so wird diese Potentialdifferenz Null. Schalten wir nun zwischen α und β einen Induktionsapparat oder irgendeinen Teil eines tierischen Körpers ein, so durchfließt diesen kein Strom. Schiebt man dann s allmählich gegen b, so wird $\alpha\beta$ von einem immer größeren Strom durchflossen. Dieser Nebenstrom alteriert den Hauptstrom um so weniger, je größer der Widerstand $\alpha\beta$ gegen den Rheostatenwiderstand as ist. (Ein besonderer Vorteil dieser Nebenschaltung ist die Vermeidung eines Extrastromes (§ 709) im Nebenkreis $a\alpha\beta s$, weil dieser kein Eisen enthält. Man kann diesen Kreis ohne große Funkenbildungen öffnen.)

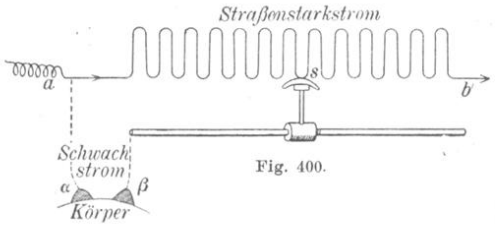


Fig. 400.

Auch der Kurbelrheostat (Fig. 399) kann durch passende Schaltung zu einem solchen Shunt benützt werden. Der Hauptstrom fließt dann von a bis b durch alle Spulen und der Zweigstrom wird abgenommen von a und O.

Messung von Widerständen und elektromotorischen Kräften.

Wir sagten schon, daß es möglich ist den Widerstand oder die elektromotorische Kraft direkt, d. h. absolut nur mittels Länge, Masse und Zeit zu bestimmen. Diese schwierigen Messungen sind aber alle mit solcher Genauigkeit ausgeführt, daß wir es nun immer nur mehr mit Vergleichen zu tun haben, wie wir ja auch das Gewicht eines Körpers durch Vergleich mit einem als richtig angenommenen Gewichtssatze bestimmen.

Die vielen Methoden zur Messung von Widerständen gelten für feste und flüssige Körper, bei letzteren mit Einschränkungen, die später gesondert besprochen werden. Ein ganz eigenartiges Verhalten zeigen die Gase; man kann da von Ohm'schem Widerstand nicht sprechen (§ 755).

640. Direkte Anwendung des Ohm'schen Gesetzes. Wenn man die Potentialdifferenz zwischen den zwei Endpunkten eines Widerstandes in V, z. B. mit Elektrometer (oder bequemer mit Voltmeter § 647) mißt und die Stromstärke in A, z. B. durch Elektrolyse (oder besser Ampèremeter z. B. § 684), so ergibt der Quotient dieser beiden Zahlen den Widerstand in Ω.

641. Substitutionsmethode. Man schaltet hintereinander eine Batterie, den zu messenden Widerstand x und ein beliebiges strommessendes Instrument; der Ausschlag des letzteren sei α. Dann nimmt man den gesuchten Widerstand x aus dem Stromkreise heraus und setzt an dessen Stelle einen Widerstandskasten, dessen Stöpselung man so reguliert, daß wieder der gleiche Ausschlag α sich einstellt; dieser ausgestöpselte Widerstand ist gleich x.

642. Viel genauer als diese Methoden ist die der **Wheatstone'schen Brücke.** Der Strom von zwei bis drei beliebigen, eventuell auch inkonstanten Elementen B fließt zunächst durch einen gerade ausgespannten, dünnen und blanken Draht ab von 1,5 m Länge, Fig. 401 (ohne punktierte Linien). Von a führt überdies eine Zweigleitung durch den teilweise ausgestöpselten Widerstandskasten mit einem Widerstande R über d und durch den gesuchten Widerstand x nach b. Die Stromspannung sinkt sowohl in adb, als in acb vom gemeinschaftlichen Anfangswerte V_a auf die gemeinschaftliche Endspannung V_b. Dann ist die Stromstärke

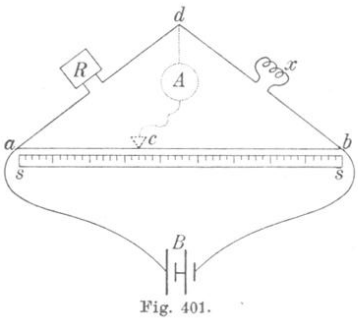


Fig. 401.

im oberen Teile:

$$J_1 = \frac{V_a - V_d}{R} = \frac{V_d - V_b}{x}$$

im unteren Teile:

$$J_2 = \frac{V_a - V_c}{R_{ac}} = \frac{V_c - V_b}{R_{cb}}.$$

Nun muß an einem mittleren Punkte oben dieselbe Spannung herrschen wie an einem analogen Punkte unten; es seien das z. B. c und d, so daß $V_c = V_d$. Dann ergibt sich durch Division der obigen Gleichung

$$R : x = R_{ac} : R_{cb}.$$

Um diesen Punkt c, der die gleiche Spannung mit dem Punkte d hat, experimentell zu finden (s. punktierte Linie in Fig. 401) legen wir von d aus eine Leitung über ein stromempfindliches Instrument A (Galvanometer § 678) zum Schleifkontakte c, den wir auf ab so lange hin und her schieben, bis das Galvanometer stromlos ist, dann ist natürlich $V_c = V_d$. Diese stromlose Leitung dAc ist somit gleichsam nicht vorhanden, und unsere Ableitung, die ohne Rücksicht auf diesen Stromweg dAc gemacht wurde, richtig. Da R_{ac}/R_{cb} bei gut zylindrischen Drähten gleich dem Längenverhältnis ac/cb ist, erhalten wir $R/x =$ Länge ac/Länge cb. Dieser Quotient wird an einem unter ab befindlichen Längenmaßstabe ss abgelesen. Die Einstellung ist am genauesten, wenn ac ungefähr gleich cb ist, wenn man also die Stöpselung vor der Messung so vornimmt, daß zunächst ungefähr $R = x$ ist. Der genaue Wert folgt dann aus obiger Gleichung.

Diese klassische Methode der Widerstandsmessung ist darum so großer Genauigkeit fähig, weil sie wie z. B. auch die Wage, eine Nullpunktmethode ist; es wird nicht ein Ausschlag, sondern das Verschwinden eines Ausschlages gemessen.

643. Widerstand fester Körper. Man versteht unter spezifischem elektrischem Widerstand den Widerstand eines Drahtes von 1 cm Länge und 1 cm² Querschnitt in Ω. Für praktische Zwecke nimmt man eine 10000 mal so große Zahl; man versteht unter „praktischem" Widerstand den einer Länge von 1 m und eines Querschnittes von 1 mm² in Ω.

Dieser ist:

für	Silber	Kupfer	Platin	Eisen	Konstantan	Quecksilber	
	0,016	0,017	0,108	0,12	0,49	0,958	Ω

Fast alle festen Körper (mit Ausnahme von Kohle) vergrößern ihren elektrischen Widerstand R von 0° C bei Erwärmung, so z. B. Silber, Kupfer usw. pro 1° C um etwa 0,004 R, hingegen Konstantan, Manganin und ähnliche Legierungen fast gar nicht. Diese Zahlen nennt man die Temperaturkoeffizienten des Widerstandes. In der Nähe des absoluten Nullpunktes verschwindet jeder Widerstand fast gänzlich.

Die metallische Modifikation des Selens leitet sehr schwach, doch sinkt der Widerstand bei starker Bestrahlung auf ein Hundertstel und weniger herunter. Diese Eigenschaft wird bei der Fernphotographie benützt.

Viele Metalle ändern ihren Widerstand, wenn man sie zwischen Magnetpole bringt. Bei Wismut kann er über das Doppelte an-

steigen. Diese Widerstandsänderung wird zur Messung magnetischer Felder benutzt.

Interessant ist die Analogie zwischen Elektrizitäts- und Wärmeleitfähigkeit; das Verhältnis $\frac{\text{Elektrizitäts-Leitfähigkeit}}{\text{Wärme-Leitfähigkeit}}$ ist für viele Körper eine konstante Zahl. Die besten Elektrizitätsleiter sind auch die besten Wärmeleiter (Erklärung § 777).

644. Die Wheatstone'sche Brücke ergibt auch ein sehr empfindliches Mittel zur **Temperaturmessung.** Wenn in Fig. 401 das Galvanometer auf Null steht, so erzeugt eine kleine Erwärmung von x infolge der Widerstandserhöhung einen Ausschlag, aus dem sich unmittelbar die Temperatur von x ergibt. Es sei z. B. x eine kleine Platinspirale, die in einer Körperhöhle eines Patienten (After, Achselhöhle) dauernd eingefügt wird; dann kann das Galvanometer so eingerichtet werden, daß es auf einem durch ein Uhrwerk gezogenen Papierstreifen die Temperatur des Patienten fortwährend registriert, was mit einem gewöhnlichen Quecksilberthermometer nicht möglich wäre. Bei Überschreiten einer bestimmten Temperatur kann ein Glockensignal ausgelöst werden.

Eine im Prinzip analoge Einrichtung kann im Zentralpunkte eines großen Gebäudes die Temperaturen verschiedener Wohnräume registrieren.

Es kann auch x in Fig. 401 als flaches berußtes Metallstreifchen ausgebildet statt einer Thermosäule (§ 660) zur Messung kalorischer Strahlung dienen — Bolometer.

645. Widerstand von Flüssigkeiten. Da bei jeder Widerstandsmessung ein Strom durch den zu messenden Widerstand geht, wird die bei Flüssigkeiten fast immer auftretende Polarisation große Störungen veranlassen. Wenn man aber durch geeignete Maßnahmen die Stromrichtung fortwährend ändert, Wechselstrom (§ 697), und sehr große Elektroden verwendet, so werden die Polarisationswirkungen unmerklich werden, besonders wenn der Wechselstrom schwach ist. Die große Oberfläche der Elektroden erreicht man dadurch, daß man Platin mit Platinschwamm überzieht. Selbstverständlich sind aber jetzt alle Instrumente so zu wählen, daß sie auf Wechselstrom reagieren. Mit dieser Modifikation können alle drei im Vorhergehenden geschilderten Methoden in Anwendung kommen.

Doch ist auch hier die Methode mit der Wheatstone'schen Brücke die genaueste und die fast ausschließlich gebrauchte.

Man erzeugt hier die Wechselströme mittels eines kleinen Induktoriums (§ 715), das an Stelle von B in Fig. 401 kommt und ersetzt den Gleichstrommesser A durch ein Telephon (§ 719). Der Schieber c wird so lange verschoben bis das Telephon möglichst schweigt.

Von größter Wichtigkeit ist hier die Form der Leitungsgefäße, d. s. die die Flüssigkeit samt den Elektroden enthaltenden Gefäße. Es sind deren sehr viele konstruiert worden. Die Elektroden sind je nach den kleineren oder größeren Widerständen der zu messenden Flüssigkeiten größere oder kleinere mit

feinverteiltem Platinmohr überzogene Platinelektroden, deren Zuleitungsdrähte durch Glasröhren gegen die Flüssigkeit isoliert sind; das Ganze kommt in ein Flüssigkeitsbad mit konstanter Temperatur. Sehr bequem ist es oft, wenn man den Widerstand meßbar ändern kann, wie z. B. in Fig. 402 durch Änderung der Elektrodendistanz ab.

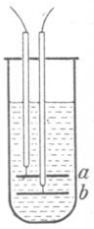


Fig. 402.

Dieses Gebiet ist besonders durch die klassischen Arbeiten von F. Kohlrausch ausgebaut worden. Man bestimmt hier $\varkappa$, den reziproken Wert von ϱ, wo ϱ den spezischen Widerstand (§ 643) bedeutet. Dieses $\varkappa$ ist die spezifische elektrische Leitfähigkeit, d. h. die Leitfähigkeit von 1 cm³ Würfel der Flüssigkeit zwischen zwei gegenüberliegenden Flächen. $\varkappa$, das für die meisten Lösungen bestimmt ist, hängt natürlich sehr von der Konzentration ab.

Für die ersten Messungen dieses Gebietes mußten die Länge und der Querschnitt des Elektrolyten sehr genau bestimmt werden. Jetzt aber ist die Sache leichter, indem man in ein beliebiges Zersetzungsgefäß erst Lösungen mit bekannten $\varkappa_1$ einbringt, z. B. gesättigte NaCl-Lösung, und den Widerstand R_1 bestimmt. Nach dem Reinigen des Gefäßes kommt der zu messende Elektrolyt mit dem unbekannten $\varkappa_2$ hinein, der gemessene Widerstand sei jetzt R_2. Da $R_1 : R_2 = 1/\varkappa_1 : 1/\varkappa_2$, so ist $\varkappa_2 = \varkappa_1 R_1/R_2$. Dieses $\varkappa_1 R_1$ heißt die Widerstandskapazität des Gefäßes und hängt von dessen geometrischer Form ab. Ist sie einmal für ein bestimmtes Gefäß bekannt, so läßt sich jedes $\varkappa$ rasch finden.

Flüssigkeiten leiten viel schlechter als Metalle. Einer der bestleitenden Elektrolyten ist z. B. die Lösung 100 g H_2O + 30 g H_2SO_4 und selbst diese leitet etwa $4 \cdot 10^5$mal schlechter als Kupfer.

Der Einfluß der Temperatur ist umgekehrt wie bei den festen Körpern, Flüssigkeiten leiten bei höherer Temperatur besser.

Der Widerstand des menschlichen Körpers ist sehr variabel. Muskeln leiten besser als Nerven; am besten die Blutgefäße, am schlechtesten die Knochen. Der Hauptwiderstand liegt in der Epidermis, besonders wenn sie trocken ist, darum befeuchtet man die aufliegenden Elektroden (in Fig. 396). Mit der Elektrodengröße sinkt der Widerstand. Bestimmte Zahlen anzugeben ist unmöglich, da sich der Widerstand überdies bei manchen pathologischen Zuständen ändert. Der Gesamtwiderstand des Patienten in Fig. 396 beträgt einige Hundert Ω.

646. Messung elektromotorischer Kräfte. Die Potentialdifferenz zweier Punkte irgendeiner Leitung (oder elektromotorische Kraft oder Spannung zwischen diesen Punkten) mißt zunächst sehr einfach ein Elektrometer (§ 578). Kleinere Werte mißt ein Quadrantelektrometer, größere auch ein geeichtes Exner'sches Elektroskop.

Die klassische Methode aber zur Bestimmung elektromotorischer Kräfte, z. B. von Elementen, ist die Kompensationsmethode von Poggendorf.

In Fig. 403 ist ab ein dünner, gerader und blanker Draht, durch den ein Strom einer Hilfsbatterie B fließt. Dann sinkt das Potential in diesem Drahte regelmäßig, z. B. von links nach rechts.

$V_a - V_b$ ist vielleicht 2 V; genau kenne ich diese Zahl aber nicht. Irgendwo aber im Drahte ab, z. B. für c, ist der Spannungsabfall $V_c - V_b$ genau

gleich 1,019 V, also gleich der Spannung eines Weston-Normalelementes. Bringe ich die Enden der Leitung eines solchen Normalelementes W in passender Stromrichtung an die Punkte c und b, so kann kein Strom fließen; die Potentialdifferenz des Drahtes $(V_c - V_b)$ hält der Spannung des Normalelementes genau das Gleichgewicht. Das Strommessinstrument A bleibt stromlos. Man verschiebt also den Schleifkontakt c so lange, bis dieser Fall eintritt. Das Potential $(V_c - V_b)$ ist dann genau 1,019 V.

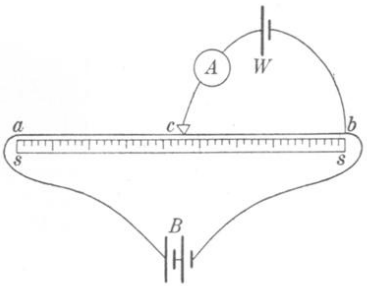


Fig. 403.

Bringe ich nun an Stelle von W irgendein Element mit der zu messenden Spannung x und verschiebe jetzt wieder den Schleifkontakt so lange, bis A wieder stromlos ist, vielleicht bis zu einer Stelle d, so ist

$$\frac{V_d - V_b}{V_c - V_b} = \frac{\text{Länge } db}{\text{Länge } cb} = \frac{x}{1{,}019}. \quad \text{Daraus } x = 1{,}019 \frac{db}{cb} \text{ V}.$$

Diese Methode — als Nullpunktsmethode — ist fast beliebig genau.

647. Für praktische Zwecke verwendet man aber **Voltmeter** d. s. irgendwelche strommessende Apparate mit grossem Widerstande. Es sei z. B. an einer stromdurchflossenen Drahtleitung die Potentialdifferenz $(V_a - V_b)$ der Punkte a und b zu bestimmen. Führen wir von a eine Nebenleitung zu einem strommessendem Apparat A (Galvanometer o. dgl.) und weiter zu b zurück, so geht durch diese Parallelleitung ein Zweigstrom. Wenn nun der Widerstand dieser Zweigleitung gegen den Hauptstrom sehr groß ist, so fließt nach dem Kirchhoff'schen Verzweigungsgesetze nur ein minimaler Zweigstrom durch die Nebenleitung, der den Hauptstrom praktisch nicht merklich schwächt. Gleichwohl zeigt ein sehr empfindlicher Strommeßapparat diesen Zweigstrom an, dessen Stärke dann natürlich der Potentialdifferenz $(V_a - V_b)$ proportional ist. Man liest dann $(V_a - V_b)$ direkt an der Skala ab.

Hat man ein genaues Ampèremeter und einen guten Widerstandskasten, so läßt sich ein Voltmeter leicht eichen. Man sendet einen in A gemessenen Strom durch einen in Ω bestimmten (nicht zu großen) Widerstand. An den Enden des Widerstandes schaltet man das Voltmeter an, dessen Ausschlag so viele V bedeutet, als das Produkt Stromstärke mal Widerstand beträgt.

Auch hier kann man Voltmeter mit verschiedenen Meßbereichen dadurch gewinnen, daß man verschiedene Vorschaltwiderstände (keine Shunts!) mittels Kurbel- oder Stöpseleinschaltung in das Instrument einbaut.

Man kann dann rasch und bequem durch direkte Anschaltung des Voltmeters an ein Element oder an zwei Punkte einer Leitung die dort herrschende Spannung ablesen.

Einige Schaltungsbehelfe.

648. Schaltung von Elementen. Das Zinkende eines (Zn — H_2SO_4 Lösung — Kohle) Elementes sei geerdet, das andere isoliert. Wo das Zn die Flüssigkeit berührt, entsteht die elektromotorische Kraft E. In diesem „offenen" Zustande des Elementes ist dann die „Klemmspannung" k, d. i. die Potentialdifferenz der Elementpole, genau so groß wie E.

In Fig. 404 gibt die strichlierte Linie den Potentialverlauf. z und C sind die Pole. Schließe ich aber die beiden Enden durch einen Leiter mit dem Widerstande R_a („äußerer Widerstand"), so wird k kleiner (Fig. 405). Es sei der innere Widerstand, d. i. der Widerstand in dem Elemente, R_i, so haben wir hier die Stromstärke $J = \frac{E}{R_i + R_a}$ für den Gesamtstromkreis (§ 633); derselbe Strom J fließt auch im äußeren Stromkreis und hier ist $J = \frac{k}{R_a}$, weil der äußere Leiter an seinen Enden die Spannung k hat. Aus $\frac{E}{R_i + R_a} = \frac{k}{R_a}$ ergibt sich $k = E \frac{R_a}{R_i + R_a}$. Für die Klemmspannung k ist daher maßgebend der Bruch $\frac{R_a}{R_i + R_a}$. Ein Teil des Potentialabfalles findet schon im Elemente selbst statt: von E bis k, ein Teil im äußeren Schließungsleiter: von k bis Null. In Fig. 405 ist nur das Potentialgefälle im Innern des Elementes strichliert gezeichnet.

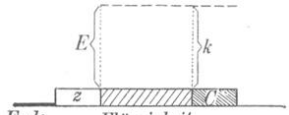


Fig. 404.

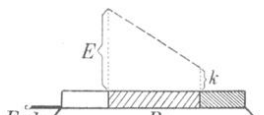


Fig. 405.

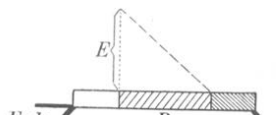


Fig. 406.

Ist R_a sehr klein, z. B. kurzer, dicker Draht, also im Vergleiche mit R_i fast Null, so ist k fast gleich $E \frac{0}{R_i + 0}$, fast Null, d. h. die Klemmspannung ist verschwindend klein, fast das ganze Potentialgefälle liegt gemäß des großen R_i im Innern der Batterie (Fig. 406).

Ist R_a sehr groß gegen R_i, also R_i fast Null, so wird k fast gleich $E \frac{R_a}{0 + R_a}$ oder fast gleich E, d. h. die Klemmspannung ist fast wie im offenen Element (Fig. 404), wo wir ja auch gleichsam einen unendlich großen äußeren Widerstand supponieren könnten.

Ist schließlich z. B. $R_i = R_a$, so gilt $k = E \frac{R_a}{R_a + R_a} = \frac{1}{2} E$, d. h. die Klemmspannung ist genau die Hälfte der Elementspannung (im offenen Zustande).

Das, was hier für ein Element abgeleitet wurde, gilt auch für die Vereinigung vieler Elemente zu einer Batterie.

Die Klemmspannung sinkt bei Stromschluß um so mehr, je kleiner der äußere Widerstand im Verhältnis zum Batteriewiderstand wird.

Hat man also einem bestimmten Objekte möglichst viel elektrische Energie (i. e. Stromstärke mal Spannung) zuzuführen, und steht uns nur eine bestimmte Zahl von Elementen, jedes mit der elektromotorischen Kraft E zur Verfügung, so werden wir durch passende Schaltung für möglichst hohe Klemmspannung zu sorgen haben. Schaltet man Elemente hintereinander, z. B. 4 Stück, so ist die elektromotorische Kraft dieser Batterie (Fig. 407 oben) im offenen Zustande $4E$, aber es wird auch der innere Widerstand gleich $4R_i$, wenn R_i der innere Widerstand eines Elementes ist.

Oft nützt ein solches Hintereinanderschalten vieler Elemente, oft nicht. Wenn ein kleiner dicker Platindraht mit 4 hintereinandergeschalteten (in serie) Daniell nicht glüht, glüht er meist auch mit 100 nicht. Was ich durch die elektromotorische Kraft gewinne, verliere ich durch den großen Widerstand der Elemente.

Darum muß man Elemente verschieden schalten. Will man z. B. durch den großen Widerstand des menschlichen Körpers einen Batteriestrom senden, schaltet man hintereinander. Will man hingegen einen kleinen dicken Draht glühen, macht man den inneren Widerstand dadurch klein, daß man mehrere Elemente nebeneinanderschaltet. In Fig. 407 sind drei verschiedene Schaltungsmethoden von 4 Elementen gezeichnet. Wir haben für die gezeichneten Kombinationen die Spannung $4E$, resp. $2E$, resp. E und den inneren Widerstand $4R_i$, resp. R_i, resp. $^1/_4 R_i$. Ein Apparat, der durch Kurbeldrehung, resp. Umstöpselung solche Umschaltungen von Elementen rasch ermöglicht, heißt Pachytrop. Im allgemeinen gilt ungefähr die Regel: für großen äußeren Widerstand hintereinander, für kleinen äußeren Widerstand parallel. Ein Pachytrop gestattet rasches Ausprobieren.

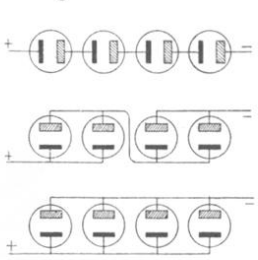


Fig. 407.

Beispiel: Ich habe 30 Elemente, jedes 1 ℣ und 0,5 Θ. Was ist günstiger: Serienschaltung oder Parallelschaltung?

1) $R_a = 10\,000\ \Theta$ $\quad J_s = \dfrac{30\ ℣}{(30 \cdot 0{,}5 + 10\,000)\ \Theta}$ $\quad J_p = \dfrac{1\ ℣}{\left(\dfrac{0{,}5}{30} + 10\,000\right)\Theta}$.

Hier ist I_s etwa 30mal besser als I_p.

2) $R_a' = 0{,}003\ \Theta$ $\quad J_s' = \dfrac{30\ ℣}{(30 \cdot 0{,}5 + 0{,}003)\ \Theta}$ $\quad J_p' = \dfrac{1\ ℣}{\left(\dfrac{0{,}5}{30} + 0{,}003\right)\Theta}$.

Hier ist I_p' etwa 30mal besser als I_s'.

649. Schalthilfsmittel. Die fest an den Wänden verlegten Kupferleitungen müssen mit isolierenden Hüllen umwickelt und besonders in feuchten Räumen an Porzellanisolatoren befestigt sein. Bei guter Isolation ist ein Einschluß in Metallröhren (Kabel) und direktes Einmauern möglich. Für Versuchszwecke verwendet man biegsame Kupferseile mit Wolle oder Seide umsponnen.

Die Enden dieser Drähte müssen blank sein und werden mittels blanker Metallklemmen an die Apparate leitend angeklemmt. Auch die Verbindung der blanken Enden zweier oder mehrerer Drähte wird durch eigene Klemmschrauben bewerkstelligt.

Fig. 408 ist ein Stromschlüssel, mit welchem eine Leitung geschlossen oder unterbrochen werden kann.

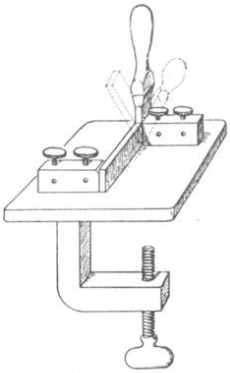


Fig. 408.

Fig. 409 stellt, von oben gesehen, einen Stromwender oder Kommutator dar; in einer runden Hartgummischeibe H_2 sind 4 voneinander isolierte Metallzapfen 1, 2, 3 und 4. Der Batteriestrom geht zu 1 und 3. Die Versuchsleitung mit A ist in 2 und 4 eingeschaltet. Verbindet man 1 mit 4 und 2 mit 3 (ausgezogene Pfeile), so fließt der Strom durch A von links nach rechts. Verbindet man aber 1 mit 2 und 4 mit 3 (gestrichelte Pfeile), so fließt der Strom in umgekehrter Richtung durch A. Um diese Verbindung rasch machen zu können, legt man auf die Hartgummischeibe H_2 zentrisch eine zweite H_1 (in Fig. 409 rechts, von unten gesehen), die zwei Metallstreifen m_1 und m_2 hat. Dann bewirkt eine Achsendrehung dieser oberen Scheibe um 90° die gewünschte Umschaltung. In der gezeichneten Stellung wäre die Verbindung 1 mit 4 und 2 mit 3 effektuiert.

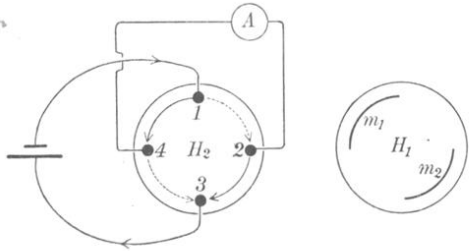


Fig. 409.

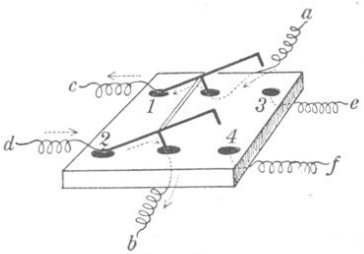


Fig. 410.

Fig. 410 stellt eine Pohl'sche Wippe dar, welche einen raschen Umtausch zweier Leitungen ermöglicht. Ein Brett enthält 6 (schwarz gezeichnete) Hg-Näpfchen. In a und b ist z. B. eine Zersetzungszelle angeschaltet, in c und d eine Batterie, in e und f ein Strommesser. In der gezeichneten Lage wird die Zersetzungszelle polarisiert, beim Umlegen der

Wippe gehen die linken Drähte der Wippe aus den Quecksilbernäpfchen 1 und 2, dafür tauchen nun die rechten in 3 und 4. Die Zersetzungszelle wirkt dann durch e und f auf den Strommesser, welcher den Polarisationsstrom anzeigt.

4. Elektrizität und Wärme.

Joule'sche Wärme.

650. Die **Energie eines stromdurchflossenen Leiters** in Watt fanden wir (§ 629) gleich Produkt aus Stromstärke J (im A gemessen) mal elektromotorischer Kraft E (in V gemessen). Setzen wir hier in diesem Produkte $J \cdot E$ für E nach dem Ohm'schen Gesetze $J \cdot R$, wo R der Widerstand in Ω ist, so erhalten wir $J^2 \cdot R$, d. h.

(Stromenergie eines Leiterstückes in Watt) = (Quadrat der Stromstärke in A) mal (Widerstand in Ω).

Diese Stromenergie verwandelt sich, wenn keine Stromzersetzungen, Bewegungen od. dgl. eintreten, in Wärmeenergie, welche Joule'sche Wärme genannt wird. Erinnern wir uns (§ 260), daß ein Watt äquivalent ist mit 0,24 g Kal pro sek (genauer 0,2387), so erhalten wir für die in irgendeinem Leiter durch den Strom erzeugte

Wärme in g Kal pro sek = (Stromstärke in A) mal (Potentialdifferenz in V) · 0,24 oder

= (Stromstärke in A)^2 mal (Widerstand in Ω) · 0,24.

Wenn in einem verschieden dicken Leiterkreise die Stromstärke überall konstant ist, ist die in den einzelnen Strecken erzeugte Wärme dem Widerstand proportional. Wollen wir also die Wärme an bestimmten Stellen der Stromleitung konzentrieren, muß hier der Widerstand im Vergleich zu den anderen Stellen sehr groß sein. Erwärmt wird natürlich jeder stromdurchflossene Leiter und es tritt dadurch überall in der ganzen Leitung eine unerwünschte Erwärmung als Energieverlust auf. Darum darf die Dimensionierung der Zuleitung unter ein gewisses Maß nicht herabgehen. Man rechnet bei Kupfer für 3 A mindestens 1 mm^2 Querschnitt.

651. Unter **Kurzschluß** versteht man die Einschaltung eines Widerstandes, der im Verhältnisse zum Widerstande der Zuleitung sehr klein ist. Wenn man z. B. an den Enden einer Starkstromleitung einen kurzen Kupferdraht einschaltete, würde ein viel zu starker Strom fließen und alle Zuleitungen längs den Wänden des Gebäudes würden, falls sie nicht außerordentlich stark dimensioniert wären, ins Glühen kommen und unter eminenter Feuersgefahr schmelzen. Man schaltet darum in die Leitungen Siche-

rungen ein, kurze 1 bis 2 cm lange Drähte oder Bleche aus Blei, Silber oder leicht schmelzbaren Legierungen, deren Querschnitt je nach dem Zwecke so gewählt ist, daß ihr Schmelzen lange vor Eintritt einer katastrophalen Stromstärke die Leitung unterbricht.

652. Elektrische Heizung. Die Joule'sche Wärme wird vielfach zur Erwärmung verwendet.

Für Kochzwecke nimmt man Drähte aus Nickel oder Nickellegierung mit Glasperlen, Ton oder Schamotte u. dgl. überzogen, um Oxydation zu verhindern, oder Platindraht zwischen Asbest, oder Glimmerstreifen, auf denen eine dünne Silberschicht eingebrannt ist usw. Das ganze Heizdrahtsystem befindet sich am Boden des Kochgefäßes oder in einer Herdplatte oder in einem Inhalationsapparate usw. Herausragende Metallstifte ermöglichen den Anschluß an eine Starkstromleitung. Die Schaltung der Heizdrähte erfolgt so, daß man durch einfaches Umlegen eines Anschlußstöpsels mehrere Heizdrähte parallel oder aber in Serie legen kann. Erstere Schaltung, durch die viel Strom geht, dient zum raschen Anheizen, letztere, um dauernd mäßige Wärme zu erzeugen. Die Betriebskosten solcher elektrischer Apparate sind derzeit noch sehr hoch.

Zum Heizen von Räumen eignen sich Drahtwiderstände z. B. Flachgitter aus Asbestschnur, in welche Drähte aus Nickellegierungen eingeflochten sind. Da hier keine so hohen Temperaturen wie beim Kochen angewendet werden, so ist die Gefahr der Oxydation sehr gering. Auch hier läßt der Kostenpunkt nur Ausnahmefälle zu, z. B. für Schaufenster, um im Winter das Beschlagen zu verhindern, für elektrische Straßenbahnen u. dgl. oder dann, wenn elektrische Energie ganz besonders billig ist.

Stromdurchflossene dünne und passend isolierte Drähte können auch in Gewebe eingeflochten werden („elektrische Thermophore"): Geheizte Teppiche, elektrische Wärmekissen für chirurgische Zwecke, letztere mit Signalen wegen Überheizung usw.

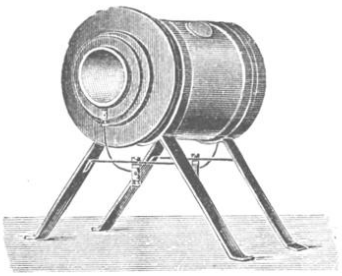


Fig. 411.

Für wissenschaftliche Versuche sind zu rascher und reinlicher Erhitzung kleinerer Gegenstände sehr geeignet die Widerstandsöfen von Heraeus. Auf der Mitte der äußeren Oberfläche eines zylinderförmigen Porzellanrohres, sog. Marquardt'sche Masse, ist eine Spirale aus Platinfolie eingebrannt, deren Enden unter Vorschaltung eines Rheostaten direkt an eine Starkstromleitung angeschlossen werden können. Die erhitzten Teile sind in einer starken Asbestpackung (Fig. 411). Der in der Mitte des Ofens befindliche zylinderförmige Hohlraum kann durch Regulierung des

Vorschaltrheostaten bequem auf jede Temperatur von 100° bis 1500° C gebracht werden. Man kann sich solche Öfen, die bis etwa 1000° C aushalten, leicht selbst aus Nickeldraht und Porzellanröhren herstellen.

653. In der Heilkunde nimmt man, um Verätzungen zu erzeugen, Schlingen von dünnem Platiniridiumdraht, die durch Stromzufuhr glühend gemacht werden. Diese **Galvanokaustik** ist der Behandlung mit dem Paquelin (§ 340) oft überlegen, besonders wo es sich um das Abbrennen gestielter Tumoren u. dgl. handelt. Auch ist die Stärke des Glühens leichter regulierbar. Die Methode braucht aber wegen der Stromquelle ein viel komplizierteres Instrumentarium. (Über „Kaltkauter" § 734.)

654. Die wichtigste Verwendung der Stromwärme ergeben die **Glühlampen.** Ein dünner Draht, der durch Stromzufuhr bis zur Weißglut erhitzt wird, ist, um Oxydation zu vermeiden, in einer luftleeren Glasbirne eingeschmolzen. Dieser glühende Faden hat natürlich einen gegen die übrige Leitung sehr hohen Widerstand. Zuerst verwendete man Kohlenfäden, dann aber Fäden aus schwer schmelzbarem Metall: früher Osmium, jetzt immer mehr Tantal oder Wolfram. Die Kohlenfadenlampen brauchen etwa 3,5 Watt pro Normalkerze; die neueren Metallfadenlampen sind viel ökonomischer, sie beanspruchen nur etwas über 1 Watt pro HK. Das hängt mit den hohen Schmelzpunkten dieser Metalle zusammen (§ 466).

Eine ganz abweichende Type bildet die Nernstlampe. Hier ist der Glühkörper ein dünnes (1 bis 2 cm langes) Stäbchen aus Magnesia mit Beimengung anderer Erden in Luft (nicht in Luftleere) ausgespannt. Dieser Nernststift leitet erst bei einer Temperatur von über 700°, muß also durch künstliche Einrichtungen so hoch vorerhitzt werden. Das Licht ist sehr milde und angenehm und braucht pro 1 HK etwa 1,6 Watt.

Bei der ökonomischen Beurteilung von Glühlampen spielt die Lebensdauer, bis 1000 und mehr Brennstunden, eine wichtige Rolle.

Die Lichtstärke dieser Glühlampen kann bis zu 1000 HK gesteigert werden; die gebräuchlichsten Glühlampen haben eine Helligkeit zwischen 10 und 50 HK.

Die ganz kleinen Lämpchen, wie sie vom Physiker bei Ablesungen von feinen Skalen oder vom Mediziner (Zahnarzt, Laryngologen, Ophthalmologen usw.) in der sog. Endoskopie gebraucht werden, haben bei 2 bis 4 V eine Lichtstärke von etwa 1 HK und weniger; Lebensdauer sehr gering.

Mehrere Glühlampen werden (fast ausnahmslos) parallel geschaltet; wenn dann auch einige verlöschen, brennt der Rest weiter.

Beispiel: Wir haben eine Batterie mit 60 Akkumulatoren, innerer Gesamtwiderstand etwa 0,4 Ω und Spannung etwa 120 V. Der Widerstand einer

16kerzigen leuchtenden Kohlenfadenlampe sei 280 Ω und der Widerstand der Leitungsdrähte 0,5 Ω. Die Klemmspannung (§ 648) ist dann, wenn nur eine einzige Lampe brennt,

$$E \cdot \frac{R_a}{R_i + R_a} = 120 \frac{(280 + 0{,}5)}{0{,}4 + (280 + 0{,}5)}$$

oder nahe gleich der Originalspannung 120 V. Das ganze Potentialgefälle liegt also in der Glühlampe, es erscheint Stromwärme nur in dieser. Die Stromstärke ist ungefähr $\frac{120}{280}$ oder 0,43 A. Diese 16kerzige Glühlampe verbraucht in Watt 120 V · 0,43 A, also pro HK etwa 3,2 Watt.

Nehmen wir statt 1 Lampe deren 10 parallel geschaltet, so ergibt die Rechnung gleichfalls eine nur minimale Abnahme der Klemmspannung. Anders aber bei 100 Lampen. R_a ist dann $\frac{280}{100}$ und wir haben für die Klemmspannung $120 \frac{(2{,}8 + 0{,}5)}{0{,}4 + (2{,}8 + 0{,}5)} = 120 \cdot 0{,}89$, d. h. 11% der Stromwärme wird in den Akkumulatoren und in der Zuleitung aufgezehrt, die Lampen brennen schlecht und unökonomisch.

655. Bogenlicht. Bringt man 2 Kohlenstäbe, die mit den Polen einer mindestens 50voltigen Batterie in Verbindung stehen, zuerst in Berührung und entfernt sie dann bis auf einige mm, so entsteht eine glänzende Lichterscheinung (Davy 1821). Die rascher abbrennende positive Kohlenelektrode (ungefähr 3700° C) leuchtet in starker Weißglut. Weniger hell ist die langsamer abbrennende negative Kohle (etwa 2500° C). Der Zwischenraum wird durch einen bläulichen, nur wenig leuchtenden Lichtbogen überbrückt. Das Licht einer Projektionslampe z. B. kommt in erster Reihe von einer kraterförmigen Vertiefung, die sich an der positiven Kohle ausbildet und geht in Fig. 412 (positive Kohle oben) schief abwärts. Man nimmt darum bei Projektionslampen die positive Kohle gewöhnlich etwas dicker als die negative und stellt sie etwas geneigt (oder horizontal), damit möglichst viel horizontal gerichtete Strahlung aus dem Krater herausgeht.

Fig. 412.

Tränkt man die Kohlen mit gewissen Salzen, z. B. Fluorsalzen des Kalzium, Barium, Strontium usw., so leuchtet auch der Lichtbogen selbst (meist gelb oder rot); diese „Effektkohlen" geben eine viel bessere Energieausbeute.

Die technischen Konstruktionen der Bogenlampe verlangen also zuerst ein Aneinanderschieben der Kohlenstäbe, dann ein plötzliches Auseinanderrücken beim Stromdurchgang und schließlich ein allmähliches Nachschieben wegen des Abbrennens. Während in den früheren Konstruktionen die Kohlen rasch, in etwa 8 Stunden, abbrannten, schließt man

jetzt in den Dauerbrandbogenlampen die Kohlen in eine enge Glasglocke möglichst luftdicht ein, wodurch man eine Brenndauer bis zu 150 Stunden erhält.

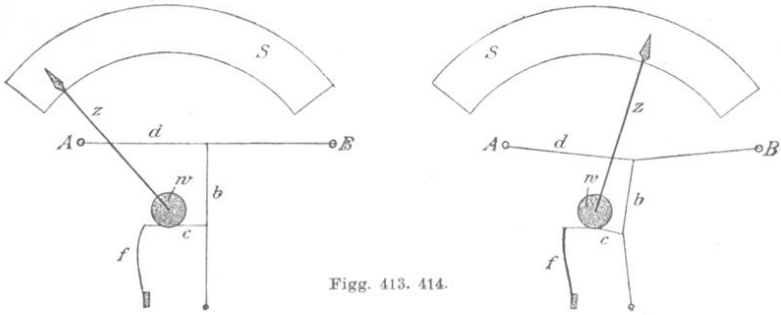
Eine gewöhnliche Bogenlampe braucht etwa 50 V und 10 A, also 500 Watt bei einer mittleren (räumlichen) Helligkeit von 500 HK; eine HK verlangt also etwa 1 Watt. Die Energiekosten beim Bogenlichte sind bei gleicher Helligkeit ungefähr ebenso groß wie beim Auerlicht; Glühlicht aber ist teurer.

Man hat Bogenlicht, besonders bei Scheinwerfern, bis zu 70 000 HK hergestellt.

Die hohe Temperatur des Lichtbogens findet für chemische Zwecke z. B. in den elektrischen Öfen von Moissan vielfache Verwendung. Ein Kohlentiegel bildet z. B. die Kathode und ein vertikal in die Mitte dieses Tiegels tauchender Kohlenstab die Anode. Der Lichtbogen entsteht zwischen Stab und Tiegel. Man arbeitet hier mit Stromstärken von einigen Tausend A. Die im Tiegel befindlichen Substanzen werden so der größten Hitze ausgesetzt, die man überhaupt herstellen kann, etwa 2500 bis 3000° C. In dieser Weise werden besonders die Karbide erzeugt, z. B. das Kalziumkarbid für die Azetylenbeleuchtung, das Siliziumkarbid oder Karborundum, ein fast die Härte des Diamanten erreichendes Schleifmittel usw.

656. Hitzdrahtinstrumente. Die Erhitzung eines stromdurchflossenen Drahtes ist natürlich von einer Verlängerung begleitet, deren Messung die Stromstärke bestimmen läßt.

Zwischen den fixen Punkten A und B (Fig. 413) ist der dünne zu erwärmende Draht d, meist Platiniridium, 0,03 mm dick, gespannt. Von der Mitte dieses Drahtes ist nach dem fixen Punkte unten ein weiterer Draht b



Figg. 413. 414.

gespannt. In der Mitte dieses Vertikaldrahtes ist ein Kokonfaden c befestigt, der durch eine Feder f nach links gespannt wird. c ist in passender Weise über eine fixe Rolle w geführt, welche den Zeiger z trägt. Wenn d durch einen (nur durch AB gehenden) Strom (bis gegen 300° C) erwärmt und

verlängert wird, stellt sich der Zustand Fig. 414 heraus; der Zeiger z bewegt sich auf einer Skala S nach rechts. Die Rolle w ist etwas exzentrisch, so daß bei einer schwachen Erwärmung, am Anfang der Skala, der Zeiger sich stärker bewegt; es wäre sonst, da ja die Erwärmung dem Stromquadrate proportional ist, die Skala sehr ungleichmäßig.

Das Instrument muß empirisch geeicht werden. Als Ampèremeter braucht es, minimale Ströme ausgenommen, einen Shunt, als Voltmeter Vorschaltwiderstände. Der Hauptvorteil dieser Instrumente besteht darin, daß sie in gleicher Weise für Gleichstrom und Wechselstrom (verschiedener Frequenz, § 707) gebraucht werden können, ein Nachteil, daß sich der Nullpunkt etwas ändert.

Thermoelektrizität.

657. Thermoelement. Zwei verschiedene Drähte seien wie in Fig. 415 an zwei Stellen a und b aneinandergelötet; (es genügt aber auch inniger Kontakt). Wenn diese zwei Lötstellen ungleich warm sind, fließt ein dauernder Strom, Thermostrom, durch das System. In Fig. 415 seien die zwei Metalle, z. B. Eisen und Konstantan; dann fließt, wenn b wärmer ist, ein Strom in der Richtung $Fe - a -$ Konst $- b - Fe$. Eine Temperaturdifferenz von 1^0 zwischen a und b entspricht einer elektromotorischen Kraft von 0,000053 V. Es ist also die thermoelektrische Kraft im Vergleich zu den Wirkungen der Lösungstension eine sehr kleine.

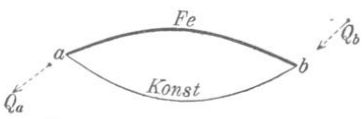


Fig. 415.

Nimmt man andere Metallkombinationen, so erhält man meist noch weniger. Nur die Kombination von Antimon und Wismut ergibt einen fast doppelt so großen Wert.

In der Regel wächst der Strom bei wachsender Temperaturdifferenz der Lötstellen, nimmt aber manchmal bei weiterer Steigerung wieder ab und fließt dann sogar in entgegengesetzter Richtung.

Um den Strom aus der Leitung der Fig. 415 herauszubringen, unterbricht man die Leitung an irgendeiner nicht erwärmten Stelle und schaltet hier mittels beliebiger Leitungsdrähte ein Strommeßinstrument oder dergleichen ein.

658. Peltiereffekt. Woher kommt diese Stromenergie? Die Lötstelle b muß dauernd auf einer gewissen hohen Temperatur gehalten sein, verschluckt also dauernd Wärme. Das Umgekehrte gilt für die Lötstelle a; diese muß dauernd kalt gehalten werden, wir müssen fortwährend Wärme wegnehmen, weil sie sich sonst erwärmen würde. Jeder Thermostrom

kühlt also die warme Lötstelle und erwärmt die kältere, ganz gleich aber wirkt auch ein fremder durch das Thermoelement gehender Strom.

Je nach der Metallkombination tritt also beim Durchsenden eines fremden Stromes durch ein (kaltes) Thermoelement in den Berührungsstellen der beiden Metalle je nach der Stromrichtung Erwärmung oder Abkühlung auf. Diese Peltierwirkung ist der Stromstärke proportional und addiert oder subtrahiert sich zum Joule-effekt.

Das Thermoelement (Fig. 415) mit der heißen Stelle b und der kalten a gibt uns ein Beispiel für eine Anwendung des zweiten Hauptsatzes. Solange der Thermostrom fließt, will er (Peltiereffekt) b abkühlen und a erwärmen, wir müssen also in b dauernd Q_b Kal pro sek zugeben und in a dauernd Q_a Kal pro sek wegnehmen. (Bei dieser Überlegung kümmern wir uns um den Joule-effekt und um die Wärmeleitung in den Drähten nicht.) Die bei hoher Temperatur zufließende Wärme Q_b vermindert sich zu Q_a bei tieferer Temperatur; $(Q_b - Q_a)$ hat sich in elektrische Energie verwandelt. Könnten wir ein Thermoelement ohne jede Wärmeleitung, Ausstrahlung und Joule-effekt konstruieren, so hätten wir ein Beispiel eines reversiblen Prozesses. In Wirklichkeit ist der Prozeß natürlich irreversibel.

659. Temperaturmessung durch Thermoelement. Thermoelemente eignen sich sehr für thermometrische Zwecke. Wenn wir in Fig. 415 die Punkte a und b weit auseinander bringen, z. B. b an die Decke des Zimmers, so werden wir, da b wärmer sein wird, einen Strom erhalten. Wenn wir nun a, das unten im Zimmer leicht zugänglich ist, so lange erwärmen, bis der Strom im Galvanometer verschwindet, haben beide Lötstellen die gleiche Temperatur und wir haben so die Temperatur an der Zimmerdecke bestimmt. b könnte auch in irgendeinem anderen unzugänglichen Raume sein.

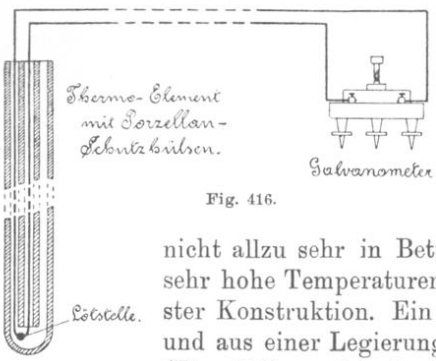


Fig. 416.

Bei sehr großer Temperaturdifferenz ist nur die Temperatur der einen sehr heißen (oder sehr kalten) Lötstelle ausschlaggebend; die Temperatur der zweiten Lötstelle kommt nicht allzu sehr in Betracht. So mißt man sehr tiefe und sehr hohe Temperaturen mit Thermoelementen verschiedenster Konstruktion. Ein Thermoelement aus Platin einerseits und aus einer Legierung von Platin und Rhodium anderseits (Fig. 416) ergibt ein thermoelektrisches Pyrometer, welches Temperaturen bis hinauf zu 1600° C zu messen gestattet. Die Lötstelle kommt in einen Ofen, gut durch Porzellanröhrchen isoliert. Die freien Enden werden durch gewöhnliche Leitungen mit einem Galvanometer hohen Widerstandes verbunden, an welchem man die Temperatur direkt

ablesen kann; diese Angaben sind durch Vergleichung mit einem Luftthermometer gewonnen. Als Thermoelemente für tiefe Temperaturen (bis -200^0 C) eignet sich die Kombination Kupfer-Konstantan.

660. Thermosäule. Man kann die thermoelektrischen Wirkungen natürlich steigern, wenn man mehrere Elemente hintereinander schaltet. In Fig. 417 haben wir eine solche Batterie oder Säule von fünf Elementen, welche abwechselnd aus zwei verschiedenen Metallen besteht. Erhitzt man die Lötstellen 1, 3, 5 usw., so summiert sich die Wirkung der einzelnen Elemente. Es werden verschiedene solche Batterien für wissenschaftliche und technische Zwecke gebraucht. Für Messungen kleinerer Temperaturdifferenzen dienen solche Thermosäulen aus Wismut und Antimon bestehend mit 20 bis 40 Elementen. In Verbindung mit einem Galvanometer sind noch minimale Wärmemengen z. B. von auffallender kalorischer Strahlung meßbar.

Fig. 417.

661. Es werden auch — in Ausnahmefällen — **Thermobatterien für Stromlieferung** gemacht.

Die Thermosäule von Gülcher besteht z. B. aus einer Kombination von Nickel und einer Legierung Antimon-Zink. Die geraden Lötstellen werden durch kleine Bunsenflammen erhitzt, während die ungeraden mit großen, Wärme ausstrahlenden Kupferstreifen als Kühlvorrichtung versehen sind; eine solche Batterie besteht z. B. aus 66 Elementen, hat bei einem inneren Widerstand von 0,65 Ω eine elektromotorische Kraft von 4 V, leistet somit bei einem Gasverbrauch, der etwa dem eines Bunsenbrenners gleich ist, ungefähr dasselbe wie zwei Akkumulatoren und kann mit Vorteil überall dort zum Laden parallel geschalteter Akkumulatoren verwendet werden, wo kein Starkstrom zur Verfügung steht. Wiewohl hier Wärmeenergie direkt in elektrische Energie übergeht, ist die ökonomische Ausbeute der Thermosäulen recht gering.

5. Magnetismus.

662. Magnetische Pole. Der natürliche Magneteisenstein hat die Eigenschaft, weiches Eisen anzuziehen und festzuhalten; dies war schon im Altertum bekannt.

Eisen kann in unmittelbarer Nähe dieses Magneteisensteins vorübergehend oder temporär magnetisch werden, während gehärteter Stahl, besonders wenn er in passender Weise mit diesem Material gestrichen wird (§ 671), dauernden oder permanenten Magnetismus erhält. Noch stärkere Magnete, sog. Elektromagnete, gewinnt man dadurch, daß man um weiches Eisen eine Spule gut isolierten Drahtes legt und durch diesen einen kräftigen elektrischen Strom schickt. Solche starke Elektromagnete ziehen, wie wir später hören werden, nicht nur Eisen, sondern

alle Körper an. Diese magnetische Anziehung ist natürlich ganz etwas anderes als die Newton'sche Massenanziehung oder die elektrostatische Anziehung.

Wenn wir einen stabförmigen Magneten in Eisenfeilspänen wälzen und dann emporheben, so haftet das Eisen nur an den Enden des Stabes; die Anziehungskraft ist also besonders an diesen Stellen bemerkbar und wir nennen sie die Pole des Magneten. Man kann diese Pole dadurch, daß man einen Stahlstab in die Form eines Hufeisens biegt, viel näher aneinander bringen: Hufeisenmagnet.

Hängt man einen Stabmagnet um eine vertikale Achse in horizontaler Ebene drehbar auf, so stellt er sich in die Nord-Süd-Richtung ein. Man nennt dann jenen Pol, der (ungefähr) nach dem geographischen Norden weist, den Nordpol, und den entgegengesetzten den Südpol.

Nähert man zwei N-Pole oder zwei S-Pole, so findet man Abstoßung, während ein N- und ein S-Pol sich anziehen.

663. Gesetz von Coulomb. Die Wirkung zweier Pole aufeinander wurde von Coulomb untersucht, und er fand das nach ihm benannte Gesetz, daß die

$$\text{Kraft (in Dynen)} = \lambda \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Hier bedeutet m_1 und m_2 die wirkenden Magnetismusmengen, r ihre Entfernung in cm und λ einen Proportionalitätsfaktor. Das Gesetz ist also ganz analog dem für elektrostatische Wirkungen (§ 555).

Nun haben wir über die Einheit des Magnetismus noch keinerlei Bestimmungen getroffen und wir können, genau so wie früher in § 556 den Faktor γ, hier den Faktor $\lambda = 1$ setzen. Die Definition der magnetischen Einheit erfolgt dann in ganz analoger Weise. Die Einheit der magnetischen Masse ist jene, welche eine gleich große Masse in 1 cm Entfernung mit der Krafteinheit (eine Dyne) abstößt.

664. Elektromagnetisches Maßsystem. Wir haben, als wir das elektrostatische Maßsystem besprachen, und als wir die Einheit der Elektrizitätsmenge definierten, gesagt, daß wir mit dieser Definition für das ganze Gebiet der Elektrizität und des Magnetismus gebundene Marschroute hätten. Wenn wir uns daher entschlossen hätten, alles nach elektrostatischem Maßsystem zu messen, so dürften wir hier beim Coulomb'schen Gesetz für den Magnetismus den Faktor λ nicht gleich Eins ansetzen. Er würde einen anderen, ganz bestimmten Wert erhalten.

Wir haben also die Wahl, ob wir den Faktor γ in der Coulomb'schen Formel für elektrostatische Wirkungen gleich Eins annehmen, dann haben wir das elektrostatische Maßsystem, oder ob wir den Faktor λ im Coulomb'schen Gesetz für magnetische Wirkungen gleich Eins annehmen, dann haben wir das magnetische Maßsystem. In letzterem Falle wäre die Einheit von e (§ 556) mit $3 \cdot 10^{10}$ zu multiplizieren. Es sei ganz besonders betont und wir werden darauf noch zurückkommen (§ 738), daß diese Zahl gleich der Lichtgeschwindigkeit ist.

Wir haben also im ganzen drei Maßsysteme kennen gelernt:
1. das elektrostatische,
2. das elektromagnetische,
   beide haben mehr wissenschaftlichen Wert. Wir verwenden als endgültiges Maßsystem
3. das praktische Maßsystem mit internationalen Einheiten.

665. Permeabilität. Bis jetzt haben wir stillschweigend angenommen, daß die beiden aufeinander wirkenden Pole sich in Luft befinden oder im Vakuum (was die Resultate nur in minimaler Weise änderte). Sind die Magnete aber in einem anderen Medium, z. B. in einer Eisenchloridlösung, so wird die Kraftwirkung eine schwächere, das Coulomb'sche Gesetz lautet dann

$$\text{Kraft (in Dynen)} = \frac{1}{\mu}\lambda\frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Es heißt μ die Permeabilitätskonstante des betreffenden Mediums und ist der Dielektrizitätskonstante (§ 559) in manchem Punkte analog. Für Vakuum ist $\mu = 1$; jene Körper, für welche $\mu > 1$, heißen paramagnetische und solche, für die $\mu < 1$ heißen diamagnetische Körper.

Je größer μ eines Körpers, desto stärker wird er vom Magneten angezogen; für die Mehrzahl der paramagnetischen Körper ist μ kaum größer als 1, also die Anziehung unmerklich. Hohe Werte (also starke magnetische Anziehung) hat μ nur bei Eisen, Kobalt, Nickel und einigen (von Heusler entdeckten) Legierungen aus Kupfer, Mangan und Aluminium. μ ist nicht konstant, sondern abhängig von der Stärke der magnetischen Kraft; bei Eisen ist μ für schwächere Kräfte 4000, für stärkere 200. Diese Zahlen ändern sich natürlich auch nach den verschiedenen Eisensorten.

Bei vielen Körpern ändert sich μ stark mit der Temperatur: μ wird gleich 1 für Eisen bei 700°, für Kobalt bei 1100°, für Nickel bei 310° C. Bei diesen Temperaturen werden die genannten Körper unmagnetisch.

Diamagnetische Körper ($\mu < 1$) werden vom Magneten abgestoßen, z. B. Wismut, Gold usw. Diese Abstoßung ist aber nur eine scheinbare. Ein starker Magnet zieht den Äther (das Vakuum) und eine Wismutkugel an, so wie die Erde unsere Atmosphäre und einen Luftballon anzieht. Infolge eines dem Archimedischen analogen Prinzipes geht das Wismut vom Magneten weg, wie der Luftballon von der Erde.

Es werden also von einem Magneten alle Körper magnetisch angezogen, wenn auch in sehr verschiedener Stärke.

666. Magnetische Kraftlinien. Die mathematisch geometrische Analogie der elektrostatischen und elektromagnetischen Anziehung oder die für beide Fälle gleiche Form des Coulomb'schen Gesetzes ergibt, daß auch die magnetischen Kräfte durch physikalische Veränderungen des Äthers

erzeugt sein müssen, und daß wir auch hier von der Vorstellung der Kraftlinien Gebrauch machen können. Geometrisch ist alles wie in § 562. Wir müßten hier diesen ganzen Paragraphen wiederholen, aber nur immer statt „elektrostatisch“ das Wort „magnetisch“ setzen. Folgende „magnetische“ Kraftlinienbilder sind von größter Wichtigkeit. Fig. 360 zeigt die Kraftlinien eines Poles. Sie gehen strahlenförmig nach allen Seiten des Raumes. Die Fig. 361 gibt die Kraftlinien zweier gleichnamiger Pole und Fig. 362 die zweier entgegengesetzter Pole. Auch hier kann man die Anziehung bzw. Abstoßung erklären durch einen Verkürzungszug längs der Kraftlinien bzw. durch einen Querdruck paralleler Kraftlinien. Auch hier gibt die Dichte der Kraftlinien ein Maß für die Intensität des magnetischen Feldes, welche gleich ist der Anzahl der Dynen, mit denen an dieser Stelle eine Einheitsmasse des Magnetismus ponderomotorisch bewegt wird.

Es kann nicht ausdrücklich genug betont werden, daß die Gleichheit dieser elektrostatischen und magnetischen Kraftlinienbilder nur aus der mathematischen Analogie des Coulomb'schen Gesetzes für beide Fälle folgt. Es ist eine geometrische, aber absolut keine physikalische Identität. Die Veränderungen des Äthers sind hier ganz andere. Bei den elektrostatischen Kraftlinien hat man vielleicht eine kleine dauernde Verschiebung eines Ätherteilchens aus seiner Ruhelage in der Richtung der Kraftlinien; bei elektromagnetischen Kraftlinien indes hat man vielleicht eine kleine kreisförmige Bewegung jedes Ätherteilchens in einer zur Kraftlinie senkrechten Ebene um diese Kraftlinien herum, also eine Art Ätherwirbel.

Für das Verständnis des Folgenden ist eine Vertrautheit mit dem Begriffe der elektromagnetischen Kraftlinien sehr wichtig, es seien darum hier noch einige magnetische Kraftlinienbilder dargestellt. Man erhält solche, indem man Eisenfeilspäne auf einen Papierkarton in einem magnetischen Felde streut; durch leises Beklopfen des Kartons ordnen sich die Eisenteilchen in die Richtung der magnetischen Kraftlinien aus. Fig. 418 gibt so die Kraftlinien zweier entgegengesetzter Pole, Fig. 419 die Kraftlinien eines Hufeisenmagneten.

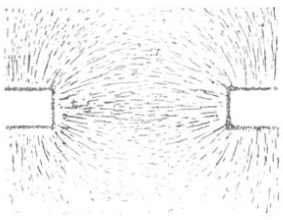


Fig. 418.

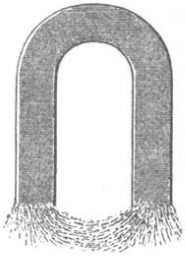


Fig. 419.

Wir wollen — willkürlich — die Richtung der Kraftlinien von N gegen S hin annehmen.

Natürlich gibt es auch ein magnetisches Potential; doch ist es für

das Folgende nicht von jener Bedeutung, wie das elektrostatische Potential für die bisherigen Kapitel.

667. Magnetische Influenz. Magnetische Kraftlinien gehen lieber durch Eisen als durch Luft. Am besten sieht man das in einem homogenen Felde, d. i. ein Feld, in dem die gleich dichten Kraftlinien parallel laufen (z. B. horizontal), wo also die Kraft überall die gleiche ist. Bringt man in ein solches Feld eine Eisenscheibe, so zieht diese die Kraftlinien auf der einen Seite hinein und läßt sie auf der anderen wieder austreten. Fig. 420 zeigt diese Ausrichtung von Eisenfeilspänen in einem homogenen Felde.

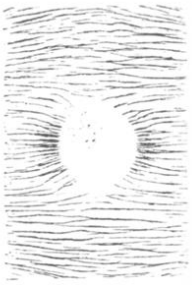


Fig. 420.

Da wo die Kraftlinien eintreten, haben wir S-Magnetismus, dort wo sie austreten, N-Magnetismus; wir können also von einer magnetischen Influenz (manchmal auch magnetische Induktion genannt) sprechen. Ein in ein magnetisches Feld gebrachtes weiches Eisen, wird so selbst zum Magneten, so lange es im Felde ist.

Der Anziehung von weichem Eisen geht also eine magnetische Influenz voraus. (Es sind diese Erscheinungen ganz analog den elektrostatischen, Fig. 364 und Fig. 365).

Dieses Hineinziehen der magnetischen Kraftlinien ist um so stärker, je stärker die Permeabilität. Bei diamagnetischen Körpern, wo $\mu < 1$ ist, weichen umgekehrt die Kraftlinien aus.

668. Unterschied zwischen elektrischer Ladung und Magnetismus. Es gibt Leiter für Elektrizität, aber nicht für Magnetismus. Infolge der kleinsten Potentialdifferenz verläßt Elektrizität im Leiter ihren Sitz und strömt an andere Stellen ab. Der Magnetismus aber sitzt fest an der Materie z. B. an ganz bestimmten Stellen des Stahles.

Durch elektrische Influenz kann man positive und negative Elektrizitäten wirklich trennen. Alle die elektrostatischen Versuche in § 572 sind mit magnetischer Influenz unmöglich. Durch Zerbrechen eines Stabmagneten die eine Hälfte N- und die andere S-magnetisch zu erhalten, ist unmöglich. Bricht man einen Eisenstab im magnetischen Felde oder eine magnetisierte Stricknadel in zwei Hälften, so ist jeder Teil für sich ein vollständiger Magnet, jede Hälfte hat einen N- und einen S-Pol. Jeder mechanisch getrennte Teil eines Magneten wird, wenn er auch noch so klein ist, immer wieder ein vollständiger Magnet. Es muß also auch das Molekel ein Magnet sein; ein Stahlmagnet ist nichts anderes als eine Reihenfolge von gleichgerichteten Molekularmagneten.

Darum geht auch die Kraftlinie, die vom N-Pol heraus und außerhalb

des Magneten zum *S*-Pol zieht, im Inneren des Magneten weiter (von Molekel zu Molekel) vom *S*-Pol zum *N*-Pole. Die magnetische Kraftlinie ist also in diesem Sinne immer eine geschlossene Kurve.

669. Die Tabelle S. 367 gibt einen Vergleich elektrostatischer und elektromagnetischer Kraftlinien.

670. Molekularmagnetismus. Denken wir uns jedes Molekel als kleinen Magnet. Ein weicher Eisenstab besteht zunächst aus solchen nach allen möglichen Richtungen orientierten Elementarmagneten, die sich in ihrer Wirkung nach außen hin aufheben. Wenn ich nun diesen Stab in ein magnetisches Feld bringe, so daß die magnetischen Kraftlinien parallel der Stabachse gehen, so werden diese Elementarmagnete alle gedreht, ausgerichtet, sie zeigen mehr oder weniger alle nach einer Seite. Der *S*-Pol des einen geht immer gegen den *N*-Pol des nächsten Elementarmagneten. In der Stabmitte heben sie sich in ihrer Wirkung auf, an den Polen aber kommen auf der einen Seite die *N*-Pole, auf der anderen Seite die *S*-Pole zur Geltung.

Je stärker das richtende Kraftfeld ist, desto mehr orientieren sich die Teilchen, desto stärker wird der Magnetismus im weichen Eisen. Sind aber alle Teilchen ausgerichtet, so ist eine weitere Steigerung des Magnetismus unmöglich, es ist „Sättigung" eingetreten.

Nimmt man den weichen Eisenstab aus dem magnetisierenden Felde heraus, so tritt im allgemeinen wieder das alte Durcheinander der Elementarmagnete ein, einige wenige aber bleiben in der aufgezwungenen Richtung, d. h. mit anderen Worten, außerhalb eines magnetischen Feldes verschwindet der Magnetismus, aber nicht ganz, es bleibt etwas „remanenter" Magnetismus zurück. Für viel elektrotechnische Verwendungen (z. B. Transformatoren § 706) nimmt man Eisensorten mit möglichst kleiner Remanenz. Es soll z. B. ein weicher Eisenstab in einer von einem Strom durchflossenen Spirale rasch Magnetismus annehmen, bei Stromöffnung aber möglichst rasch und vollständig unmagnetisch werden. Hier muß das Zurückbleiben, „Hysteresis", der magnetischen Wirkung gegen die magnetisierende Kraft möglichst klein sein.

In Stahl erfolgt die Ausrichtung der Elementarmagnete viel schwieriger, ist diese aber einmal erfolgt, ist Stahl einmal magnetisch, so behält er den Magnetismus für immer: „Koerzitivkraft".

671. Magnetisierung durch Streichen. Um einen unmagnetischen geraden Stahlstab *n-s* mit einem geraden Stahlmagneten *N-S* zu magnetisieren, setzt man (Fig. 421) *S* in der Mitte von *n-s* an und führt *N-S* parallel mit sich selbst bis ans Ende von *n*, hebt *N-S* in die Höhe und wiederholt diese Prozedur (längs dem punktierten Pfeilwege) mehrere Male. Wie ein Kamm Haare ausrichtet, so „kämmen" die von *S* über *s* und durch die

Zu § 669.

Kraftlinien:	elektrostatisch	elektromagnetisch
1) Die K. bezeichnen die Richtung, in der	. . . . ein elektrisierter Körper angezogen oder abgestoßen wird	. . . . ein fiktiver Pol Eine kleine Magnetnadel stellt sich darum in die Tangente der Kraftlinien
2) Jede K. kommt	. . . . . von einem + elektr. Körper	. . . . von einem *N*-Pole
und geht	. . . . . zu einem — elektr. Körper	. . . . zu einem *S*-Pole
3) Im Inneren eines Leiters sind keine K., diese sind ungeschlossene Kurven		. . . . K. sind geschlossene Kurven, welche durch Magnete hindurchgehen (Siehe aber § 673).
4) Die Anzahl der K. pro Flächeneinheit gibt die Größe der Kraft an (Feldintensität)		
5) Die K. suchen sich zu verkürzen (wie elastische Fäden) — Längszug		
6) In gleicher Richtung gehende K. stoßen sich ab — Querdruck		
7) In einem Felde sucht	. . . . . jeder Leiter von beiden Seiten her eine bestimmte Anzahl K. in sich hineinzuziehen (Influenz)	. . . . weiches *Fe* (*Co*, *Ni* o. dgl.) eine bestimmte Anzahl K. in sich hineinzuziehen u. durch sein Inneres hindurchzuführen (Influenz o. Induktion)
8) Die K. sind die Richtung, in der	. . . ein länglicher Leiter oder Isolator sich einstellt	. . . . kleine *Fe*-späne sich anordnen
9) Die K. sind vielleicht (?)	. . . . kleine Verschiebungen des Äthers aus seiner Ruhelage in der Richtung d. K.	. . . . kleine Wirbel des Äthers um die Ruhelage in einer zur K. senkrechten Ebene.

Luft nach N gehenden Kraftlinien von N-S die Molekularmagnete in n-s zurecht. Diese Prozedur des Magnetisierens erfordert Energie, z. B. analog jener beim Spannen einer elastischen Feder.

672. Erdmagnetismus. Die Erde ist ein Magnet. Die Kraftlinien der Erde gehen vom magnetischen N-Pol (ungefähr geographischer S-Pol) vertikal heraus und gehen am magnetischen S-Pole (ungefähr geographischer N-Pol) wieder vertikal in die Erde zurück.

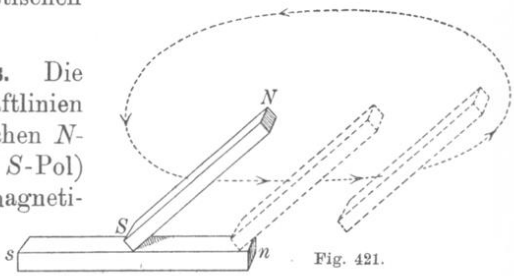


Fig. 421.

Am magnetischen Äquator (ungefähr geographischer Äquator) gehen sie horizontal.

Eine freibewegliche Magnetnadel stellt sich in die Richtung dieser Erdkraftlinien. In unseren Breiten z. B. mit dem Nordende gegen den geographischen Nordpol und schief geneigt gegen den Horizont. Man beobachtet diese zwei Größen getrennt:

1. Deklinationsnadel ist eine um eine vertikale Achse drehbare Magnetnadel. Hat sie sich durch die Wirkung des Erdmagnetismus eingestellt, so nennt man eine durch sie gelegte vertikale Ebene den magnetischen Meridian.

2. Inklinationsnadel ist eine im magnetischen Meridiane um eine darauf senkrechte, also horizontale Achse drehbare Nadel.

ad. 1. Der Winkel zwischen dem magnetischen und dem astronomischen Meridian, zwischen der NS-Richtung des Magnetismus und der geographischen NS-Richtung heißt Deklination. Diese ist an verschiedenen Orten der Erde eine verschiedene und ändert sich innerhalb von Jahrhunderten: säkulare Änderung. Seitdem sie beobachtet wurde, änderte sich die Deklination z. B. für London von $-11{,}25^0$ im Jahre 1580 bis $+24{,}01^0$ im Jahre 1798. Derzeit nimmt sie wieder ab und beträgt etwa 15^0 westlich. In Deutschland ist die Deklination heute etwa 12^0 westlich, doch an verschiedenen Orten verschieden.

Überdies zeigt die Deklination jährliche und tägliche Schwankungen und auch plötzliche Störungen (magnetische Gewitter).

ad 2. Der Winkel zwischen Horizont und Inklinationsrichtung heißt Inklination. Auch diese ist an verschiedenen Orten der Erde sehr verschieden. In der Nähe des geographischen Nordpoles zeigt die Magnetnadel mit dem Nordpol vertikal abwärts, in der Nähe des (sehr unregelmäßig verlaufenden) magnetischen Äquators steht die Magnetnadel horizontal, am geographischen Südpole zeigt der Südpol vertikal nach abwärts.

Auch die Inklination hat analoge zeitliche Änderungen wie die Deklination. Die Inklination ist derzeit in Berlin ca 66^0, in Wien ca. 63^0.

Deklination und Inklination ergeben die Richtung des magnetischen Feldes. Von ebenso großer Wichtigkeit wie die Bestimmung dieser Größen ist auch die Messung der Intensität des Erdfeldes an verschiedenen Orten.

6. Ponderomotorische Wirkung von Strömen.

673. Elektromagnetische Kraftlinien des elektrischen **Stromes.** Wenn man einen Kupferdraht mit Eisenfeilspänen bestreut, so bleiben diese nicht an ihm haften, da ja Kupfer unmagnetisch (nur minimal diamagnetisch) ist. Sobald aber ein kräftiger Strom den Draht durchfließt, zieht er die Eisenteilchen an sich; ein stromdurchflossener Draht wird magnetisch. Auch hier werden wir die Sache am besten überblicken, wenn wir das magnetische Feld, das ein stromdurchflossener Leiter erzeugt, uns in Form von Kraftlinienbildern verschaffen.

Zu dem Zwecke führen wir durch ein kleines Loch eines horizontal liegenden Kartons einen vertikalen, stromdurchflossenen Leitungsdraht. Bestreuen wir nun die Papierfläche mit feinem Eisenpulver, so entsteht die Fig. 422 gezeichnete Figur. Die magnetischen Kraftlinien bilden Kreise, die konzentrisch um den Leiter in einer auf diesem Leiter senkrechten Ebene liegen. Jede Kraftlinie ist also in sich selbst geschlossen. An einem geraden stromdurchflossenen Drahte z. B. hat man sich die Zeichnung Fig. 422 immer wieder an beliebigen Stellen des Drahtes erneut zu denken, wie dies schematisch das Modell Fig. 423 darzustellen sucht. Kehrt sich die Stromrichtung um, so ist auch die (Pfeil-)Richtung der Kraftlinien umzukehren.

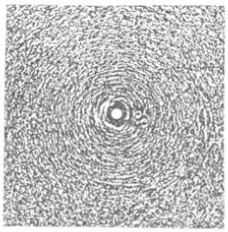


Fig. 422.

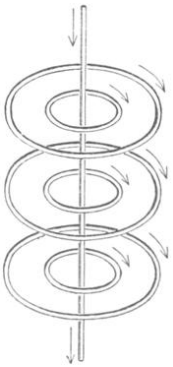


Fig. 423.

Nehmen wir zwei parallele Leiter, so haben wir zwei Fälle zu unterscheiden, je nachdem die Stromrichtung in beiden gleich oder entgegengesetzt ist. In ersterem Falle erhalten wir das in Fig. 424 dargestellte Ergebnis. Im zweiten Falle, wenn die parallelen Leiter von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossen sind, stellt Fig. 425 das Kraftlinienbild vor.

Es sei hier, wie § 563, ausdrücklich betont, daß die Kraft„linien" nur Richtungssymbole darstellen; es ist ja der ganze Raum, nicht nur bestimmte „Linien" um die stromdurchflossenen Leiter herum geändert; korrekter wäre eigentlich die Vorstellung breiter Kraftröhren, die diesen ganzen Raum kontinuierlich ausfüllen.

Die bis jetzt experimentell gewonnenen Kraftfelder scheinen identisch mit den Figg. 55 o. 363 u. 56. Sie sind aber nicht einmal geometrisch identisch, denn die früheren Zeichnungen muß man sich in Wirklichkeit um eine Achse rotiert denken, um die räumliche Anordnung zu erhalten; die hier besprochenen Strom-

kraftlinien liegen aber immer wieder in gleicher Beschaffenheit in allen Ebenen senkrecht zur Stromrichtung, wie in Fig. 423.

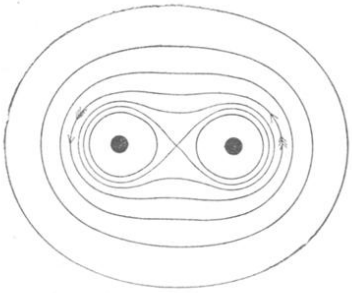


Fig. 424.

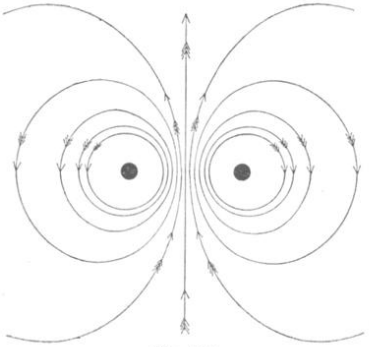


Fig. 425.

674. Gegenseitige Wirkung von Strömen. Erinnern wir uns daran, daß elektromagnetische Kraftlinien sich zu verkürzen streben, so ergibt der unmittelbare Anblick der Fig. 424, daß zwei parallele Leiter, die in derselben Richtung von Strömen durchflossen werden, sich gegenseitig anziehen. Erinnern wir uns hingegen daran, daß Kraftlinien, die nebeneinander in gleicher Richtung laufen, sich abzustoßen trachten, so ergibt der unmittelbare Anblick von Fig. 425, daß zwei parallele Leiter, die in entgegengesetzter Richtung von Elektrizität durchströmt werden, einander abstoßen; die Kraftlinien sind hier zwischen den Drähten zusammengepreßt und drücken auseinander.

Diese ponderomotorische Wirkung elektrischer Ströme aufeinander läßt sich, wenn man die Stromleiter leicht beweglich macht, unschwer direkt zeigen. Zwei schlaff in etwa 3 cm Entfernung nebenander hängende 4 bis 5 m lange Drähte in gleicher Richtung vom Strom durchflossen, ziehen sich an, biegen sich aber, in entgegengesetzter Richtung durchströmt, voneinander weg.

Zwei übereinanderliegende gekreuzte Ströme drehen sich wenn möglich so, daß die Ströme parallel in gleicher Richtung fließen.

675. Stromwirkung auf Magnetnadel. Erinnern wir uns daran, daß die Kraftlinie die Richtung darstellt, in der (genauer in deren Tangente) eine Magnetnadel sich einstellt, so ist unmittelbar klar, daß eine freibewegliche Magnetnadel sich senkrecht zur Stromrichtung zu stellen sucht.

Führen wir über eine von N nach S zeigende Deklinationsnadel parallel zu ihr einen Strom, so würde die Magnetnadel durch die Wirkung des Stromes allein sich in die Richtung der Kraftlinien einstellen, also senkrecht zum Strome. Wir haben aber zwei Kräfte: die Wirkung des Stromes

und die Wirkung des Erdmagnetismus; die schließliche Nadelstellung wird ein Kompromiß zwischen diesen beiden Kräften sein (Oersted 1820).

Die Magnetnadel wird um so stärker aus der ursprünglichen Lage abgelenkt, je stärker der Strom ist. Die Ablenkung wird durch die Ampère'sche Regel bestimmt, welche in Fig. 426 (in moderner Form) dargestellt ist. Bringt man die rechte Hand in die Stromrichtung mit der Handfläche gegen den Magneten, so gibt der Daumen die Richtung, in welcher der Nordpol hinausgedrückt wird.

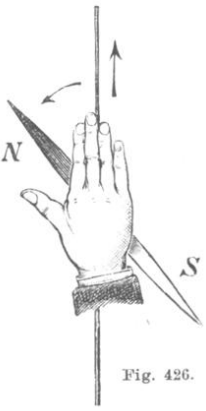


Fig. 426.

Es ist klar, daß man durch den mehr oder weniger großen Ausschlag der Magnetnadel die Stromstärke messen kann.

676. Tangentenbussole. Eine kleine Deklinationsnadel hängt in der Mitte eines im magnetischen Meridian stehenden Drahtringes von etwa 20 cm Halbmesser. An einer ganz kleinen Strecke ist dieser Ring unterbrochen, damit man hier einen Strom in den Ring hineinschicken kann. Solange kein Strom fließt, ist die Magnetnadel genau in der Draht- und Meridianebene, wird aber bei Stromschluß je nach der Stromrichtung auf die eine oder andere Seite abgelenkt. Eine einfache Rechnung ergibt, daß die Tangente des Ablenkungswinkels proportional der Stromstärke ist, wobei die Stärke des Nadelmagnetismus keinen Einfluß hat. Nimmt man nämlich eine sehr kräftige Magnetnadel, so ist zwar die Stromablenkung stärker, aber ebenso auch die rückrichtende Kraft des Erdmagnetismus. Eine solche Tangentenbussole mißt Ströme von einigen A. Sie ist von wissenschaftlicher Bedeutung, weil man aus den Dimensionen des Drahtkreises und aus der Stärke des magnetischen Kraftfeldes jedes derartige Instrument leicht direkt eichen kann.

677. Das **Gesetz von Biot und Savart** bestimmt die Stärke der Ablenkung. Es sei AB in Fig. 427 ein stromdurchflossener Leiter, Stromstärke i; m sei ein Magnetpol mit der magnetischen Menge m. Ein kleines Stück des Leiters ds übt dann eine Kraft aus, welche gegeben ist durch $C\frac{i\,ds\,m}{r^2}\sin\varphi$, wo C eine vom angewendeten Maßsystem abhängige Konstante ist.

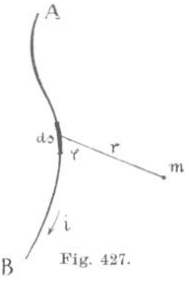


Fig. 427.

678. Für Messung schwächerer Ströme dienen **Galvanometer.** Führt man einen Strom mehrmals um eine an einem Kokonfaden hängende kleine Magnetnadel in einer der Nadel parallelen Ebene herum, wobei die einzelnen Stromwindungen natürlich gegeneinander sehr gut isoliert sein müssen, so addieren sich die Wirkungen der Stromschleifen. Man

kann durch solche Multiplikatoren sehr geringe Stromstärken messen. Speziell für physiologische Zwecke hat man sehr empfindliche Galvanometer mit vielen Tausenden von Windungen dünnsten Drahtes konstruiert. Es wird dadurch der Widerstand eines solchen Instrumentes sehr groß, was aber nicht schadet, da ja auch die verwendeten physiologischen Präparate einen sehr großen Widerstand besitzen. Mit solchen Instrumenten, die natürlich mit Spiegelablesung versehen sind, machte Du Bois-Reymond seine berühmten bioelektrischen Versuche.

Um den Ausschlag noch weiter zu verstärken, verwendet man Astasierung. Man befestigt unter oder über dem Galvanometer einen fixen starken Magneten, so daß er dem Erdmagnetismus entgegenwirkt und das magnetische Feld an der Stelle, wo die galvanische Nadel hängt, schwächt oder eventuell fast ganz aufhebt. Dann wirkt nur der Strom auf die Nadel; der Erdmagnetismus ist fast verschwunden; der Ausschlag wird jetzt sehr groß. Man nennt diese Einrichtung die äußere Astasierung zum Unterschiede von der inneren Astasierung, welche Fig. 428 in einer modernen Form schematisch darstellt.

Drei winzige, etwa $^1/_2$ cm lange Magnetchen *sn* oben und drei ebensolche *ns* unten sind so fix miteinander verbunden, daß alle oben nach entgegengesetzter Richtung zeigen wie die unten. Dieses leichte, astatische Nadelsystem hängt nun an einem möglichst dünnen Quarzfaden, dessen Torsionskraft minimal ist. Das obere Magnetsystem ist in der Mitte der oberen Spule und das untere in der Mitte der unteren Spule; der Strom durchfließt diese beiden Spulen in entgegengesetzter Richtung. Sind die zwei starr miteinander verbundenen magnetischen Systeme oben und unten möglichst gleich, so ist die Kraft des Erdmagnetismus auf dies System fast gleich Null, während die Stromwirkungen nach der Ampère'schen Regel sich summieren. In der Mitte zwischen den Spulen ist ein kleiner Spiegel zur Spiegelablesung. Dann befindet sich über dem Ganzen ein nicht gezeichneter fixer Magnet, der auch noch durch äußere Astasierung mitwirkt, besonders aber zu einer beliebigen Orientierung des Nadelsystems dient. Derartige Instrumente, von denen Fig. 428 das Thomson-Galvanometer darstellt, vermögen Ströme bis zu 10^{-10} A und weniger zu messen.

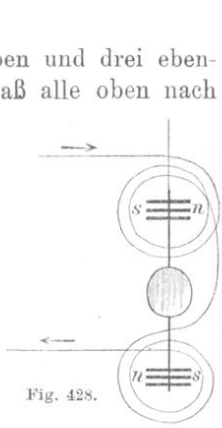


Fig. 428.

Je besser solche Instrumente astasiert sind, desto empfindlicher werden sie auch leider gegen magnetische Störungen. In großen Städten mit elektrischen Straßenströmen werden sie daher immer unbrauchbarer; an ihre Stelle treten immer mehr die fast ebenso weit hinunter messenden Drehspulengalvanometer (§ 692).

679. Magnetische Doppelfläche. Ein kreisförmiger Stromleiter hat Kraftlinien, die in Fig. 429 dargestellt sind. Dieses Kraftfeld ergibt sich unmittelbar aus Erweiterungen der Betrachtungen Figg. 423 und 426. Wir sehen, wie die Kraftlinien auf der einen Seite der Kreisfläche austreten, um den Leiter herumgehen und auf der anderen Seite in die Kreisfläche wieder eintreten. Das Ganze gleicht also einem Magneten, der sehr kurz ist (die Länge dieses Magneten wäre nur gleich der Drahtdicke) und der aber andererseits sehr dick ist (die Dicke des Magneten wäre gleich dem Durchmesser des Drahtkreises). Wir können hier von einer magnetischen Doppelfläche sprechen; das Ganze gleicht einer dünnen Scheibe, deren ganze Vorderfläche S-Magnetismus und deren Hinterfläche N-Magnetismus enthält. Auch hier gilt natürlich die Ampère'sche Regel.

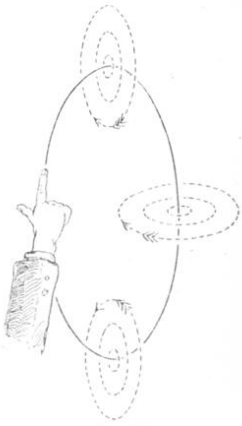


Fig. 429.

680. In der Erde fließen dauernd sog. **Erdströme,** die, weil sehr variabel, in unseren Telegraphenlinien störend auftreten. Es ist nicht unmöglich, daß es einst gelingen wird, alle Erscheinungen des Erdmagnetismus zurückzuführen auf Ströme, die im Innern und in der Atmosphäre der Erde fließen. Auch schwache Einflüsse von Sonnenströmen sind denkbar.

681. Man kann auch die fiktiven Elementarmagnete (§ 670) ersetzen durch lauter kleine in sich geschlossene **Elementarströme.** Nach dieser Ampère'schen Vorstellung wird jedes Eisenmolekel (auch Kobalt, Nickel usw.) dauernd von einem kleinen Kreisstrom umflossen. Weil kein Widerstand da ist, bleibt ein solcher Molekularstrom dauernd erhalten. Die Magnetisierung erfolgt durch Drehung dieser elektrischen Molekularströme nach einer Richtung hin und es gilt im übrigen das in § 670 Gesagte. Die Vorderfläche eines N-Poles eines Stahlstabes sieht schematisch so aus, wie es Fig. 430 zeigt, wobei die Molekel natürlich viel zu groß und in viel zu geringer Anzahl gezeichnet sind. Hier heben sich im Innern die aneinander grenzenden Ströme, die an der Berührungsstelle immer gegeneinander fließen, in ihrer Wirkung nach außen auf, und es wirkt das Ganze so, wie wenn die gezeichneten Ströme nur am Rande fließen würden.

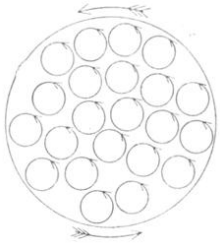


Fig. 430.

Der große Vorteil dieser Anschauung liegt in der Einheitlichkeit; es gibt keinen Magnetismus, sondern nur Elektrizität. Die Anziehung eines N- und S-Poles ist Anziehung paralleler gleichgerichteter Ströme, die Abstoßung gleicher Pole ist Abstoßung paralleler entgegengesetzt gerichteter Ströme.

682. Um aus stromdurchflossenen Drähten eine Form zu bekommen, welche gewöhnlichen länglichen Magneten ähnlich ist, müssen wir eine längere Drahtspule, ein sog. **Solenoid,** nehmen. Hier gibt die Rechnung sowohl als auch der direkte Versuch mit Eisenfeilspänen oder Orientierung einer kleinen Magnetnadel den Verlauf der Kraftlinien. Im Innern gehen die Kraftlinien parallel der Längsachse der Drahtspule (siehe die Eisenspäne in Fig. 431), kommen auf der einen Seite bei N heraus und (in der Zeichnung nicht dargestellt) gehen in gekrümmten Linien zur anderen Seite S, wo sie wieder in das Innere eintreten. Wir haben hier ganz denselben Verlauf der Kraftlinien wie beim Stahlmagneten, dem ein solches Solenoid natürlich in seinen Wirkungen gleicht.

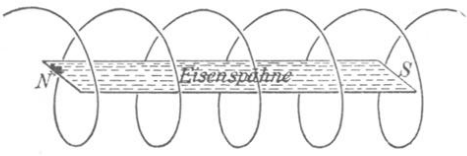


Fig. 431.

683. Elektromagnet. Da die Kraftlinien in Eisen sich viel leichter ausbilden, so wird die Wirkung bedeutend verstärkt, wenn man in das Innere einer solchen Spule einen Eisenkern bringt. Die Anwendung der Ampère'schen Regel ergibt die Lage der Pole.

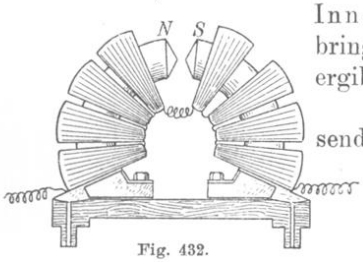


Fig. 432.

Die magnetischen Wirkungen können bei passender Anordnung kolossale werden. Einen besonders starken Elektromagnet zeigt uns Fig. 432. Das eigentliche Kraftfeld entsteht hier in dem Luftzwischenraum zwischen N und S. Zwischen kegelförmigen Eisenaufsätzen (Fig. 432) erzeugt der Magnet ein Kraftfeld, dessen Intensität mehrere 100000 Male stärker ist als die des Erdmagnetismus.

Unter Siderostat versteht man in der Augenheilkunde einen starken Elektromagnet, z. B. die eine Hälfte der Fig. 432, dessen spitzer Pol, dem Auge nahe gebracht, Eisensplitter aus diesem ohne Operation zu extrahieren gestattet.

684. Feder-Galvanometer. Hängt man (Fig. 433) ein weiches Eisen F (geschlitzte Eisenröhre) an einer elastischen Metallfeder f derart auf, daß das untere Ende dieses Eisens F ein wenig in das Innere einer vertikalen Spule eintaucht, so wird ein durch diese Spule gesendeter Strom das Eisen in die Spule um so tiefer hineinziehen, je stärker er ist. An einer feststehenden Skala S kann man dann die durch die Spule hindurchgesendete A-Zahl ablesen.

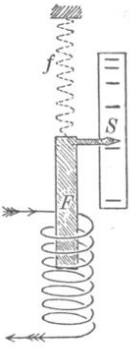


Fig. 433.

Man konstruiert so durch passende Wahl der Drahtstärke und Win-

dungsanzahl und durch passende Wahl der Elastizität der Aufhängefeder Ampèremeter, welche (ohne Shunt) Ströme bis hinauf zu 50 A und herunter bis zu 0,5 A zu messen gestatten. Durch Verwendung einer Spule mit vielem dünnem Draht erhält man (§ 647) sehr praktische Voltmeter. Die Instrumente werden empirisch geeicht und zeichnen sich durch große Billigkeit aus.

Dieses Prinzip des Hineinziehens von Eisen in ein Solenoid wird in den verschiedensten Konstruktionen auch in Verbindung mit Hebelzeigern und kreisförmigen Skalen zur Strommessung verwendet.

685. Elektrische Stimmgabeln. M_1 und M_2 (Fig. 434) sind zwei Stahlstimmgabeln, s_1 und s_2 zwei kleine Elektromagnete. An dem einen Ende von M_1 ist eine Spitze r, welche in das feststehende Quecksilbernäpfchen q eintaucht. Der Strom der Batterie B geht durch den unteren Schenkel M_1, die Spitze r, das Quecksilber q und dann durch s_1 und s_2 zu B zurück. Dadurch wird zunächst s_1 magnetisch und zieht beide Zinken von M_1 an, hebt also r aus q heraus und öffnet den Strom; der Magnetismus von s_1 verschwindet, die Zinken schwingen in die alte Lage zurück und noch etwas darüber hinaus, der Strom schließt sich wieder usf. Dieser (durch regelmäßig und automatisch wiederkehrende Stromöffnung bewirkte) magnetische Antrieb bringt M_1 in kräftiges Schwingen Ebenso muß auch, da ja s_2 genau mit s_1 in regelmäßigen Intervallen magnetisch wird, M_2 zu schwingen anfangen; diese Gabel M_2 steht dann irgendwo, z. B. als zeitschreibender Apparat mit einem Vibrographen (§ 200) oder Saitengalvanometer (§ 690) usw. in Verbindung.

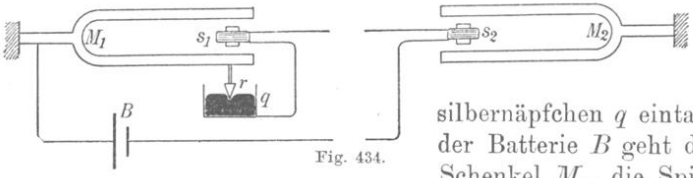


Fig. 434.

Ein ähnliches Prinzip haben wir bei unserer **elektrischen Hausklingel** (Fig. 435). Ein Elektromagnet S zieht das am Rande einer Feder F befestigte Eisenstückchen E an, öffnet dadurch den Strom bei der Spitze r, die fest steht; der Magnetismus verschwindet und so schwingt die Feder hin und her, wodurch der Klöppel K gegen die Glocke G schlägt. Sowie man durch einen Druck auf den Taster T den Strom schließt, ertönt die Glocke. Fig. 436 gibt eine größere elektrische Anlage mit drei Tastern T_1, T_2 und T_3, die sich in verschiedenen Räumen befinden können; B ist die Batterie, K die elektrische Klingel. Wenn irgendein Taster T niedergedrückt wird, ertönt die Klingel.

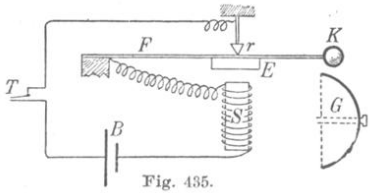


Fig. 435.

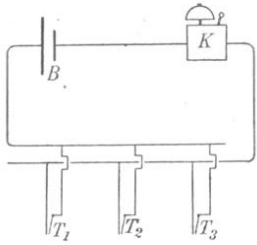


Fig. 436.

686. Telegraphenapparat von **Morse.** Wenn durch den Magneten S ein Strom geschickt wird (Fig. 437), so wird der weiche Eisenanker E angezogen, welcher an einem um den Punkt O drehbaren Hebel EOs befestigt ist. Die (durch eine Spiralfeder f für gewöhnlich nach abwärts gezogene) Spitze s geht dann hinauf, drückt gegen einen durch ein Uhrwerk getriebenen Papierstreifen P und macht auf demselben je nach der Zeitdauer des Stromes einen Punkt oder Strich. Aus der Kombination von solchen Punkten und Strichen ist ein Alphabet zusammengestellt und man kann, wenn man an der Aufgabestation in passender Weise durch einen Taster den Strom schließt und öffnet, Buchstaben und Worte telegraphieren.

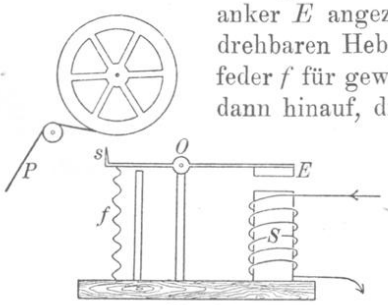


Fig. 437.

Wesentlich verbilligt werden die Telegraphenleitungen dadurch, daß man von der Batterie nur einen Draht zwischen den beiden Stationen zu ziehen hat und daß die Rückleitung durch die Erde erfolgen kann.

Der Morseapparat ist einer der bequemsten und verbreitetsten Telegraphenapparate, wird aber durch rascher arbeitende immer mehr verdrängt.

Die Ausführung und Anwendung der eben geschilderten Vorrichtungen ist natürlich viel komplizierter. Vor allem wäre es schwer, auf weite Strecken hinaus einen Strom zu senden, der stark genug wäre, den gewünschten magnetischen Effekt hervorzubringen. Man setzt daher von der Aufgabestation aus durch die Aufgabsbatterie zunächst in der entfernten Empfangsstation nur einen Hilfselektromagneten mit einem sehr leicht beweglichen Hebelarm (Relais) in Tätigkeit und schließt dadurch erst eine Batterie in der fernen Empfangsstation, welche dann den schwerer beweglichen eigentlichen Schreibapparat betätigt.

Ebenso werden besondere Einrichtungen getroffen, um gleichzeitig auf derselben Linie nach beiden Richtungen telegraphieren zu können, ja man ist durch eine Reihe von sinnreichen Vorrichtungen dahin gekommen, daß derselbe Draht sogar gleichzeitig zur Sendung mehrerer telegraphischer Nachrichten verwendet werden kann.

687. Elektrodynamische Rotation. Ein (fiktiver) Pol bewegt sich in der Richtung der Kraftlinien, müßte sich also nach § 673 dauernd kreisförmig um einen stromdurchflossenen Leiter herumdrehen. Nun gibt es aber keinen einzelnen Pol, wir müssen daher einen Kunstgriff anwenden.

Ein Glasgefäß (Fig. 438) ist bis an den Rand mit einer Lösung von $CuSO_4$ gefüllt. Der vertikale fixe Draht ab taucht in die Lösung ein. Am oberen Ende des Glases, aber noch in der Flüssigkeit, ist ein Drahtring c, der vom Draht d gehalten wird. Verbindet man a und d mit einer Batterie,

so fließt ein Strom vertikal durch den Draht ab, von b horizontal durch die oberste Flüssigkeitspartie radial gegen c und über d wieder in die Batterie zurück. Läßt man nun mittels eines Korkes eine magnetisierte Stricknadel vertikal so schwimmen, daß der Nordpol in n und der Südpol in s ist, so liegt s außerhalb der Wirkung des elektrischen Stromes, n hingegen liegt neben ab, dessen Kraftlinien konzentrische, in horizontaler Ebene liegende Kreise sind. Dieser n-Pol wird daher und mit ihm der ganze Magnet, sowie ein Strom fließt, dauernd in der Richtung der Kraftlinien um ab herumgeführt. Die vertikal schwimmende magnetisierte Stricknadel rotiert also, immer vertikal bleibend, um ab herum. Kehrt man die Stromrichtung um, so gehen die magnetischen Stromkraftlinien in entgegengesetzter Richtung, es kehrt sich der Sinn der Rotation um.

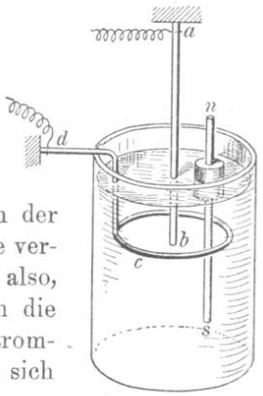


Fig. 438.

Auch bei derartiger Rotation muß actio und reactio gleich sein. Wenn ich daher die Magnetnadel festhalte und den Draht ab beweglich mache, muß der Drahtbügel um den Magnet herum rotieren.

688. Diesen Versuch zeigt das **Faraday'sche Pendel** (Fig. 439). ab ist ein leicht beweglicher Draht, dessen oberes Ende a fest ist und dessen unteres Ende b wie an einer Angelschnur ins Quecksilber hineinhängt, das im zylinderförmigen Gefäß H ist. Der Boden dieses Gefäßes hat in der Mitte ein Loch, in welches n das Polende eines starken Elektromagneten, eingekittet ist. Schließt man den Stromkreis so, daß von a durch b ein Strom fließt, so sucht der Draht ab nach dem vorigen Versuch den Magnetpol n um sich herum zu drehen. Da sich derselbe jetzt, weil er fest ist, nicht bewegen kann, wohl aber das leicht bewegliche peitschenartige Drahtstück ab, so wird letzteres um den Pol herumlaufen. Kehrt man die Stromrichtung um, so ändert sich auch der Sinn der Rotation.

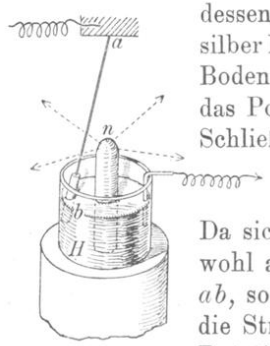


Fig. 439.

689. Wirkung magnetischer Kraftlinien auf einen stromdurchflossenen Leiter. In Fig. 439 sind auch einige von n nach allen Seiten des Raumes gehende Kraftlinien des magnetischen Poles n punktiert gezeichnet. Wir können nun die Bewegung des Faraday'schen Pendels auch in einer anderen Weise, die für das Folgende von größter Wichtigkeit ist, charakterisieren: Der stromdurchflossene Leiter ab bewegt sich so, daß er die magnetischen Kraftlinien schneidet.

In Fig. 440 gehen die magnetischen Kraftlinien vom N-Pol rechts

zum S-Pol links (punktierte parallele Pfeile). Wird nun in dem Leiter ab von vorne nach hinten in der Richtung des dicken Pfeiles ein Strom gesendet, so erfolgt Abstoßung dieses Leiters ab nach oben. Die Ampère'sche Regel gilt auch hier. Legt man den Zeigefinger der rechten Hand in die Richtung ab, die Handfläche gegen N, so wird N in der Daumenrichtung, also in der Zeichnung nach unten getrieben. Weil aber der Magnet fest und ab beweglich ist, muß ab hinauf gedrückt werden.

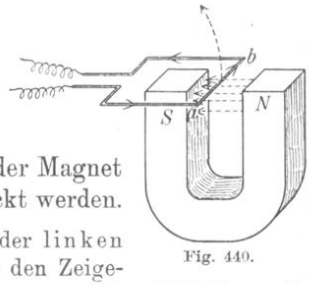


Fig. 440.

Handregel: Man hält die drei ersten Finger der linken Hand senkrecht gegeneinander gespreizt und zwar den Zeigefinger in der Kraftlinienrichtung und den Mittelfinger in der Stromrichtung, dann gibt der Daumen die Bewegungsrichtung des Leiters an (Fig. 441).

Fig. 441.

Der Stromträger ab steht in Fig. 440 senkrecht zu den Kraftlinien. Ein zu den Kraftlinien senkrechter Stromträger wird parallel mit sich selbst senkrecht zu den Kraftlinien bewegt. Die ponderomotorische Kraft ist proportional der Länge des geraden Leiterstückes, der Stärke des durchfließenden Stromes und der Stärke des magnetischen Feldes.

Im allgemeinen steht die Richtung der Kraftlinien und die des Leiters nicht senkrecht aufeinander. Man zerlegt dann die Kraftlinien in zwei Komponenten, von denen die eine parallel zum Leiter, die zweite aber senkrecht auf diesem steht. Kraftlinien, die dem stromdurchflossenen Leiter parallel sind, haben keine Wirkung. Man könnte auch umgekehrt den Leiter in zwei Komponenten sich zerlegt denken.

690. Für Messungen rascher Stromänderungen ist ein gewöhnliches Galvanometer viel zu träge; solche ermöglicht das **Saiten-Galvanometer** (Einthoven 1903).

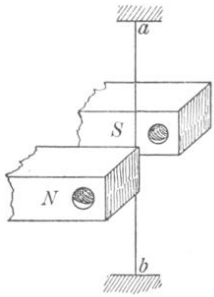


Fig. 442.

Ein dünner Draht ab ist vertikal durch ein starkes magnetisches Feld gespannt, dessen Kraftlinien in der Fig. 442 von vorne nach hinten gehen. Fließt durch diese Saite ab (aus Platin oder Silber) ein elektrischer Strom, so wird die Mitte des Drahtes je nach der Stromrichtung nach links oder nach rechts ausgebogen. Der Magnet ist von vorne nach hinten so durchbohrt, daß man diese Saitenausbiegung durch ein Mikroskop mit Okularskala sehen oder aber projizieren kann. Der Vorteil des Instrumentes besteht darin, daß der gespannte Draht fast momentan sich ausbiegt, daß er also sehr rasch sich ändernden Stromimpulsen ohne merkliche Verzögerung folgt, weil er fast gar keine

Masse, fast gar keine Trägheit besitzt. Besondere Empfindlichkeit, bis zu 10^{-12} A, erreicht man mit starken Elektromagneten und einem versilberten Quarzfaden von 3 μ Dicke, der mäßig gespannt ist. Starke Spannung vermindert die Empfindlichkeit, steigert aber die Einstellungsschnelligkeit bis unter $^1/_{100}$ sek.

Das Instrument arbeitet viel rascher und genauer als das vorher für ähnliche Zwecke gebrauchte Kapillar-Elektrometer. Da bei raschem Hin- und Hergehen des Drahtfadens ein direktes Beobachten mit dem Auge nicht möglich ist, wird der Faden *ab* projiziert, wobei ein undurchsichtiger Schirm mit horizontalem Spalt alles bis auf die Fadenmitte abblendet. Das projizierte Bild der Fadenmitte erscheint nun als dunkler Punkt in dem kleinen, horizontalen Lichtstreifen des Spaltes. Dieses Bild entwirft man auf einen photographischen Filmstreifen, der auf einer rotierenden Trommel aufgespannt ist oder auf einer Platte, die (durch Reibung oder sonstige Kunstgriffe je nach dem beabsichtigten Meßzwecke mehr weniger verzögert) nach abwärts fällt. Man erhält so die nach rechts oder nach links erfolgenden Ausschläge als nach rechts oder nach links ausgebogene Kurven. Photographiert man gleichzeitig eine vertikal stehende, schwingende Stimmgabel von bekannter Tonhöhe, so erhält man im Bilde auch eine Sinuslinie für die Zeitmarkierung. Natürlich kann man auch andere Zeitmomente, Beginn und Schluß einer elektrophysiologischen Reizung usw. markieren.

691. Elektrokardiogramm. Um ein Beispiel zu liefern, sei der Aktionsstrom des normalen menschlichen Herzens angegeben. Dieses liegt schräg im Körper, rechts oben die Basis und links unten die Spitze. Die durch die Herztätigkeit erzeugten elektrischen Ströme fließen darum unsymmetrisch durch den Körper. Es ergeben sich verschiedene Ableitungsmöglichkeiten dieses Stromes, z. B. linker Fuß und rechte Hand oder beide Hände usw. Die Extremitäten werden einfach in wannenartige Gefäße mit leitender Flüssigkeit gehalten, welche leitend mit einem Saitengalvanometer verbunden sind. Das Schema eines solchen menschlichen Elektrokardiogrammes nach Einthoven gibt Fig. 443.

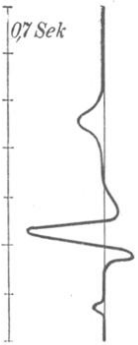


Fig. 443.

Dieses einfache Beispiel genüge, um die Wichtigkeit dieses Instrumentes für das ganze Gebiet der Elektrophysiologie zu zeigen; ebenso ist auch seine Bedeutung für die Diagnostik bei Herzkrankheiten unmittelbar einzusehen.

Aber auch für physikalische Probleme findet der Apparat vielfache Verwendung.

692. Drehspulengalvanometer. Ein stromdurchflossenes Solenoid wirkt wie ein Magnet. Bei entsprechender Anordnung kann es so beweglich gemacht werden, daß es sich wie eine Magnetnadel einstellt. Dieses

Einstellungsbestreben wird besonders stark sein, wenn wir statt des schwachen Erdfeldes das eines kräftigen Hufeisenmagneten nehmen.

In Fig. 444 sind N und S die Pole eines guten permanenten Hufeisenmagneten. In seinem Felde hängt an einem dünnen Draht ab ein viereckiges Drahträhmchen, das durch die Feder f gespannt wird. a und c sind fix mit einem nicht gezeichneten Stative verbunden. Der zu messende Strom fließt von a nach b, dann einigemale durch das viereckige Drahträhmchen (Solenoid) und über fc wieder aus dem Apparat heraus. Dieses leicht bewegliche Solenoid erhalte z. B. bei der Stromrichtung ac einen Nordpol gegen vorne und einen Südpol gegen hinten. Dadurch sucht sich die Ebene des Rähmchens senkrecht zu der Richtung der Kraftlinien NS soweit einzustellen, als es die Torsion von ab und fc gestattet. Die Wirkung wird sehr verstärkt, wenn man ins Innere der Spule, aber vollständig unabhängig von ihr, von hinten her gehalten, einen fixen Eisenkörper E einschiebt, der das magnetische Feld NS verstärkt.

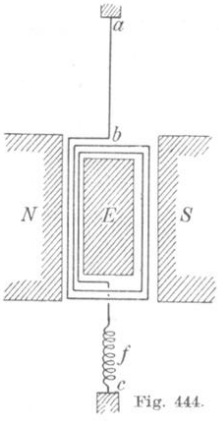


Fig. 444.

Auch die Anwendung des in § 689 geschilderten Prinzipes ergibt dieselbe Ablenkung, da die vertikalen Stromleiter des Solenoides senkrecht zu den Kraftlinien gedrückt werden.

Man kann das Ganze auch ein umgekehrtes gewöhnliches Galvanometer nennen. In jenem ist die Spule fix und der Magnet beweglich, hier aber ist der Magnet fix und die Spule beweglich.

Da das Feld ziemlich homogen ist, ist die Ablenkung der Stromstärke proportional. Sie wird bei feinen Instrumenten mittels Spiegels gemessen. Man macht diese Drahtspulengalvanometer schon fast so empfindlich wie die gewöhnlichen Magnetgalvanometer, sie haben aber den großen Vorteil, daß äußere magnetische Kräfte auf die Spule nicht störend einwirken. Einen weiteren Vorteil werden wir § 705 besprechen.

Bei minder empfindlichen Instrumenten macht man das Solenoidrähmchen zwischen zwei fixen Zapfen drehbar. Eine seitliche Feder sucht das Rähmchen parallel den Kraftlinien einzustellen und der zu messende Strom dreht es dieser elastischen Kraft entgegen aus dieser Lage heraus. Die Drehung wird durch einen über einer kreisförmigen Skala spielenden Zeiger abgelesen. Solche Konstruktionen sind sowohl für Ampèremeter als für Voltmeter in immer steigenderem Gebrauche.

7. Elektromotorische Wirkung durch Relativbewegung vom Leiter gegen magnetisches Feld.

693. Ein gegen magnetische Kraftlinien bewegter Leiter. Sendet man durch das Faraday'sche Pendel (Fig. 439) einen elektrischen Strom, so entsteht trotz der Reibung Bewegung. Es muß also, da hier mechanische Energie auftritt, irgendwo eine gleich große Energiemenge verschwinden.

Wer leistet diese fortgesetzte Arbeit?

Der Magnet, z. B. ein permanenter Magnet, bleibt ungeändert; somit müssen wir die Energiequelle im Strome des Leiters ab suchen. Es muß also, solange der Leiter ab rotiert, der treibende Strom geändert werden und zwar durch eine Art elektromotorische Gegenkraft geschwächt werden, sonst würde ja das Pendel immer rascher und rascher sich drehen, was gegen das Gesetz der Erhaltung der Energie wäre. Dies wurde schon von Lenz (1834) erkannt. Es muß somit, wenn ein stromloser Leiter mechanisch so bewegt wird, daß er Kraftlinien schneidet, in ihm eine elektromotorische Kraft erzeugt werden.

Schaltet man beim Faraday'schen Pendel (Fig. 439) statt der Batterie ein Galvanometer ein, und dreht man nun das Pendel ab mechanisch mit der Hand um den magnetischen Pol herum, so gibt das Galvanometer einen Ausschlag. Ebenso wird, wenn man in Fig. 440 den Leiter statt mit einer Batterie mit einem Galvanometer verbindet, eine mechanische Bewegung dieses Leiters nach unten einen Strom von a nach b hervorrufen.

Fig. 445.

Die hier an den Leiterenden erzeugte elektromotorische Kraft ist der pro sek geschnittenen Kraftlinienzahl proportional, also der Stärke des magnetischen Feldes und der Schnelligkeit der Leiterbewegung.

Auch hier müßte, wenn der Leiter die Kraftlinien schief schneidet, wie in § 689, der Leiter oder die Kraftlinien in Komponenten zerlegt werden.

Handregel: Man hält die drei ersten Finger der rechten Hand senkrecht gegeneinander gespreizt und zwar den Zeigefinger in der Kraftlinienrichtung, den Daumen in der Bewegungsrichtung, dann zeigt der Mittelfinger die Richtung der elektromotorischen Kraft im Drahte an (Fig. 445).

Man nennt diese Ströme Induktionsströme. Die hier erzeugte Stromenergie ist ein Äquivalent der mechanischen Energie.

694. Elektromagnetische Induktion. Es sei eine runde Drahtspule mit einem Galvanometer verbunden. Schiebt man einen Stab-

magneten bis zu seiner Mitte in die Spule ein, so entsteht ein Stromstoß im Galvanometer, da die Kraftlinien des Magneten die Windungen der Spule schneiden. Beim Herausziehen geht dieser Stromstoß in entgegengesetzter Richtung. Schiebt man den Magneten sehr langsam ein, so erfolgt scheinbar kein Ausschlag; die abfließende Elektrizitätsmenge ist zwar genau so groß wie beim raschen Einschieben, verteilt sich aber auf längere Zeit. In diesem Falle ist der Ausschlag, z. B. 0,1 Skalenteile während 30 Sekunden, die das Einschieben dauert, in jenem 30 Skalenteile während 0,1 Sekunde.

Es werden natürlich schon beim bloßen Annähern eines Magneten an eine Spule Kraftlinien geschnitten, es genügt also, wenn wir von außen einen Magneten annähern und entfernen. Wir erhalten dann zwei Stromstöße in entgegengesetzter Richtung. Auch dieser elektrische Strom entsteht aus der mechanischen Energie.

Das Hineinschieben des Magneten in eine geschlossene Spule erfordert mechanische Energie, welche sich in elektrische Energie des Induktionsstromes verwandelt.

695. Unipolarinduktion. Das Faraday'sche Pendel gibt bei fortgesetzter Rotation einen dauernden Strom in derselben Richtung, einen Gleichstrom. Da hier nur ein Pol wirkt, nennt man technische Maschinen, die nach diesem Prinzip mechanische Arbeit dauernd in Gleichstrom verwandeln, Unipolarmaschinen (praktisch kaum in Gebrauch).

696. Erdinduktor. Wenn man die Windungsebene einer großen Spule vertikal in die Deklinationsrichtung bringt und dann die Spule um eine vertikale Achse um 180^0 dreht, erhält man einen Strom durch das Schneiden der Horizontalkomponenten des Erdkraftfeldes, dessen Stärke man aus der Stärke des hier induzierten Stromes bestimmen kann.

Dreht man um weitere 180^0, so tritt, wie im folgenden Paragraph auseinandergesetzt werden soll, ein entgegengesetzter Strom auf.

697. Sinusstrom. Wenn wir ein Drahtsystem in einem magnetischen Felde rotieren lassen, so werden im allgemeinen bei einer vollständigen Umdrehung des Systems um 360^0 alle Kraftlinien zweimal geschnitten, einmal beim Hin- und einmal beim Zurückgange des Systems. Es ist bei der halben Drehung von 0^0—180^0 ein Strom in der einen Richtung, bei der zweiten halben Drehung von 180^0—360^0 ein Strom in entgegengesetzter Richtung erzeugt worden. Man nennt einen solchen Strom einen Wechselstrom.

In Fig. 446 sei N ein Nord- und S ein Südpol. Die Kraftlinien gehen hier ziemlich parallel von N nach S. In dem Zwischenraum zwischen den Polen sei ein viereckiger Drahtrahmen $suvt$ um eine vertikale Achse or drehbar. Eine kleine Drehung aus der in der Fig. 446 angedeuteten Lage wird nur einen ganz minimalen Strom erzeugen, da su sowohl als auch

vt so ziemlich parallel den Kraftlinien sich bewegen. Wird die Drehung aber fortgesetzt, so werden immer mehr Kraftlinien geschnitten, und wenn eine Drehung um 90^0 erfolgt ist und wir die in der Fig. 447 dargestellte Lage erreicht haben, so wird bei der geringsten Drehung von su und vt um die Achse or, da jetzt die Bewegung senkrecht zu den Kraftlinien geschieht, ein kräftiger Strom erzeugt werden. Die horizontalen Drahtlagen st und uv schneiden nie Kraftlinien, sie dienen nur zur Leitung. Setzen wir die Drehung noch um weitere 90^0, also bis 180^0 fort, so kommen wir wieder in eine ähnliche Lage wie in Fig. 446; der Strom wird verschwunden sein. Bei einer noch weiteren Drehung werden die vertikalen Drähte die Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung schneiden wie früher, es wird ein Strom in entgegengesetzter Richtung entstehen. Nach einer vollständigen Drehung um 360^0 fängt die Sache von vorne an, es beginnt eine neue Periode.

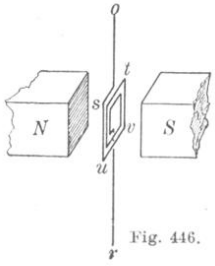


Fig. 446.

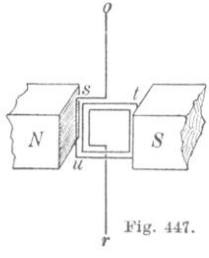


Fig. 447.

Den Verlauf dieses Wechselstromes zeigt die Kurve in Fig. 40, die Ordinaten bedeuten Stromstärken, die Abszissen Umdrehungszeiten. Beim Beginn der Drehung, 0^0, ist die Stromstärke gleich Null. Bei 90^0 oder $\pi/2$ wird die Stromstärke ein Maximum erreichen, dann wird sie immer kleiner und verschwindet bei 180^0 oder π; dann fließt der Strom in entgegengesetzter Richtung, wird immer stärker, bis er dann bei 270^0 oder $3\pi/2$ ein Minimum (Maximum in entgegengesetzter Richtung) erreicht hat, um dann bei 360^0 oder 2π wieder zu verschwinden. Dann ist eine ganze Umdrehung vollendet und die Periode beginnt von neuem.

Eine reine Wechselstromkurve ist eine Sinuslinie.

698. Trommelwickelung. Will man solche Wechselströme in Gleichstrom verwandeln, so muß man passende Kommutatoren anbringen, welche je nach einer halben Umdrehung die Stromrichtung umkehren.

In Fig. 448 ist N ein Nordpol, S ein Südpol. Es sind wieder nur die zylindrisch ausgehöhlten Pole, nicht aber der ganze Magnet gezeichnet. Zwischen ihnen dreht sich um die horizontale Achse oo ein Zylinder F aus Eisen (unterteilt! § 706), auf welchen isoliert der Drahtrahmen $suvt$ aufgewickelt ist. Das Ganze ist identisch mit Fig. 446, nur ist die Achse hier horizontal, das magnetische Feld sehr ausgedehnt und durch die Anwesenheit von F (große Permeabilität) sehr stark. Vorne in der Achse sitzt der Kommutator, 2 isolierte Halbzylinder aus Kupfer, k und l. Es ist k mit u, l mit v verbunden. Die fixen Metallbürsten a und b schleifen auf den rotierenden Metall-Halbzylindern l und k. So oft uv vertikal steht,

wechselt die induzierte Stromrichtung, aber auch der Bürstenkontakt: der Wechselstrom ist in einen Gleichstrom verwandelt. Der induzierte Strom erhält eine höhere Spannung, wenn man statt des einfachen Drahtes *suvt* in gleichen Richtungen einen langen Draht viele Male herumwickelt und dessen Enden zu *k* und *l* führt.

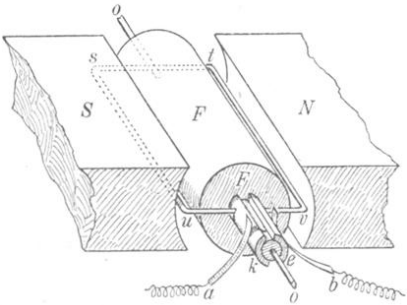


Fig. 448.

Der im magnetischen Felde rotierende Teil einer solchen Maschine heißt „Anker". Die in der Technik wirklich verwendeten Anker beruhen alle auf dem Prinzip des Schneidens der Kraftlinien, sind aber natürlich viel komplizierter.

Ein Gleichstrom, wie ihn die schematische Darstellung Fig. 448 lieferte, wäre ein in gleicher Richtung (sinusförmig) auf und abschwankender Strom. Die Verwandlung in einen wirklichen Gleichstrom erfordert komplizierte Anordnungen, wie sie die Hefner Alteneck'sche Trommelwickelung verwirklicht.

Statt der zwei wirksamen Leiter *us* und *tv* in Fig. 448 sind ihrer viele längs der Zylinderfläche *F* gespannt. In Fig. 449 (den Trommelanker von vorne gesehen) sind es ihrer 12, die alle untereinander verbunden und ineinander geschlossen sind. Man beachte, daß von den Drähten, die senkrecht zu den Kraftlinien (Papierebene) stehen, die rechts von der Ebene *V V* einen Strom nach rückwärts senden, die links aber nach vorwärts (wie *us* und *tv* in Fig. 448). Geht man von irgendeinem

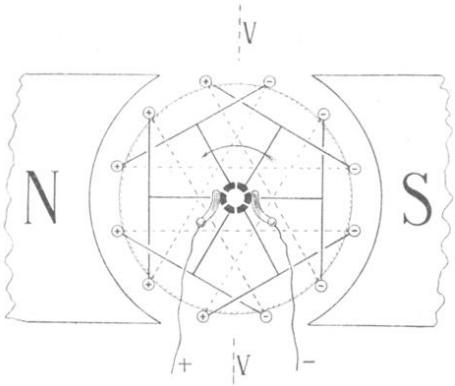


Fig. 449.

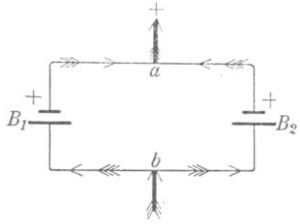


Fig. 450.

Punkte aus dies Schaltungsschema durch, so kann man leicht bemerken, daß jeder Strom in der einen Hälfte gegen einen Strom in der anderen Hälfte geschaltet ist. Diese beiden Stromhälften halten sich gegenseitig auf, wie in 2 gegeneinander geschalteten Elementen B_1 und B_2 (Fig. 450). Verbindet man hier die Punkte *a* und *b* durch eine äußere (nicht gezeichnete) Leitung in der Richtung der dicken Pfeile, so fließt ein Strom von *a* nach *b*, weil so B_1 und B_2

parallel geschaltet sind. Beim Trommelanker (Fig. 449) besorgt dies der in der Mitte gezeichnete Bürstenkommutator, hier „Kollektor" genannt.

699. Ringanker. In Fig. 451 haben wir zwischen dem N- und S-Pol eines Magneten einen Eisenring, bestehend aus weichen Eisenlamellen, der um eine zur Papierfläche senkrechte Achse drehbar ist. Die Kraftlinien nehmen den durch die dünnen Linien angedeuteten Verlauf. Sie gehen lieber durch Eisen als durch Luft (§ 667). Trotz der Drehung des Ringes ändern sie ihre Lage nur sehr wenig, wenn das Eisen wenig Hysteresis besitzt. Der ganze Ring ist mit einem in sich selbst zurückkehrenden Draht umwickelt. Dieser Draht sei vom Eisen isoliert, sonst aber (zunächst) blank. Betrachten wir von diesem kreisförmigen Solenoid jene Spulen, die sich links von der Achse beim N-Pol nach abwärts bewegen. Der linke Teil dieser Spulen schneidet die Kraftlinien nach abwärts und wir werden daher einen je nach der Wickelungsrichtung gerichteten Strom, z. B. nach rückwärts und durch die Spiralen abwärts gegen K_2 erhalten. Anders ist es in der rechten Hälfte des Ringes, die nach dem S-Pol zu liegt; hier werden die Kraftlinien durch die Spulen im entgegengesetzten Sinne wie früher geschnitten; überdies liegen die Spulen durch die Drehung verkehrt, es entsteht daher gleichfalls ein Strom nach abwärts gegen K_2 gerichtet. Wenn wir daher bei unserer Dynamomaschine in K_1 und K_2 fixliegende Bürsten auflegen, welche am blanken Spulendraht schleifen, so erhalten wir bei einer Drehung des mit den Spulen umwickelten Eisenringes, des sog. Ringankers, einen kontinuierlichen Gleichstrom.

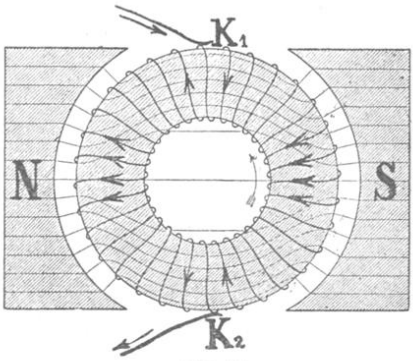


Fig. 451.

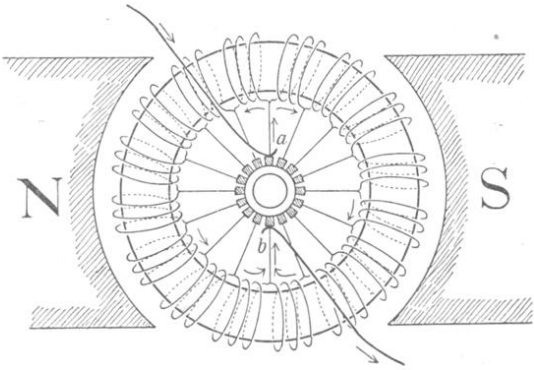


Fig. 452.

Bei etwas größeren Dimensionen würde aber die Geschwindigkeit bei K_1 und K_2 eine zu große werden, so daß die Reibung der Bürsten die Spulenwickelung bald zerstören würde. Darum verlegt man (Fig. 452) die Bürsten mit den entsprechenden Kollektoren möglichst knapp an die Achse a und b. Dieser Ringanker heißt auch Pacinotti'scher oder Gramme'scher Ring.

700. Dynamoprinzip. Das magnetische Feld der eben besprochenen Maschinen muß möglichst kräftig sein; es lag daher die Idee nahe, die

permanenten Stahlmagnete durch Elektromagnete zu ersetzen. Nun zeigte Siemens (1862), daß man den Strom für die Feldmagnete der Maschine selbst entnehmen kann. Man führt z. B. von der positiven Bürste des Ankers (Fig. 453) den Strom mittels isolierten Drahtes um die weichen Eisenschenkel des Feldmagneten NS zum äußeren positiven Leitungsdraht; von der anderen Bürste führt die Leitung (eventuell über den Rheostaten R) zum äußeren negativen Leitungsdrahte. Zwischen diesen + und — Draht sind eine Reihe von Glühlampen (durch schiefe Kreuze dargestellt) parallel geschaltet. Wenn die Maschine in Ruhe ist, so ist nur ein schwaches magnetisches Feld infolge des remanenten Magnetismus der Eisenschenkel vorhanden. Sowie der Anker aber zu laufen beginnt, wird, wenn dadurch, daß genügend viele Glühlampen eingeschaltet sind, ein genügend starker Strom von + zu — fließen kann, auch um die Feldmagnete ein kräftiger Strom gehen und das magnetische Feld wird dadurch immer stärker und stärker bis zu einem gewissen Maximum. Eine derartige Maschine heißt eine Dynamomaschine. Sie verwandelt mechanische Energie in elektrische. Eine Dynamomaschine, die keinen Strom liefert, bedarf zur Rotation, abgesehen von der Reibung, keine Arbeit. Je mehr Strom aber man der Maschine entnimmt, desto größer wird die zur Rotation nötige mechanische Energie.

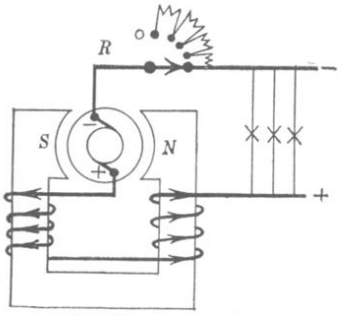


Fig. 453.

701. Dynamoschaltungen. In dem eben geschilderten Beispiele ist der Anker und die Bewickelung der Feldmagnete hintereinander geschaltet: Serienschaltung. Diese Einrichtung leidet an einem gewissen Übelstand. Nehmen wir z. B. an, daß der + und der — Draht (Fig. 453) nur durch eine oder wenige Glühlampen überbrückt seien, so findet der Strom im äußeren Stromkreise einen großen Widerstand. Er bleibt daher schwach und es bleibt auch die Magnetisierung des Elektromagneten schwach. Eine solche Serienmaschine, die z. B. für 100 Glühlampen gebaut ist, ist absolut nicht imstande, den Strom für nur zwei Glühlampen zu liefern.

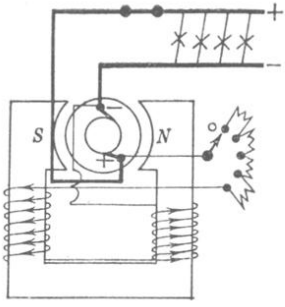


Fig. 454.

Man muß zu dem Zwecke andere Schaltungen vornehmen. Fig. 454 stellt eine Nebenschlußschaltung vor. Bei den Bürsten teilt sich der Strom; ein Teil (dick gezeichnet) geht in die äußere Leitung und ein zweiter Teil (dünn gezeichnet) geht um die Magnetwickelung herum. Mag-

net und Anker liegen nicht mehr hintereinander, in Serie, sondern nebeneinander, parallel. In der Magnetleitung ist ein (rechts gezeichneter) Rheostat eingeschaltet; man kann daher den Magnetzweigstrom leicht ändern und die Maschine (innerhalb gewisser Grenzen) stets so einrichten, daß sie auch bei wechselndem äußerem Widerstande dieselbe Spannung (gleiche Anzahl V) liefert.

Für physikalische Versuche eignet sich diese Maschine darum, weil man durch den Rheostaten im Magnetbewickelungszweige die Klemmspannung so ändern kann, wie man sie braucht.

Noch besser ist aber die Kompoundschaltung, eine Kombination der eben geschilderten zwei Schaltungen. Fig. 455 ist zunächst genau so wie Fig. 453.

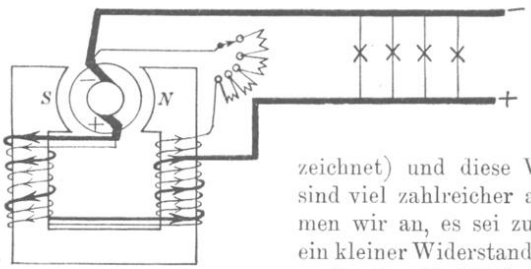


Fig. 455.

Der dicke Draht stellt eine Serienschaltung vor. Zugleich ist aber eine zweite Wickelung (parallel, wie Fig. 454) von den Bürsten aus um den Magneten geführt (dünn gezeichnet) und diese Windungen aus dünnem Drahte sind viel zahlreicher als die aus dickem Drahte. Nehmen wir an, es sei zunächst im äußeren Stromkreise ein kleiner Widerstand; es seien z. B. zur Abendzeit eine große Anzahl Glühlampen parallel geschaltet. Dann fließt auch durch die dicke Magnetwickelung viel Strom, aber (nach dem Kirchhoff'schen Verzweigungsgesetz) nur ein minimaler durch den dünnen langen Bewicklungsdraht. Wenn aber nun der größte Teil der Lampen ausgelöscht wird, und dadurch der äußere Widerstand sehr groß wird, so wird der durch die dicke Magnetwickelung fließende Strom für die Magnetisierung zu schwach. Jetzt tritt die dünne Bewickelung in Aktion; denn nun fließt der größte Teil des Stromes durch die dünne Bewickelung, die den Magnetismus auf die alte Höhe bringt. Dynamomaschinen mit derartigen Kompound- oder Verbundschaltungen liefern dieselbe Voltzahl, ob man ihnen nun einen starken oder einen schwachen Strom entnimmt.

702. Bei den Dynamos wird der Strom dadurch erzeugt, daß die passend konstruierten Leiter magnetische Kraftlinien schneiden. Es wird daher umgekehrt (nach § 693), wenn man durch eine solche Dynamomaschine einen Strom hindurchschickt, diese Maschine zu rotieren anfangen.

Während also bei einer Dynamomaschine mechanische Energie in elektrische verwandelt wird, wird beim **Elektromotor** umgekehrt die Energie des elektrischen Stromes in mechanische Arbeit verwandelt.

Eine der verbreitetsten Anwendungen des Elektromotors finden wir in der elektrischen Traktion, speziell in den elektrischen Tramways. Unter den Sitzen eines solchen Wagens befinden sich gewöhnlich zwei Elektromotoren,

welche durch Zahnräder mit den Wagenachsen verbunden sind. Der Strom wird von einem über dem Geleise gespannten Draht, Trolleyleitung, mittelst einer federnden Stange diesen Elektromotoren zugeführt und fließt unten durch die Schienen und Erde zurück. Die Betriebsspannung beträgt gewöhnlich 500 V.

703. Transformatorprinzip. Wenn wir einen Strom durch ein Drahtsolenoid senden, so dauert es, wie man auch experimentell zeigen kann, eine (meist nach Tausendstel von Sekunden dauernde) Zeit, bis der Strom seinen gleichförmigen Endzustand erreicht. Es sind zuerst nur wenig magnetische Kraftlinien vorhanden; diese wachsen hinaus, indes neue nachkommen usf. Die Kraftlinie 1 in Fig. 456 oben, die den weitesten Bogen macht, ist zuerst entstanden, die innere 2 ist später geboren. Sie wachsen hintereinander wie die Kinder einer Familie. In der Fig. 456 sind nur vier Kraftlinien als Beispiel gezeichnet. Unterbricht man den Strom, so schrumpfen die Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung wieder ein, zuerst verschwindet 2, indes 1 kleiner wird usw.

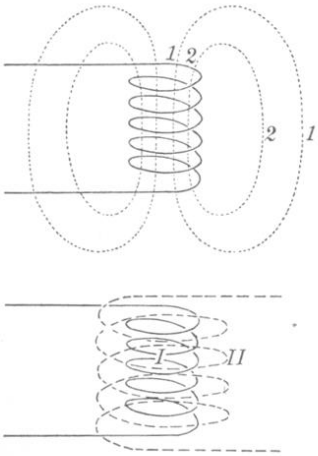


Fig. 456.

Legt man daher um die Spule I, die Primärspule (Fig. 456 unten), eine zweite Spule II, die Sekundärspule, strichliert gezeichnet, wobei I und II vollständig elektrisch isoliert sind, so wird bei Stromschluß in Spule I die Spule II von den durchwachsenden Kraftlinien geschnitten, bei Stromöffnung aber von den einschrumpfenden Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung. Wir erhalten also eine Strominduktion, einen Stromstoß in II, wenn wir I schließen und einen entgegengesetzt gerichteten, wenn wir I unterbrechen. Fortgesetztes Schließen und Unterbrechen eines Gleichstromes oder Einleitung von Wechselstrom in die primäre Spule erzeugt also hin und her gehende Ströme in der Sekundärspule. Wir hätten II statt außen herum auch in I hineingeben können, denn das Schrumpfen und Wachsen der Kraftlinien findet auch nach innen statt.

Die Anwendung der Handregel ergibt hier folgendes: Ist die primäre und sekundäre Spule in gleicher Richtung gewickelt, so ist die Stromrichtung in II beim Schließen der von I entgegengesetzt, beim Öffnen gleichgerichtet.

Nimmt man für I einen dicken Draht mit wenig Windungen und für II einen dünnen Draht mit vielen Windungen, so erfolgt eine Umwandlung oder Transformation der Stromenergie d. i. des Produktes Stromstärke mal Spannung. In I sei viel Strom und wenig Spannung z. B. 3 A · 10 V oder 30 Watt; in II entstehen z. B. 0,03 A · 1000 V = 30 Watt. Die Span-

nung wurde 100 mal so groß auf Kosten der Stromstärke, die 100 mal kleiner wurde. Energie wurde theoretisch weder gewonnen noch verloren; praktisch tritt natürlich immer durch die Joule'sche Wärme ein Verlust ein. Indem man hier für die sekundäre Spule möglichst viele Windungen nimmt, von denen ja jede einzelne von Kraftlinien geschnitten wird, erhält man sehr hohe Spannungen, da jede Windung für sich wirkt und alle hintereinander geschaltet sind. Diese Transformation verwandelt einen starken Strom mit wenig Spannung in einen schwachen Strom mit viel Spannung.

Natürlich kann man das Ganze umdrehen. Man kann die dünne Spule zur primären und die dicke zur sekundären machen, dann tritt eine solche Transformation ein, daß ein schwacher, aber hochgespannter Strom sich in einen starken Strom mit wenig Spannung verwandelt.

Es ist also der Transformator eine Vorrichtung, der für Wechselstrom in dem Produkte $A \cdot V$ den einen Faktor auf Kosten des anderen vergrößert.

I und II sind hier vollständig, was elektrische Leitung anlangt, voneinander isoliert. Durch die gegenseitige Induktion besteht aber doch ein magnetischer Zusammenhang, I und II sind durch Magnetismus miteinander gekoppelt. Je enger diese magnetische Koppelung ist, desto mehr Kraftlinien kommen zur Wirkung, desto stärker ist die gegenseitige Induktion.

Man kann die Induktionserscheinungen auch in einer anderen Form darstellen. So oft die Zahl der Kraftlinien, welche eine von einem Leiter eingeschlossene Fläche durchsetzen, sich ändert, entsteht in diesem Leiter ein Induktionsstrom.

704. Wenn sich ein größerer Leiter durch Kraftlinien bewegt, können in ihm mehrweniger unregelmäßige Lokalströme induziert werden, die nach ihrem Entdecker **Foucault'sche Ströme** benannt werden.

In vielen Instrumenten, z. B. in Hitzdrahtinstrumenten verwendet man solche zu einer magnetischen Dämpfung. Der Zeiger *z* hat an seinem unteren Ende eine dünne Aluminiumplatte, in Fig. 413 nicht gezeichnet, die bei jeder Zeigerbewegung durch einen ganz dünnen Spalt eines Hufeisenmagneten bewegt wird und hier die Kraftlinien schneidet. Die dadurch im Aluminiumblättchen induzierten Lokalströme werden vom Magneten in einer der Bewegung entgegengesetzten Richtung angezogen. Diese Bewegung ist dann vollständig gedämpft, aperiodisch. Der Zeiger geht an seinen Skalenstrich, ohne zu pendeln.

Bringt man knapp in die Nähe einer schwingenden Magnetnadel (z. B. eines Galvanometers) große Kupfermassen, so induziert die Nadelbewegung in diesen Kupfermassen Lokalströme und die Schwingungsenergie der Nadel wird rasch verbraucht; die Nadel kommt schnell zur Ruhe.

Wenn wir im Innern einer Spule, welche von unterbrochenem Gleichstrom oder Wechselstrom durchflossen wird, einen isolierten, massiven Metallzylinder haben, so stellt dieser innere Metallkern gleichsam eine sekundäre Spule dar. Die von der Spule wegweichenden und wieder einschrumpfenden Kraftlinien schneiden den Metallkern und es werden in ihm starke (kurzgeschlossene) Kreisströme induziert. Solche Foucault'sche Ströme, hier auch Wirbelströme genannt, bedeuten eine große Energievergeudung. Der Kern wird stark und unnütz erwärmt.

705. Magnetische Dämpfung. Das Drehspulengalvanometer, (Fig. 444) hat den großen Vorteil sich selbst zu dämpfen. Wenn es im offenen Zustand hin und her pendelt, so genügt eine leitende Verbindung von a und d, um es momentan in seinem Laufe aufzuhalten. Die Drehung des Rahmens erzeugt (durch das Schneiden der Kraftlinien) einen Induktionsstrom (Joule'sche Wärme); die mechanische Schwingungsenergie wird rasch verbraucht. Ist daher ein solches Instrument an eine Leitung von nicht allzugroßem Widerstande angeschlossen, so bewegt es sich vollständig aperiodisch.

706. Transformatoreisen. Da Kraftlinien im Eisen dichter und zahlreicher werden, müssen die Spulen in Transformatoren viel besser wirken, wenn wir in sie einen Eisenzylinder stecken. Um aber die Wirbelströme in diesem Eisenkern zu vermeiden, nimmt man keinen massiven Eisenzylinder, sondern Bündel von Eisendrähten oder Eisenblechen, die durch Oxydation oder Lackanstrich gegenseitig voneinander isoliert sind: unterteiltes oder lamelliertes Eisen. Dadurch können Wirbelströme nicht zustande kommen.

Aus diesen Gründen muß man auch überall, wo im Eisen starke Magnetismen rasch wechseln, z. B. bei Dynamoankern, unterteiltes Eisen, Eisenlamellen o. dgl. verwenden. Dieses Eisen ist auch mit möglichst kleiner Hysteresis zu wählen (§ 670).

707. Wechselstrommaschinen. Wir sahen, daß mit Ausnahme der Unipolarmaschinen alle rotierenden Maschinen ursprünglich Wechselstrom liefern, der bei den Gleichstromtypen durch Kommutatoren oder Kollektoren gleichgerichtet wird. Immer mehr aber wird Wechselstrom selbst in Verwendung gezogen.

Wir haben Fig. 457 u. 458 einen großen feststehenden Eisenring E (aus Lamellen mit kleiner Hysteresis) mit einer Reihe von nach innen gerichteten Zapfen a; der Übersichtlichkeit wegen sind in der Figur nur vier gezeichnet. Diese Zapfen sind mit sehr vielem und dünnem Draht, von Zapfen zu Zapfen die Richtung wechselnd, bewickelt (Fig. 457). Innerhalb dieses äußeren festen Magnetkranzes dreht sich konzentrisch ein zweiter Eisenring F, dessen nach außen gerichtete Zapfen b mit wenig Windungen

dicken Drahtes, wieder in abwechselnder Richtung, umwickelt sind. Mittels der zwei Schleifringe s_1 und s_2 wird von irgendeiner Gleichstromhilfsdynamo ein Strom eingeleitet, welcher die vorstehenden rotierenden Zapfen b abwechselnd zu dauernden N- oder S-Magneten macht. So oft nun abwechselnd so ein Nord- resp. Südpol des inneren Rades an einem äußeren Zapfen a mit seinen Kraftlinien vorübergeht (Fig. 458), wird in diesem ein Strom von wechselnder Richtung erzeugt, dessen Verlauf ungefähr durch eine Sinuskurve dargestellt wird; nur ungefähr, weil die Hysteresis des Eisens die

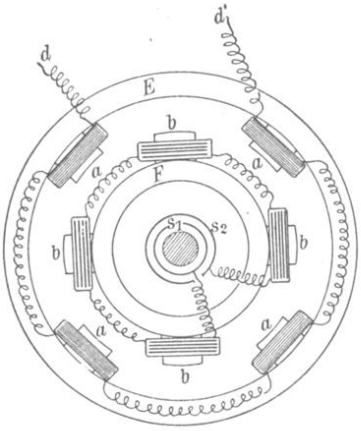


Fig. 457.

Fig. 458.

reine Sinusform etwas stört. Da aber die Spulen um a, in denen der Strom induziert wird, mit dünnen und zahlreichen Windungen umwickelt sind, so kann man die Spannung des induzierten Wechselstromes beliebig hoch hinauftreiben; in der Technik der elektrischen Kraftübertragung arbeitet man mit einer Fernleitungsspannung von 3000 bis 100000 V. Nun ist die elektrische Energie gleich dem Produkte $V \cdot A$. Wir können daher bei diesen hohen Spannungen mit verhältnismäßig schwachen Strömen große elektrische Energie erzeugen. Diese schwachen Ströme können mittels dünner Drähte weiter geleitet werden. Wir können so mit dünnen Fernleitungen gewaltige elektrische Energiemengen über Hunderte von km fortführen.

An der Verbrauchsstelle aber darf die Spannung keine zu hohe sein, nicht nur weil Glühlampen diese hohe Spannung nicht vertragen, sondern ganz besonders, weil diese hohe Spannung größte Lebensgefahr für alle brächte, welche mit einer solchen Leitung in Berührung kämen. Der Wechselstrom ist nun darin dem Gleichstrom überlegen, daß er direkt transformiert werden kann. Die beiden dünnen Drähte dd' (Fig. 457) werden an den betreffenden Verbrauchstellen an einen Transformator angeschaltet, in dem die ursprüngliche Spannung von z. B. 10000 V auf 100 V

herunter und die ursprüngliche Stromstärke von z. B. 50 A dafür auf 5000 A hinauftransformiert wird. Diese leichte Transformierbarkeit des Wechselstromes ermöglicht ohne allzu hohe Kosten eine Fernleitung mit dünnen Drähten; man baut die Zentrale irgendwo außerhalb der Stadt, wo der Grund billig, die Kohlenzufuhr bequem, bzw. eine Wasserkraft zum Betriebe vorhanden ist. Selbstverständlich muß die Führung des hochgespannten Stromes so geschehen, daß die Berührung der Drähte Unberufenen unmöglich wird. Diese Drähte dürfen daher nur außerhalb der Stadt in oberirdischen Leitungen geführt werden, in stark bewohnten Gegenden verlegt man sie in wohl isolierte, unterirdische Kabel.

An einzelnen Zentralpunkten des Leitungsnetzes stehen die Transformatoren. Die technischen Transformatoren haben (Fig. 459) einen geschlossenen Eisenkern *A*, so daß die elektromagnetischen Kraftlinien nur in Eisen gehen. Die primäre Rolle ist z. B. in sechs Rollen dünnen Drahtes I unterteilt, die sekundäre Rolle in vier Rollen dicken Drahtes II. Es ist eine besonders sorgfältige Isolierung nötig, damit nicht die hohe Spannung in die dicke Leitung überspringt. Das Eisen ist natürlich unterteilt und sehr weich.

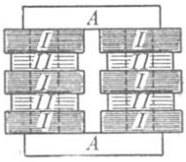


Fig. 459.

Die Periodenzahl des Wechselstromes, Frequenz, beträgt meistens 30 bis 50. Eine mit Wechselstrom gespeiste Lampe leuchtet etwa 60 bis 100 mal in der Sekunde auf. Dieser rasche Lichtwechsel wird an ruhenden Gegenständen nicht bemerkt, da die Retina unseres Auges zu langsam arbeitet.

708. Es seien hier auch noch die **Wechselstromsirenen** erwähnt, welche für physikalische und physiologische Zwecke einen ungefähren Sinusstrom von leicht zu variierender Frequenz und Stärke liefern. Eine vertikale Holzscheibe *h* (Figg. 460 u. 461) wird um die Achse *oo* gedreht; in ihrer Peripherie sind kleine Eisenzylinder *f* eingelassen. In der Fig. 460 ist nur einer gezeichnet, in der Fig. 461 sechs; in Wirklichkeit sind es aber mehr. Rechts stehen fixe gleichstromdurchflossene Spulen I; links ebenso fix die zu induzierenden Spulen II (in den Figuren der Übersichtlichkeit wegen nur je einmal gezeichnet). So oft nun ein rotierender kleiner Eisenzylinder *f* zwischen die Spulen I und II kommt, gehen die Kraftlinien von I nach II und es tritt Induktion ein. Indem man so sehr viele Eisenzylinder zwischen sehr vielen Spulen I und II rotieren läßt, kann man sehr hohe Frequenzen erreichen.

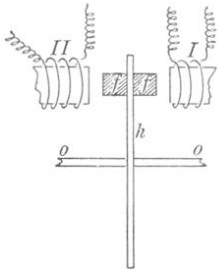


Fig. 460.

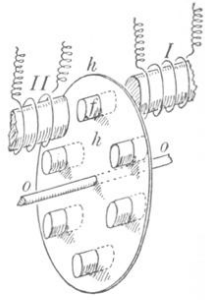


Fig. 461.

709. Selbstinduktion. Beim Transformator induziert ein Strom in der Spule I einen solchen in II, man spricht hier von gegenseitiger Induktion. Nehmen wir aber irgendeine Spule allein, z. B. einen Elektromagnet, so muß im Momente, wo wir einen Strom anfangen lassen zu fließen, jede einzelne Windung in ihren eigenen Nachbarwindungen einen entgegengesetzt gerichteten Induktionsstrom erzeugen, der den Gesamtstrom schwächt und ihn nur allmählich seinen vollen Wert gewinnen läßt; umgekehrt wird bei Stromöffnung jede Windung in den Nachbarwindungen einen gleichgerichteten Strom induzieren, der den Gesamtstrom verstärkt. Da der Hauptstrom diese Induktionsströme in seiner eigenen Bahn erzeugt, spricht man von Selbstinduktion. Diese in der eigenen Leitung induzierten Ströme heißen auch Extraströme (Schliessungsextrastrom und Öffnungsextrastrom).

Man kann diese Erscheinung auch so auffassen. Wenn ein Strom zu fließen beginnt, muß er das magnetische Feld im umliegenden Raume erzeugen und das kostet Energie. Diese beim Beginn des Strömens erforderliche Arbeit läßt den Strom nur allmählich seinen vollen Wert, den das Ohm'sche Gesetz verlangt, erreichen. Je stärker das magnetische Feld, desto mehr Arbeit leistet der Strom, desto langsamer steigt er an.

Diese potentielle Energie des magnetischen Feldes bleibt konstant, solange der Strom konstant ist. Öffnet oder schwächt man den Strom, so verschwindet diese magnetische Energie ganz oder teilweise und man erhält dann beim Öffnungsextrastrom genau jene elektrische Energie zurück, welche beim Schließen scheinbar verloren ging. Der Öffnungsextrastrom kann bei großen Magneten, Dynamomaschinen u. dgl. eine sehr hohe Spannung erreichen.

Einen kräftigen Öffnungsextrastrom zeigt folgende oft verwendete Versuchsanordnung Fig. 462. Der Batteriestrom B geht, wenn der Schlüssel S geschlossen ist, zu a und b. Dort teilt er sich, einmal die dünndrähtige Spule m und parallel eine zwischen α und β eingeschaltete Versuchsperson durchfließend. Im Momente, wo man S öffnet, schrumpft das magnetische Feld von m plötzlich ein und das Schneiden der schrumpfenden Kraftlinien in den Drahtspiralen erzeugt (in der alten Stromrichtung) einen hochgespannten Strom, der über $\alpha\beta$ abfließt. Die physiologische Reizung der Versuchsperson ist, besonders mit Eisen im Inneren der Spule, unerträglich stark, selbst wenn nur ein Element angewendet wird. Man kann auch zwischen α und β Funken erzeugen, welche Anwendung bei technischen Feuerzeugen oft Verwendung

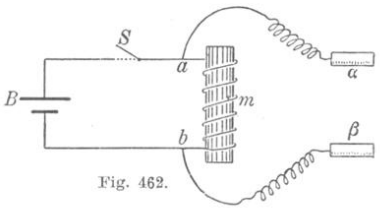


Fig. 462.

findet. Weitere Beispiele für die Wirkung der Selbstinduktion werden wir noch kennen lernen.

Das allmähliche Ansteigen der Stromstärke bei Stromschluß zeigt für eine bestimmte große Spule Fig. 463. Die Ordinaten geben die Stromstärken, die Abszissen die Zeit in 0,01 sek; erst nach 0,3 sek etwa ist die volle Intensität des konstant fließenden Gleichstromes erreicht. Bei großen Elektromagneten, wo die Energie zur Erzeugung der Kraftlinien sehr groß ist, kann dieses Ansteigen beim Schließen bis zu Minuten dauern; es ist hier die Geschwindigkeit der Intensitätsänderung des Gesamtstromes klein.

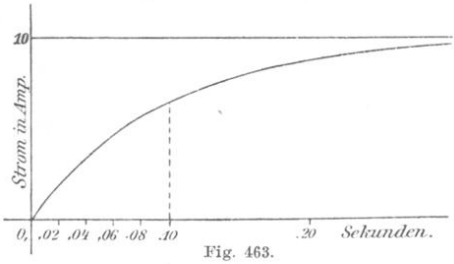


Fig. 463.

Es wirkt also der elektromotorischen Kraft der Batterie beim Stromschließen eine elektromotorische Kraft des Extrastromes entgegen, die im ersten Momente groß ist und nach einiger Zeit verschwindet.

Nennen wir die punktierte Stromstärke in Fig. 463 J und eine knapp weiter rechts liegende (nicht gezeichnete) J', ihre horizontale gegenseitige Entfernung im Diagramm, die kleine Zeit, τ, so ist $\frac{J'-J}{\tau}$ oder das Verhältnis (Stromänderung : Zeit) ein Maß für die Schnelligkeit des Anwachsens der Kraftlinien. Dieser Schnelligkeit proportional ist natürlich die elektromotorische Kraft des Extrastroms. Nennen wir diesen Proportionalitätsfaktor L und den Ohm'schen Widerstand des Kreises R, so ist die gesamte elektromotorische Kraft in einem beliebigen Momente $E = JR - L\frac{J'-J}{\tau}$. Das letzte Glied rechts verschwindet, wenn $J' = J$ oder wenn der Strom konstant geworden, dann bleibt das Ohm'sche Gesetz $E = JR$. Das L heißt Koeffizient der Selbstinduktion oder auch nur Selbstinduktion. Mißt man alles im praktischen Maßsysteme, also in V, A und Θ, so erhält man L in „Henry". L ist z. B. für die primäre Rolle eines kleinen Schlittenapparates etwa 0,0002 Henry, für die Sekundärspule eines großen Ruhmkorffs etwa 1000 Henry.

Die Selbstinduktion ist groß bei großen Elektromagneten, großen dünnen Ruhmkorffspulen (§ 716), klein bei geraden Leitern (weil wenig Schneidungsmöglichkeit der wachsenden oder schrumpfenden Kraftlinien) und gleich Null bei genau bifilar gewickelten Spulen (z. B. § 637 im Stöpselrheostaten).

710. Man kann das durch die Selbstinduktion bewirkte allmähliche Ansteigen des Stromes bei Stromschluß auch als Wirkung einer Art von Widerstand auffassen.

Ein Wechselstrom findet so infolge der Selbstinduktion, wo immer er magnetisch wechselnde Felder zu erzeugen hat, einen **scheinbaren Widerstand** oder „Impedanz". Während für den Gleichstrom die

Stromstärke nach dem Ohm'schen Gesetze berechnet wird und man darum in diesem Falle nur den gewöhnlichen oder Ohm'schen Widerstand einführen muß, kommt hier noch die Impedanz hinzu. Man nennt eine Spule mit kleinem Ohm'schen und großem scheinbaren Widerstand eine Drosselspule, weil sie gleichsam den Wechselstrom ohne Energieverbrauch abdrosselt. Es ist klar, daß dieser Unterschied zwischen Wechselstrom und Gleichstrom um so auffallender sein wird, je öfter der Wechselstrom seine Periode ändert und ebenso ist klar, daß ein scheinbarer Widerstand auch für Gleichstrom auftreten wird, wenn dieser nur Bruchteile einer Sekunde strömt.

Ist im Transformator die Spule I mit einer Wechselstromquelle verbunden und die Sekundärspule II ungeschlossen, so ist der scheinbare Widerstand sehr groß, es geht fast kein Strom hindurch. Im Momente aber, wo man nun der Spule II Strom entnimmt, sinkt der scheinbare Widerstand von I und es geht durch I um so mehr Strom (und Stromenergie) je mehr Energie man dem II entnimmt. Diese rechnerisch und experimentell leicht zu beweisende Tatsache ist für die Wechselstromtechnik von allergrößter Bedeutung, weil die Spule I eines Transformators so lange an der Wechselstromleitung ohne Wattverbrauch eingeschaltet werden kann, als man dem sekundären Stromkreis keine Arbeit zumutet.

711. Wechselstrommotoren. Versucht man die Wechselstrommaschine Fig. 457 durch Einleiten von Gleichstrom in den inneren Ring und Einleiten von Wechselstrom in d und d' zum Rotieren und zur mechanischen Arbeitsleistung zu verwenden, so muß der innere Ring genau den Wechseln des Wechselstromes entsprechend, synchron, sich drehen. Das ist schwer zu erreichen und darum ist der einfache Wechselstrom zur Arbeitsübertragung nicht zu brauchen.

Um Wechselstrommotoren zu erlangen, verwendet die Elektrotechnik gleichzeitig mehrere, z. B. drei, verschiedene Wechselströme, welche zwar alle gleiche Frequenz, aber nicht gleichzeitige Stromumkehr haben. Solche Maschinen mit drei in der Phase verschobenen Wechselströmen heißen Drehstrommaschinen, die bei jeder (nicht zu großen) mechanischen Belastung anlaufen und ohne Bürsten arbeiten. Darum sind solche Motoren in den meisten Fällen den Gleichstrommotoren überlegen.

712. Was bedeutet der Ausdruck **Stromstärke und Spannung eines Wechselstromes?** Der Strom und die Spannung sind ja abwechselnd positiv und negativ, ein einfacher Mittelwert wäre Null.

Ein Wechselstrom leistet aber elektrische Energie oder Joule'sche Wärme, diese ist dem jeweiligen Quadrat der Stromstärke proportional, wobei natürlich die Stromrichtung gleichgültig ist. Man versteht darum unter effektiver Stromstärke eines Wechselstromes die Wurzel aus dem Zahlenmittel der Quadrate möglichst vieler Stromstärken, die gleichmäßig über eine ganze Periode zu verteilen sind. Ebenso ist die effektive Spannung die Wurzel aus dem Zahlenmittel der Quadrate mög-

lichst vieler Spannungen, die gleichmäßig über eine ganze Periode zu verteilen sind. Hitzdraht-Instrumente (§ 656) können daher sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom gebraucht werden, wenn nur die eingebauten Shunts bei Ampèremetern oder die Vorschaltwiderstände bei Voltmetern vollständig ohne Selbstinduktion sind. Für diese Instrumente ist die Anzahl der Wechsel ohne Belang.

Federgalvanometer (§ 684) reagieren auch auf Wechselströme. In allen Apparaten aber mit weichem Eisen ist die Hysteresis von Einfluß. Es müssen daher Federgalvanometer für verschiedene Periodenzahl des Wechselstromes eigens geeicht werden. Durch passende Wahl der Eisensorte und -form gelingt es aber, bis zu einer Frequenz von 50, Instrumente zu bauen, die bis auf etwa 2 % Genauigkeit sowohl für Gleichströme als auch für beliebige Wechselströme verwendet werden können.

713. Dynamometer. Ein gewöhnliches Nadel-Galvanometer oder ein gewöhnliches Drehspulen-Galvanometer reagiert natürlich nicht auf Wechselströme, die fortwährend nach entgegengesetzten Seiten wirken. Wenn wir aber beim Drehspulen-Galvanometer (§ 692) statt des permanenten Magneten ein Solenoid verwenden und wenn wir sowohl die Drehspule als auch diese fix stehenden Windungen von den zu messenden Wechselströmen durchfließen lassen, so wird sich die Stromrichtung gleichzeitig in der abgelenkten Drehspule und in dem fixen ablenkenden Solenoid umkehren. Die Drehung erfolgt natürlich immer in gleicher Richtung und ist dem Quadrat der Stromstärke proportional. Solche Apparate heißen Dynamometer.

714. Wattmeter. Nimmt man bei einem solchen Dynamometer eine dünndrahtige Drehspule mit großem Widerstand und das fixe ablenkende Solenoid mit dickem Draht und kleinem Widerstand und schaltet man die fixe Rolle direkt wie ein Ampèremeter in die Leitung ein, indes die drehbare Rolle wie ein Voltmeter an zwei Punkten der Leitung angeschlossen wird, so erhält man ein Wattmeter. Die Wirkung der fixen Spule ist der Anzahl der A proportional, die Wirkung der dünnen Spule der angelegten Potentialdifferenz V; der Ausschlag wird daher proportional sein dem Produkt $V \cdot A$; dieser Ausschlag liefert also bei einem passend graduierten Apparat direkt den Stromeffekt für die eingeschaltete Stromstrecke in Watt. Das Prinzip gilt für Gleich- und (mit einigen Einschränkungen) Wechselströme.

715. Medizinisches Induktorium. Induzierte Stromstöße nennen die Mediziner Faradische Ströme. Sie werden für physiologische, diagnostische und therapeutische Zwecke verwendet.

I in der schematischen Fig. 464 ist eine Spule aus 3—4 Lagen dicken Drahtes, II eine Spule mit 5000 bis 20000 Windungen dünnen Drahtes. Ein Strom von einigen Elementen der Batterie B geht durch I; er wird regelmäßig in a mit nach dem Prinzip der elektrischen Stimmgabel (§ 685) konstruierten Einrichtungen (Wagner'scher oder Neef'scher Hammer)

einige 20 bis 200 mal pro sek unterbrochen und geschlossen. Dadurch werden in II hochgespannte Öffnungs- und Schließungsinduktionsströme erzeugt. Man kann durch dieses Induktorium die Spannung einer Batterie von 2—3 V auf einige 100 bis 1000 V erhöhen. Es erfolgt eine Hinauftransformation der Spannung. Wenn wir II auf einer schlittenartigen Vorrichtung, die oft über 1 m lang ist, ganz weit von I wegschieben, schwächen wir die Wirkung, indes wir beim Überschieben von II über I die stärkste Wirkung erzielen, besonders wenn ein Eisendrahtbündel in der Mitte von I ist. Eine Skala auf der Schiene ermöglicht ungefähre Dosierung dieser Koppelung: Schlittenapparat von Du Bois-Reymond.

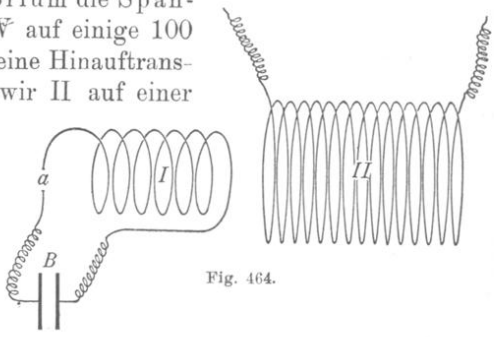


Fig. 464.

Man hat die Spule II auch drehbar eingerichtet. Stehen die Achsen von I und II senkrecht aufeinander, so ist die Wirkung gleich Null; allgemein ist sie umgekehrt dem Sinus des Winkels zwischen den Achsen proportional.

Eine andere Schwächung der Induktion erzielt man durch einen Kupferzylinder, der bei übereinander geschobenen I und II zwischen I und II sich einschieben läßt. Die Induktionsströme, welche in diesem mehr oder weniger tief eingeschobenen Kupfermantel entstehen, verkleinern die Wirkung von I auf II.

Die beim Öffnen und Schließen des induzierenden Stromes I in II induzierten Ströme liefern immer dieselbe Elektrizitätsmenge, da ja die Zahl der geschnittenen d. h. der wachsenden und der zusammenschrumpfenden Kraftlinien immer dieselbe ist. Je nach der Schnelligkeit aber, mit der diese Kraftlinien aus I herauswachsen oder nach I zurückschrumpfen, wird dieselbe induzierte Elektrizitätsmenge innerhalb kürzerer oder längerer Zeit abfließen, d. h. ihre Spannung wird größer oder kleiner sein. Da im allgemeinen das Öffnen des Primärstromes rascher erfolgt als das Schließen, ist der sog. „Öffnungsstrom“ in II höher gespannt und physiologisch wirksamer. Darum ist die Konstruktion des Stromunterbrechers von größter Wichtigkeit.

Die gewöhnliche Schaltung ist unmittelbar verständlich. Der Strom der Batterie B (Fig. 465 linker Teil) geht durch die schematisch gezeichnete primäre Spule I (Spule II ist nicht gezeichnet) und den Elektromagneten S, zieht das Eisenblättchen E an, wodurch der Platinkontakt bei r unterbrochen wird; die Feder F springt wieder in die Höhe usw. Der Strom in I wird so vollständig unterbrochen, daß ein Stromverlauf entsprechend dem Diagramm Fig. 465 rechts (ausgezogene Linie) resultiert. O ist der Moment des Stromschlusses,

B der Moment der Stromöffnung. Von O bis A haben wir langsamen Stromanstieg wegen des entgegengesetzten Schließungsextrastromes, von A bis B konstanten Gleichstrom, von B bis C fließt Öffnungsextrastrom durch den Funken bei r hindurch. Die gestrichelte Linie in Fig. 465 rechts gibt den Verlauf des induzierten

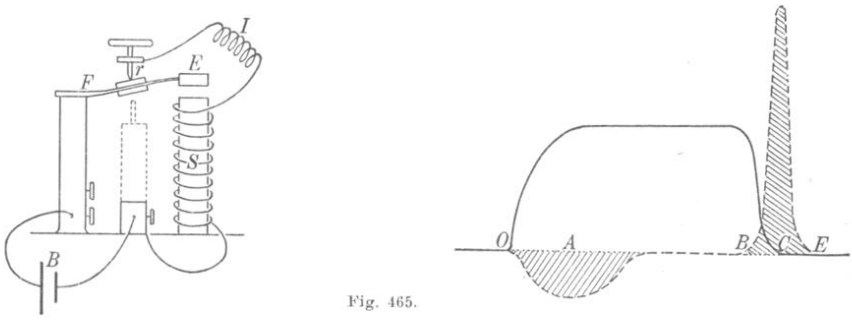


Fig. 465.

Stromes in II. Wir haben von O bis A Induktion durch den wachsenden Schließungsstrom von I, dann noch den Extrastrom in II. Dann aber bleibt II stromlos, weil Strom in I konstant. B bis C Induktionsstoß infolge des Abfallens des primären Stromes, C bis E Induktionsstoß durch Verschwinden des starken Extrastromes von II. Dieser letztere induzierte Strom fließt noch, eine Art sekundärer Öffnungsstrom, wenn der primäre Strom schon ganz verschwunden ist. Die durch Schließung von I in II induzierten Ströme haben weniger Spannung als die durch das Öffnen induzierten. Letztere wirken darum physiologisch stärker. Die Strommengen (schraffierte Flächen) sind in beiden Fällen gleich, nur die Abflußdauer ist verschieden.

Diese Ungleichheit ist für viele physiologische und therapeutische Zwecke unerwünscht. Darum hat Helmholtz eine Modifikation dieses Wagnerschen Hammers angegeben, welche Fig. 466 schematisch darstellt. Der Strom

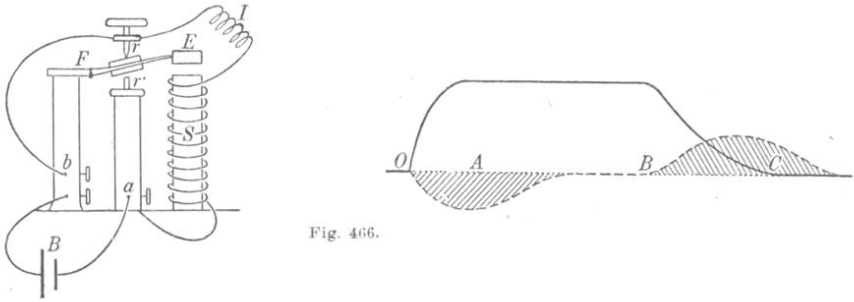


Fig. 466.

geht zunächst den Weg $BaSIbB$ wie früher in Fig. 465; der Magnet S zieht E an und schließt nun unten bei r'. Jetzt teilt sich der Batteriestrom in a und b, nämlich $aSIb$ (großer Widerstand) und $ar'Fb$ (kleiner Widerstand als Shunt). Der durch S gehende Strom wird nicht unterbrochen, aber sehr schwach; der

Magnet läßt los und die Feder oszilliert in die Höhe usw. Während also bei Schaltung in Fig. 465 ein Moment eintritt, wo der primäre Öffnungsstrom plötzlich unterbrochen wurde, tritt hier keine vollständige Unterbrechung ein, der Öffnungsstrom von I kann in einer stets geschlossen bleibenden Leitung abfließen. Fig. 466 rechts stellt, analog der Fig. 465, in der ausgezogenen Linie den primären, in der gestrichelten Linie den sekundären Stromverlauf dar. Man erreicht so ungefähre Symmetrie auf beiden Seiten der Nullinie. Öffnungs- und Schließungsstrom sind in II fast gleich.

716. Größere Funkeninduktoren wurden zuerst von Ruhmkorff gebaut, darum nennt man sie auch oft **Ruhmkorffs.** Ein plötzliches Schließen des Primärstromes ist wegen des langsamen Stromanstieges (große Selbstinduktion) unmöglich, wohl aber kann man durch passende Anordnungen ein fast momentanes Öffnen erzielen. Der primäre Gleichstrom (Fig. 467) sei bei a und b eingeschaltet. Er fließt durch $adrFcb$; die Eisenstäbe im Innern werden magnetisch, ziehen das Eisen E an, die Feder F biegt nach links und es tritt Unterbrechung bei r ein; die Feder losgelassen und sich nach rechts biegend schließt wieder usw. Bei Unterbrechung in r entsteht infolge der großen Selbstinduktion ein sehr starker, lichtbogenförmiger, gut leitender Öffnungsfunke, wodurch eine plötzliche Unterbrechung unmöglich wird. Darum ist der Unterbrechungsstelle parallel bei c und d ein Staniol-Glimmer-Kondensator K angeschaltet. Dieser Kondensator ist natürlich ungeladen, wenn der Unterbrecher bei r geschlossen ist; sobald er aber geöffnet wird, stürzt der ganze Extrastrom der primären Spule in den Kondensator, und zwar von b über die Batterie und ad in die untere Fläche und von c aus direkt in die obere. Dadurch wird der Primär-Öffnungsfunke bei r entlastet und ganz kurz. Es gelingt so eine fast momentane Öffnung, die Kraftlinien im primären Strom schrumpfen fast momentan zusammen. Der induzierte Öffnungsinduktionsstoß wird darum zeitlich sehr kurz, erreicht somit beim Abfluß einer bestimmten Elektrizitätsmenge eine sehr große Spannung. Das Hinauftransformieren der Spannung hängt natürlich ceteris paribus von dem Verhältnis der Windungszahlen in I und II ab. Bei größeren Apparaten und Verwendung starker Primärströme können zwischen den Enden α und β (Elektroden) der etwa aus 100000 Windungen bestehenden sekundären Rolle Funken bis zu 1,5 m Länge überkrachen, die natürlich nur durch den primären Öffnungsextrastrom indu-

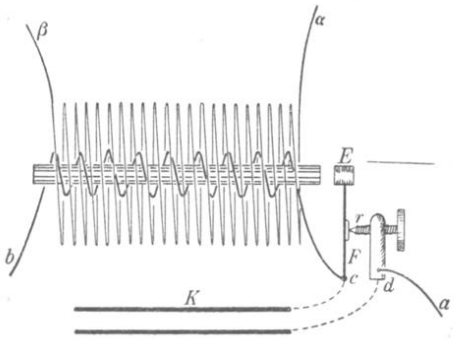


Fig. 467.

ziert werden. Bei solchen Spannungen kann die Isolierung nur durch besondere Sorgfalt und durch Anwendung technischer Kunstgriffe erreicht werden. So würden z. B. durch einfache Hin- und Herwickelung die hochgespannten Enden der sekundären Wickelung nahe aneinander kommen, der Funke würde im Innern überschlagen; man macht darum II aus einer Reihe von Teilspulen.

717. Von allergrößter Wichtigkeit ist der bei r arbeitende **Unterbrecher.**

Unterbrecher wie in Fig. 467 nach dem Prinzip des Wagner'schen Hammers wurden durch sehr gute Platinkontakte in neuerer Zeit bedeutend verbessert; bei allzugroßer Stromstärke versagen sie aber.

Ein für viele Fälle bequemer Unterbrecher besteht aus einem kleinen Elektromotor, der abwechselnd mittels einer Pleuelstange einen vertikalen Kontaktstab etliche 50—500 mal pro sek in Quecksilber eintaucht und wieder heraushebt. Um allzu rasche Oxydation des Quecksilbers zu vermeiden, ist dieses mit einer nichtleitenden Petroleumschicht übergossen. Bei Einstellung dieses sowie aller Unterbrecher ist sehr darauf zu achten, daß die Zeitdauer, während welcher der Kontakt besteht, nicht zu klein wird, weil sonst der primäre Strom nie seine volle Stärke erreichen könnte.

Man kann auch mittels eines kleinen Elektromotors ein Metallrad mit etwa sechs Zacken rasch drehen und gleichzeitig eine kleine Turbine betreiben, welche einen feinen Quecksilberstrahl auf die vorbeirotierenden Metallzacken spritzt. So oft diese Metallzacken, die mit dem einen Batteriepol verbunden sind, den mit dem anderen Batteriepol verbundenen Quecksilberstrahl schneiden, entsteht Kontakt. Dieser ganze Turbinen- oder Quecksilberstrahlunterbrecher ist (ohne Motor) in einem zylindrischen, mit Petroleum gefüllten Gefäß kompendiös zusammengebaut. Nach längerem Gebrauch tritt ein vollständiges Verschlammen des Petroleums und des Quecksilbers ein, der Apparat muß dann gereinigt werden.

718. Sehr bequem für größere Spannungen des primären Kreises, mindestens 20 V, ist der **elektrolytische Unterbrecher von Wehnelt.** In einem großen Zylinderglas ist verdünnte Schwefelsäure. Der Strom tritt durch eine Platinspitze p ein (Fig. 468), die bis auf ihr unterstes Ende durch ein Porzellanrohr P isoliert ist. Als Kathode dient eine große Bleiplatte Pb. An p bildet sich ein Sauerstoffbläschen, auch entsteht hier durch die (wegen der großen Stromdichte) große Joule'sche Wärme ein Dampfbläschen, welches isoliert. Bei dieser plötzlichen Unterbrechung geht durch dieses Bläschen ein Öffnungsfunke und die dadurch eintretende Explosion schleudert das Gasbläschen weg, wodurch neuerlicher Strom eintritt usw. Die ganze Zelle ist sehr groß, damit sie sich nicht zu rasch erwärmt. Man erhält so bis zu 3000 Unterbrechungen in der Sekunde und

zwar um so mehr, je kleiner die Selbstinduktion der eingeschalteten Primärspule ist. Diese baut man darum in modernen Apparaten aus einigen getrennten Windungslagen; indem man diese durch eine Art Pachytrop in Serie oder parallel schaltet, ändert man die Anzahl der Unterbrechungen, was z. B. bei verschiedenen Härtegraden von Röntgenröhren (§ 750) sehr bequem ist. Gewöhnlich arbeitet man mit 500 Unterbrechungen pro sek. Immer aber muß die Größe der freien Platinspitze p zu ändern sein, was dadurch erreicht wird, daß sie durch eine nicht gezeichnete Schraubeneinrichtung am oberen Ende von P mehr oder weniger aus der Porzellanröhre herausgeschoben werden kann.

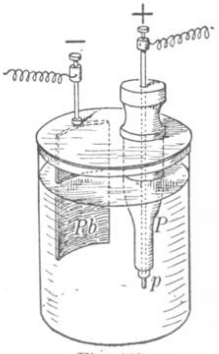


Fig. 468.

Die Unterbrechung geschieht bei elektrolytischen Unterbrechern so rasch, daß die Anwendung der Kondensatoren K (Fig. 467) entfallen kann.

719. Telephon. NS (Fig. 469) ist ein permanenter Stahlmagnet, dessen eines Ende mit einer Spule s aus dünnem Draht umwickelt ist. Diesem Stabende gegenüber ist eine dünne Eisenmembrane ee befestigt, deren mittlere Partie frei liegt. Die Kraftlinien des Magneten gehen zum Teil durch diese Eisenmembrane ee. Von den Kraftlinien des Magneten sind nur je zwei gestrichelt gezeichnet, α und β. Nähert man die Mitte der Eisenmembrane ee dem Magneten, so gehen mehr Kraftlinien durch sie. Die gestrichelt gezeichneten Kraftlinien α (rechts eine, links eine) springen mit ihrem oberen, punktiert gezeichneten Teile in ee hinein. Bei diesem Hinausrücken haben sie den Draht der Spule s geschnitten und in ihr einen Strom induziert. Das Entgegengesetzte tritt ein, wenn die Membrane von dem Magneten entfernt wird. Der Übersichtlichkeit wegen sind nur diese vier Kraftlinien und das Hinaufrücken von zweien übertrieben gezeichnet.

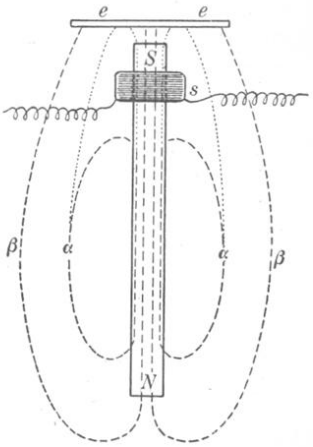


Fig. 469.

Sprechen wir nun gegen diese dünne Eisenmembrane ee, so schwingt die Mitte der Platte, sich ausbauchend, hin und her und bei diesem fortwährenden Nähern und Entfernen gegen den Magnetpol werden fortwährend Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung durch die Spule gehen und es wird ein Wechselstrom erzeugt, der in Form und Frequenz ganz genau den Schwingungen der Membrane und den akustischen Schwingungen der Sprache entspricht. Führt man nun diesen Strom durch einen zweiten

Apparat, der dem eben geschilderten ganz gleich ist, so wird dadurch der Magnetismus des zweiten Stahlstabes in demselben Tempo und in derselben Größe geschwächt oder gestärkt und die zweite Membrane gerät genau in dieselben Schwingungen wie die erste. Es werden somit dadurch im zweiten Instrument dieselben Schallwellen erzeugt, welche das erste Telephon in Schwingungen versetzten. Man kann auf diese Weise durch die Leitung hindurch auf große Distanz sprechen.

720. In der schematischen Fig. 470 ist B eine Batterie, deren Strom durch das **Mikrophon** ACm und eine dicke Spule I fließt. Ersteres besteht aus einer Metallplatte A, vor welcher eine dünne Metallmembran m ist. Der Zwischenraum zwischen beiden Metallplatten ist mit Kohlenkörnern C angefüllt. Jede Erschütterung der Platte m wird einen Druck auf die Kohlenkörner ausüben, dadurch den Widerstand und die Stromstärke ändern. Um die dicke Spule I ist eine sekundäre Spule II (in Fig. 470 nebenan gezeichnet) gewickelt, welche mit einem Telephon T in Verbindung ist. Alle die Stromschwankungen, welche durch eine Erschütterung von m hervorgerufen werden, äußern sich in Stromschwankungen in I und werden durch Induktion in II das Telephon T zum Tönen bringen. Wird gegen m gesprochen, so hört man im Telephon das viele hunderte Kilometer (darum Transformation durch I, II) entfernte Gespräch.

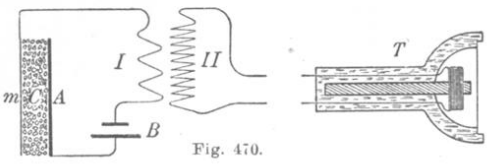


Fig. 470.

Während bei der Verwendung zweier Telephone zum Sprechen und Hören (wie § 719) die Energie des Stromes, der die ganze Leitung durchsetzt und sich da zum Teil in Wärme verwandelt, aus der Energie der sprechenden Stimme geschöpft wird, bildet hier das Mikrophon eine Art Relais. Die Energie liefert die Batterie B und die Energie der Stimme dient nur zur Erzeugung der Widerstandsänderung.

Man kann durch ein Mikrophon auch sehr schwache Geräusche laut und kräftig machen. Legt man ein Mikrophon z. B. in die Herzgegend eines Menschen, so hört man im Telephon die Herztöne in kräftiger Weise. Man kann aber auch, wenn man nur das Windungsverhältnis von I und II passend wählt, die Spannung dieses durch die Herztöne induzierten Stromes in II bis zur Möglichkeit der Reizung eines Froschschenkels, der als Stromanzeiger dient, steigern; letzterer kann z. B. mittels eines Hebelchens durch seine Zuckungen den Rhythmus der Herztöne auf eine rotierende Trommel schreiben.

8. Elektromagnetische Schwingungen.

721. Elektrische Schwingung. Zwei kommunizierende Röhren (Fig. 471) seien mit Quecksilber gefüllt. Wenn wir eine Höhendifferenz herstellen und dann die Röhren sich selbst überlassen, so wird das Quecksilber eine Zeitlang, abwechselnd links oder rechts höhergehend, hin- und herpendeln.

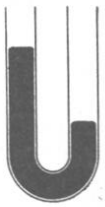


Fig. 471.

Analoges gibt es in der Elektrizität. Wenn man eine positiv und eine negativ geladene Kugel durch einen dicken Draht plötzlich verbindet, so findet kein einfacher Ausgleich der Ladungen statt, sondern es werden, wie in Fig. 471 das Quecksilber auf- und abwärtspendelt, hier die Ladungen der beiden Kugeln zwischen positiv und negativ regelmäßig abwechseln.

Während aber in Fig. 471 die Trägheit des Quecksilbers die Ursache des Hin- und Herpendelns ist, wird die analoge elektrische Schwingung durch die Selbstinduktion erzeugt. Bei leitender Verbindung der positiv und der negativ geladenen Kugel entsteht (durch den Schließungsextrastrom verzögert) nur allmählig (z. B. Fig. 463) ein Strom, der, wenn die Kugeln das gleiche Potential erreicht haben (wegen des Öffnungsstromes) nicht aufhört, sondern gleichsam übers Ziel schießend, die ursprünglich negative Kugel positiv auflädt usw.

Wenn man hingegen die Anordnung Fig. 472 sich selbst überläßt, so tritt ein allmählicher Ausgleich der Quecksilberhöhendifferenz ohne Schwingung ein. Die Ursache der Verschiedenheit in beiden Erscheinungen Figg. 471 und 472 liegt in der Reibung. In Fig. 472 haben wir unten ein dünnes Verbindungsrohr, in Fig. 471 ein breites und wir können daher annehmen, daß, wenn wir gar keine Reibung hätten, das Quecksilber fortwährend um die Gleichgewichtslage hin- und herschwingen würde. Ebenso würde ja auch ein Pendel ohne Reibung seine Schwingungen fortwährend beibehalten. Auch eine angeschlagene Stimmgabel wird infolge der inneren Reibung, die Wärme erzeugt, immer kleinere Schwingungen machen; hier tritt aber noch eine weitere Erscheinung in den Vordergrund. Die Stimmgabel beeinflußt das umliegende Medium, sie sendet Schallstrahlen aus und, da die Schwingungen der Gabel auch für diese Energie aufzukommen haben, muß auch diese Ausstrahlung die Dämpfung vergrößern.

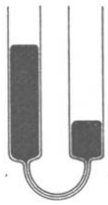


Fig. 472.

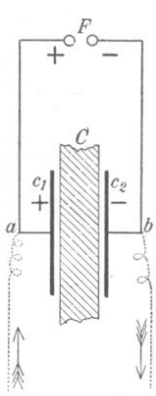
Verbinden wir eine positiv und eine negativ geladene Kugel statt durch einen dicken Draht durch einen schlechten Leiter, z. B. durch eine befeuchtete Hanfschnur, so finden keine Schwingungen

statt, der Ausgleich geschieht wie in Fig. 472. Wir haben also auch bei elektrischen Schwingungen einmal eine Art innerer Reibung, die Dämpfung erfolgt durch Umwandlung der Schwingungsenergie in Joule'sche Wärme; andererseits werden wir sehen, daß auch hier, wie beim Schwingen einer Stimmgabel, oft ein bedeutender Teil der Schwingungsenergie in den Raum hinausgestrahlt wird.

722. Oszillierende Funkenentladung. Läßt man die beiden Belegungen einer Leydnerflasche durch einen dicken kurzen Funken sich entladen, so besteht (Feddersen 1859) der scheinbar einfache Funke aus einer Reihe von einzelnen Teilfunken. Beobachtet man das Funkenbild in einem rasch rotierenden Spiegel, so erblickt man eine Reihe von Spiegelbildern, die unschwer erkennen lassen, daß der Funke abwechselnd hin- und hergeht.

Schaltet man z. B. in die Entladungsbahn ein Solenoid ein, so wird dieses von rasch wechselnden Strömen durchlaufen und es entsteht daher an jedem Ende wechselnd ein Nord- oder Südpol, welcher z. B. den leicht beweglichen Kathodenstrahl einer Braun'schen Röhre (später Fig. 486) synchron hin- und herdrückt; wir erhalten am phosphoreszierenden Schirm einen ausgedehnten Lichtstreif, der im rotierenden Spiegel zu einer Wellenlinie aufgelöst erscheint.

723. Erzeugung einer elektrischen Schwingung. C in Fig. 473 sei ein Kondensator (z. B. Leydnerflasche), dessen Belegungen c_1 und c_2 durch die dick gezeichnete Leitung mit der Funkenstrecke F (etwa 0,5 cm lang) verbunden sind. Die beiden punktiert gezeichneten Drähte führen zu einer Influenzmaschine, welche c_1 positiv und c_2 negativ auflädt. Hat diese Spannungsdifferenz an der Funkenstrecke einen gewissen Wert erreicht, so bildet sich der Funke (Widerstand nur einige Θ) und macht in F eine leitende Verbindung zwischen c_1 und c_2. — Es entsteht im Schwingungskreise $c_1 a F b c_2$ eine elektrische Schwingung.



Influenzmaschine
Fig. 473.

Ist L die Selbstinduktion der Leitung $c_1 a F b c_2$, die nicht zu klein sein darf, und C die Kapazität, so ist die Schwingungsdauer $\tau = \pi\sqrt{LC}$ sek. Das folgt sowohl aus rechnerischen Betrachtungen wie aus experimentellen Beobachtungen. Doch gilt die Formel nur, wenn der Ohm'sche Widerstand der Leitung eine gewisse Größe nicht überschreitet, da sonst Schwingungen überhaupt nicht zustande kommen.

Je größer die Selbstinduktion und die Kapazität des Schwingungskreises, desto länger ist die Schwingungsdauer, die in den gebräuchlichsten Fällen nach Millionstel oder höchstens Hunderttausendstel sek zählt, also sehr klein ist. Eine solche Schwingung ist also ein Wechselstrom mit sehr hoher Frequenz.

Man nimmt in Fig. 473 statt der Influenzmaschine besser ein Induktorium. Auch dieses lädt ja z. B. c_1 positiv auf, was immerhin einige Hundertstel sek dauert; dann schlägt der Funke bei F über und es setzt die zeitlich um soviel kürzere elektrische Schwingung ein, die schon nach etwa zehnmaligem Hin- und Herpendeln infolge der Dämpfung verschwunden ist. Dann, nach einiger Zeit erst, entwickelt sich der entgegengesetzte Strom des Induktoriums, der c_2 positiv auflädt usw. Der Funke F springt (je nach der Unterbrechungszahl des Induktoriums) z. B. 100mal pro sek über, und jedesmal ist mehr als hinlänglich Zeit zur Ausbildung einiger Schwingungen (deren 10 Hin- und Hergänge z. B. nur 10/500 000 sek dauern).

Darum ist die Beschaffenheit des Funkens F sehr wichtig. Während der eigentlichen wirklichen Entladungszeit soll der Funke für die Schwingung eine glühende Brücke bilden, dann aber soll er auslöschen, damit die Neuaufladung von C beginnen kann. Es ist daher jede Neigung des Funkens zu dauernder Lichtbogenbildung zu unterdrücken.

Zu dem Zwecke stellt man senkrecht zur Funkenstrecke zwei Magnetpole, welche die Funkenbahn elektromagnetisch hinausblasen (nach § 689) oder man verwendet mechanisches Hinausblasen mittels eines kräftigen Luftstromes oder man läßt den Funken unter Öl, Petroleum u. dgl. überspringen. Man kann aber auch in vielen Fällen einfach Zinkkugeln als Funkenelektroden verwenden (oder „Löschfunken“ § 741).

724. In Fig. 473 hängt der Schwingungskreis mit der Energiequelle (Influenzmaschine oder Induktorium) leitend zusammen, es ist dies eine „galvanische **Koppelung**“.

Fig. 474 gibt eine etwas andere (für ärztliche Zwecke geeignetere) Anordnung mit 2 Kondensatoren C_1 und C_2, in der die hohe Spannung des Induktoriums nirgends in die Schwingungsleitung direkt eintreten kann.

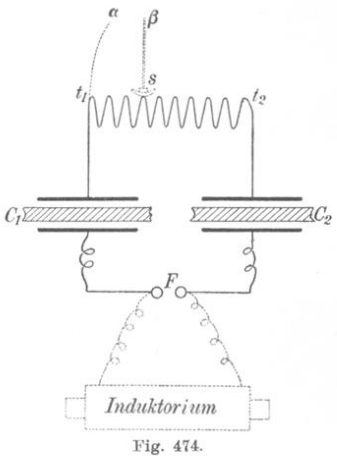


Fig. 474.

Zuerst hat man eine bestimmte Ladungsverteilung, immer mehr anwachsend, bis bei F der Funken überschlägt, durch welchen nun die Schwingung von $C_1 F C_2 t_2 t_1$ (ausgezogen gezeichnet) einsetzt. Wenn diese abgelaufen ist (z. B. nach $\frac{10}{500\,000}$ sek) tritt durch die entgegengesetzte Ladung vom Induktorium her die entgegengesetzte Ladung von C_1 und C_2 auf, neuerliche Funken, neuerliche Schwingung usw. Ein von wenigen der etwa 10 Windungen des $t_1 t_2$ abzweigender (gestrichelt gezeichneter) Nebenstrom $t_1 \alpha \beta s$ gestattet, da der Schleifkontakt s

längs $t_1 t_2$ verschiebbar ist, eine Spannungsdosierung (§ 639) zwischen α und β, in welche Strecke z. B. ein Patient eingeschaltet wird. Hier ist der Schwingungskreis galvanisch vom Induktorium isoliert, seine Betätigung erfolgt durch elektrostatische Koppelung in C_1 und C_2 (durch Vermittelung der elektrischen Kraftlinien). Der Nebenschwingungskreis $t_1 \alpha \beta s$ aber ist an $C_1 F C_2 t_2 t_1$ galvanisch gekoppelt.

725. Außer dieser direkten Anwendung Fig. 474 gibt D'Arsonval ein **Kondensatorbett** an; hier ist α zu einer großen leitenden Fläche ausgestaltet, auf der eine isolierende Matratze liegt; auf dieser ruht der Patient, β in der Hand. So bildet der Kranke die eine Belegung eines mit elektrischen Schwingungen gespeisten Kondensators.

726. Da eine elektrische Schwingung ein Wechselstrom mit riesiger Frequenz, ein Hochfrequenzstrom ist, also hier die Kraftlinien sehr rasch wachsen und schrumpfen, muß auch die Induktionsfähigkeit eine eminente sein. Machen wir die von elektrischen Schwingungen durchsetzte Spule $t_1 t_2$ von Fig. 474 (natürlich ohne angehängte Nebenleitung $t_1 \alpha \beta s$) zur Primärspule eines Induktoriums, dessen Sekundärwickelung etwa 100 bis 400 Windungen dünneren Drahtes enthält, so entstehen in letzterer Schwingungen mit einigen 100 000 V Spannung an den offenen Enden, wodurch eine Reihe glänzender Funkenexperimente ermöglicht werden. Man legt wegen der hohen Spannung diesen von **Tesla** angegebenen **Schwingungstransformator** meist in ein isolierendes Ölbad. Primäre und sekundäre Spule sind hier magnetisch gekoppelt (durch die elektromagnetischen Kraftlinien). Bei solchen Transformatoren hat die Einbringung von Eisen keinen Zweck, weil bei so hohen Frequenzen die Hysteresis viel zu groß würde, als daß der Eisenmagnetismus so rasch wechseln könnte.

727. D'Arsonvalisation. Ein anderes Beispiel magnetischer Koppelung liefert folgende therapeutische Anwendung. Die von elektrischen Schwingungen oder Hochfrequenzströmen durchsetzte primäre Spule (z. B. $t_1 t_2$ in Fig. 474) ist eine aus etwa 16 Windungen bestehende und so weite Spule, daß ein Mensch darin, ohne den Draht zu berühren, bequem stehen kann. (Es sind auch horizontale Formen für liegende Patienten konstruiert worden.) Der Körper des Patienten im Innern dieser Spule bildet gleichsam die sekundäre Spule, er wird von lauter induzierten Foucault'schen Strömen durchflossen. Irgendwelche Empfindungen werden durch eine solche Autoinduktion oder Autokonduktion nicht ausgelöst, ausgenommen solche suggestiver Natur, die natürlich sehr groß sein müssen (weil z. B. eine Glühlampe mit 2—4 V an um den Körper geschlungenen Drähten erglüht usw.). Die physiologische Wirkung soll in einer vielfach bestrittenen Erhöhung des Stoffwechsels usw. bestehen. Die im Körper induzierten Ströme sind wegen des großen Widerstandes minimal.

728. Bringt man in Fig. 474 zwischen α und β eine Glühlampe, so liegt diese in Parallelschaltung zu dem Drahte $t_1 s$ und man würde zunächst erwarten, daß die Zweigleitung $\alpha\beta$ nach dem Kirchhoff'schen Gesetze fast keinen Strom führt, da ja der Ohm'sche Widerstand des Kupferdrahtes $t_1 s$ gegen den der Glühlampe minimal ist. Nun steigt aber die Impedanz oder der scheinbare Widerstand (§ 710) mit der Schwingungszahl; bei den riesigen Frequenzen elektrischer Schwingungen ist der scheinbare Widerstand in $t_1 s$ so groß, daß der Strom lieber durch den Nebenschluß der Glühlampe geht.

Bei solchen raschen Schwingungen werden nicht nur die Wirkungen der Selbstinduktion sehr groß, es ähneln solche Ströme auch sehr elektrischen Ladungen, da sie längs der Oberfläche des Leiters gehen und nur teilweise ins Innere eindringen, daher der Name **Skin-** (d. h. Haut- oder besser Oberflächen-) **Effekt.**

729. Bei allen bisher geschilderten Schwingungserregungen finden immer nur einige wenige (weil rasch gedämpfte) Schwingungen bei jedem einzelnen Funkenübergange statt; die verhältnismäßig lange Zwischenzeit zwischen den einzelnen Funken schwingt das System nicht. Es ist, wie wenn man eine stark gedämpfte Stimmgabel immer nur von Zeit zu Zeit (z. B. alle zwei bis drei Minuten einmal) anschlüge. Fig. 475 stellt eine **kontinuierliche Schwingungserregung** dar. Es ist einem Gleichstromlichtbogen eine Selbstinduktion L und eine Kapazität C parallel geschaltet. Dann entsteht in L ein Wechselstrom (Lecher 1887). Läßt man den Lichtbogen, wie Poulsen (1904) zeigte, in einer (die Wärme gut leitenden) Wasserstoffatmosphäre brennen, so erhält man sehr kräftige und kontinuierliche elektrische Schwingungen.

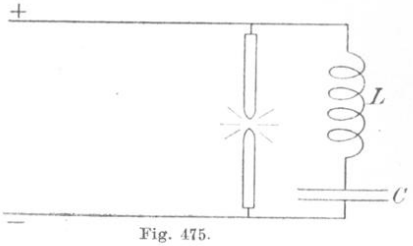


Fig. 475.

Die Theorie dieser Erscheinung wurde im Anschluß an Betrachtungen über die Stabilität von Gasentladungen (Kaufmann 1900) von Simon (1905) gegeben.

730. Physiologische Wirkungen. Wir wiesen bereits (§ 610) darauf hin, daß durch Ionenwanderungen bewirkte Konzentrationsänderungen, die im Organismus auftreten, von größter Wichtigkeit sind. Seit 1899 hat Nernst[1]) durch eigene und Schülerarbeiten dieses Gebiet theoretisch und experimentell von der physikalisch-chemischen Seite her erfolgreich bearbeitet.

1) Eine sehr übersichtliche Darstellung von Nernst selbst im „Handbuch der gesamten medizinischen Anwendungen der Elektrizität" von Boruttau. 1909—1911.

Geht im Innern eines Organismus ein Strom durch die Grenzfläche von Protoplasma und einer wässerigen Lösung, so finden Konzentrationsänderungen statt, welche einerseits der Stromstärke proportional sind, andererseits aber nach allen Seiten hin abdiffundieren. Aus der gegenseitigen Abwägung dieser entgegengesetzten Wirkungen läßt sich manche bisher unklare Erscheinung, besonders für elektrische Reizungen von kurzer Dauer, leicht verstehen.

Erst wenn eine Konzentrationsänderung eine bestimmte Größe erreicht, erfolgt ein Reiz, wird die Reizschwelle überschritten. Geht also eine bestimmte Elektrizitätsmenge rasch durch einen kleinen Querschnitt des Körpers, d. h. ist die Stromdichte sehr groß, so erfolgen große Konzentrationsänderungen, die nicht Zeit haben, wegzudiffundieren. Darum wirkt der steile Öffnungsstrom (Fig. 465) eines Induktors physiologisch stärker, als dieselbe Elektrizitätsmenge des minder steilen Schließungsstromes; darum kann man durch passende Auswahl der dem Patienten aufzusetzenden Elektroden die Wirkung lokalisieren. Bei sehr raschen Wechselströmen (Schwingungen) werden jedoch die einzelnen Zweige zwar sehr steil (große Spannung und große Stromdichte), aber infolge der raschen Richtungswechsel sind die elektrochemischen Wirkungen minimal.

So wird verständlich, daß man, wie zuerst D'Arsonval gezeigt, die Enden der sekundären Teslaspule mit ihren 100 000 V und mehr ohne Schädigung in die Hand nehmen kann, wobei ein eingeschaltetes Ampèremeter einen den menschlichen Körper durchfließenden Strom von einigen A anzeigt und mehrere in dieselbe Leitung hintereinander geschaltete Glühlampen hell aufleuchten. Die physiologische Wirkung ist ceteris paribus der Wurzel aus der Frequenz ungefähr umgekehrt proportional. Früher meinte man, daß Teslaströme darum ohne Schädigung vom Menschen ertragen würden, weil sie (wie eine elektrische Ladung) nur an der Oberfläche fließen. Ein solcher Skineffekt findet aber nur bei guten Leitern statt, nicht aber in einem schlecht leitenden organischen Gewebe.

731. Elektrische Schwingungen durchsetzen den menschlichen Körper wirklich und erzeugen hier große Joule'sche Wärme, die sich durch passende Lokalisation therapeutisch verwenden läßt. Diese **Thermopenetration** ist natürlich nur bei hohen Frequenzen möglich; wollte man mittels Gleichstromes dieselbe Joule'sche Wärme erzeugen, wäre diese wegen der sonstigen physiologischen Wirkungen absolut tödlich.

Die Thermopenetration (oder besser Diathermie) erzeugt große und lokal ziemlich genau zu dosierende Temperatursteigerungen mit den entsprechenden Folgeerscheinungen, vorübergehendes Sinken arteriellen Blutdruckes, peripherische Gefäßerweiterungen usw. Während die

Anwendung der Hitze von außen her, z. B. Fig. 190, infolge der Blutzirkulation, welche die Wärme konvektiv wegführt, nur einige mm tief unter die Haut dringt, kann man hier bei möglichst kontinuierlichen Schwingungsvorgängen (mit Stromstärken bis zu 10 A) bisher unmögliche Erfolge mikrobizider und anderer Art erzielen. Von günstigen Beeinflussungen seien nur erwähnt die von rheumatischen und gichtischen Leiden oder besonders gonorrhoischen Gelenkserkrankungen (Gonokokken sterben bei etwa 40° C ab). Eine endgültige Beurteilung des Wertes dieser Methode ist heute noch nicht möglich, doch scheint die physikalische Grundlage weitere Erfolge recht wahrscheinlich zu machen.

732. Die **elektropathologischen Wirkungen** elektrischer Ströme sind kompliziert. Tödliche Wirkungen können bei besonders ungünstigen Umständen, nämlich bei besonders guten Kontaktbedingungen, z. B. Stehen in nasser Wanne, die ein Pol berührt, und Ergreifen des anderen Leitungsdrahtes mit nasser Hand (bipolare Berührung), schon bei kleinen Spannungen eintreten. Solche Unglücksfälle ergaben sich bei Gleichströmen bei etwa 250 V, bei Wechselströmen schon bei 100 V, ja sogar 60 V. Die untere Gefahrgrenze ist im allgemeinen für Gleichstrom bei 500, für Wechselströme bei 200 V. Letzteres gilt für eine Wechselstromfrequenz von 30—150 und es ist eigentlich zu bedauern, daß unsere technisch verwendeten niederen Frequenzen gefährlich sind, indes man bei höheren Frequenzen 100 000 V und mehr ertragen kann. Die Selbstinduktionen solcher Hochfrequenzströme sind aber in den meisten Fällen ein Hindernis für ihre technische Verwertung. Eine genaue Angabe der Gefahrgrenze ist schon deshalb unmöglich, weil verschiedene Personen ganz verschieden reagieren. In den meisten Fällen erfolgt der Tod wahrscheinlich durch Herzstillstand unter fibrillären Zuckungen; bei andauerndem Kontakte (über zwei Minuten) Erstickung infolge des allgemeinen Tetanus.

733. Bei hohen Frequenzen können aber auch eine zu große Joule'sche Wärme oder Funkenentladungen und die durch diese verursachten Verbrennungen schädlich wirken. In neuerer Zeit jedoch wird die Funkenentladung von Hochfrequenztransformatoren (z. B. in Tesla Anordnungen), die sog. **Fulguration**, besonders zur Behandlung frischer operativer Schnittflächen, zur Zerstörung eventuell bei der Operation übriggebliebener Krebskeime usw. in ausgedehntem Maße verwendet.

734. Analog der Fulguration, aber quantitativ schwächer wirkt der Hochfrequenzkauter oder **Kaltkauter.** Es ist dies eine z. B. lanzettförmige Nadel aus Platin, welche mit einem Hochfrequenzpol von nicht allzuhoher Spannung verbunden ist. Wie bei der Thermopenetration herrscht unmittelbar am Kaltkauter eine sehr große Stromdichte, welche aber hier so ansteigt, daß das Gewebe direkt verbrennt oder verschorft, bei rascher Bewegung aber nur ohne

Verbrennung ein ungemein reines Trennen (Schneiden) ermöglicht, wobei zwischen Nadel und Gewebe ein fast mikroskopisches Funkenspiel eintritt.

735. Elektrische Resonanz. Wir sahen, daß ein elektrischer Schwingungskreis einen zweiten, der mit ihm entweder galvanisch oder elektrostatisch oder elektromagnetisch gekoppelt ist, elektrisch zum Mitschwingen bringt: dieses Mitschwingen wird immer erzwungen; es ist aber besonders stark, wenn der erregende Kreis und der erregte in Resonanz stehen (wie § 187 in der Akustik). Wir sahen (§ 723), daß die Schwingungsdauer einer elektrischen Schwingung (wenigstens in den einfachen von uns betrachteten Fällen) von der Selbstinduktion und den Endkapazitäten des Leiters abhängt, man kann also durch Änderung dieser beiden Größen die elektrische Schwingungsdauer auf Resonanz einstellen.

736. In Fig. 476 ist F eine mit einem Induktorium verbundene Funkenstrecke; die elektrische Schwingung geht den Weg FC_1axybC_2F, wo C_1 und C_2 zwei Kondensatoren, ac und bd zwei horizontal und parallel ausgespannte, blanke Drähte, **Lecher'sche Drähte** (1890), sind.

Von dieser erregenden Schwingung (speziell von xy) wird der ungeschlossene Kreis $cxyd$ ins Mitschwingen gebracht, so daß c sich abwechselnd positiv und negativ, und gleichzeitig d abwechselnd negativ und positiv auflädt. Legt man quer über cd eine (nicht gezeichnete) ausgepumpte Glasröhre, so leuchtet diese, aber nur, wenn die Schwingungszahl für den Schwingungskreis links und rechts gleich ist. Man kann durch Verschieben des auf den parallelen Drähten aufliegenden Drahtes, der Brücke xy, leicht auf scharfe Resonanz (Aufleuchten der Vakuumröhre bei cd) einstellen.

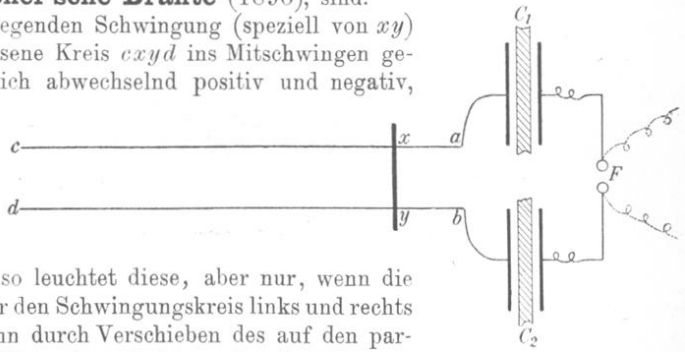


Fig. 476.

Die Schwingung in xc (resp. yd) wird dann dargestellt durch Verdichtung (bzw. Verdünnung) der Elektrizität am Ende, analog den Schwingungen einer gedeckten Pfeife (Fig. 117). (In Fig. 476 sollte die Länge xc und yd viel größer gezeichnet sein). Da man aus dem bekannten Werte der Kapazität und der Selbstinduktion in FC_1axybC_2F die Schwingungsdauer τ berechnen kann, und da in xc genau $^1/_4\lambda$ liegt, erhält man aus $c = \frac{\lambda}{\tau}$ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wirkung im Drahte mit $3 \cdot 10^{10}$ cm.

737. Fig. 477 zeigt das Resonanzprinzip an der **Oudin'schen Spule,** einem medizinisch verwendeten Apparate. Die Schwingung wird in $FC_1s_1s_2C_2F$ eingeleitet. Die galvanisch gekoppelte Strecke ab gerät ins Mitschwingen. Wenn s_2 geerdet ist, so wird b abwechselnd positiv und negativ geladen Wie die Luftsäule einer akustischen Pfeife, wenn richtig

angeblasen, in Schwingung gerät, so schwingt die Elektrizität in der langen Spule $s_2 b$, wenn s_2 im richtigen Tempo abwechselnd Elektrizität gegen b hin und von b zurück drückt. Damit letzteres eintritt, muß zwischen der Hauptschwingung $FC_1 s_1 s_2 C_2 F$ und der galvanisch gekoppelten in $s_2 b$ scharfe Resonanz hergestellt werden. Um nun diese elektrischen Schwingungen in beiden Kreisen gleich zu machen, ist s_2 zu einem Schleifkontakt ausgebildet, der längs der unteren dicken Windungen $s_1 a$ so lange verschoben wird, bis kräftige Lichtbüschel in der Spitze b anzeigen, daß da oben große Spannungsschwingungen, abwechselnde Stromstauungen stattfinden, analog den Luftverdichtungen und -verdünnungen im Knoten am oberen Ende einer oben geschlossenen Pfeife. Da der in $s_2 b$ pendelnde Strom trotz seiner oben großen Spannung verhältnismäßig schwach ist, ist der obere Teil der Drahtspule ab sehr dünn. Die Höhe der Oudin'schen Spirale ist etwa 0,8 m, der Durchmesser etwa 0,2 m.

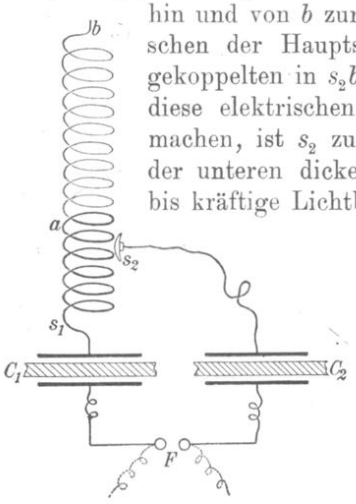


Fig. 477.

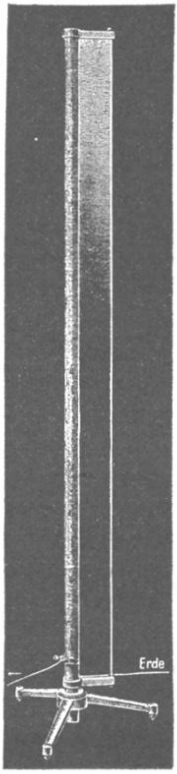


Fig. 478.

Macht man eine solche Spirale viel länger (etwa 2 m und darüber) und schmäler (Durchmesser 6 cm), so kann man, wie zuerst Seibt zeigte, nicht nur an der Spitze einen Knoten ausbilden, wodurch $^1/_4$ einer elektrischen Welle in die Spule kommt, man kann auch durch Verkleinerung der primären Schwingungsdauer ganz analog wie bei einer gedeckten Pfeife (Fig. 117) in der Akustik $^3/_4$, $^5/_4$ usw. der elektrischen Welle in der Spule erzeugen. Es gehen dann kleine Entladungen von allen Knotenstellen der elektrischen Schwingung gegen einen dünnen, geerdeten Eisendraht, der in einigen cm Entfernung der Spule parallel befestigt ist. Fig. 478 zeigt die Grundschwingung $^1/_4\,\lambda$, oben die Entladung beim Schwingungsknoten. (Ein Analogon mit offenen Pfeifen erhält man durch gleichzeitige Erdung der oberen Spitze der Seibtschen Spule).

738. Elektromagnetische Lichttheorie. Die Versuche von Feddersen und einige wenige theoretische Arbeiten über elektrische Schwingungen bildeten ein kleines Kapitel der Elektrizitätslehre, das erst Max-

well (1865) und H. Hertz (1888) durch ihre berühmten Untersuchungen in gebührender Bedeutung erkennen ließen. Es sei Fig. 479 AB ein gerader Primärleiter, in dem zwischen A und B eine elektrische Schwingung hin- und her pendelt; ein sekundärer Leiter $A'B'$ in einiger Entfernung wird dadurch induziert, genau so wie die sekundäre Spule eines Induktoriums durch die primäre.

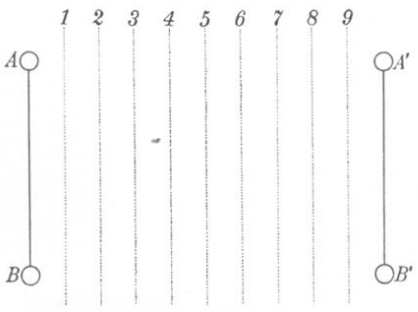


Fig. 479.

Geschieht diese Induktion momentan oder braucht sie Zeit?

Maxwell beantwortet diese Frage theoretisch. Er brachte zunächst einige Faraday'sche Anschauungen in mathematische Formeln und erweiterte sie. Bereits § 575 sahen wir, daß beim Entstehen elektrischer Kraftlinien, also auch beim Laden eines Kondensators im Dielektrikum ein kurzer Verschiebungsstrom entsteht, beim Entladen ein entgegengesetzter. Der schwingungsdurchsetzte Leiter AB induziert also nicht nur $A'B'$, sondern auch den isolierenden Zwischenraum. Wir haben hier im ganzen Dielektrikum induzierte Verschiebungsströme. Denken wir uns aus dem Dielektrikum einzelne Streifen 1, 2, 3 usw. (Fig. 479 punktiert gezeichnet) willkürlich herausgegriffen, so wird auch in allen diesen Streifen ein vertikal hin- und herpendelnder Verschiebungsstrom entstehen und zwar zuerst in 1, dann in 2, dann in 3 usw. Das Ganze ergibt eine Art Wellenbewegung, da der genau gleiche, hinauf- und hinunterpendelnde Strom zuerst in 1 einsetzt, etwas später in 2, noch später in 3 usw. Wir haben also in unserem Beispiele eine fortschreitende, vertikale, transversale elektrische Welle.

Die Verschiebungsströme im Dielektrikum haben aber auch, wie jeder Strom, magnetische Kraftlinien; es muß also auch fortwährendes Hin- und Herpendeln von magnetischer Kraft eintreten und es läßt sich leicht zeigen, daß diese magnetische Welle senkrecht zur elektrischen steht. Maxwell untersuchte nun theoretisch die Fortpflanzung dieser elektromagnetischen Wellenbewegung. Das Resultat liefert eine Formel, welche enthält: Die Dielektrizitätskonstante ε (§ 559), die Permeabilitätskonstante μ (§ 665) und das Verhältnis der Stromstärke im elektrostatischen Maße zur Stromstärke im elektromagnetischen Maße nämlich $3 \cdot 10^{10}$ (§ 664). Es ist μ für alle praktischen Fälle 1 und fällt darum weg. Für irgendein Medium mit der Dielektrizitätskonstante ε berechnet Maxwell die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer elektrischen Welle mit $v = \frac{3 \cdot 10^{10}}{\sqrt{\varepsilon}}$.

Nach Maxwell sind Lichtwellen nichts anderes als sehr kleine elektromagnetische Wellen.

v ist nicht nur die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle, sondern auch die einer Lichtwelle im Dielektrikum, dessen Dielektrizitätskonstante ε ist. Dann ist $\sqrt{\varepsilon} = \frac{3{,}10^{10}}{v} = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit in Luft}}{\text{Lichtgeschwindigkeit im Medium}} = n$ (§ 370).

Das Quadrat des Brechungsexponenten muß also gleich sein der Dielektrizitätskonstante. Dies scheint auch experimentell bei sehr langen Lichtwellen, wenn nicht (meist bekannte) störende Nebenumstände eintreten, zu stimmen.

Für einen luftleeren Raum und für Luft ist ε als 1 anzunehmen und es ist dann $v = 3 \cdot 10^{10}$ cm.

Elektrische Wellen pflanzen sich nach dieser Theorie in Luft oder irgendeinem Isolator mit derselben Geschwindigkeit wie Licht fort und haben theoretisch auch alle Eigenschaften optischer (bzw. kalorischer) Ätherwellen.

739. Daß dem wirklich so sei, zeigte **H. Hertz** experimentell.

Zwei etwa je 10 cm lange Metallzylinder a und b (Fig. 480) enden in zwei Kugeln, in welche durch die Drähte c und d ein Hochspannungsstrom (Induktionsapparat, Influenzmaschine u. dgl.) eingeleitet wird. So oft in F ein Funke überspringt, entsteht in aFb eine kurze elektrische Vertikalschwingung (wie in Fig. 479), die, einem vertikal polarisierten Lichtstrahl gleich, vertikale elektrische Transversalwellen in den Raum hinausstrahlt. Stellt man aFb in die Brennlinie eines (punktiert gezeichneten) vertikalen, parabolisch gekrümmten Blechschirmes, so wird der elektrische Strahl parallel nur nach einer Seite geworfen, wie Licht in einem Scheinwerfer. Stellt man in den Weg dieses Strahles in einigen m Entfernung einen genau gleich konstruierten Hohlspiegel (entgegengesetzt orientiert), so werden die elektrischen Wellen wieder in der Brennlinie dieses Spiegels vereinigt. In dieser Brennlinie ist ein Leiter $a'fb'$ befestigt, der in der Mitte isoliert hinter den Spiegel geht und bei f auf etwa 0,1 mm unterbrochen ist. In diesen Leiter $a'fb'$ wird nun eine sekundäre Schwingung induziert, aber nur wenn für ihn genau dieselbe elektrische Schwingungsdauer besteht, wie für die primäre Schwingung aFb, wenn er in elektrischer

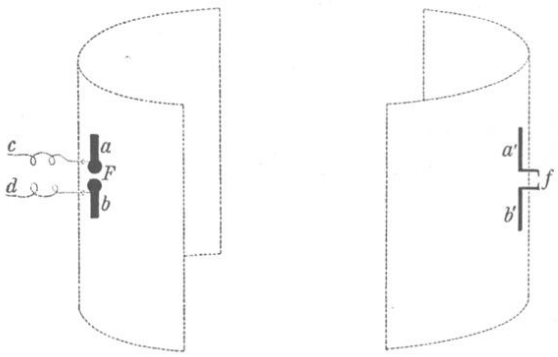


Fig. 480.

Resonanz ist; durch Verlängern oder Verkürzen der Drahtenden a' und b' kann man dies unschwer erreichen. Dann erscheinen, als Beweis für die in $a'fb'$ induzierte oder absorbierte Schwingung, in f kleine Fünkchen.

Hertz und seine Nachfolger zeigten so experimentell, daß dieser elektrische Wellenstrahl alle Eigenschaften eines vertikal polarisierten Lichtstrahles hat. Er kann durch Zwischenschalten eines Metallschirmes abgeblendet werden, der die auffallenden Schwingungen durch Induktion in seiner Masse (und die dadurch entstehende Joule'sche Wärme) absorbiert.

Daß dieser elektrische Strahl reflektiert wird, beweist schon der Erfolg der Parabelspiegel; man kann das aber auch unschwer direkt zeigen. Ebenso kann man an dem Strahl Brechung und Interferenz nachweisen. Solche Versuche ergaben genau wie beim Licht die Möglichkeit der Messung der Wellenlänge. Die Schwingungsdauer läßt sich aus den Dimensionen von aFb berechnen (§ 723), und wir erhalten dann (gemäß der Formel § 166) die Geschwindigkeit $c = \lambda/\tau$. Bei den Originalversuchen von Hertz war $\lambda = 66$ cm und $\tau = 22 \cdot 10^{-10}$ sek. Daraus ergibt sich experimentell der Wert der Geschwindigkeit dieser elektrischen Wellen genau gleich mit der Lichtgeschwindigkeit. Lichtstrahlen sind somit nichts anderes, als elektromagnetische Störungen des Äthers. Fast alle Erscheinungen des Lichtes können mit elektrischen Schwingungen nachgeahmt werden. Dabei hat aber Maxwell sowohl als auch Hertz darauf verzichtet, eine mechanische Vorstellung dieser periodischen Ätherstörungen zu geben.

Die kleinste elektromagnetische Schwingung, die bisher dargestellt wurde, hat 3 mm Wellenlänge (Lampa).

740. Das **Lichtaussendende** ist nach der Elektronentheorie das schwingende, elektrisch geladene **Elektron.** Da eine Bewegung eines geladenen Körpers genau so wirkt, wie ein analoger Strom, so ergibt sich die Ursache der elektrischen Schwingung des Lichtes direkt durch die Oszillation des geladenen Elektrons. Es ist diese Elektronenvorstellung eine Art Verbindung der Fresnelschen Vorstellung einer mechanischen Ätherschwingung und der Maxwell'schen Vorstellung einer elektrischen Schwingung (§ 771).

Restlos befriedigend ist aber weder die mechanische noch die elektrische Auffassung.

741. Das Prinzip des in Fig. 480 dargestellten Versuches von Hertz wurde von Marconi (1895) zur **drahtlosen Telegraphie** ausgebildet. In einer unten geerdeten, etwa 60 bis 200 m langen Vertikalstange, Antenne, wird eine stehende elektrische Schwingung erzeugt, die unten, an der Erde, dauernd das Potential Null hat, indes oben große positive und negative Potentiale rasch wechseln. Eine zweite, weit entfernte,

gleiche Empfangsantenne absorbiert diese Schwingungen, wodurch eine Zeichengebung ermöglicht wird.

Die Schwingungserregung erfolgt in der Aufgabeantenne in verschiedenster Weise; seit Braun (1900) aber immer so, daß man die Antenne an einen geschlossenen Schwingungskreis koppelt. Man kann z. B. in Fig. 477 statt der Oudin'schen Spule ab eine gerade Antenne anbringen.

Die derzeit reinste und beste Antennenschwingung erhält man durch die sog. Stoßerregung (M. Wien 1900).

Man nimmt hier den wirksamen Funken ganz klein. Durch die (punktierten) Drähte in Fig. 481 links wird ein hochgespannter Strom zugeleitet, so daß in f ein kleiner Funken überspringt. Meistens hat man (in Fig. 481 nicht gezeichnet) nicht einen, sondern mehrere solcher kleiner Funkenstrecken hintereinander. So wird, besonders wenn die Fünkchen zwischen gut wärmeleitenden Kupferplatten überspringen, trotz großer Energie der einzelne Funke nicht heiß, weshalb diese kleinen Fünkchen eine sehr große Dämpfung haben. Der geschlossene Schwingungskreis: Kapazität C und Selbstinduktion L_1 wird hier nur von einem einzigen Schwingungsstoß durchsetzt; die Löschfunken in f verlöschen, sowie sie ihre Pflicht getan und die ungeschlossene Antennenleitung $E L_1 L_2 A$ in Schwingungen versetzt haben. A liegt ganz oben an der Spitze der Antenne (viel zu kurz gezeichnet); E ist eine sehr gute Erdleitung, d. h. viele vom Fußpunkte der Antenne wegziehende, in die Erde vergrabene Drähte. Diese Schwingungen in der Antenne, nicht gestört durch den angehängten (weil längst gedämpften) Schwingungskreis, gehen nun lange (bis 100 mal) und sehr regelmäßig hin und her, wie etwa eine Stimmgabel, die durch einen kurzen Schlag zum Tönen gebracht wurde. Die verschiedenen L sind variable Selbstinduktionen, wodurch die Schwingungsdauer geändert werden kann.

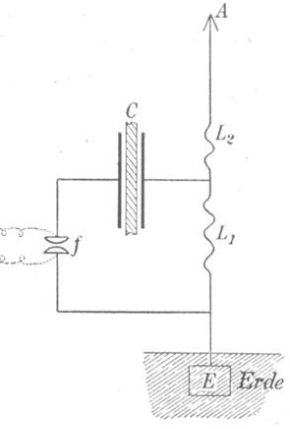


Fig. 481.

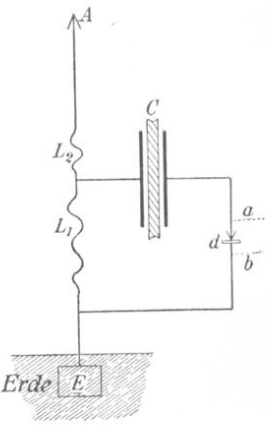


Fig. 482.

Man nennt die Einrichtung auch das System der tönenden Funken. Läßt man den Funken in f 100 mal oder 200 mal pro sek überspringen, so tönt auch die Aufgabe- und Empfangstation mit akustisch 100 oder 200 Schwingungen pro sek. Dieses Tönen hat aber mit der eigentlichen elektrischen Schwingung nichts zu tun, es zeigt nur das Tempo der elektrischen Energiezufuhr, z. B. die Unterbrechungszahl des Induktoriums an.

In der Empfangsantenne A (Fig. 482) schwingt die induzierte oder absorbierte Elektrizität in AL_2L_1E hin und her; diese Antenne ist durch Änderung der variablen Selbstinduktionen L mit der Aufgabeantenne in Resonanz gebracht. Durch die Schwingung in L_1, wird in dem geschlossenen Kreise L_1Cd, wenn auch er in richtiger Resonanz ist, eine geschlossene Schwingung erzeugt. Hier liegt bei d ein Detektor d. i. irgendeine Einrichtung, um schwache elektrische Schwingungen bemerkbar zu machen. Es sind viele Arten von Detektoren konstruiert worden.

742. Die derzeit wichtigsten Detektoren sind die sog. **Thermodetektoren.** Wenn in d (Fig. 482) ein fein gespitztes Graphitstäbchen gegen ein Bleiglanzplättchen drückt, so erwärmt eine durchgehende elektrische Schwingung die Kontaktstelle, weil hier die Stromdichte in der Spitze sehr groß wird, und es entsteht ein Thermoelement, das in einem parallel geschalteten Telephon (in punktierter Leitung a und b) ein knackendes Geräusch gibt. Dieses Telephon läßt infolge seiner großen Selbstinduktion von der Schwingung nichts durch, reagiert also nur auf die Thermokraft in d.

Mit Hilfe solcher Einrichtungen hat man schon auf Entfernungen von 3000 km sichere telegraphische Zeichen vermittelt (ausnahmsweise über 5000 km). Die Signale gehen leichter über See als über Land (§ 744) und besser bei Nacht als bei Tag (Luftionisierung § 754).

743. Des historischen und physikalischen Interesses wegen sei noch ein anderer Detektor, der **Kohärer** (oder Fritter) geschildert. Er besteht aus feinen Metallkörnern, die zwischen zwei Metallbacken m und m' (Fig. 483) in einer Glasröhre g gerade so zusammengepreßt sind, daß sie einen Strom von 1 bis 2 Elementen B kaum leiten. Geht nun eine elektrische Schwingung durch, so werden die Metallkörner — vielleicht infolge von Zusammenschweißen durch kleine Induktionsfünkchen — leitend. Ein schwacher mechanischer Schlag gegen die Glasröhre g stellt wieder den alten, nicht leitenden Zustand her. Ein solcher Kohärer K liegt im Stromkreise der Batterie B in Serie mit einem Elektromagneten E. Zunächst ist der Widerstand von K so groß, daß kein Strom durchgeht. Geht aber durch diese Leitung eine elektrische Schwingung, so wird K leitend, der Magnet E wird erregt und zieht das an der Feder f sitzende Eisen e der unteren (punktiert gezeichneten) Schaltung an. Dadurch schließt sich bei a die (punktiert gezeichnete) Leitung der Batterie B'. In dieser Leitung ist zunächst eine nach der Art der elektrischen Klingel konstruierte Vorrichtung G, deren Klöpel r gegen den Kohärer rasselt und ihn durch seine mechanischen Schläge immer wieder nichtleitend macht; gleichzeitig wird der Magnet M eines gewöhnlichen Morseschreibapparates erregt. Solange also die

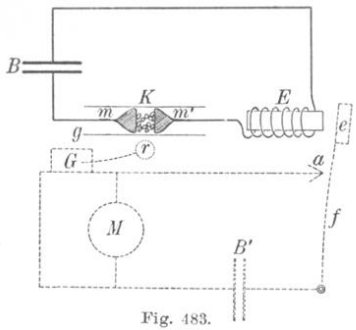


Fig. 483.

obere Leitung B von elektrischen Schwingungen durchsetzt ist, rasselt r und der Morseapparat schreibt eng nebeneinanderliegende Punkte. Lange andauernde Schwingungen ergeben längere Punktreihen oder Striche, kurz dauernde Schwingungen Punkte. Man telegraphiert somit auch hier mit einem Morseapparat, indem man die elektrischen Schwingungen in der Aufgabeantenne entsprechend durch längere oder kürzere Zeit andauern läßt.

744. Erdleitung. Da in weiten Entfernungen die Krümmung der Erdkugel jede direkte Zustrahlung unmöglich macht, dürfte hier die Koppelung der Aufgabe- und Empfangsantenne eine nur elektrostatische sein. Die Aufgabeantenne sendet abwechselnd gewaltige positive und negative Ladungen in die Spitze der Antenne, deren Kapazität am oberen Ende durch eine Art Drahtschirm möglichst groß gemacht wird. Die entgegengesetzte Ladung geht in die Erde und ladet diese, vom Fußpunkt der Aufgabeantenne wegfließend, abwechselnd negativ und positiv. Diese Ladungen ziehen kreisförmig über die Erdoberfläche (in ganz analoger Weise wie durch einen geworfenen Stein erzeugte Wasserwellen über eine Seeoberfläche). Am Fußpunkt der Empfangsantenne streichen diese Ladungen hin und elektrisieren diese abwechselnd positiv und negativ. Steht diese Empfangsantenne in elektrischer Resonanz, so muß eine Schwingung entstehen (Lecher 1902).

Für nahe Entfernungen ist jedenfalls auch direkte Zustrahlung möglich, d. h. elektromagnetische Koppelung wie bei den Hertz'schen Versuchen, da man ja auch von Freiluftballons drahtlos telegraphieren kann.

9. Elektrische Entladungen in Gasen.

745. Kathodenstrahlen. Fig. 484 stellt eine allseitig geschlossene Glasröhre vor, aus der die Luft bis auf 0,01 mm Hg Druck ausgepumpt ist; ein luftdicht eingeschmolzener Platindraht führt zu einer Aluminiumscheibe, der Kathode K, und ein an irgendeiner Stelle eingeschmolzener zweiter Draht bildet die Anode A. Bei Anlegung einer großen Spannung (z. B. Influenzmaschine oder Ruhmkorff-Induktorium) erstrahlt, indes die ganze Röhre fast dunkel bleibt, die der Kathode gegenüberliegende Glaswand G in hellgrünem Fluoreszenzlichte. Die Farbe dieses Fluoreszenzlichtes hängt von der Art des Glases in G ab. Gleichzeitig wird in G Wärme erzeugt, so daß G eventuell glüht und schmilzt.

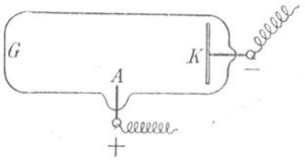


Fig. 484.

Bringen wir zwischen diese Glaswand G und die Kathode K irgendein etwa 1 mm dickes Metallblech, z. B. von der Form eines Kreuzes,

so erscheint auf G ein dunkler Schatten dieses Kreuzes (Fig. 485). Es müssen also Strahlen von der Kathodenscheibe senkrecht und geradlinig fortgehen und beim Anlangen an der gegenüberliegenden Glaswand diese zum Fluoreszieren bringen. Licht kann das nicht sein, weil eine breite leuchtende Scheibe K nie einen so scharfen Schatten erzeugen könnte.

Fig. 485.

746. Aufklärung über das Wesen der Kathodenstrahlung liefert ihre **magnetische** und **elektrostatische Ablenkung.** In Fig. 486 wird der Kathodenstrahl durch eine Metallblende d auf ein kleines Bündel eingeengt, das auf einen mit fluoreszierenden Substanzen bestrichenen Glimmerschirm P auffallend einen kleinen Lichtfleck erzeugt: Braun'sche Röhre. Bringt man einen Magneten so an die Röhre, daß die magnetischen Kraftlinien senkrecht stehen zum Kathodenstrahl, so wird dieser senkrecht zu diesen beiden Richtungen abgelenkt; der Lichtfleck auf P verschiebt sich. Man erkennt daraus (linke Handregel, § 689), daß die Kathodenstrahlung einem zur Kathode hingehenden Strom gleicht oder daß von der Kathode weg ein negativer Strom geht. Ein gewöhnlicher Strom kann das nicht sein, denn ein gewöhnlicher Strom fließt in einem dicken Leiter den kürzesten Weg. In einer Kathodenröhre geht aber die Strahlung senkrecht von der Kathodenscheibe weg, wobei es ganz gleichgültig ist, wo die Anode (A in Fig. 484 oder 486) sich befindet.

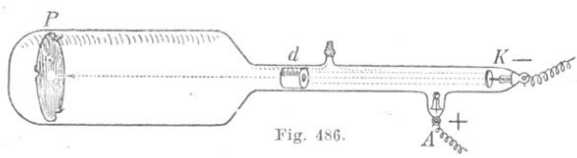


Fig. 486.

Aber auch elektrostatische Kräfte lenken die Kathodenstrahlung so ab, wie wenn diese aus negativ geladenen Teilchen bestünde.

747. Diese hypothetischen Teilchen heißen **Elektronen.** Sie sind sehr klein, denn sie durchfliegen ein dünnes (etwa 0,01 mm dickes) Aluminiumblech, welches keine Spur eines gewöhnlichen Gases hindurchläßt. Da sie trotz ihrer Kleinheit in G beim Anprall Wärme erzeugen, muß ihre Geschwindigkeit eine sehr große sein. Daß sie negativ geladen sind, kann man direkt beweisen, indem man den Kathodenstrahl auf einen isolierten Metallkörper auffallen läßt, der bald negative Ladung annimmt.

Die Elektronen sind so klein und fliegen so schnell, daß sie natürlich unsichtbar bleiben. Nur dort, wo sie an eine feste Masse anprallen (G in Fig. 484 oder P in Fig. 486), wird ihre Wirkung als Fluoreszenzlicht, Wärme u. dgl. bemerkbar.

Eine sinngemäße, experimentelle und theoretische Auswertung all der

bisher genannten Erscheinungen ergibt dann eine Reihe von quantitativen Resultaten. Diese lauten:

Ein Kathodenstrahl besteht aus einem Schwarm von gleich großen, wohl individualisierten Atomsplittern von der Masse $m = {}^1/_{2000}$ der Masse eines H-Atoms; jedes solche m hat dieselbe negative Ladung, das elektrische Elementarquantum e. Diese Elektronen werden mit riesiger Geschwindigkeit, bis zu $^1/_3$ der Lichtgeschwindigkeit, von der Kathode geradlinig weg an die gegenüberliegende Wand geschleudert. Hier anprallend erzeugen sie Fluoreszenz und Wärme.

748. Anodenstrahlen. Wenn irgendwo negative Ladung auftritt, muß die entsprechende gleich große positive Ladung an anderer Stelle sich zeigen. Das Vorhandensein von positiven Elektronen, d. h. von positiv geladenen kleinen Atomsplittern konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Hingegen ist folgendes experimentell gesichert: Es werden positiv geladene Massen von der Kathode angezogen, die durch Löcher (Kanäle) in der Kathode in einer dem Kathodenstrahl entgegengesetzten Richtung nach der anderen Seite hin fliegen können (Goldstein). Diese Kanalstrahlen (α in Fig. 487) wurden nach ähnlichen Methoden wie die Kathodenstrahlen — besonders von W. Wien — untersucht und es zeigte sich, daß die positive Ladung hier an Massenpartikelchen sitzt, welche ungefähr die Masse von ganzen H-Atomen haben. Naturgemäß ist auch die Geschwindigkeit dieser gegen das negative Elektron relativ riesigen Partikelchen eine relativ geringe, nur etwa 3600 km/sek. Die Erscheinungen dieser Kanalstrahlen sind ziemlich kompliziert, und es ist darum von großem Interesse, daß Gehrke und Reichenheim (1906) mit Salzanoden direkte Anodenstrahlen erzeugen konnten, die mit den bereits bekannten Kanalstrahlen dem Wesen nach identisch sind (α' in Fig. 487). Sie bestehen aus Teilchen, deren Masse je nach der Art des als Anode verwendeten Salzes gleich ist dem (elektropositiven) Atome dieses Salzes, z. B. Natrium oder Strontium. Die Geschwindigkeit dieser direkten Anodenstrahlen ist viel kleiner als die der Kanalstrahlen, nur einige 100 km in der Sekunde.

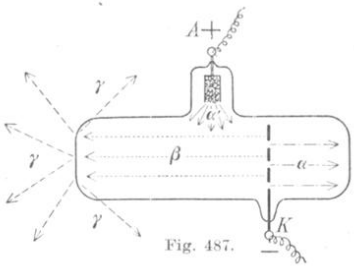


Fig. 487.

Die Fig. 487 ist als schematische Zeichnung zur Erleichterung der Übersicht aufzufassen; die in ihr gleichzeitig dargestellten Erscheinungen werden deutlich nur bei verschiedenen Drucken in der Röhre.

Die Geschwindigkeiten der Kathoden- und Anodenstrahlen hängen natürlich außer von der in Bewegung zu setzenden Masse von der treiben-

den elektrischen Kraft ab, d. h. in erster Reihe von der Größe der angewandten Spannung.

749. Röntgenstrahlen. Wie ein gewöhnliches aufschlagendes Projektil explosionsartige Schallwellen im Luftraum erzeugt, so muß auch ein an einen festen Körper prallendes Elektron eine explosionsartig auftretende Welle im Ätherraum hervorbringen. Das sind die von Röntgen (1895) entdeckten und von ihm mit X bezeichneten Strahlen. Sie entstehen dort, wo die Kathodenstrahlen an einen festen Körper anprallen. Diese Strahlung ist in Fig. 487 durch γ bezeichnet.

Die Röntgenstrahlen sind selbst unsichtbar, erzeugen aber Fluoreszenz und photographische Wirkung und machen die Luft leitend. Sie sind von magnetischen und elektrischen Kräften nicht ablenkbar, unterscheiden sich also auch dadurch von Kathodenstrahlen. Sie pflanzen sich mit Lichtgeschwindigkeit fort und scheinen einer Beugung fähig, welche auf eine sehr kleine Wellenlänge hindeutet. Strahlen von derart kleinen Wellenlängen zeigen aus theoretischen Gründen keine Brechung. Darum kann man mit Röntgenstrahlen nie optische Bilder, sondern nur Schattenbilder erhalten. Diese Strahlen durchdringen dünne Metallschichten und andere undurchsichtige Materialien. Die verschiedenen Körper sind im allgemeinen um so durchlässiger, je kleiner ihr Atomgewicht ist. Ein Aluminiumblättchen von 3,5 mm Dicke ist ebenso durchlässig wie ein Platinblech von 0,018 mm; Blei von 2,5 mm ist schon vollkommen undurchlässig. Von weitgehendster Bedeutung für die Medizin ist, daß die Röntgenstrahlen durch Muskelfleisch hindurchgehen, von Knochen aber mehr oder weniger absorbiert werden. Man kann Röntgenbilder durch Fluoreszenz erhalten oder durch Photographie. Bringt man Barium-Platin-Cyanür auf ein schwarzes Papier und stellt hinter dieses eine Röntgenröhre, so geht die Strahlung durch das schwarze Papier hindurch auf das Barium-Platin-Cyanür, das in gelblichem Lichte fluoresziert. Hält man nun zwischen Schirm und Röntgenröhre z. B. die Handfläche, so sieht man auf dem Schirm das in Fig. 488 dargestellte Bild. Die Weichteile halten die Strahlung kaum, die Knochen gänzlich auf. Ebenso sieht man die Geldstücke in einem ledernen Portemonnaie, die Rippen eines Regenschirmes usw. Röntgenphotographien gewinnt man, indem man z. B. die Hand auf eine mit der

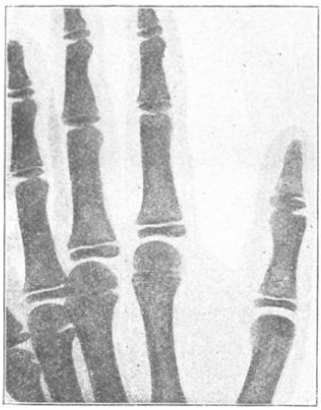


Fig. 488.

photographischen Platte beschickte Holzkassette knapp auflegt und nun durch kurze Zeit bestrahlt. Entwickelung und Fixierung der photographischen Platte erfolgt in gewöhnlicher Weise. Die Fig. 488 (verkleinert) ist in dieser Weise gewonnen. Eine Verstärkung der photographischen Wirkung erhält man, wenn man mit der photographischen Platte gleichzeitig einen Schirm mit blau fluoreszierendem Kalziumwolframat in die Kassette bringt.

Der diagnostische Wert dieser Methode liegt auf der Hand: man kann normale und pathologische Veränderungen von Knochen und Geweben, Vorhandensein von Fremdkörpern usw. meist unschwer konstatieren.

750. Röntgenröhren. Da zur Erzeugung scharfer Röntgenschatten eine möglichst punktförmige Strahlungsquelle notwendig ist, konzentriert man die erzeugende Kathodenstrahlung auf einen Punkt. In Fig. 489 ist K die nach einer Kugelfläche gekrümmte Kathode aus (schwer zerstäubbarem) Aluminium, deren senkrecht von der Fläche weggehende (ausgezogen gezeichnete) Kathodenstrahlen gegen einen Punkt der Antikathode k fallen. Hier entstehen die X-Strahlen, die nach unten von k (gestrichelt gezeichnet) mit Lichtgeschwindigkeit weggehen. Die Fläche k ist meist eine Platte von Platin oder Tantal. Diese harte Metallschicht stoppt die Elektronen viel rascher als Glas, erzeugt also bessere Röntgenstrahlung. Bei Anwendung zu starker Ströme (besonders mit Wehnelt-Unterbrechung) wird k leicht zu stark erhitzt. Die Antikathode liegt darum auf einer dicken Metallmasse auf und wird oft sogar mit Wasser oder Öl abgekühlt; (dann aber nur in bestimmten Lagen brauchbar).

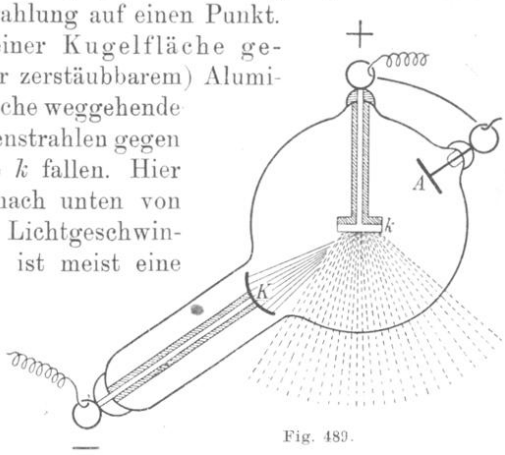


Fig. 489.

Man unterscheidet je nach dem größeren oder kleineren Grade der Luftverdünnung harte oder weiche Röhren. Eine harte, d. h. zu stark ausgepumpte Röhre hat einen großen Widerstand, die Entladung geht zum Teile außen längs des Glases, man hört darum ein starkes Knistern, das Fluoreszenzlicht ist hellgrün und flackernd. Die Knochen in einem Fluoreszenzbild sind flau, weil diese Röntgenstrahlen auch durch die Knochen gehen, die Penetrationskraft ist zu groß. Eine mittelharte, d. h. richtig ausgepumpte Röhre gibt ein scharfes Knochenbild, wie in Fig. 488; die Strahlung durchdringt die Weichteile, nicht aber die Knochen. In der Röhre sieht man um die Anode herum einen bläulichen Lichtschim-

mer und man hört nur ein schwaches Knistern von den Außenentladungen. Weiche Röhren enthalten zu viel Luft, die Penetrationskraft ist zu klein; da auch die Weichteile der Hand Schatten erzeugen, ist das Bild auch flau. Man erkennt weiche Röhren daran, daß das Fluoreszenzlicht fast gelb ist und um die Anode herum ein großer bläulicher Lichthof sichtbar wird.

In der Medizin verwendet man je nach dem Zweck verschieden harte Röhren.

751. Bei längerem Gebrauch findet man, daß die Röhren sich gleichsam selber auspumpen, d. h. hart werden, wahrscheinlich darum, weil geladene Gasteilchen an den Wänden haften bleiben. Die modernen Röhrenkonstruktionen sind daher mit **Regenerierungsvorrichtungen** versehen. Die Röhre in Fig. 490 enthält zwei solche Einrich-

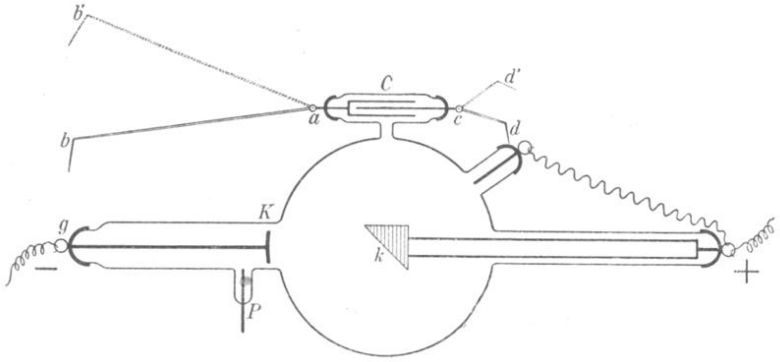


Fig. 490.

tungen. Entweder man erhitzt ein eingeschmolzenes Palladiumstäbchen P behutsam mit einer Spiritusflamme; dann diffundiert Wasserstoff aus der Flamme durch das heiße Palladium in die Röhre und macht sie weicher. Oder man entwickelt Gas im Innern der Röhre durch folgende Methode: zwei Metallhebel ab (um a drehbar) und cd (um c drehbar, z. B. in die punktiert gezeichnete Lage cd') bilden eine Zweigleitung zur Röntgenröhre. Ist die Röhre von richtiger Härte, so fließt die Elektrizität von + zu − durch die Röhre selbst. Wird diese aber durch Selbstevakuierung zu hart, d. h. der Widerstand zu groß, so springt plötzlich ein Funke zwischen der Spitze b und der Metallkappe g über, der dem Zweigstrom $dcCabg$ entspricht. Hier ist C ein kleiner Kondensator, dessen Metallbelegungen durch Glas (in Fig. 490 wegen Kleinheit nicht gezeichnet) getrennt sind. In diesem Kondensator springen kleine Fünkchen (stille Entladung) über und machen Gas frei, welches die große Röhre füllt, bis ihr Widerstand so weit gesunken ist, daß die Seitenentladung (Funken zwischen

b und *g* und Fünkchen in *C*) aussetzt. Wird die Röhre wieder zu hart, beginnt die Selbstregenerierung aufs neue.

752. Belastung der Röhren. Harte Röhren brauchen stärkere Spannungen. Zu große Stromstärken bringen die Antikathode zu schädlichem Glühen. Auch soll der Strom nie in verkehrter Richtung durchgehen. Da jedes Induktorium Schließungs- und Öffnungsstrom liefert, so muß die Spannung so gewählt werden, daß nur der Öffnungsstrom, der ja größere Spannung hat (§ 716), durchgeht. Man erkennt das an der „schließungslichtfreien" Art des Leuchtens.

753. Röntgenstrahlen werden aber nicht nur zu diagnostischen, sondern auch zu therapeutischen Zwecken mannigfachster Art verwendet. Da in letzterem Falle die Kontrolle der Dosierung von größter Wichtigkeit ist, sendet man die Strahlung zur Probe z. B. durch mit verschieden dicken Platinblechen verschlossene kleine Öffnungen einer Bleiplatte auf einen Fluoreszenzschirm. Je penetranter die Strahlung, durch desto dickere Platinplättchen geht die Strahlung durch. Dann kann man die Intensität der Strahlung auch nach der Verfärbung bestimmter Reagenzpapiere oder der Trübung bestimmter Lösungen beurteilen. Es sind mehrere solcher **Röntgendosimeter** angegeben worden. Die Röntgentechnik ist so ausgebildet, daß eine auch nur halbwegs befriedigende Darstellung dieses Gebietes hier nicht gegeben werden kann. Es sei nur noch erwähnt, daß die kräftigen Wirkungen dieser Strahlen bei längerer Einwirkung in allerhöchstem Grade schädlich sind (besonders auf Hoden, Ovarien, Milz, Knochenmark und Lymphapparat).

754. Ein gewöhnliches Gas bei Atmosphärendruck ist ein absoluter Isolator, solange es keine Ionen enthält. **Gasionen** können auf sehr verschiedene Weise erzeugt werden, z. B. durch Kathodenstrahlung, Strahlung radioaktiver Körper, Röntgenstrahlen, ultraviolettes Licht, Erwärmung auf hohe Temperaturen, Einleitung von Verbrennungsgasen usw. In all diesen Fällen werden aus einigen der Gasmolekel Elektronen frei gemacht und diese freien Elektronen geben Veranlassung zur Bildung von Gasionen. Man hat zuerst einige positive Molekel und natürlich ebenso viele freie, negative Elektronen, welch letztere sich mit einem ungeladenen Molekel verbinden. Die positiv und negativ elektrisch geladenen Molekel ziehen andere neutrale Molekel an sich, so daß die Gasionen aus positiv und negativ geladenen größeren Atomkomplexen bestehen. Der Begriff eines Gasions ist somit ganz verschieden von dem eines Flüssigkeitsions und ist auch nicht mit jener Schärfe und Sicherheit ausgebildet. Die positiven und negativen Gasionen ziehen sich gegenseitig an und werden, ihre Ladung neutralisierend, wieder zu gewöhnlichen Molekeln. Die Leitfähigkeit eines Gases verschwindet

also allmählich nach Aufhören der ionisierenden Kraft von selbst. Ebenso wird die Wirkung der ionisierenden Kraft stets um den Betrag dieser freiwilligen Ionenrückbildung vermindert. Sind in einem ionisierten Gase zwei entgegengesetzt geladene Leiter vorhanden, so ziehen die positiven Gasionen zur Kathode, die negativen zur Anode, wo sie sich entladen, die mitgeschleppten Gasmolekel zurücklassend. Diese zwei nach entgegengesetzten Richtungen ziehenden Ionenprozessionen sind ähnlich wie in Elektrolyten, doch liegt ein fundamentaler Unterschied darin, daß nach Abgabe der elektrischen Ladung Molekel (nicht Atome!) zurückbleiben, eine chemische Zersetzung bei Stromdurchgang also nicht stattfindet.

755. Einen weiteren wichtigen Unterschied zwischen elektrolytischer und Gasleitung gibt der Begriff des **Sättigungsstromes.** B in Fig. 491 sei eine Batterie, deren Spannung man z. B. durch Zu- und Abschalten von Elementen variieren kann. Der Strom fließt von B zur Metallplatte m, von dieser durch die Luftschicht nach m' und weiter über das Milliampèremeter A zu B zurück. R ist eine Ionisierungsquelle, z. B. eine Röntgenröhre oder eine Flamme oder ein radioaktiver Körper oder eine ultraviolette Srahlungsquelle od. dgl. Durch diese Ionisierung wird der Luftraum zwischen m und m' leitend. In Fig. 492 gebe die horizontale Abszisse die Anzahl der in B wirkenden V, die vertikale Ordinate die Stromstärke in Milliampère an. Bis zu a (z. B. 200 V) ist die Stromstärke der Spannung proportional (schief ansteigende gerade Linie), es gilt das Ohm'sche Gesetz: je stärker die Spannung, desto stärker der Strom. Macht man nun die Spannung immer größer, ein wenig über 200 V hinaus, so wächst der Strom langsamer, ja er wird sogar (horizontale Linie oben in Fig. 492) konstant; es sei dies z. B. bei 300 V. Es werden nämlich dann alle durch die ionisierende Strahlung pro sek erzeugten Ionen pro sek an die Platten m bzw. m' geführt; eine größere Spannung kann nicht mehr Strom liefern, weil eben nicht mehr verfügbare Elektronen da sind. Dieser Sättigungsstrom gibt somit ein Maß für die ionisierende Kraft. Ist letztere sehr groß, z. B. bei Radiumstrahlung, so gilt das Ohm'sche Gesetz bis zu großen Spannungen, der Sättigungsstrom liegt sehr hoch.

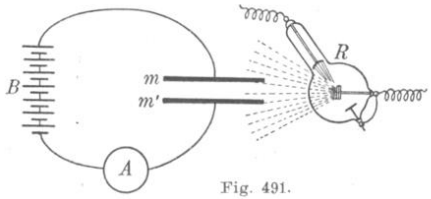


Fig. 491.

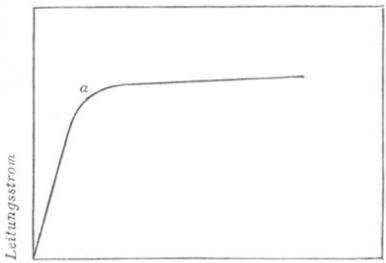


Fig. 492.

756. Diese bisher besprochene, durch äußere Ionisierung veranlaßte Strömung kann man auch einen unselbständigen Strom nennen. Macht man aber in Fig. 492 die Spannung bedeutend größer, z. B. 2000 V und mehr, so tritt eine neue Erscheinung ein, eine **selbständige Strömung**, die keine äußere Ionisierungsmithilfe braucht. Diese starke Spannung zerreißt einzelne Gasteilchen zwischen m und m' in positive Molekelreste und Elektronen. Infolge des starken elektrischen Feldes bewegen sich Elektronen und die daraus gebildeten Gasionen rasch gegeneinander, diese Ionenstöße erzeugen immer wieder neue Ionen, so daß Lichterscheinungen, Funken, Lichtbogen usw. diese Strömung, die durch Selbstionisierung entsteht, charakterisieren (J. J. Thomson, J. Stark).

757. Der **elektrische Funke**, der den Ausgleich der Elektrizität unter gleichzeitiger explosionsartiger Erwärmung der Funkenstrecke vermittelt, benötigt eine bedeutende Spannung.

Bei kugelförmigen Elektroden von 1 cm Durchmesser ist die Potentialdifferenz in V 1020, 4920, 17776, 24780 für eine Funkenlänge von 0,01, 0,10, 0,50, 0,80 cm.

Bei längeren Funken ist die Funkenlänge ziemlich proportional der Potentialdifferenz. Doch spielen Nebenumstände eine große Rolle: die Größe und Form der Elektroden; eventuelle Ionisierung des Zwischenmediums, z. B. durch ultraviolette Strahlung; die Raschheit, mit der die Aufladung erfolgt, wegen der durch die angelegte Spannung erzeugten Vor-Ionisierung des Zwischenmediums; die durchgehende Elektrizitätsmenge; Schwingungserscheinungen usw.

Lange Funken zeigen Zickzackform, wie der Blitz, der ja auch eine elektrische Entladung ist. Die starken Wolkenelektrisierungen bei Gewittern, welche zu gegenseitigen Entladungen oder zu Entladungen gegen die Erde führen, repräsentieren gewaltige Spannungen. Diese entstehen wahrscheinlich durch Wasserkondensation (§ 317) an Elektronen, welche durch ultraviolette Lichtstrahlung oder auch radioaktive Strahlung in der Luft erzeugt wurden. Wenn dann viele dieser Tröpfchen zu Tropfen zusammenfließen und zur Erde fallen oder durch Luftströmungen verschoben werden, führen sie gewaltige Elektrizitätsmengen mit sich.

Die zündende, mechanische oder physiologische Wirkung von Blitzentladungen sucht man durch Blitzableiter, welche über die Gebäude aufragend die Entladungen aufnehmen und metallisch zu feuchten Stellen der Erde führen, unschädlich zu machen. Gefährliche Entladungen können auch durch Rückschlag entstehen, d. i. plötzliche Entladung von langsam entstandenen Influenzwirkungen, z. B. in großen Metallmassen; man schließt daher große Maschinen, Metallkessel usw. leitend an die Erde. Besondere Ausbildung erfuhren die technischen Blitzschutzvorrichtungen elektrischer Freileitungen, Starkstrom-, Telegraphen- und Telephonleitungen. Eine vollständig befriedigende Lösung dieser technischen Probleme ist noch nicht gefunden.

758 Entladungen im luftleeren Raum. Ein elektrischer Funke zeigt an der positiven Elektrode einen stielartigen Ansatz, der sich

gegen die negative Elektrode hin verästelt. Bringt man das Ganze unter die Glocke einer Luftpumpe, so verbreitert sich die Lichterscheinung mit sinkendem Druck, aus dem Funken wird ein Lichtfaden (in Luft rötlich), der sich immer mehr zu einem Lichtbande verbreitert; dieses reicht von der Anode bis weit ins Innere des Gases, während an der Kathode das negative violette Glimmlicht auftritt; zwischen beiden Lichterscheinungen ist der Faraday'sche Dunkelraum. Das Glimmlicht wächst bei weiterem Auspumpen, indes das positive Lichtband immer kürzer wird, bis schließlich die in § 745 geschilderte Kathodenstrahlung auftritt.

Alle diese Erscheinungen, deren eingehende Schilderung hier zu weit führen würde, lassen sich durch Ionen- und Elektronenstoß ziemlich befriedigend erklären.

Ebenso sind die Entladungen starker Elektrizitätsmengen in sehr heißen Räumen durch Elektronenwirkungen zu erklären. Hierher gehören die Erscheinungen im elektrischen Lichtbogen (§ 655).

759. Luftsalpetersäure. Auch bei starken Induktorien-Entladungen z. B. mit Wehnelt-Unterbrecher oder bei hochgespannten Wechselstrom-Entladungen bilden sich flammenartige Lichtbogen, in welchen sich der Sauerstoff und Stickstoff der Luft zu Stickoxyd, NO, verbinden. Da dieses Produkt durch die Hitze des Lichtbogens rasch zersetzt wird, muß man für dessen rechtzeitige Wegfuhr durch passende Gebläse sorgen. NO verwandelt man leicht in Salpetersäure und hofft so, Ersatz für die in absehbarer Zeit verbrauchten natürlichen Stickstoffverbindungen, z. B. Chilisalpeter $NaNO_3$, zu gewinnen. Nitrate — besonders salpetersaurer Kalk $Ca(NO_3)_2$ — sind in der Regel das wichtigste N-haltige Nahrungsmittel der Pflanzen; ein technisches Verfahren, Düngemittel aus dem N und O der Luft zu gewinnen, wäre von größter Bedeutung.

760. Ein anderer merkwürdiger Einfluß des elektrischen Funkens auf Luft ist die Umwandlung des Sauerstoffes O_2 in **Ozon** O_3 (§ 472). Man spürt, wenn irgendwo Funken entstehen, stets Ozongeruch. Um größere Mengen zu erhalten, verwendet man Ozonapparate, deren Prinzip darin besteht, daß zwei in Glasröhren befindliche, einander gegenüberstehende parallele Metallstäbe an die Pole eines auf einige 1000 V hinauftransformierten Wechselstroms angeschlossen sind. Zwischen den Glasröhren gehen sehr viele minimale Fünkchen über, stille Entladungen, deren stark ultraviolettes Licht wahrscheinlich die Ursache der Ozonbildung ist. Da ebendieselbe Strahlung aber schon gebildetes Ozon zerstört, muß man durch passende Gebläse das gebildete Ozon wegschaffen. Es sind große Anlagen gebaut, um mittels Ozons Trinkwasser zu sterilisieren. (Statt der Metallstäbe verwendet man da eine Reihe paralleler,

durch Glas getrennter Metallplatten.) Vielleicht basieren viele sterilisierende Wirkungen ultravioletter Strahlen auf Ozonbildung.

761. Fig. 493 skizziert eine **Quecksilberbogenlampe** für physikalische Zwecke. In einer ausgepumpten Quarzröhre (oft durch heißes Wasserbad gegen Zerspringen geschützt) sind zwei Platindrähte eingeschmolzen, welche im Inneren der Röhre mit Quecksilber bedeckt sind. Auch die äußere Stromzuführung zu den Platindrähten besteht aus Quecksilber. Legt man an die Elektroden einen Gleichstrom von 50—100 V, so geschieht zunächst nichts, weil die Quecksilberkuppen in der Horizontalröhre weit auseinanderliegen; neigt man aber (meist durch eigene Kippvorrichtungen) die Röhre für einen Moment, wodurch zwischen den beiden Elektroden eine Quecksilberverbindung eintritt, so geht Strom hindurch. Es bilden sich nun zwischen den auseinanderreißenden Quecksilbertropfen zunächst kleine Lichtbögen, und wenn die Röhre wieder in die gezeichnete horizontale Lage kommt, bleibt ein glänzender, fast die ganze Röhre erfüllender, grünlich-blauer Lichtbogen (punktiert gezeichnet) stehen. Man kann Hg-Lampen auch mittels elektrischer Vorrichtungen durch bloßes Stromeinschalten anzünden. Ebenso sind verschiedene Konstruktionen von Kühlvorrichtungen in Gebrauch. Das die ganze Röhre bis knapp an die Anode erfüllende Licht ist analog der leuchtenden Lichtsäule an der positiven Elektrode einer Vakuumröhre bei mäßigem Drucke; zwischen Kathode und Quecksilberlichtsäule liegt ein kleiner dunkler Kathodenraum. Solche Lampen liefern 1 HK Helligkeit pro 0,27 Watt, sind also viel billiger, als alle anderen technisch gebrauchter Lichtquellen. Störend ist nur die Farbe und der dem Auge direkt schädliche Reichtum an ultravioletten Strahlen. Für Beleuchtungszwecke baut man daher Hg-Lampen aus Glas, welches wenigstens einen Teil der ultravioletten Strahlung zurückhält.

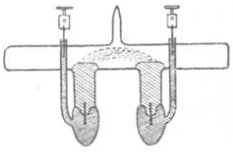


Fig. 493.

Über die enormen photochemischen und therapeutischen Wirkungen dieser Lampe sprachen wir § 472. Die medizinisch verwendeten Hg-Lampen bestehen natürlich aus Quarz (oder mindestens aus für Ultraviolett ziemlich durchlässigem Uviolglas). Sie sind in kleinen, durch strömendes Wasser gekühlten, vorn mit Quarz verschlossenen Metallkammern eingebaut.

10. Radioaktivität.

762. Entdeckung. Unmittelbar nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen wurde die — falsche — Vermutung ausgesprochen, daß diese X-Strahlen mit der Fluoreszenz an der Glaswand *G* in Fig. 484 in Zusammenhang stehen könnten.

Becquerel (1896) untersuchte darum viele fluoreszierende Substanzen, indem er sie auf eine in schwarzes Papier gehüllte photographische Platte brachte; X-Strahlen hätten durch das Papier hindurch die Platte photographisch beeinflussen müssen. Das Resultat war ein negatives, nur bei einem Uransalze (Kalium-Uranylsulfat) zeigte sich eine Ausnahme. Bei weiterer Verfolgung dieser Erscheinung fand Becquerel aber, daß hier eine Fluoreszenzerregung des Uransalzes ganz überflüssig sei, daß vielmehr alle Uransalze ganz spontan (ohne Belichtung) dauernd photographische Wirkungen ausüben. Es geht also von Uranverbindungen eine ganz eigentümliche Strahlung aus, die zuerst Becquerelstrahlung, später aber radioaktive Strahlung genannt wurde.

Auch Thoriumsalze (G. C. Schmidt 1898) sind radioaktiv.

Solche photographische Wirkungen sind für Auffindung radioaktiver Körper sehr bequem und empfindlich, da man schwache Substanzen wochenlang auf die Platte einwirken lassen kann; für quantitative Messungen hat man aber eine andere Eigenart der radioaktiven Körper benützt, ihre ionisierende Kraft.

763. Messung. In Fig. 494 ist E ein Elektroskop mit den Blättchen b, deren Ausschlag durch ein — nicht gezeichnetes — Mikroskop zu bestimmen ist. Z, der Zerstreuungsraum, ist ein allseitig geschlossener Messingzylinder, der luftdicht auf das Elektroskopgehäuse E aufgesetzt wird. Z und E sind geerdet. z, der Zerstreuungskörper, ist mit den Elektroskopblättchen in leitender Verbindung und mit diesen durch den Bernstein B isoliert. Zunächst wird das Elektroskop durch eine passende (nicht gezeichnete) Vorrichtung von außen her geladen. Man beobachtet nun die Zeit, die die Blättchen b brauchen, um innerhalb eines gewissen Skalenbereiches des geeichten Elektroskops zusammenzufallen und bestimmt daraus den Verlust pro Minute. Bei guter Isolierung soll dieser sehr gering sein. Nach diesem Vorversuche bringt man den zu untersuchenden radioaktiven Körper auf das ringförmige, geerdete Metallschälchen s und wiederholt den Versuch. Da jetzt die Luft zwischen dem geladenen z und dem geerdeten Z durch die Anwesenheit des radioaktiven Körpers in s leitend wird, fallen die Elektroskopblättchen b rascher zusammen und die Schnelligkeit dieses Ladungsverlustes (minus

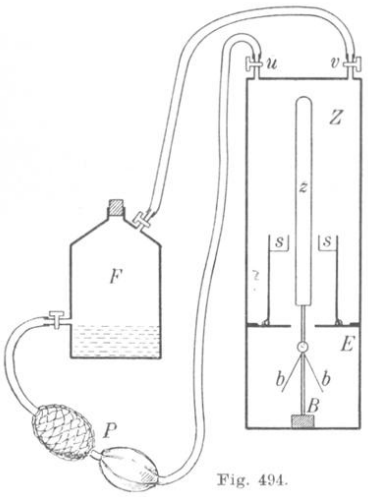


Fig. 494.

Korrektur des Vorversuches) gibt ein Maß für die Radioaktivität. (Bei dieser Untersuchung sind die oberen zwei Hähne von Z geschlossen und ist der ganze links gezeichnete Teil als überflüssig wegzudenken.)

Bei stark radioaktiven Substanzen würden die Blättchen b momentan zusammenfallen. Man verwendet da Methoden analog der in Fig. 491 gezeichneten, indem man den durch das radioaktive Material erzeugten Sättigungsstrom mißt. Statt des Milliampèremeters nimmt man hier oft besser eine elektrometrische Messung des Stromgefälles.

Alle diese Wirkungen sind (bis zu einem gewissen Grade) der Menge der wirkenden Substanz proportional.

764. Mit Hilfe solcher quantitativer Bestimmung untersuchte Frau Curie, eine Schülerin Becquerels, möglichst viele Substanzen. Alle Uranverbindungen erwiesen sich als radioaktiv. Es war also die Ionisierungsursache im Uran selbst zu suchen. Manche Uransalze, z. B. die Joachimstaler Uranpechblende, zeigten aber eine größere Radioaktivität als ihrem Urangehalte entspricht. Das veranlaßte Frau Curie aus einer ganzen Waggonladung von Rückständen der Uranfabrikation in Joachimstal (Deutschböhmen) einige besonders stark radioaktive Stoffe zu isolieren, wobei die Beurteilung der Radioaktivität der einzelnen chemischen Abtrennungsstufen bei jeder Lösung oder Fällung stets durch ihre ionisierende Wirkung gemessen wurde. So erhielt Curie aus 1000 kg Pechblende-Rückständen geringe Mengen von neuen radioaktiven Elementen, darunter etwa 0,35 mg eines besonders wirksamen Stoffes, den sie **Radium**, Ra, nannte.

Ra ist etwa 1 000 000mal wirksamer als U. Ein charakteristisches Spektrum beweist, daß Ra ein chemisches Element ist. Das reine Radium oxydiert in der Luft sehr rasch; man verwendet daher die Chlor- oder Bromverbindungen, deren Wirkungen (dem Ra-Gehalte entsprechend) mit denen von Ra identisch sind. Ra Cl kostet derzeit pro mg etwa 300—400 Kronen, doch genügt meist ein viel kleinerer Teil, um alle Erscheinungen zu zeigen.

Blei von einigen mm Dicke schirmt alle radioaktiven Strahlen (wenigstens zum größten Teile) ab. Bringt man eine sehr kleine Menge Ra Cl auf den Boden eines sehr kleinen Bleimörserchens PB in Fig. 495, so geht darum die gesamte radioaktive Strahlung nur vertikal nach aufwärts. Durch Einwirkung eines magnetischen Feldes, dessen Kraftlinien in Fig. 495 von vorne nach hinten gerichtet sein sollen, trennt sich die gesamte Strahlung in drei Teile:

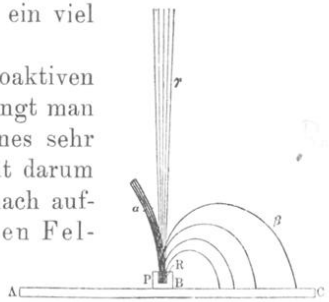


Fig 495.

1. α-Strahlung, schwach nach einer Seite abgelenkt (dunkel und übertrieben abgelenkt gezeichnet).

2. β-Strahlen, stark nach der anderen Seite abgelenkt; diese Strahlen werden auch wie die Kathodenstrahlen durch elektrostatische Kräfte abgelenkt.

3. γ-Strahlen, unablenkbar.

Des weiteren unterscheiden sich diese drei Strahlengattungen auch noch durch ihre Absorbierbarkeit; α wird am stärksten, γ am wenigstens absorbiert.

α-Strahlen werden durch ein Aluminiumblättchen von 0,0003 cm Dicke zur Hälfte absorbiert, einige cm Luft oder ein dünnes Papier hält sie vollständig auf; die α-Strahlen verschiedener radioaktiver Substanzen sind in dieser Beziehung verschieden. β Strahlen werden durch ein Aluminiumblättchen von 0,05 cm zur Hälfte absorbiert. Am durchdringendsten sind die γ-Strahlen, welche vollständig erst durch Blei von 7 cm und Eisen von 19 cm Dicke absorbiert werden.

Es ergibt sich aus der Gesamtheit aller einschlägigen Untersuchungen:

α-Strahlen sind positiv geladene Atome von Helium, einem zuerst im Sonnenspektrum entdeckten Elemente. Die Geschwindigkeit der α-Teilchen reicht etwa bis zu $^1/_{10}$ der Lichtgeschwindigkeit.

β-Strahlen sind identisch mit den Kathodenstrahlen, nur ist ihre Geschwindigkeit größer, bis 270 000 km/sek.

Während α und β Strahlen eigentlich Strömungen, d. h. fliegende materielle Teilchen sind, scheinen die γ-Strahlen ganz kurze Ätherstöße und identisch mit den Röntgenstrahlen zu sein. In neuerer Zeit wurden sehr langsame β-Strahlen gefunden, die man δ-Strahlen nannte.

Alle drei Strahlen α, β und γ ionisieren die Luft, haben photographische Wirkung und erregen Fluoreszenz. Der Hauptanteil (bis 98%) an diesen Erscheinungen, besonders in der Nähe der radioaktiven Substanz rührt von den α-Strahlen her.

Die kinetische Energie dieser Strahlung ist eine enorme Arbeitsleistung des Ra. Direkt gemessen, fand man, daß jedes g Ra pro Stunde 132 g Kal entwickelt.

765. Eine solche ununterbrochene Selbsterwärmung des Radiums schien zunächst mit dem Prinzip der Erhaltung der Energie unvereinbar. Diese und viele andere rätselhafte Erscheinungen der Radioaktivität wurden aber verständlich durch die **Desaggregationshypothese** (Zerfallstheorie) von Rutherford und Soddy (1900). Das schwere U-Atom (Atomgewicht 238,5) ist instabil und unbeständig; in einer größeren U-Menge zerfallen explosionsartig immer einige wenige Atome; sie werden zu einem neuen Elemente U II. Dieses neugewonnene U II verwandelt sich wieder in ein anderes chemisches Element U X usw. Die ganze Reihe ist: Uran I, Uran II, Uran X, Ionium, Radium, Emanation,

Radium A, B, C, D, E und F. Das Endprodukt dieses stufenweisen Zerfalles des U ist wahrscheinlich Blei.

Es fehlen hier vielleicht noch einige (kurzlebige) Zwischenglieder.

Von U II stammt wahrscheinlich noch eine zweite Reihe radioaktiver Körper, die Aktiniumreihe.

Ähnlich wie von Uran leiten sich von Thorium, Th, eine Reihe radioaktiver Zersetzungsprodukte ab. Das wahrscheinlich erste Zerfallsprodukt des Thoriums ist Mesothorium I, welches medizinisch vielfach statt des teureren Ra verwendet wird.

Jede Umsetzung einer radioaktiven Stufe in die nächste niedere ist nun meist (nicht immer) von Aussendung von α-, β- oder γ-Strahlen begleitet.

766. Wir wollen uns das Element **Ra-Emanation** näher ansehen. Reines Radium ist ein fester Körper, der sich unter Abgabe von α-Strahlen, d. h. unter Heliumausscheidung, in ein anderes, aber gasförmiges Element, Ra-Emanation, verwandelt. Wenn man Luft langsam über $RaCl_2$ und dann durch eine auf -150^0 abgekühlte Glasvorlage streichen läßt, wird dieses Gas Ra-Emanation verflüssigt, nicht aber die Luft. Pumpt man die Luft ab und nimmt die Vorlage aus dem Kältebade, so erhält man dann das chemische Element Ra-Emanation in reinem Zustande, das (nach Vergasung) durch ein eigenes Spektrum charakterisiert ist. Das Atomgewicht der Ra-Emanation ist 222, also um 4, dem Atomgewichte des Heliums, geringer als das des Ra, 226. Die Atome dieser Ra-Emanation sind aber sehr labil, d. h. sehr kurzlebig. Nach 4 Tagen hat sich die Hälfte aller Ra-Emanation unter neuerlicher Abscheidung von Helium in ein neues Element, Ra A, verwandelt. Da letzteres sich als fester Überzug an der Glaswand niederschlägt, so schien es zunächst fälschlich, als habe sich all die Ra-Emanation nur in Helium verwandelt.

Eine andere Schwierigkeit war längere Zeit folgende: Wenn $RaCl_2$ offen aufbewahrt wird, so wird das immer sich bildende Gas Ra-Emanation durch Luftströmung weitergeführt und verwandelt sich an irgendeinem festen Körper der Umgebung in festes Ra A. So wird irgendein neutraler Körper durch diesen Ra A-Überzug radioaktiv. Man nannte das, bevor man noch die Ursache dieser Erscheinung kannte, induzierte Radioaktivität.

767. Alle radioaktiven Körper, von U (oder von Th) an, erleiden also einen allmähligen stufenweisen Zerfall, nur ist die **Lebensdauer** der einzelnen Generationen sehr verschieden. Die ionisierende Kraft einer dieser Zwischengenerationen wird, wenn man die Wirkung der nachwachsenden nächsten Generation experimentell oder rechnerisch irgendwie eliminiert, in geometrischer Abnahme immer kleiner. Zuerst

erfolgt der Abfall der ionisierenden Wirkung rasch, dann immer langsamer und langsamer; eine Konstatierung des Endes, des vollständigen Verschwindens, ist kaum möglich und man bestimmt darum die sog. Halbierungskonstante, d. h. die Zeit, innerhalb welcher die ionisierende Kraft eines radioaktiven Elementes auf ihren halben Wert gesunken ist. Solche Halbierungskonstanten sind für jede radioaktive Zwischenstufe charakteristisch und dienen in erster Reihe zu ihrer Erkennung. Lang liegende U-Erze enthalten somit selbstverständlich alle Generationen in sich und zwar von den langlebigen mehr als von den kurzlebigen. Hat man aus diesem alten U alles Radium durch chemische Abscheidung entfernt, so wächst, aber sehr langsam, neues Radium nach, indes natürlich ebenso langsam die entsprechende Menge U verschwindet. Um hier merkbare Änderungen zu erhalten, bedarf es vieler Jahrhunderte. Die Umwandlung hingegen von Ra-Emanation in Ra A und Ra B läßt sich zeitlich bereits innerhalb einiger Stunden und Tage unschwer kontrollieren.

Alle radioaktiven Umwandlungen erwiesen sich bisher als unabhängig von allen physikalischen und chemischen Beeinflussungen, also auch unabhängig von der Temperatur.

768. Bei der **medizinischen Verwendung** der Radioaktivität wurde viel gesündigt. Bevor sich die Physiker noch halbwegs im klaren waren über das Wesen dieser merkwürdigen Erscheinungen, wurde Ra therapeutisch schon vielfach versucht.

Es kommen hier in Betracht einmal die charakteristischen Zerstörungen, welche Ra auf einzelne Gewebe ausübt und zweitens die Wirkung der Emanation, besonders in Heilquellen.

Etwa 1 bis 5 mg Radiumbromid (bzw. auch ein anderer radioaktiver Körper, z. B. Mesothorium) ist in einer kleinen flachen Metall- oder Hartgummikapsel eingeschlossen, oben meist mit einer dünnen Glimmerplatte abgeschlossen. Solche Kapseln werden mit Heftpflaster an der Haut befestigt. Je nach der Dauer der Bestrahlung, 5—60 Min., tritt Erythem, Blasenbildung bis zur Ulzeration auf. Die Wirkung ist ähnlich der Röntgenstrahlung (auch hier sind degenerative Veränderungen der Hoden, der Milz usw. nachgewiesen worden).

Da bei fast allen natürlichen Heilquellen (Gastein, Nauheim, Karlsbad; im Fangoschlamm usw.) Radioaktivität nachgewiesen wurde, meint man in den radioaktiven Bestandteilen das therapeutisch wirksame Agens vieler solcher Quellen gefunden zu haben. Alle diese Wässer enthalten viel Ra-Emanationsgas absorbiert.

Man hat auch künstliches Emanationswasser, eine wässerige Lösung von Ra-Emanation zum Trinken hergestellt. Da aber Ra-Ema-

nation in 4 Tagen bis auf die Hälfte desaggregiert. also rasch verschwindet, muß dieses Emanationswasser immer wieder frisch bereitet werden. Ist daher die Emanation das Wirksame in manchen natürlichen Heilquellen, so müssen solche Wässer durch längeren Transport ihre Heilkraft verlieren.

Um aber Emanationsgas therapeutisch zu verwenden, bringt man eine Lösung von $RaCl_2$ in eine Waschflasche (wie z. B. in Fig. 193) und leitet Sauerstoff durch, der die Emanation in eine große Emanationskammer, Emanatorium (in der Größe einer Telephonzelle), mitnimmt, in welchem der Patient ein bis zwei Stunden verweilt. Auch bloße Mund-Nasenmasken zur Einatmung solcher Emanationen wurden konstruiert. Physikalisch wichtig ist bei diesen Prozeduren, daß einige wenige Sauerstoffblasen alle Emanation aus der z. B. 300 cm^3 Lösung enthaltenden Waschflasche mitnehmen. Vor einer neuen Verwendung muß die Flüssigkeit etwa vier Tage ruhen, weil dann erst die neue Emanation nachgewachsen ist. Eine praktisch zu beobachtende Abnahme dieser Emanationsneubildung ist natürlich nicht zu besorgen, da die Halbierungskonstante des Ra Cl über 1000 Jahre ist.

769. Der frühere Apparat (Fig. 494 mit dem Teile links) kann auch zur **Emanationsmessung** von natürlichen oder künstlichen radioaktiven Lösungen dienen. Im Metallgehäuse Z sind zwei Hähne u und v, welche man durch Schläuche mit den Röhren einer Flasche F und der Pumpe P (nach Art der Pumpe in Fig. 107) verbindet. Durch deren Betätigung bringt man das Emanationsgas nach Z, wo in bereits geschilderter Weise die Voltabnahme per sek und damit die Radioaktivität bestimmt wird. Als Emanationseinheit gilt ein Curie, d. i. jene Gasmenge der Emanation, welche mit einem g Ra in Gleichgewicht steht. Ra erzeugt ja immer frische Emanation, diese verwandelt sich aber in Ra A, verschwindet somit als Gas und es muß sich ein bestimmtes Gleichgewicht zwischen dem 1 g Ra und der im selben Gefäße dauernd vorhandenen Emanationsmenge herstellen. Diese Gasmenge beträgt, auf 0^0 C und 76 cm Hg reduziert, 0,57 mm^3. Die Gasmenge der Emanation, welche im Liter der natürlichen Quellen gefunden wird, ist viel geringer; man mißt diese meist nach Macheeinheiten, einer aus der Theorie der Fig. 491 gewonnenen Größe. 1 Curie ist gleich $2{,}7 \cdot 10^9$ Macheeinheiten. Hat man eine Flüssigkeit mit z. B. 1000 Macheeinheiten, so gehen bei Sauerstoffdurchleitung etwa 75% der Emanation aus der Lösung ins Emanatorium. Es sind dann, wenn 1 Liter Flüssigkeit zur Verfügung steht, 750 Macheeinheiten in der vielleicht 3 m^3 (oder 3000 l) fassenden Emanationskammer, also 750/3000 oder $25 \cdot 10^{-2}$ Macheeinheiten pro Liter. Die Angabe dieser Einheiten soll sich stets auf ein dm^3 (Gas oder Wasser) beziehen.

11. Elektronik.

770. Wir haben den Begriff des Elektrons bei der Kathoden- und radioaktiven Strahlung, bei der elektrolytischen und Gasleitung besprochen. Man hat nun versucht, auch die anderen elektrischen Erscheinungen von diesem Gesichts-

punkte aus zu erklären, allerdings nur teilweise mit gutem Erfolge. Ganz unklar sind noch unsere Begriffe von dem **Aufbau der Atome aus Elektronen.** Vielleicht haben wir im Atom eine positive Zentralladung, um welche negative Elektronen kreisen. Man hätte dann eine Art Analogon zu einem astronomischen Sonnensystem mit seinen Planeten und Monden; jedes Atom wäre ein kleines Universum für sich.

771. Strahlung. Die beweglichen Elektronen müssen im allgemeinen innerhalb des Atombezirkes bleiben und somit müssen ihre Bewegungen hin und her gehende oder rotierende sein. Diese Bewegungen sind jedenfalls so rasch, daß einige hundert Billionen Schwingungen pro sek stattfinden. Der Raum zwischen den Elektronen ist mit Lichtäther erfüllt, der vielleicht auch die Elektronen durchdringt oder irgendwie mit ihnen zusammenhängt. Die elektrische Fernwirkung eines Elektrons auf ein anderes wird dann durch Spannungen dieses Äthers bewirkt und es muß daher auch ein mit seiner Ladung kreisendes oder hin und her schwingendes Elektron periodische Störungen des Äthermeeres erregen, die mit Lichtgeschwindigkeit sich fortpflanzen. Das schwingende Elektron entspräche der alten Undulationstheorie, die mitschwingende Ladung des Elektrons aber wäre identisch mit hin und her gehenden elektrischen Strömen und daraus ergäbe sich eine sinngemäße Weiterführung der Maxwell'schen Theorie.

Die Tatsache, daß die Elektronenmasse nur etwa $^1/_{2000}$ von der eines H-Atoms ist, macht die Kompliziertheit der meisten Spektra minder unverständlich. Das Eisenspektrum zeigt einige tausend Linien. Nun hat Eisen das Atomgewicht 56, also 56 · 2000 Elektronen. Durch passende Anordnung dieser 112000 Elektronen muß die Entstehung von einigen tausend verschiedenen Schwingungen erklärt werden. Es ist dies infolge des Überflusses von Kombinationsmöglichkeiten ein ungemein schwieriges Problem, das noch einige Zeit der endgültigen Lösung harren wird.

772. Zeeman Effekt. Aber gerade in diesem schwierigen Gebiete, das von der menschlichen Denkkraft scheinbar kaum lösbare Aufgaben erheischt, erlebte die Elektronentheorie einen Erfolg. Wenn im Kathodenstrahl ein bewegtes Elektron durch magnetische Kraft abgelenkt wird, so müssen solche magnetische Einflüsse auch die im Atome schwingenden Elektronen in neue Bahnen drängen. Die dadurch zu gewärtigenden Änderungen der Linienspektren wurden von H. A. Lorentz theoretisch behandelt und von seinem Schüler Zeeman (1896) experimentell gefunden. An Stelle der einfachen Linien im Spektrum treten deren zwei, drei oder mehr. Die Ergebnisse der Theorie stehen aber nur zum Teile mit den Versuchsergebnissen völlig in Übereinstimmung.

773. Wir sehen, daß dort, wo die Kathodenstrahlen an eine feste Wand anprallen, durch den Elektronenstoß Wärme erzeugt wird. In analoger Weise hat man das Zustandekommen der **Joule'schen Wärme** erklärt.

Im Metalle liegen die Molekel verhältnismäßig nahe aneinander; von den mit großen Geschwindigkeiten im Atom schwingenden Elektronen wird ein gewisser Teil sich losreißen und in den Räumen zwischen den Molekeln frei hin und her vagabundieren. Denken wir uns den Durchmesser eines

Metalleiters riesig vergrößert; Fig. 496 soll einen ganz kleinen Teil eines solchen Drahtes vorstellen, die schwarzen Punkte seien Molekel. (In Wirklichkeit viel enger aneinander, als der Deutlichkeit wegen gezeichnet.) Die Molekel bleiben fest an ihrer Stelle im Metalle stehen; in den Zwischenräumen bewegen sich die freien Elektronen gleichmäßig nach allen Richtungen hin und her.

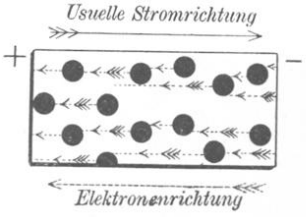


Fig. 496.

Lassen wir nun einen Strom den Draht durchfließen, so wirkt im Leiter eine elektrische Kraft, welche die Elektronen z. B. nach links treibt. Die Elektronen gehen also in diesem Drahte von rechts nach links, genau wie in der Kathodenröhre (Fig. 484) und prallen an die im Wege stehenden ruhenden Molekel an. Einige wenige dieser Elektronenbahnen sind in Fig. 496 durch die gestrichelten Linien dargestellt. Die Elektronen selbst sind, als zu klein, nicht gezeichnet; dieselben ziehen im stromdurchflossenen Leiter der usuellen Stromrichtung entgegen, indes die Molekel (die schwarzen Punkte) ruhig bleiben. Ein solcher Leiter besteht also gleichsam aus einer Unmasse von gleichgerichteten und gleichartigen Kathodenröhren. Es muß also überall, wo die kleinen Kathodenstrahlen an die im Wege stehenden Molekel anprallen, Wärme entstehen.

774. Während aber die Elektronen in der Kathodenröhre mit fast $^1/_3$ Lichtgeschwindigkeit sich bewegen, ist die **Durchschnittgeschwindigkeit** im Metalleiter, da die Elektronen wegen der schwächeren elektrischen Kraft sowohl als auch wegen der Kleinheit des freien Weges nie recht in kräftige Bewegung kommen können, sehr gering. Bei den zum Telegraphieren benützten Strömen z. B. zählt die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen nur Bruchteile von mm pro sek. Die elektromagnetische Wirkung aber geht mit Lichtgeschwindigkeit.

Diesen scheinbaren Widerspruch möge ein hydrodynamisches Analogon lösen. Denken wir uns, Fig. 497, ein horizontales und etwa 1,5 km langes Rohr r mit Wassser gefüllt. Die Ausflußöffnung bei a sei sehr klein; das Wasser links von h, im Reservoir H, sei gefärbt. Öffnet man plötzlich den Hahn h, so pflanzt sich eine Druckwelle mit Schallgeschwindigkeit fort; in etwa 1 sek hat sich der Überdruck bis a fortgepflanzt, so daß schon nach 1 sek dort Wassertropfen austreten werden. Es kann aber Stunden und Tage dauern, bis das gefärbte Wasser von H nach Verdrängung des ungefärbten in r bei a ankommt. Das hängt ganz von der Weite der Röhre und der Lochgröße bei a ab. Es ist etwas Verschiedenes um die Geschwindigkeit der Strömung und um die Geschwindigkeit der Wirkung. Die Strömungsgeschwindigkeit der Elektrizität kann also nur Bruchteile von mm/sek betragen, indes die Fortpflanzung der elektromagnetischen Wirkung mit Lichtgeschwindigkeit erfolgt.

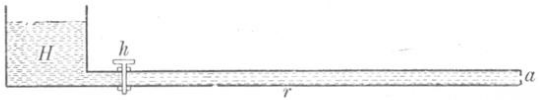


Fig. 497.

775. Stromträger im Magnetfelde. Wenn nun ein stromdurchflossener Leiter gleichsam aus lauter Kathodenröhren besteht, so müssen auch hier durch den Magneten die Elektronenbahnen nach der Seite gedrückt werden. Stellen wir den Leiter (Fig. 498) in ein dazu senkrechtes Magnetfeld, so gehen die Elektronen nicht mehr wie in Fig. 496 nach links, die Elektronenbahn wird vielmehr überall nach aufwärts gekrümmt. Da nun die Elektronen selbst aus dem Draht nicht herauskönnen, klopfen sie den Draht in dieser Richtung ponderomotorisch heraus. Ein stromdurchflossener Leiter erfährt im Magnetfelde einen Druck senkrecht zu den Kraftlinien (§ 689).

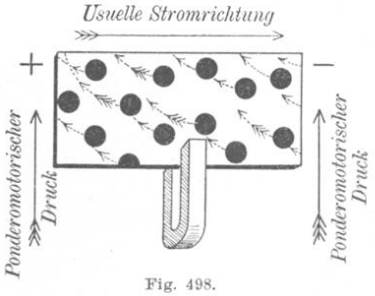


Fig. 498.

776. Induktionsstrom. Halten wir unser Modell eines Leiterbruchteiles jetzt vertikal und bewegen wir es nun mechanisch von rechts nach links, so muß jedes einzelne Elektron diese seitliche Bewegung mitmachen. Geschieht diese mechanische Seitenbewegung aber in einem magnetischen Felde (Fig. 499), so werden diese geradlinig nach links geschobenen Elektronen genau wie im Kathodenstrahl z. B. nach oben gekrümmt. Es findet also ein Abströmen der Elektronen nach oben statt. Es ist dies die Induktion eines Kraftlinien schneidenden Leiters (§ 693). In Figg. 498 u. 499 ist der Hufeisenmagnet nur schematisch (viel zu klein) gezeichnet.

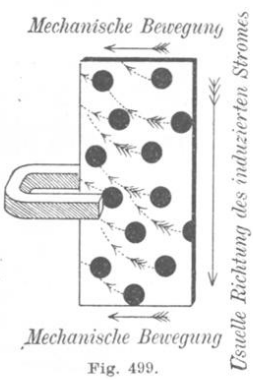


Fig. 499.

777. Wärmeleitung. In einem ruhenden, von keinem Strom durchflossenen Leiter gehen die Elektronen nach allen Seiten planlos hin und her. Die Energie dieser Bewegung stellt Wärmeenergie dar, da ja der Anprall der Elektronen Wärme erzeugt. Erwärmt man einen Leiter an irgendeiner Stelle, so macht man dadurch die Bewegung der Elektronen an dieser Stelle zu einer rascheren. Diese rascheren Elektronen dringen nun mit ihrer raschen Bewegung an kältere Stellen und geben vom Überschusse ihrer Bewegung durch fortwährenden Anprall ab, erwärmen somit diese kälteren Stellen. Da dieses Strömen der Elektronen die Wärmeleitung und das früher § 773 geschilderte Strömen der Elektronen die Elektrizitätsleitung darstellt, so ist leicht ersichtlich, daß zwischen diesen beiden Leitungen ein inniger Zusammenhang bestehen muß, dessen vulgärster Ausdruck dahin lautet, daß jeder gute Elektrizitätsleiter auch ein guter Wärmeleiter sein wird. Ganz genau stimmt das nicht, weil die Wärme auch z. B. durch Strahlung zwischen den Molekeln sich fortpflanzt.

778. Thermoelektrizität. Die Anzahl der in einem Metalle freien Elektronen ist bei verschiedenen Metallen verschieden. Bringt man zwei solche Metalle zur Berührung, so wird das Metall mit mehr freien Elek-

tronen an das elektronenärmere von seinem Überschusse abgeben. Wenn ein ursprünglich unelektrisches Metall auf solche Weise negative Elektronen in sich aufnimmt, muß es negativ elektrisch werden. Zwei Metalle werden sich also beim Berühren negativ, bzw. positiv laden. (Die Größenordnung der so zustande kommenden Potentialdifferenzen liegt weit unter denen der Lösungstension).

Die Anzahl der freien Elektronen in einem Metall wird sich auch mit der steigenden Temperatur dieses Metalles ändern und zwar im allgemeinen vergrößern, da ja die raschere Wärmebewegung Anlaß zum Loslösen immer neuer Elektronen gibt. Diese Elektronenvermehrung mit steigender Temperatur kann nun bei verschiedenen Metallen ganz verschieden sein. Wenn man somit zwei Metalle zur Berührung bringt, hängt die gegenseitige Ladung von der Temperatur ab (§ 657).

779. Scheinbare Masse. Die elektrische Selbstinduktion wirkt analog wie die Trägheit der Materie. Es braucht Zeit (wobei scheinbar Energie verschwindet), bis ein Strom sich in Bewegung setzt und seine volle Stärke erreicht. Dafür sucht er aber nach Abschaltung der Stromquelle in der alten Richtung noch weiter zu fließen (er gibt die scheinbar verlorene Energie wieder her, Extraströme, § 709). Wenn der elektrische Strom aus einem Strom von Elektronen besteht, so muß diese scheinbare Trägheit des Stromes eine Folge dieser Elektronenbewegung sein.

Wenn man ein Elektron (oder sonst eine geladene Masse) in Bewegung setzt, so erzeugt man eigentlich einen elektrischen Strom, und der Beginn eines solchen erfordert Arbeit. Um also ein Elektron in Bewegung zu setzen, muß man:

1. gegen die wirkliche Trägheit des materiellen Teilchens arbeiten, und
2. gegen die scheinbare Trägheit, vorgetäuscht durch die Ladung.

Arbeit ist notwendig, sowohl für das Inbewegungsetzen des materiellen Teilchens als auch für das Inbewegungsetzen der darauf befindlichen Elektrizität. Diese beiden Energieteile erhält man wieder, wenn die Bewegung aufhört. Die elektrische Ladung täuscht also ein Plus von gewöhnlicher Materie vor. Die Masse des Elektrons m, berechnet aus seiner Trägheit, besteht somit aus der wirklichen, gemeinen Masse m_w und aus der durch die elektrische Ladung vorgetäuschten Masse m_e

$$m = m_w + m_e.$$

Verschiedene Beobachtungen an bewegten Elektronen ergaben nun, daß wahrscheinlich $m = m_e$ ist. Die Trägheit eines Elektrons ist nur durch seine elektrische Ladung bedingt. Wenn nun unsere Atome und damit alle Körper nur aus Elektronen bestehen, wäre auch die Trägheit mechanischer Massen nur eine elektrische Erscheinung. Es wäre vielleicht nicht ausgeschlossen, daß so die Mechanik zu einem Teilgebiet der Elektrizitätslehre würde.

780. Dieses ganze Wissensgebiet, die **Elektronik**, ist noch im Werden und es läßt sich heute nicht absehen, ob ein gedeihlicher Abschluß dieser neuesten Anschauungsweisen, von welchen hier nur einige willkürlich herausgegriffene Beispiele gegeben wurden, möglich sein wird oder nicht.