

B. Elektrotechnische Grundbegriffe.

Elektrische Erscheinungen bieten oft große Ähnlichkeit mit dem Verhalten des Wassers, ein Umstand, der das Verständnis elektrischer Vorgänge wesentlich erleichtert.

Zwischen den Ventilen 1 und 2 eines mit Wasser gefüllten Röhrensystems (Fig. 291) befindet sich eine Wasserpumpe 3. Treibt man diese in der Pfeilrichtung an, so wird bei 1 eine Druckwirkung, bei 2 eine Saugwirkung nach der Pumpe zu auftreten. Je nach der Konstruktion der Pumpe erfolgt diese Wirkung gleichmäßig oder stoßweise. Dem ersten Falle würde die Arbeitsweise einer Kreiselpumpe, dem zweiten die einer Kolbenpumpe entsprechen; wir wollen eine Kreiselpumpe annehmen. — Solange die Ventile 1 und 2 geschlossen sind, ist zwar ein Druckunterschied in den Rohrenden links und rechts der Pumpe vorhanden; eine fließende Bewegung des Wassers kommt indes nicht zustande. Bei Öffnung des Ventils 1 pflanzt sich der Wasserdruck fort bis zum Ventil 2, doch ist ein Strömen des Wassers auch jetzt noch nicht möglich. Erst wenn auch 2 geöffnet wird, kann das Wasser das ganze Röhrensystem durchfließen. Das Wasser geht also von der Pumpe 3 aus, fließt durch Ventil 1 zum Wasserrad 4, treibt dieses an und kehrt durch Ventil 2 zur Pumpe zurück. Wir haben hier eine hydraulische Kraftübertragungsanlage, worin die an der Pumpe 3 aufgewendete mechanische, in Strömungsenergie verwandelte Arbeit fortgeleitet und im Wasserrad 4, das irgendeine Arbeitsmaschine antreiben möge, wieder nutzbar gemacht wird.

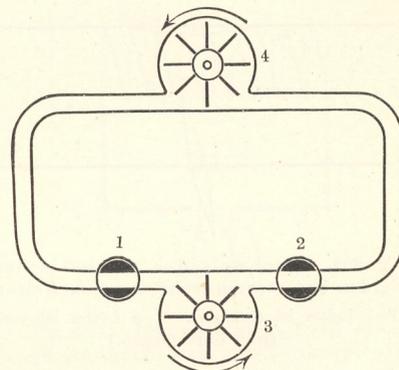


Fig. 291. Hydraulische Kraftübertragungsanlage.

Vergleicht man diesen hydraulischen Vorgang mit einem elektrischen (Fig. 292), so tritt an Stelle der Pumpe der Stromerzeuger, etwa ein galvanisches Element 3, das an seinen Polen eine stets gleichbleibende Druckdifferenz zu erzeugen vermag. Die Rohrleitung ersetzt eine Drahtleitung, und zwei in diese eingebaute Schalter 1 und 2 gestatten, den Stromkreis nach Belieben zu öffnen und zu schließen. Je nach Lage der Schalter wird die in der Figur als Stromverbraucher angenommene Glühlampe 4 aufleuchten oder erlöschen.

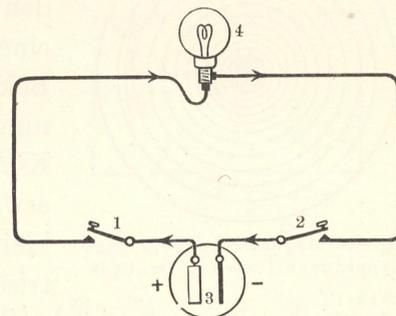


Fig. 292. Elektrische Lichtanlage.

Die einfachste Form eines derartigen *galvanischen Elementes* (Fig. 293) bilden ein Kupferstab 1 und ein Zinkstab 2, die in ein Glas mit angesäuertem Wasser tauchen. An den aus dem Gefäß herausragenden Stabenden, den *Polen* des Elementes, herrscht eine Druckdifferenz, die sich (in Fig. 292 durch die Leitung über die Glühlampe hinweg) auszugleichen sucht. Man nennt diese Druckdifferenz die *elektrische Spannung* und nimmt an, daß der Ausgleich vom positiven (+) Pol zum negativen (—) Pol erfolgt. Die elektrische Spannung des Elementes besteht auch dann, wenn die Schalter 1 und 2 (Fig. 292) geöffnet sind, nur kann ein Ausgleich dann nicht erfolgen. Erst beim Schließen beider Schalter kann man von einem elektrischen *Strom* sprechen, der, vom +-Pol ausgehend und zum —-Pol zurückkehrend, immer wieder mit erneutem Druck in gleicher Richtung durch Leitung und Glühlampe fließt.

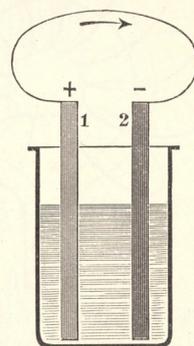


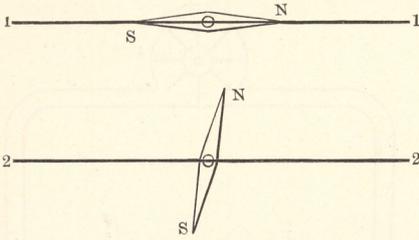
Fig. 293. Galvanisches Element.

Genau so, wie die sekundlich durch ein Rohr fließende Wassermenge abhängt von dem Rohrquerschnitt und dem an der Durchflußstelle herrschenden Druck, ebenso ist die sekundlich durch einen Draht fließende Elektrizitätsmenge abhängig vom Drahtquerschnitt und dem elektrischen Druck (Spannung), der zwischen Anfang und Ende der Drahtleitung herrscht. Je größer der Rohrdurchmesser ist, desto größer kann die durchtretende Wassermenge sein; je stärker die Rohrwandung gewählt wird, desto höheren Druck darf das Wasser annehmen. Ist das Rohr dem Wasserdruck nicht gewachsen, platzt es und gewährt dem Wasser einen Weg ins Freie. Und

andererseits: Je stärker der elektrische Strom ist, desto größer muß der Leitungsquerschnitt sein; je höher die Spannung gewählt wird, desto stärker ist die den Leiter umgebende Isolation zu bemessen. Würde man die Leitungsdrähte nicht isolieren, so würde der elektrische Strom den ihm bequemsten Weg, nämlich den zur Erde, einschlagen, also verloren gehen.

Als Isolationsstoffe verwendet man Materialien, die die Elektrizität nicht leiten, den Strom also zwingen, die durch den Leiter bezeichnete Bahn zu durchmessen. Während zu den *Leitern* alle Metalle, ferner Kohle, Salz- und Säurelösungen und die Körper der Lebewesen gehören, zählen Baumwolle, Seide, Jute, Gummi, Glimmer, trockenes Papier, Porzellan, Glas und Öl zu den *Nichtleitern* oder *Isolatoren*. Das Leitvermögen der Leiter ist sehr verschieden. Am besten leiten die Metalle. Von den Metallen hat wieder das Silber die höchste Leitfähigkeit, doch kommt es seines hohen Preises wegen als Leitungsmaterial nicht in Frage; statt dessen verwendet man Kupfer, dessen Leitfähigkeit fast die des Silbers erreicht.

Fig. 294. Nachweis des magnetischen Feldes bei stromdurchflossenem Leiter.
(1-1 Leiter ist stromlos. 2-2 Leiter ist vom Strom durchflossen.)



Will man den elektrischen Strom zu einer Arbeitsleistung zwingen, so muß man ihm einen Widerstand in den Weg legen, bei dessen Überwindung er seine Energie abgibt. Dem Wasserstrom

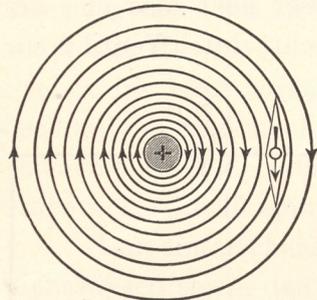


Fig. 295. Magnetisches Feld eines stromdurchflossenen Drahtes.

waren in Fig. 291, um seine Energie in mechanische Arbeit umzuwandeln, die Schaufeln des Wasserrades in den Weg gelegt. Analog kann man den elektrischen Strom veranlassen, seinen Weg durch den Kohlenfaden einer Glühlampe oder die Drahtwicklung eines Elektromotors zu nehmen. Bekanntlich wird durch Reibung zweier Körper Wärme erzeugt, die zunimmt, je größer der Druck und je rauher die Oberfläche der beiden Körper ist. Auch der Wasserstrom wird das durchfließende Rohr etwas erwärmen, und zwar um so mehr, je stärker der Wasserstrom und je kleiner und unebener das Rohrrinnere ist. Ähnlich tritt in einem elektrischen Stromkreis eine Erwärmung der Leiter auf, die dort am größten ist, wo der Strom den höchsten Widerstand findet. Ist die Elektrizitätsquelle stark genug, so kann die Erwärmung des Leiters unter Umständen so weit gehen, daß sich dieser bis zur Weißglut erhitzt, eine Eigenschaft, die man z. B. im Faden der Glühlampe nutzbringend verwertet. Bei einem Elektromotor, der zur Umwandlung elektrischer Energie in mechanische dient, ist die Drahtwicklung so dimensioniert, daß der elektrische Strom in der Hauptsache nicht Wärme, sondern Magnetismus und damit mechanische Arbeit erzeugt.

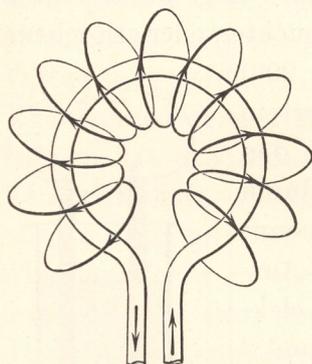


Fig. 296. Magnetisches Feld einer stromdurchflossenen Drahtwindung.

Nähert man einem stromführenden Leiter eine Magnetnadel, so wird diese aus ihrer früheren Richtung abgelenkt. Unterbricht man den Strom, so stellt sich die Nadel wieder in die Nord-Südrichtung ein. Dieses in Fig. 294 veranschaulichte Experiment lehrt, daß der stromführende Leiter auf die Magnetnadel eine magnetische Kraft ausübt. Die Umgebung des Leiters, in der eine magnetische Wirkung noch nachweisbar ist, heißt sein *magnetisches Feld*. Des besseren Verständnisses wegen denkt man sich das magnetische Feld aus unendlich vielen *Kraftlinien* bestehend, deren Richtung und Polarität durch die Lage des Leiters und durch die Stromrichtung bestimmt ist. Da eine Magnetnadel die Richtung der magnetischen Kraftlinien angibt, wie sie vom magnetischen Nordpol zum magnetischen Südpol der Erde verlaufen, so besitzt man in ihr ein Hilfsmittel, um auch die Richtung und Polarität der vom elektrischen Strom erzeugten Kraftlinien und damit die Richtung des Stromes festzustellen.

Blickt man in Richtung des Stromes an einem elektrischen Leiter entlang, so nimmt man wahr, daß eine in der Nähe befindliche, horizontal schwebende Magnetnadel sich in die in Fig. 295 gezeichnete Pfeilrichtung einstellt. Führt man die Magnetnadel im Kreise um den Leiter herum,

so behält sie in bezug auf den Leiter stets die gleiche Richtung bei, bildet also immer eine Tangente des um den Leiter beschriebenen Kreises. Dieses Verhalten der Nadel läßt auf ein magnetisches Feld schließen, dessen Kraftlinien konzentrische Ringe um den Leiter als Achse bilden. Die Kraftlinien verlaufen im Sinne des Uhrzeigers, wenn man in Richtung des Stromes an dem Leiter entlang sieht, und nehmen mit der Entfernung vom Leiter an Dichte ab.

Biegt man den Leiter zu einem Ringe (Fig. 296), so entstehen um ihn herum kreisförmige Kraftlinien, die mit Bezug auf die durch den Leiter begrenzte Ebene ein resultierendes Feld bilden und dieselbe senkrecht durchschneiden. Eine stromdurchflossene, sich aus mehreren ringförmigen Leitern zusammensetzende Drahtspirale wird also im Innern ein Magnetfeld besitzen, das hauptsächlich aus parallel zur Achse verlaufenden Kraftlinien gebildet wird (Fig. 297). Man nennt ein solches aus geradlinigen Kraftlinien bestehendes Feld ein *homogenes Magnetfeld*. Die magnetische Kraft oder *Feldstärke* im Innern einer solchen, auch *Solenoid* genannten Drahtspule wächst mit der Anzahl der Windungen und der Stärke des durchfließenden Stromes. Die Stelle, an der die Kraftlinien aus der Spule austreten, nennt man den Nordpol; die Stelle, an der sie eintreten, den Südpol der Spule.

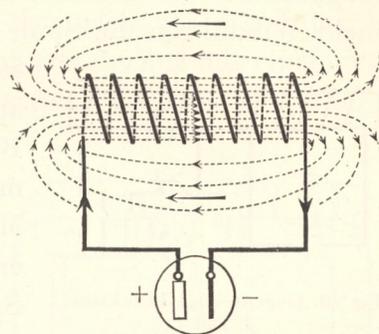


Fig. 297. Magnetisches Feld einer stromdurchflossenen Drahtspirale.

Bringt man in das Solenoid einen Eisenstab (Fig. 298), so wird dieser magnetisch. Und zwar wird das Stabende, das dem Beschauer im Sinne der Uhrzeigerbewegung vom Strom umkreist erscheint, zum Südpol, das andere zum Nordpol des *Elektromagnets*. Gleichzeitig erhält man ein wesentlich verstärktes magnetisches Feld. Unterbricht man den Stromkreis der Spule, so geht der Magnetismus des Eisens auf ein verschwindend kleines, *Remanenz* genanntes Maß zurück. Der *remanente Magnetismus* ist um so größer, je härter das Eisen ist. Bringt man in die Drahtspule einen Stahlstab, so wird dieser zwar nicht so rasch magnetisch wie ein Stab aus weichem Eisen, doch behält er seinen Magnetismus auch nach Unterbrechung des Stromes zum größten Teile bei, ist also zu einem dauernden Magnet geworden. Derartigen Magnetismus nennt man *permanenten*, im Gegensatz zu dem *temporären*, d. h. mit dem Strom wieder verschwindenden, Magnetismus des weichen Eisens.

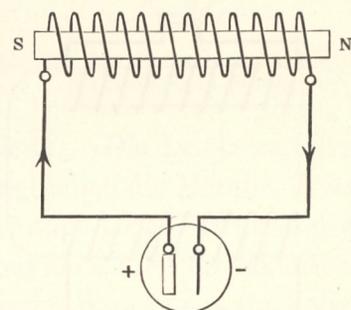


Fig. 298. Prinzip des Elektromagnets.

Nimmt man zwei kernlose Spulen, legt jede für sich an eine Stromquelle und nähert sie einander, wie Fig. 299 zeigt, so bemerkt man auch hier eine magnetische Wirkung: die Spulen ziehen sich, beweglich aufgehängt, an, wenn die Stromrichtung in beiden die gleiche ist, und stoßen sich ab, wenn die Stromrichtung verschieden ist. Hieraus ergibt sich das Gesetz: Gleichgerichtete Ströme ziehen sich an, ungleichgerichtete stoßen sich ab. Man besitzt also im elektrischen Strom ein Mittel, künstlichen Magnetismus herzustellen.

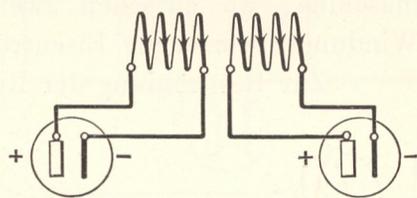


Fig. 299. Anziehung gleichgerichteter Ströme.

Umgekehrt ist es möglich, mittels eines Magnets in einem Leiter eine elektrische Druckdifferenz zu erzeugen. Diese Erscheinung bezeichnet man mit *Induktion*. Bringt man, wie in Fig. 300 dargestellt ist, in eine Spule einen Magnetstab, so wird in den Windungen ein elektrischer Strom induziert, der so lange dauert, wie der Stab in Bewegung ist. Dabei ist vorausgesetzt, daß Anfang und Ende der Wickelung miteinander in Verbindung stehen, die Grundbedingung für das Fließen eines Stromes also erfüllt ist. Bei geöffnetem Stromkreis entsteht in der Spule kein Strom, sondern nur eine *elektromotorische Kraft*. Elektromotorische Kraft nennt man bei allen Stromerzeugern den im Innern derselben hervorgerufenen

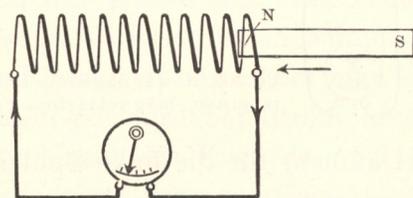


Fig. 300. Prinzip der Induktion.

elektrischen Druck. Die an den Polen des Stromerzeugers gemessene *Klemmenspannung* ist stets etwas kleiner als die elektromotorische Kraft, da bei Überwindung der sogenannten „inneren Widerstände“ in den Stromerzeugern schon ein kleiner Teil des ursprünglichen Druckes verbraucht wird.

Die in der Spule erzeugte elektromotorische Kraft (EMK) ist um so größer, je stärker der Magnetismus des Eisenstabes ist, ferner je schneller die Bewegung des Magnets erfolgt und je mehr Windungen die Spule besitzt. Legt man an die Enden der Wicklung ein Meßinstrument,

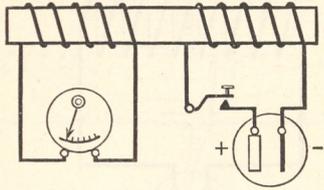


Fig. 301. Gegenseitige Induktion, 1. Fall.

so nimmt man beim Hineinbewegen des Magnetstabes einen Zeigerausschlag wahr, der jedoch sofort wieder Null wird, wenn man mit der Bewegung innehält, und nach der entgegengesetzten Seite erfolgt, wenn man den Magnetstab aus der Spule herauszieht. Der Ausschlag des Meßinstrumentes wird um so größer, je rascher die Bewegung des Stabes erfolgt. Dieselbe Wirkung läßt sich erreichen, wenn man eine zweite Spule, ähnlich dem in Fig. 301 dargestellten Vorgang, mit einer Stromquelle verbindet und so in die Nähe der ersten bringt, daß die bei Stromschluß erzeugten Kraftlinien die Fläche dieser Spule durchdringen. Enthalten die Spulen Eisen, so wird die Wirkung sehr verstärkt. Diese Eigenschaft eines periodisch vom Strom durchflossenen Leiters, in einem benachbarten Leiter einen elektrischen Druck zu erzeugen, nennt man

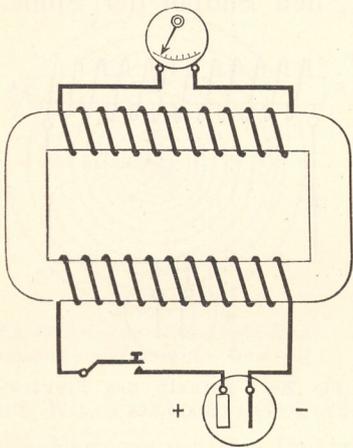


Fig. 302. Gegenseitige Induktion, 2. Fall.

gegenseitige Induktion, den induzierenden den *primären*, den induzierten den *sekundären* Strom. Die gegenseitige Induktion wird am größten, wenn das die Spulen ausfüllende Eisen einen in sich geschlossenen Kreis bildet und so den Kraftlinien einen Verlauf ohne Unterbrechung ermöglicht (Fig. 302). Bei Vergleich des induzierenden mit dem induzierten Strom ergibt sich, daß der letztere die entgegengesetzte Richtung beim Schließen, die gleiche Richtung beim Öffnen des induzierenden Stromes hat, den Wirkungen desselben also entgegenarbeitet. Er sucht demnach bei Stromschluß das entstehende Kraftlinienfeld zu schwächen und es bei Öffnung des Stromkreises aufrechtzuerhalten. Eine induzierende Wirkung entsteht auch, wenn eine Spule so vor den Polen eines Magnets vorbeibewegt oder gedreht wird, daß ihre Windungen die Kraftlinien schneiden (Fig. 303). Diese Erscheinung umfaßt das Prinzip der Dynamomaschine, wo zwischen zwei starken Magnetpolen der sogenannte *Anker*, eine mit vielen Windungen versehene Eisentrommel, gedreht wird.

Zur Bestimmung der Richtung des induzierten Stromes bedient man sich mit Vorteil der Flemingschen *Drei-Finger-Regel* (Fig. 304). Sie lautet: Man bringe den Zeigefinger der rechten Hand in Richtung der Kraftlinien und den Daumen in die Bewegungsrichtung des Leiters, dann gibt der auf beiden senkrecht stehende Mittelfinger die Richtung des induzierten Stromes an.

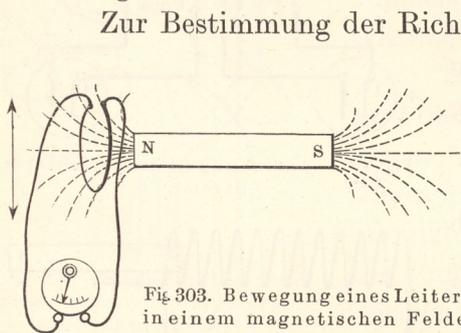


Fig. 303. Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Felde.

Wendet man diese Regel auf die in Fig. 305 dargestellten Verhältnisse an, so ergibt sich: Die Kraftlinienrichtung (Zeigefinger) ist nach links, die Bewegungsrichtung (Daumen) für die linke Spulenseite 1 nach oben, der Strom fließt also in dieser Spulenseite von hinten nach vorn; in der anderen Spulenseite 2 natürlich umgekehrt, da auch die Bewegung hier umgekehrt, d. h. von oben nach unten, erfolgt. Der bei diesem Versuch erzeugte Strom stellt natürlich auch einen gewissen Energiewert dar. Da der Magnet durch seine induzierende Tätigkeit in seiner magnetischen Stärke nicht verändert wird, kann die erzeugte elektrische Energie nur in der bei der Bewegung des Leiters aufgewendeten mechanischen Arbeit ihren Ursprung haben.

Der in Fig. 301 veranschaulichte Versuch zeigte den Einfluß der Induktion auf eine der primären geäiherte sekundäre Spule. Diesem Einfluß unterliegt aber auch die primäre Spule selbst,

denn auch in ihr werden Induktionsströme erzeugt. Da die induzierte elektromotorische Kraft stets einen Strom erzeugt, der dem primären entgegenwirkt, so wird im Moment des Schließens der Strom nicht gleich auf seinen vollen Wert steigen, sondern durch die Wirkung der induzierten gegenelektromotorischen Kraft relativ langsam. Beim Öffnen des Stromkreises sucht umgekehrt die sekundäre elektromotorische Kraft das Sinken der Stromstärke zu verzögern, was die Versuchsanordnung der Fig. 306 bestätigt. Eine Stromquelle 3 speist über den nach unten gedrückten Schalter 1 die Wicklung eines Elektromagnets. Das Meßinstrument 4 steht nur mit einem Pol mit dem Element 3 in Verbindung, ein Ausschlag ist also nicht vorhanden. Läßt man Schalter 1 los, so zieht die Feder 2 ihn nach oben und verbindet dadurch die beiden Enden der Spule 5 mit dem Meßinstrument 4. In diesem Augenblick bemerkt man einen Ausschlag des Zeigers, der langsam, der Abnahme der Kraftlinienzahl entsprechend, auf Null zurückgeht. Das Element ist hierbei, da es nur einpolig angeschlossen ist, vollständig wirkungslos. Diese, *Selbstinduktion* genannte, Erscheinung ist darauf zurückzuführen, daß zur Erzeugung des die Spule umgebenden magnetischen Feldes eine gewisse Energiemenge verbraucht wird, die im Augenblick der Unterbrechung des Stromes wieder frei wird.

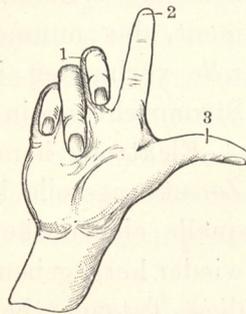


Fig. 304. Fleming'sche Drei-Finger-Regel. (1 Stromrichtung, 2 Kraftlinienrichtung, 3 Bewegungsrichtung.)

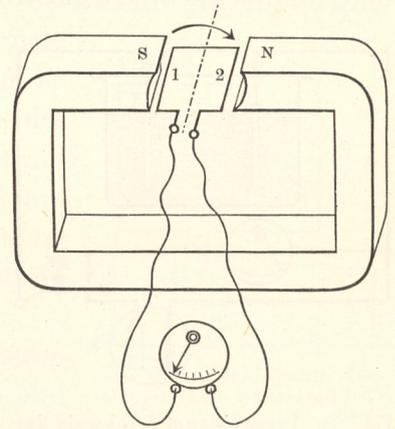


Fig. 305. Bewegung einer Spule im magnetischen Felde.

Es sei daran erinnert, daß alle Körper hinsichtlich ihres Leitvermögens eingeteilt werden in Leiter und Nichtleiter. Die Leiter zerfallen wieder in solche erster und zweiter Klasse. *Leiter erster Klasse* sind vornehmlich die Metalle, *Leiter zweiter Klasse* alle Flüssigkeiten, soweit sie den elektrischen Strom überhaupt leiten. Während in den Metallen bei Stromdurchgang nur Wärmeerscheinungen wahrnehmbar sind, hat der elektrische Strom bei den Flüssigkeiten außer der Erwärmung noch gewisse chemische Wirkungen zur Folge.

In einem Gefäß mit angesäuertem Wasser seien sich zwei Metallplatten, die sogenannten *Elektroden*, so gegenübergestellt, daß sie sich nicht berühren. Verbindet man sie, wie in Fig. 307, mit den Polen eines Elementes, so nimmt man nach kurzer Zeit an den beiden Elektroden kleine Glasbläschen wahr: das Wasser wird zersetzt. Dabei entsteht an der Elektrode, wo der Strom in die Flüssigkeit eintritt, der *Anode* (1), Sauerstoff; an der Austrittselektrode, der *Kathode* (2), Wasserstoff. Da das Wasser aus zwei Teilen Wasserstoff und einem Teil Sauerstoff besteht, so ist auch die erzeugte Wasserstoffmenge doppelt so groß wie die entstehende Sauerstoffmenge. Dieses Zerlegen der Flüssigkeit bezeichnet man als *elektrolytische Wirkung* des elektrischen Stromes. Aus Metallsalzlösungen wird bei Stromdurchgang das in dem Salz chemisch gebundene Metall abgeschieden und nach der Kathode geführt, wo es sich als feiner, gleichmäßiger Niederschlag ansetzt. Will man einen leitenden Gegenstand vernickeln, so hängt man ihn als Kathode in eine Nickelsalzlösung, benutzt irgendein Metallstück als Anode und schickt einen verhältnismäßig schwachen Strom hindurch; bald überzieht sich der Gegenstand mit einer festhaftenden Nickelschicht.

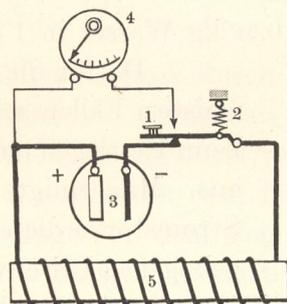


Fig. 306. Versuch zum Nachweis der Selbstinduktion.

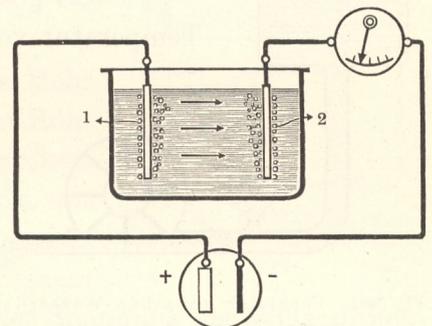


Fig. 307. Elektrische Wasserzersetzung.

Beobachtet man bei dem Versuch der Wasserzersetzung (Fig. 307) ein in den Stromkreis geschaltetes Meßinstrument, so nimmt man wahr, daß nach einiger Zeit der Zeiger des Instrumentes langsam zurückgeht. Auch die erzeugte Gasmenge nimmt nicht mehr im gleichen Maße zu wie

früher. Da an der Stromquelle nichts geändert ist, muß sich also im Stromkreis eine Änderung vollziehen: An der Oberfläche der Elektroden setzen sich die Gasbläschen fest und hindern so den Strom, in früherer Stärke in die Flüssigkeit überzutreten bzw. diese nach der Kathode zu verlassen. Gleichzeitig entsteht ein elektrischer Gegendruck, der den früheren Strom zu schwächen sucht. Diesen Vorgang, der gewisse Ähnlichkeit mit der Selbstinduktion hat, nennt man die *Polarisation*. In Fig. 308 geht der Strom vom Element über den nach unten gedrückten Schalter 1 nach der + -Elektrode und weiter durch die Flüssigkeit über die — -Elektrode zum Element zurück. Läßt man den Schalter nach einiger Zeit los, so legt er sich unter dem Zuge der Feder 2 nach oben und schließt einen Stromkreis über das Meßinstrument zur — -Elektrode, durch die Flüssigkeit zur + -Elektrode und von hier zum Schalter. Das Meßinstrument, das nunmehr mit den beiden Elektroden der *Zersetzungs-*

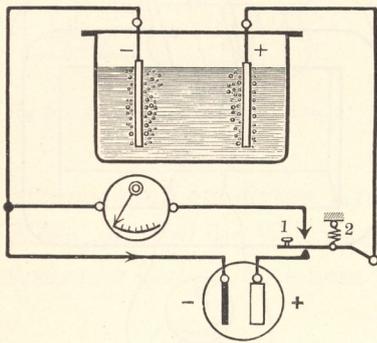


Fig. 308. Versuch zum Nachweis der Polarisation.

zelle verbunden ist, zeigt jetzt einen Ausschlag. Dabei ist die Stromrichtung in der Zelle umgekehrt: der Strom fließt aus der + -Elektrode heraus und zur — -Elektrode wieder herein. In der Zersetzungs zelle hat man also ein Mittel, mit Hilfe einer Stromquelle elektrische Energie aufzuspeichern, die zu beliebiger Zeit wieder hergegeben werden kann. Eine praktische Anwendung findet diese Tatsache bei den Akkumulatoren, deren Wirkungsweise und Bau ein späterer Abschnitt behandelt.

Elektrische Größen. In der Elektrotechnik bezeichnet man die Gebrauchseinheit für die Leistung zu Ehren des Erfinders der Dampfmaschine mit 1 Watt. Für größere Leistungen nimmt man als Maß das 1000fache dieser Gebrauchseinheit und benennt es 1 Kilowatt (KW). Um 1 kg in 1 Sekunde 1 m hoch zu heben, ist eine Leistung von 9,81 Watt aufzuwenden. 1 mkg/sek entspricht demnach 9,81 Watt. Zur Erzeugung einer Pferdestärke (75 mkg/sek) sind mithin $75 \times 9,81 = 736$ Watt erforderlich. Um die Temperatur eines Gramm Wassers in 1 Sekunde um 1 Grad C zu erhöhen, sind 4,17 Watt nötig. Diese Wärmeleistung heißt 1 Grammkalorie (gcal). Demnach ist 1 Watt $= \frac{1}{4,17} = 0,24$ gcal und 1 KW $= \frac{1}{4,17} \times 1000 = 240$ gcal, d. h. man kann mit 1 KW die Temperatur von 0,24 kg Wasser in 1 Sekunde um 1° C erhöhen.

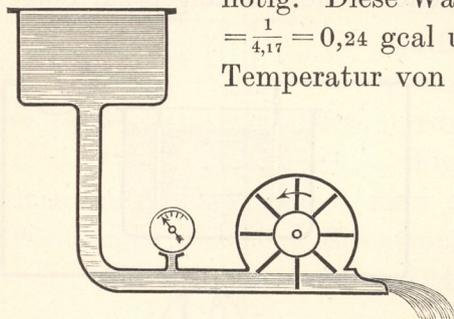


Fig. 309. Vergleich zwischen Wasserdruck und elektrischer Spannung.

Da für die Wirkungen des elektrischen Stromes in den meisten Fällen seine Stärke maßgebend ist, ging man auch beim Festlegen einer elektrischen Einheit von der Stromstärke aus. Man einigte sich dahin, als praktische Einheit für die Stromstärke diejenige anzunehmen, die, in einem kreisförmig gebogenen Leiter von 1 cm Radius fließend, auf einen Einheits-Magnetpol eine bestimmte, vom absoluten Maßsystem abgeleitete Kraft ausübt. Man nannte diese praktische Einheit

der Stromstärke nach dem verdienstvollen französischen Forscher Ampère: 1 Ampere. Gibt eine Stromquelle die Stromstärke von 1 Ampere während 1 Sekunde her, so ist die abgegebene Elektrizitätsmenge 1 Coulomb.

Vor der Besprechung der weiteren elektrischen Maßeinheiten sei wieder ein hydraulischer Vergleich herangezogen. Ein quadratisches Rohr von 1 cm lichter Weite steht mit einem Hochbehälter in Verbindung (Fig. 309). Der durch das Rohr fließende Wasserstrom hat also einen Querschnitt oder eine Stärke von 1 qcm. Das Wasser im Rohr sei einem solchen Druck ausgesetzt, daß es auf einen das Rohr verschließenden Gegenstand mit 1 kg drückt. Der Wasserdruck beträgt dann 1 kg pro Quadratcentimeter oder 1 Atmosphäre (at). Läßt man das Wasser gegen die Schaufel eines dicht vor der Öffnung angebrachten Wasserrades strömen, so beträgt auch der auf die Schaufel ausgeübte Druck, wenn man von den Verlusten im Rohre absieht, 1 kg. Diese auf die Schaufel des Wasserrades drückende Kraft ist maßgebend für die Leistung des Rades.

Verwendet man statt des Rohres von 1 cm ein solches von 2 cm lichter Weite und stellt

den gleichen Wasserdruck von 1 at = 1 kg pro Quadratcentimeter her, der sich leicht an einem angeschlossenen Druckmesser (Manometer) ablesen läßt, so beträgt der Querschnitt des Rohres wie des Wasserstromes jetzt $2 \times 2 = 4$ qcm. Da der Wasserdruck nach wie vor 1 kg pro Quadratcentimeter beträgt, so wird auf die Schaufeln ein Druck von $4 \times 1 = 4$ kg ausgeübt. Erhöht man den Druck auf 2 at = 2 kg pro Quadratcentimeter, so wird sich auch der an den Schaufeln des Wasserrades wirksame Druck auf $4 \times 2 = 8$ kg erhöhen. Naturgemäß kann das Wasserrad jetzt auch das Achtfache leisten gegenüber dem im ersten Falle. Hieraus ist zu entnehmen, daß die Leistung des Wasserrades gleich ist dem Produkt aus der Stärke (Querschnitt) des Wasserstromes und dem Druck, mit dem das Wasser gegen die Schaufeln gepreßt wird.

Bei Einwirkung des elektrischen Stromes auf irgendeine geeignete Arbeitsvorrichtung ergeben sich dieselben Beziehungen. Auch hier kann die erzeugte Leistung ausgedrückt werden durch das Produkt aus der Stärke des Stromes und dem elektrischen Druck, d. h. der Spannung, womit der Strom den Widerstand durchfließt. Es ist also Leistung = Stromstärke \times Spannung. Setzt man in dieser Formel die Werte für Stromstärke und Spannung als praktische Einheiten ein, so ergibt sich auch die Leistung in praktischen Einheiten, d. h. in Watt.

Bisher waren uns nur die vom absoluten Maßsystem abgeleiteten praktischen Einheiten der Stromstärke und der Leistung, das Ampere und das Watt, bekannt. Wir wissen jetzt, daß Spannung, Strom und Leistung in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander stehen, können also die praktische Einheit der Spannung ableiten:

„Die praktische Einheit der elektromotorischen Kraft oder Spannung ist diejenige, die mit der praktischen Einheit der Stromstärke, 1 Ampere, die praktische Einheit der Leistung, 1 Watt, hervorbringt.“ Nach Volta nennt man diese Einheit 1 Volt.

Bezeichnet man die Leistung mit \mathcal{E} (Effekt), die Spannung mit E und die Stromstärke mit J, dann ist:

$$E_{\text{Volt}} = \frac{\mathcal{E} \text{ Watt}}{J \text{ Amp.}}; \quad J_{\text{Amp.}} = \frac{\mathcal{E} \text{ Watt}}{E \text{ Volt}} \quad \text{und} \quad \mathcal{E}_{\text{Watt}} = E_{\text{Volt}} \cdot J_{\text{Amp.}}$$

Ein Wasserstrom, der unter gleichmäßigem Druck durch ein Rohr fließt, hat stets die gleiche Stärke. Diese nimmt ab, wenn man das Rohr verengt, d. h. den vom Wasser zu überwindenden Widerstand vergrößert. Man erkennt also, daß die Stärke des Stromes außer von dem Druck, mit dem er durch das Rohr getrieben wird, abhängt von dem sich ihm entgegenstellenden Widerstand. Die gleichen Beziehungen bestehen in einem elektrischen Stromkreise. Auch hier ist für die Stromstärke außer der Spannung der Widerstand des Stromkreises maßgebend. Folgender Versuch bestätigt dies (Fig. 310):

Ein dünner Eisendraht 1 ist durch ein kleines Gefäß mit reinem Wasser geführt und unter Zwischenschaltung eines Stromzeigers mit den Polen eines Elementes verbunden. Zur Messung der Temperaturerhöhung ist ein Thermometer 2 in das Wasser eingebracht. Schließt man den Schalter 3, so zeigt der Stromzeiger einen konstant bleibenden Wert von beispielsweise 4 Ampere an. Nach 5 Minuten ist die Wassertemperatur um 10° gestiegen. Jetzt unterbrechen wir den Strom, lassen das Wasser sich wieder bis auf die Anfangstemperatur abkühlen und verbinden inzwischen den Eisendraht mit einem zweiten Draht gleicher Länge und Stärke, und zwar so, daß bei geschlossenem Stromkreis der Strom nacheinander beide Drahtenden durchfließen muß (Fig. 311). Damit erhöhen wir den Widerstand des Drahtes auf das Doppelte. Legen wir jetzt die Drähte wie früher in das Wassergefäß und schließen Schalter 3, so zeigt der Stromzeiger nur die Hälfte des früheren Stromes, 2 Ampere, an. Auch die Zunahme der Wassertemperatur beträgt nach 5 Minuten nur etwa die Hälfte der früheren, ungefähr 5° . Dieser Versuch beweist, daß durch Verdoppelung des Widerstandes die Stromstärke auf die Hälfte sinkt. Hätten wir den

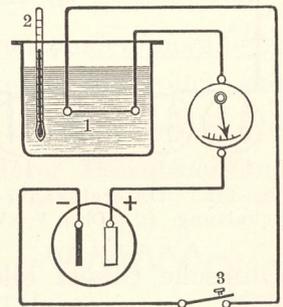


Fig. 310. Erklärung des elektrischen Widerstandes, 1. Fall.

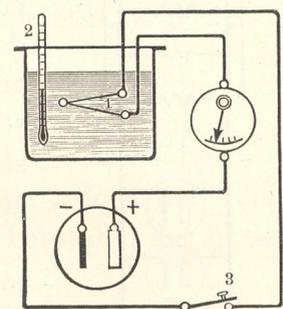


Fig. 311. Erklärung des elektrischen Widerstandes, 2. Fall.

Widerstand verdreifacht, so wäre die Stromstärke auf ein Drittel gesunken. Die Spannung ist dabei als konstant vorausgesetzt, so daß man aus gegebener Spannung und bekanntem Widerstand den Strom bestimmen kann. Es ist somit die Stromstärke in Ampere gleich dem Quotienten aus Spannung in Volt und Widerstand in Widerstandseinheiten, also $J = \frac{E}{W}$. Die praktischen Einheiten des Stromes und der Spannung sind bereits festgelegt. Nunmehr läßt sich auch die Einheit des Widerstandes bestimmen:

„Fließt bei der praktischen Einheit der Spannung durch einen Leiter die praktische Einheit der Stromstärke, dann stellt der Leiter den praktischen Einheitswert des Widerstandes dar.“

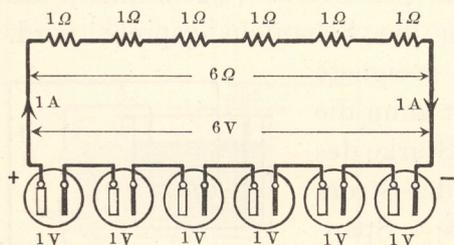


Fig. 312. Hintereinander- oder Reihenschaltung. (Ω = Ohm; V = Volt; A = Ampere.)

Nach dem Physiker Ohm bezeichnet man diesen Einheitswert mit 1 Ohm (Ω). Durch die Formel $J_{\text{Amp.}} = \frac{E \text{ Volt}}{W \text{ Ohm}}$ ist auch das von Ohm aufgestellte sogenannte *Ohmsche Gesetz* ausgedrückt. Sind zwei der hierin enthaltenen Größen bekannt, so läßt sich die dritte leicht durch Rechnung finden, denn $J_{\text{Amp.}} = \frac{E \text{ Volt}}{W \text{ Ohm}}$; $E_{\text{Volt}} = J_{\text{Amp.}} \times W_{\text{Ohm}}$; $W_{\text{Ohm}} = \frac{E \text{ Volt}}{J_{\text{Amp.}}}$. Dieses

Ohmsche Gesetz bildet das Fundament der gesamten Elektrotechnik. Der Normalwiderstand 1 Ohm wird dargestellt durch den Widerstand eines Quecksilberfadens von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei einer Temperatur von 0°. Fließt durch solchen Quecksilberfaden ein Strom von 1 Ampere, so ist die Spannung, an den beiden Enden des Fadens gemessen, 1 Volt.

Die Größe einer Leistung ist, wie besprochen, gegeben durch die Beziehung $\mathcal{C} = E \times J$. Ist die Spannung unbekannt, jedoch Widerstand und Stromstärke bekannt, so läßt sich aus dem Ohmschen Gesetz die Spannung bestimmen. Sie ist: $E = J \times W$. Setzt man diesen Wert für E in obige Gleichung ein, so ergibt sich: $\mathcal{C} = J \times W \times J$, also $\mathcal{C} = J^2 \times W$. Diese Formel besagt, daß der elektrische Effekt (\mathcal{C}), also auch die in der Zeiteinheit in einem Leiter entwickelte Wärmemenge (*Joulesche Wärme*), dem Produkte aus dem Widerstand des Leiters und dem Quadrat der Stromstärke (Stromstärke mal Stromstärke) entspricht. Dieses Gesetz wurde zuerst von dem Engländer Joule aufgestellt und heißt nach ihm das *Joulesche Gesetz*.

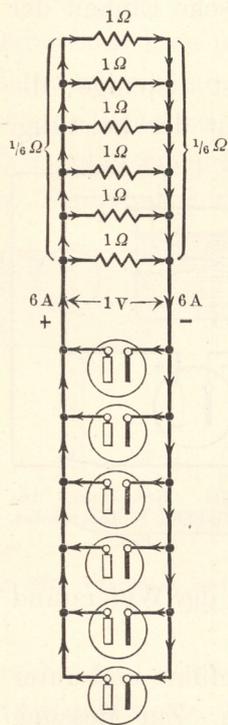


Fig. 313. Nebeneinander- oder Parallelschaltung. (Ω = Ohm; V = Volt; A = Ampere.)

In dem letzten Versuch (Fig. 311) waren die beiden dünnen Eisendrähte so verbunden, daß der Strom in voller Stärke beide Drähte nacheinander durchfließt. Die Drähte waren also „hintereinander“ geschaltet. Durch *Hintereinander-* oder *Reihenschaltung* mehrerer Widerstände wird der Gesamtwiderstand gleich der Summe der einzelnen Widerstände (Fig. 312). Ebenso wie man Stromverbraucher hintereinander schalten kann, lassen sich auch Stromquellen hintereinander verbinden. Dann wird, wenn man von dem „inneren Widerstand“ absieht, die Gesamtspannung gleich der Summe der Einzelspannungen. Schalten wir also z. B. 6 Elemente von je 1 Volt Klemmenspannung hintereinander, so beträgt die Gesamtspannung $6 \times 1 = 6$ Volt. Bedingung hierfür ist jedoch, daß alle ungleichnamigen Pole der Elemente miteinander verbunden sind, mit andern Worten, daß die Stromrichtung in den Elementen überall die gleiche ist.

Die maximale Stromabgabe einer Stromquelle ist bestimmt durch den Querschnitt der Strombahn im Stromerzeuger. Da man nun bei der Reihenschaltung den Querschnitt der Strombahn nicht verändert — der Strom durchfließt ja alle Elemente der Reihe nach —, darf man der Batterie auch keinen stärkeren Strom entnehmen als einem einzelnen Element; wohl aber kann der Strom jetzt vermöge der erhöhten Spannung einen viel größeren Widerstand überwinden.

Will man bei geringer Spannung eine hohe Stromstärke erzeugen, so verbindet man die Stromquellen nach Fig. 313 so, daß der Querschnitt der Strombahn künstlich vergrößert wird,

d. h. man schaltet die Elemente parallel oder nebeneinander. Es sind nun alle gleichnamigen Pole miteinander verbunden. Bei der *Nebeneinander-* oder *Parallelschaltung* ist die Gesamtspannung gleich der Spannung des einzelnen Elementes, während der aus der „Batterie“ zu entnehmende Höchststrom gleich der Summe der Einzelströme wird. Auch Widerstände lassen sich parallel schalten. Sind sie gleichgroß, so ist der Gesamtwiderstand gleich dem Wert eines Widerstandes, dividiert durch die Anzahl der Widerstände. In Fig. 313 beträgt der Gesamtwiderstand demnach $\frac{1}{6}$ Ohm und die Gesamtstromstärke $1 : \frac{1}{6} = 6$ Ampere. Sind zwei parallel geschaltete Widerstände nicht gleichgroß (Fig. 314), so ist der Gesamtwiderstand gleich dem Produkt derselben, dividiert durch die Summe, also: $W_{\text{Gesamt}} = \frac{W_1 \times W_2}{W_1 + W_2}$. Beträgt W_1 3 und W_2 7 Ohm, so ist der Gesamtwiderstand $\frac{3 \cdot 7}{10} = 2,1$ Ohm.

Den Widerstand eines Leiters kann man, wie bereits erörtert, bestimmen, indem man beim Durchfließen eines bestimmten Stromes die an den Enden des Leiters auftretende Spannung mißt und aus $W_{\text{Ohm}} = \frac{E \text{ Volt}}{J \text{ Amp.}}$ den Widerstand berechnet. Auch kann man einen unbekanntem Widerstand dadurch messen, daß man ihn mit einem bekannten mittels besonderer Meßeinrichtung vergleicht. So, wie der einem Wasserstrom sich entgegenstellende Widerstand größer wird mit der Länge der Leitung und kleiner bei Vergrößerung des inneren Durchmessers, nimmt auch der elektrische Widerstand zu mit der Länge des Leiters und ab bei Zunahme des Querschnittes. Dabei ist die Form des Querschnittes gleichgültig. Natürlich ist auch das Material des Leiters für die Größe seines Widerstandes bedeutsam. Ein Kupferdraht von 1 m Länge und 1 qmm Stärke hat einen kleineren Widerstand als ein gleichstarker Eisendraht. Diejenige Zahl, die angibt, wie groß der Widerstand (in Ohm) eines beliebigen Leiters von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt ist, nennt man den *spezifischen Widerstand* c des Leiters. Der auf eine mittlere Temperatur, z. B. 20°C , bezogene spezifische Widerstand c beträgt für

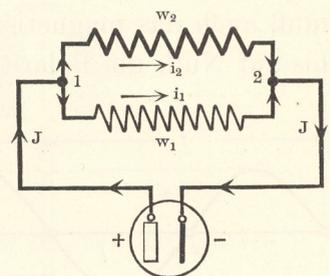


Fig. 314. Schaltung von Widerständen.

Kohle	100—1000	Aluminium	0,03 — 0,05
Manganin	0,42	Kupfer	0,017—0,018
Eisen	0,10—0,12	Silber	0,016—0,018

Diese Werte lassen erkennen, daß Silber zwar am besten leitet, Kupfer ihm jedoch nur wenig nachsteht. Andererseits ist der hohe Widerstand von Kohle augenfällig, ein Umstand, der in den Dynamomaschinen einen nicht unerheblichen Ausfall an Energie bedingt.

Das bisher über den Widerstand eines Leiters Gesagte läßt sich dahin zusammenfassen, daß die Größe des Widerstandes W (in Ω) eines Leiters von der Länge l (in m) und dem Querschnitt q (in qmm) beträgt: $W = c \times \frac{l}{q}$. Hierin ist der spezifische Leitungswiderstand c abhängig von dem Stoff und der Temperatur des Leiters.

In einem unverzweigten Stromkreise ist die Stromstärke überall die gleiche, wovon man sich überzeugen kann, wenn man analog die durch eine Rohrleitung fließende Wassermenge an verschieden starken Stellen der Rohrleitung mißt; es wird überall die gleiche Wassermenge pro Sekunde hindurchgehen. Ebenso ist auch in einem unverzweigten elektrischen Stromkreise die Stromstärke überall gleich. Verzweigt sich der Stromkreis, so teilt sich der Strom am Verzweigungspunkt in zwei gleiche Teile, wenn der Widerstand der beiden Zweige gleichgroß ist; in ungleiche Teile, wenn der Widerstand der beiden Zweige zwischen den Verbindungspunkten 1 und 2 (Fig. 314) ungleich ist. Hierbei wird der stärkere Strom durch den kleineren Widerstand, der schwächere Strom durch den stärkeren Widerstand fließen. Das Produkt aus den beiden Größen J und W ist aber in beiden Zweigen stets gleich. Daraus folgt, daß auch die Spannung, gemessen an den Punkten 1 und 2, oder der *Spannungsabfall* von 1 nach 2, in beiden Zweigen gleichgroß ist. Bezeichnet man die Widerstände der beiden Zweige mit w_1 und w_2 , die Spannungsabfälle mit e_1 und e_2 , die Ströme mit i_1 und i_2 , dann ist $e_1 = i_1 \cdot w_1 = e_2 = i_2 \cdot w_2$. Der Gesamtstrom ist gleich der Summe der Einzelströme, also $J = i_1 + i_2$ und bei mehreren Abzweigungen $J = i_1 + i_2 + i_3 + i_4$ usw.

Bisher wurden nur die Verhältnisse und Beziehungen für solche Stromkreise besprochen, in denen ein stets gleichgerichteter Strom, ein *Gleichstrom*, fließt. Es sei daran erinnert, daß in einer stromdurchflossenen Spule beim Schließen und Öffnen des Stromes eine elektromotorische Gegenkraft, die Selbstinduktion, auftritt. Auch ist schon bekannt, daß im allgemeinen eine Induktionswirkung zunimmt mit der Anzahl der erzeugten Kraftlinien und der Schnelligkeit, mit der die Kraftlinien in der Spule entstehen und verschwinden. Anstatt den Stromkreis zu schließen und wieder zu unterbrechen, soll nun ein Strom durch die Spule geschickt werden, der seine Stärke und Richtung stets ändert, ein *Wechselstrom*. Der Verlauf eines Wechselstromes ist so zu verstehen, daß bei Beginn der Strom auf einen bestimmten positiven Wert ansteigt, bis auf Null fällt, dann seine Richtung wechselt, bis zum negativen Maximalwert ansteigt, wieder fällt, Null wird, positiv ansteigt usw. Die Strecke I von 1 bis 3 in Fig. 315, also von dem Nullpunkt, an dem der Strom positiv ansteigt, bis zu dem Punkt, an dem der Strom wieder positiv ansteigt, nennt man eine *Periode* (ebenso die Strecke von 3 bis 5). Die Strecken II von 1 bis 2, von 2 bis 3, von 3 bis 4 und von 4 bis 5 nennt man je einen Wechsel. Erfolgen während einer Sekunde 50 solcher Perioden, so sagt man, der Strom hat 50 Perioden. In gleicher Weise, wie der Strom sich ändert, muß auch das magnetische Feld sich ändern, also positiv ansteigen bis zum Maximalwert, fallen bis auf Null, die Polarität ändern, wieder stärker werden usw. Es handelt sich hierbei also um

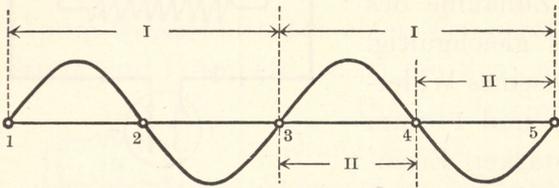


Fig. 315. Wechselstromkurve.

eine stetige Änderung des Kraftlinienfeldes, wodurch auch eine dauernde Selbstinduktion auftritt. Diese stellt eine elektromotorische Gegenkraft dar, die von der hineingeschickten Spannung überwunden werden muß. Will man also durch eine Spule einen Wechselstrom schicken, so muß man eine höhere Spannung aufwenden, als wenn ein gleichstarker Gleichstrom

die Spule durchfließen soll, und zwar muß die Wechselstromspannung eben um die wirksame Spannung der Selbstinduktion größer sein als die Gleichstromspannung. Es scheint also das Ohmsche Gesetz, das doch sagt: $\text{Strom} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}$, hier nicht mehr zuzutreffen. Dies ist auch der Fall: Durch die Wirkung der Selbstinduktion wird der Widerstand der Spule scheinbar vergrößert. Will man daher das Ohmsche Gesetz bei Wechselstrom anwenden, so muß man als Widerstand den insgesamt wirksamen sogenannten *scheinbaren Widerstand* einsetzen. Da dieser zum Teil durch die Selbstinduktion hervorgerufen wird, nimmt er wie diese zu mit Erhöhung der Stromstärke und der Periodenzahl. Das Ohmsche Gesetz für Wechselstrom lautet somit:

$$J_{\text{Amp.}} = \frac{E \text{ Volt}}{W \text{ (scheinbar) Ohm}}$$

Fließt ein Wechselstrom durch eine Zersetzungszelle, so tritt auch hier eine Zersetzung des Wassers ein, doch wird an den Elektroden kein reines Gas, sondern ein Gemisch von Sauerstoff und Wasserstoff (Knallgas) erzeugt. Es ist also durch den fortwährenden Wechsel der Stromrichtung auch ein fortwährender Wechsel in der Art des erzeugten Gases bedingt. Gleichzeitig nimmt man bei diesem elektrolytischen Vorgang wahr, daß sich mit einer bestimmten Wechselstromspannung nicht dieselbe Stromstärke erzeugen läßt wie mit einer gleichgroßen Gleichstromspannung. Es stimmt das allgemeine Ohmsche Gesetz also auch in diesem Falle nicht.

Was hier in die Erscheinung tritt, ist die Wirkung der Polarisierung, die, wie die Selbstinduktion, auch eine elektromotorische Gegenkraft erzeugt oder, anders ausgedrückt, den wirksamen Gesamtwiderstand vergrößert. Auch hier ist ein scheinbarer Widerstand in Rechnung zu setzen, so daß sich wieder ergibt: $J = \frac{E}{W \text{ (scheinbar)}}$

Im Gegensatz zu den oben besprochenen Wirkungen erzeugt ein Wechselstrom in einem Leiter genau die gleiche Wärmemenge wie ein Gleichstrom derselben Spannung und Stärke.