

Zeitschrift: Jahrbuch der Sekundarlehrerkonferenz des Kantons Zürich
Herausgeber: Sekundarlehrerkonferenz des Kantons Zürich
Band: - (1919)

Artikel: Magnetismus, Gleichstrom und Wechselstrom im Unterricht
Autor: Gubler, T.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-819559>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Magnetismus, Gleichstrom und Wechselstrom im Unterricht.

Vortrag von Th. Gubler, Andelfingen.

Magnetismus.

Die magnetischen Kraftlinien.

Man nennt den Raum um einen Magneten herum, in dem sich dessen magnetische Kraft nachweisen läßt, das magnetische Feld. Legt man auf den wagrecht liegenden Magneten ein Blatt Papier und bestreut es mit Eisenfeilspänen, so ordnen sich diese nach Kurven, die von Pol zu Pol verlaufen. Sie geben die Richtung an, in der die magnetische Kraft wirkt; man nennt sie magnetische Kraftlinien (Faraday).

Jedes Feilspanteilchen erhält auf der dem Nordpol zugewendeten Seite einen Südpol, auf der entgegengesetzten Seite einen Nordpol. Die magnetische Kraft versucht, das Teilchen in die Richtung ihrer Wirkung zu drehen. Der Drehung wirkt aber die Reibung auf der Papierfläche entgegen. Sobald wir diese leicht erschüttern, werden die Teilchen für einen Augenblick abgehoben, unterdessen ist keine Reibung vorhanden und sie legen sich in die Richtung der wirkenden Kraft.

Wo die magnetische Kraft sehr groß ist, werden die Feilspanteilchen nicht bloß gedreht, sondern sie bewegen sich in der Richtung gegen das Kraftgefälle, da die Rauigkeit des Papiers nicht genügt, sie an ihrem Platz festzuhalten. Dadurch entstehen weiße Stellen im Kraftlinienbild. Diese sind also nicht das Zeichen eines verfehlten Kraftlinienbildes.

Das gegenseitige Verhalten der Eisenfeilteilchen in den Kraftlinien kann man mit zwei Eisendrahtstückchen nachweisen, die an dünnen Fäden hängen. Hält man sie in gleicher Höhe über einen Magnetpol, so stoßen sie einander ab und hängen parallel, da nun gleichnamige Pole einander gegenüberliegen und sich diese abstoßen. In gleicher Weise stoßen sich

die einander gegenüberliegenden Eisenteilchen benachbarter Kraftlinien ab. Hält man die Drahtstücke so, daß das eine die Fortsetzung des andern bildet, so legen sie sich zu einer Geraden zusammen; sie ziehen einander an, da nun ungleichnamige Pole einander gegenüberliegen. Ebenso ordnen sich die aufeinanderfolgenden Eisenteilchen in den Kraftlinien aneinander.

Das magnetische Feld befindet sich infolgedessen in einer Art Zwangszustand. In der Richtung der Kraftlinien herrscht eine Zugspannung; jede Kraftlinie sucht sich zu verkürzen, in eine Gerade zu verwandeln. Andererseits suchen sich die Kraftlinien seitlich gegenseitig zu verdrängen, was einen Druck senkrecht gegen die Kraftlinien zur Folge hat. Daraus folgt auch, daß sich die magnetischen Kraftlinien weder schneiden, noch kreuzen, noch durchdringen können.

Diese Eigenschaften der Kraftlinien in Verbindung mit der Tatsache, daß sich die magnetischen Felder zu einem resultierenden Feld verbinden können, liefern uns einen Schlüssel zur Erklärung der mechanischen Wirkungen im magnetischen Felde. Wir werden deshalb im folgenden öfters die Kraftlinienbilder untersuchen.

Anstatt durch Eisenfeilspäne können wir den Verlauf der Kraftlinien auch mit Hilfe einer kleinen, frei beweglich auf-

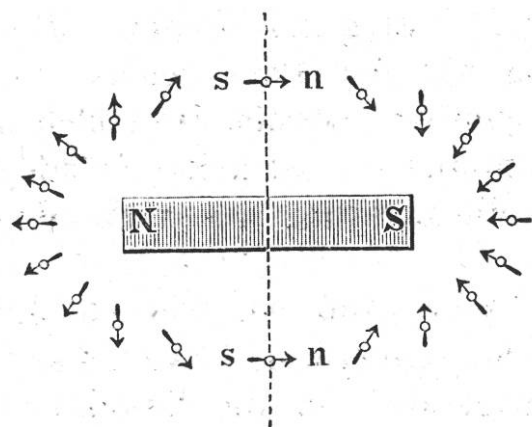


Fig. 1

gehängten magnetischen Nadel nachweisen. (Eine Nadel wird magnetisiert und durch ein Stückchen Kautschuk von etwa 3 mm Seite gesteckt. Senkrecht zu der Nadel zieht man durch den Kautschuk einen dünnen Faden zum Aufhängen. Damit das Verhalten der Magnetnadel auf größere Entfernung sichtbar sei, wird der Nordpol

mit einer blauen, der Südpol mit einer roten Markkugel versehen.) Wenn wir die Nadel durch das Kraftfeld führen (Fig. 1), gibt sie an jeder Stelle die Richtung der magnetischen Kraft an. Dabei zeigt der Nordpol der Magnetnadel vom Nordpol des Magneten weg und gegen den Südpol hin. Man bezeichnet die Richtung, in der sich der Nordpol der frei beweglichen Magnetnadel bewegt, als die positive Richtung der Kraft-

linien. Die Kraftlinien strahlen also vom Nordpol aus, durchsetzen den Luftraum um den Magneten herum und treten beim Südpol wieder in den Magneten ein. Der Nordpol ist das Quellgebiet, der Südpol das Sinkgebiet der magnetischen Kraftlinien.

Man nimmt an, daß die Kraftlinien innerhalb des Magneten vom Südpol zum Nordpol verlaufen, daß sie also geschlossene Linien bilden. Demzufolge kann niemals ein Magnet mit nur einem Pol bestehen.

Wenn wir die Magnetnadel über dem Magneten vorbeiführen, bemerken wir, daß sie sich nicht etwa an den Enden senkrecht stellt, sondern etwas innerhalb derselben. Wir erkennen, daß die magnetischen Pole nicht an den Enden der Magnete liegen. Sie sind um $\frac{5}{6}$ der Länge des Magneten voneinander entfernt, liegen also bei unsern Stabmagneten von 27 cm Länge etwa 2,3 cm von den Enden entfernt.

Die Energie, mit der die Nadel schwingt, erlaubt einen Schluß auf die Stärke des magnetischen Feldes im betreffenden Punkt.

Das magnetische Feld wird durch die Natur des umgebenden Mittels nicht beeinflußt, insofern dieses Mittel nicht magnetisch beeinflußt werden kann. Die Magnetnadel ändert deshalb ihre Richtung nicht, wenn wir zwischen sie und den Magneten die verschiedensten Körper bringen. (Die am Faden hängende Magnetnadel wird über einem Pol des Stabmagneten oder des Elektromagneten aufgehängt, so daß ein Zwischenraum von 2 bis 3 cm vorhanden ist. In diesen Zwischenraum bringt, man ein Buch, ein Brettstück, eine Glasplatte, ein Messing-, Blei-, Zink-, Aluminiumblech etc.) Die Magnetnadel verliert aber ihre Orientierung nach dem Magneten, wenn wir eine genügend dicke und große Eisenplatte in den Zwischenraum bringen. Daß die Körper außer Eisen für den Verlauf der Kraftlinien kein Hindernis sind, können wir auch nachweisen, indem wir auf ihnen mit Eisenfeilspänen das Kraftlinienbild sichtbar machen. Die Erklärung dafür, daß nur magnetisierbare Körper eine Schirmwirkung ausüben, erhalten wir später.

Das Kraftlinienbild kann im Schüler leicht die falsche Vorstellung erwecken, als ob die magnetische Kraft nur in den durch die Kraftlinien angegebenen Stellen wirksam sei, und daß die Zwischenräume zwischen den Kraftlinien

unmagnetisch seien. Diese falsche Vorstellung wird noch unterstützt, wenn der Schüler vernimmt, daß die Stärke des Magneten durch die Zahl der Kraftlinien ausgedrückt wird. Man wird darauf aufmerksam machen, daß die magnetische Kraft, wie das Licht, das von einer Lichtquelle ausgeht, den Raum gleichmäßig durchdringt, daß man ja auch von Lichtstrahlen redet. Die Feilspanlinien geben nur die Richtung der wirkenden Kraft an, sie sind das Ergebnis von magnetischer Anziehung und Abstoßung zwischen den Eisenfeilteilchen. Das Messen

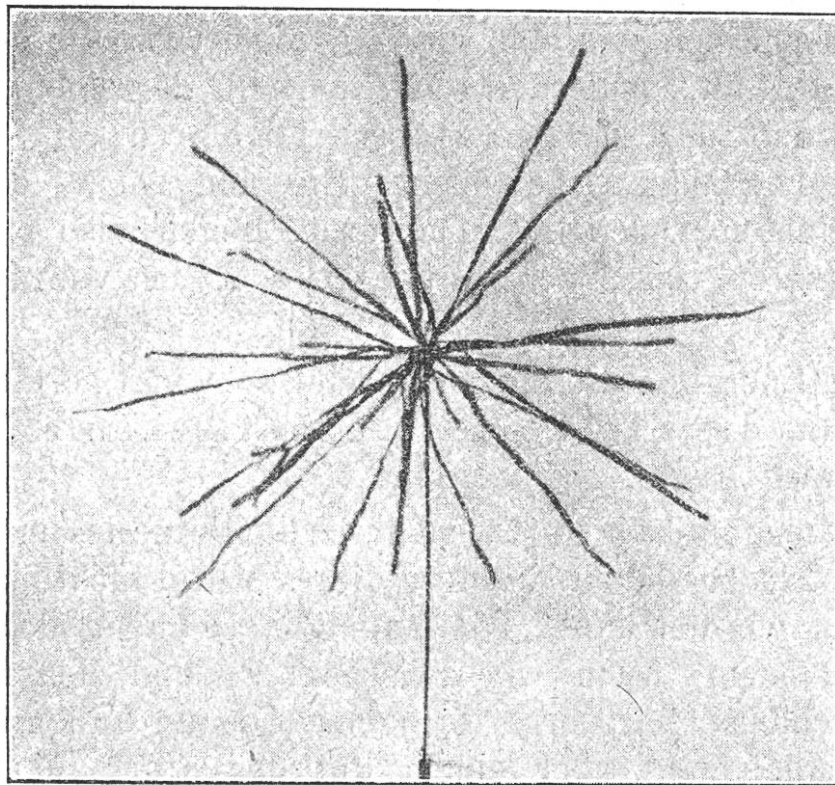


Fig. 2

der Stärke der Magneten mit der Zahl der Kraftlinien beruht wie alle Messungen auf willkürlichen Annahmen.

Wechselwirkung zwischen zwei Magneten.

Die Anziehung ungleichnamiger Pole und die Abstoßung gleichnamiger Pole erklärt sich aus den Kraftlinienbildern. Liegen gleichnamige Pole einander gegenüber (Fig. 22 b), so treffen die Kraftlinien aufeinander; sie haben nichts miteinander gemein, sie stoßen einander ab, da in den benachbarten Kraftlinien sich gleichnamige Pole gegenüberliegen. Befinden sich aber ungleichnamige Pole einander gegenüber (Fig. 21 b), so verlaufen die Kraftlinien in der gleichen Richtung, sie gehen ineinander über, suchen sich zu verkürzen, ziehen einander an.

Sie kennen den Versuch, zwei Stabmagnete mit den gleichnamigen Polen aufeinander zu legen mit Zwischenlage eines Geldstückes als Achse. Die Schüler sind in den Schülerübungen darauf gekommen und haben ferner gefunden, man könnte eine fortdauernde Rotation herbeiführen, wenn man im Augenblick, da die ungleichnamigen Pole aufeinander liegen, in einen der beiden Magnete die Pole vertauschen könnte. Den Gedanken kann man durchführen, wenn der Elektromagnet bekannt ist. Über einen wagrecht liegenden Elektromagneten

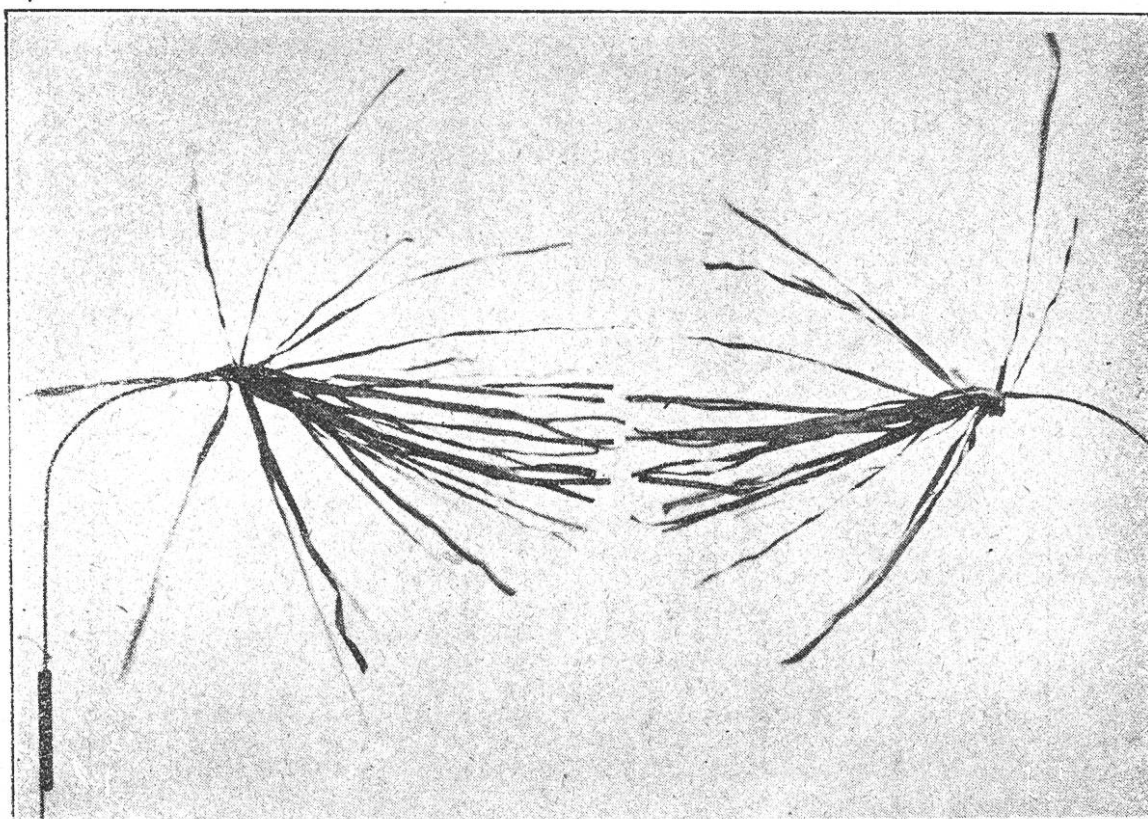


Fig. 3

von den Dimensionen des Stabmagneten wird ein Stabmagnet im Aufhängehaken aufgehängt. Wie dieser eine Drehung von 180° ausgeführt hat, wird im Elektromagneten die Stromrichtung umgekehrt.

Statt der Ihnen wohlbekannten magnetischen Kraftlinienbilder führe ich Ihnen im Versuch die elektrischen Kraftlinienbilder vor. Das elektrische Papierbüschel mit seinen nach allen Richtungen sich sträubenden Papierstreifen (Fig. 2) gibt das Kraftlinienbild eines kugelförmigen Leiters. Die Papierstreifen von zwei ungleichnamig geladenen Papierbüscheln (Fig. 3) streben einander zu, diejenigen von zwei gleichnamig geladenen Papierbüscheln (Fig. 4) stoßen einander ab. Nähert

man einem geladenen Papierbüschel einen geerdeten Leiter, so streben ihm die Streifen entgegen und geben wieder die Richtung der Kraftlinien an. Diese Versuche haben den Vorteil, daß das Bild nicht wie bei den magnetischen Kraftlinienbildern ein bloßer Querschnitt ist, sondern ein räumliches Gebilde.

Weiches Eisen im magnetischen Felde.

Weiches Eisen, das in ein magnetisches Feld gebracht wird, verändert den Verlauf der Kraftlinien. Wir erkennen

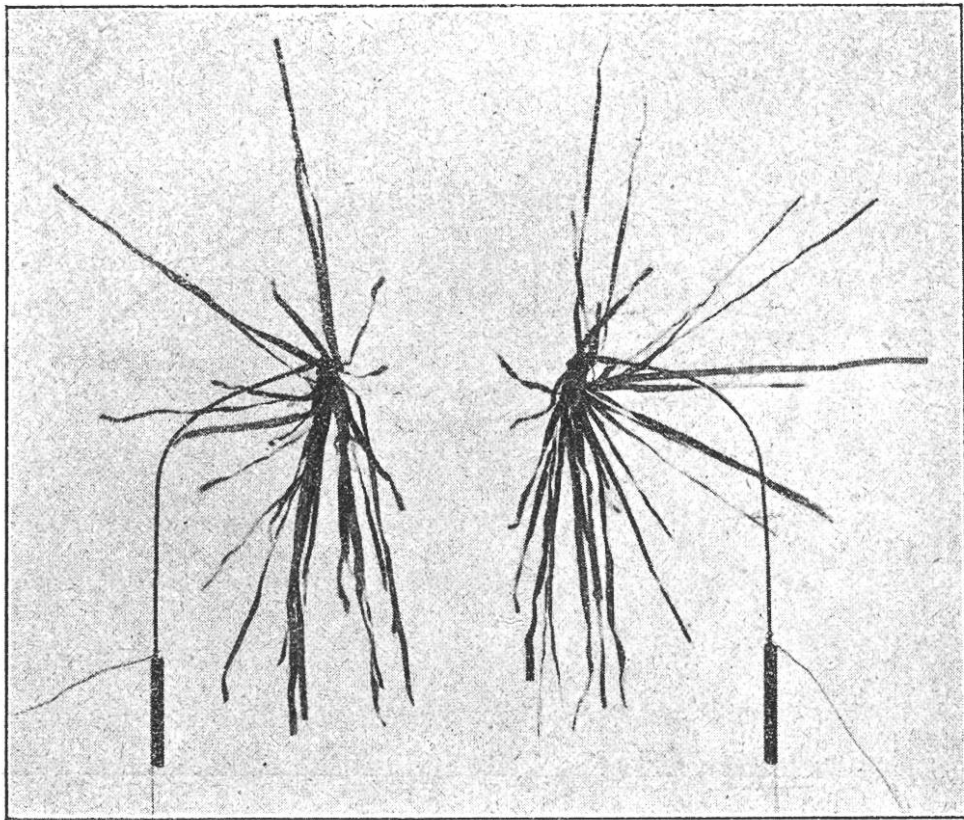


Fig. 4

aus den Kraftlinienbildern (Fig. 5 und 34), daß die Kraftlinien gleichsam in das Eisen hineingesogen werden; das Eisen ist für sie durchlässiger als die Luft. Im Eisenstück ordnen sich dabei die Molekularmagnete wie die Eisenfeilteilchen in der mit Eisenfeilspänen gefüllten Glasröhre, wenn sie mit einem Magneten gestrichen wird. Unter den verschiedenen Kraftlinienbildern dieser Art interessiert namentlich dasjenige, das den Kraftlinienverlauf im vierpoligen Trommelanker veranschaulicht (Fig. 5). (Um den Eisenring werden vier Stabmagnete im Kreuz angeordnet, so daß abwechselnd Nord- und Südpole nach innen schauen.)

Nun besitzen wir eine Erklärung für die beobachtete Schirmwirkung des Eisens. Wenn wir die freibewegliche Magnetnadel in das magnetische Feld bringen, stellt sie sich so, daß die Kraftlinien des Feldes im gleichen Sinne durch ihre Länge gehen, wie die eigenen inneren Kraftlinien, d. h., daß die vom Nordpol des Magneten ausstrahlenden Kraftlinien beim Südpol der Nadel ein- und beim Nordpol austreten (Fig. 6 a). Wenn wir nun ein Eisenblech von genügender Größe und Dicke zwischen den Magneten und die Magnetnadel bringen,

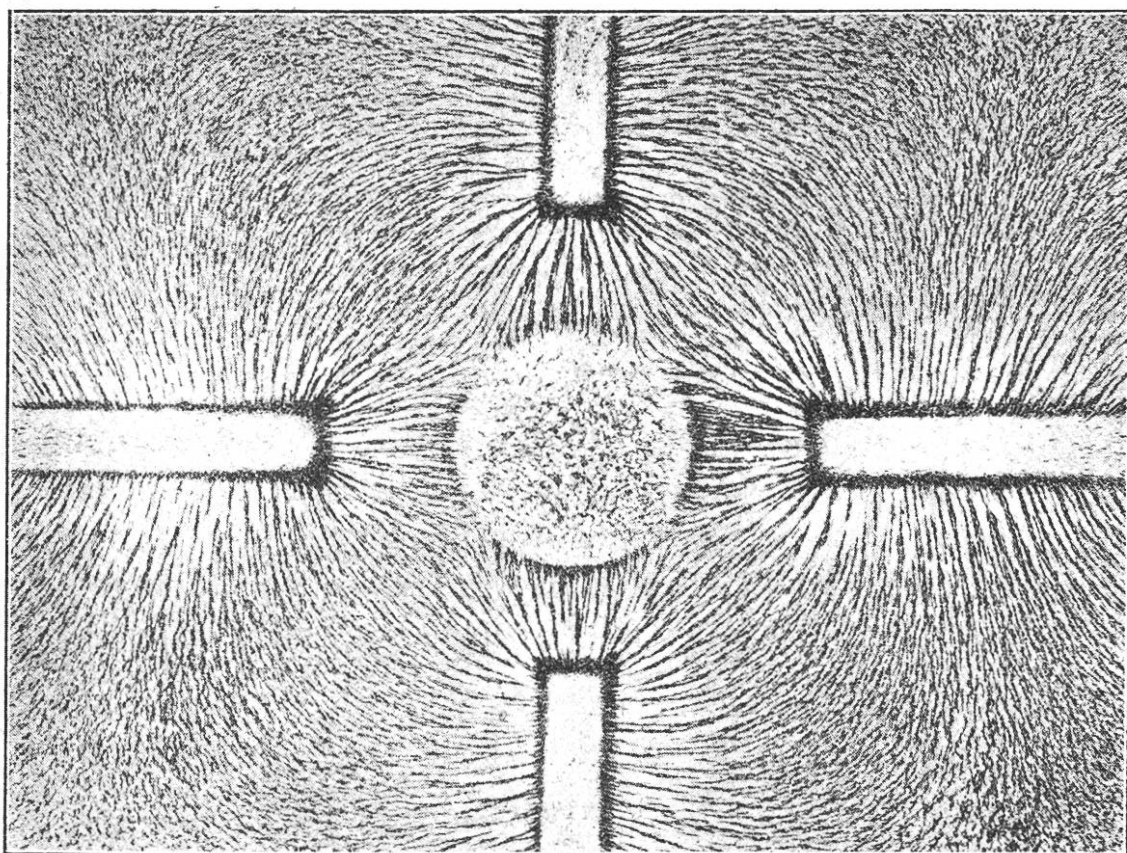


Fig. 5

verlaufen die Kraftlinien des Magneten in diesem und durchdringen es, nicht (Fig. 6 b), so daß die Nadel nicht mehr unter ihrem Einfluß steht und sich in das Erdfeld, in die N-S-Richtung, einstellt. (Den Magneten mit dem Nordpol nach N gerichtet legen!)

Die Eigenschaft der Schirmwirkung des Eisens ist praktisch von Bedeutung. Bringt man in ein magnetisches Feld eine Hohlkugel oder einen Hohlzylinder aus Eisen, so treten die Kraftlinien in die Wandungen ein, während der Hohlraum frei von Kraftlinien bleibt. (Siehe auch das Innere des Ringes

in Fig. 5.) Ein Apparat, z. B. ein Kompaß, der in den Hohlraum gebracht wird, ist dem Einfluß des magnetischen Feldes entzogen.

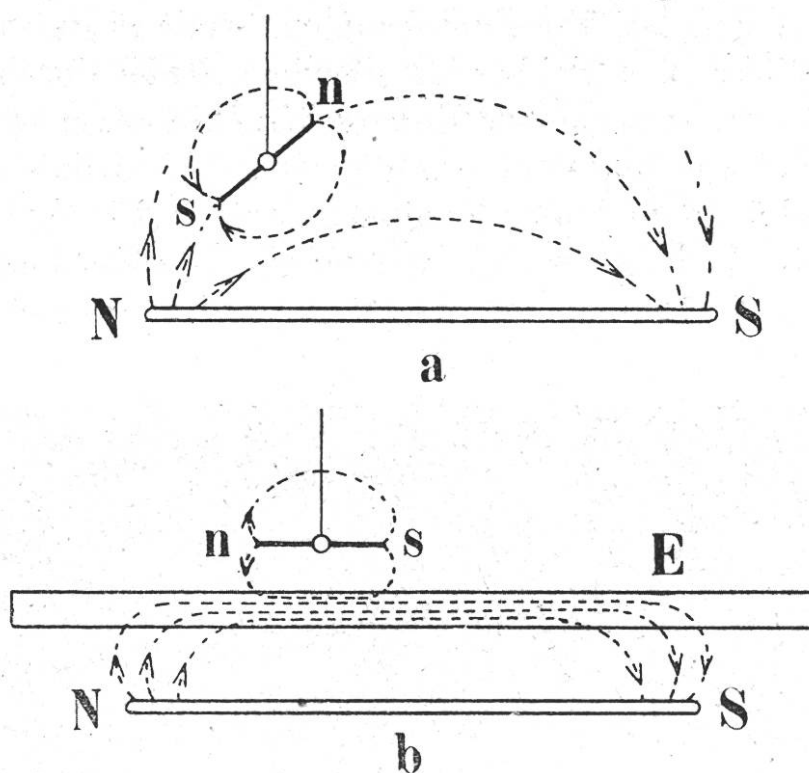


Fig. 6

Die elektrischen Maschinen werden so gebaut, daß möglichst viele Kraftlinien durch das Eisen verlaufen, und möglichst wenig durch die Luft, daß die Streuung ein Minimum sei; darum wird auch die Entfernung der Magnetpole vom Anker auf ein Minimum reduziert.

Ich kann den Abschnitt über den Magnetismus nicht schließen, ohne darauf hinzuweisen, daß sich beinahe sämtliche Versuche zur Durchführung in den Schülerübungen eignen und daß ihnen die Schüler großes Interesse entgegenbringen.

Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes.

Das Kraftfeld eines Stromleiters.

Nicht bloß der Magnet, auch der stromdurchflossene Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben. Um die Kraftlinien mit einem einzelnen stromdurchflossenen Leiter nachweisen zu können, müßten wir eine Stromstärke von mindestens 20 Ampère verwenden. Da der uns zur Verfügung stehende Strom schwach ist, bilden wir einen Strang von Stromleitern. (In ein Brettchen schlagen wir vier Nägel, die die Ecken eines Rechteckes bezeichnen, und wickeln den isolierten Leitungsdraht von 0,5 bis 0,8 mm Dicke mindestens 20mal herum. Die Windungen werden gebunden und mit Schellacklösung bestrichen; sie bilden nach dem Trocknen ein Ganzes.) Wir nennen die Vorrichtung in Zukunft Draht-

viereck. Legen wir auf den Leiterstrang einen Karton, den wir mit Eisenfeilspänen bestreuen, so ordnen sich diese in Linien, die zum Leiter senkrecht stehen. Das erhaltene Bild ist eigentlich nur der Grundriß der Kraftlinien. Lassen wir den Leiter senkrecht durch die Papierfläche gehen, und streuen wir Eisenfeilspäne auf, so entstehen Kraftlinien, die den Leiter in konzentrischen Kreisen umgeben, deren Ebene senkrecht auf dem Leiter steht (Fig. 7). Sie umhüllen den Leiter auf dessen ganze Länge und bilden in Wirklichkeit Krafttröhren.

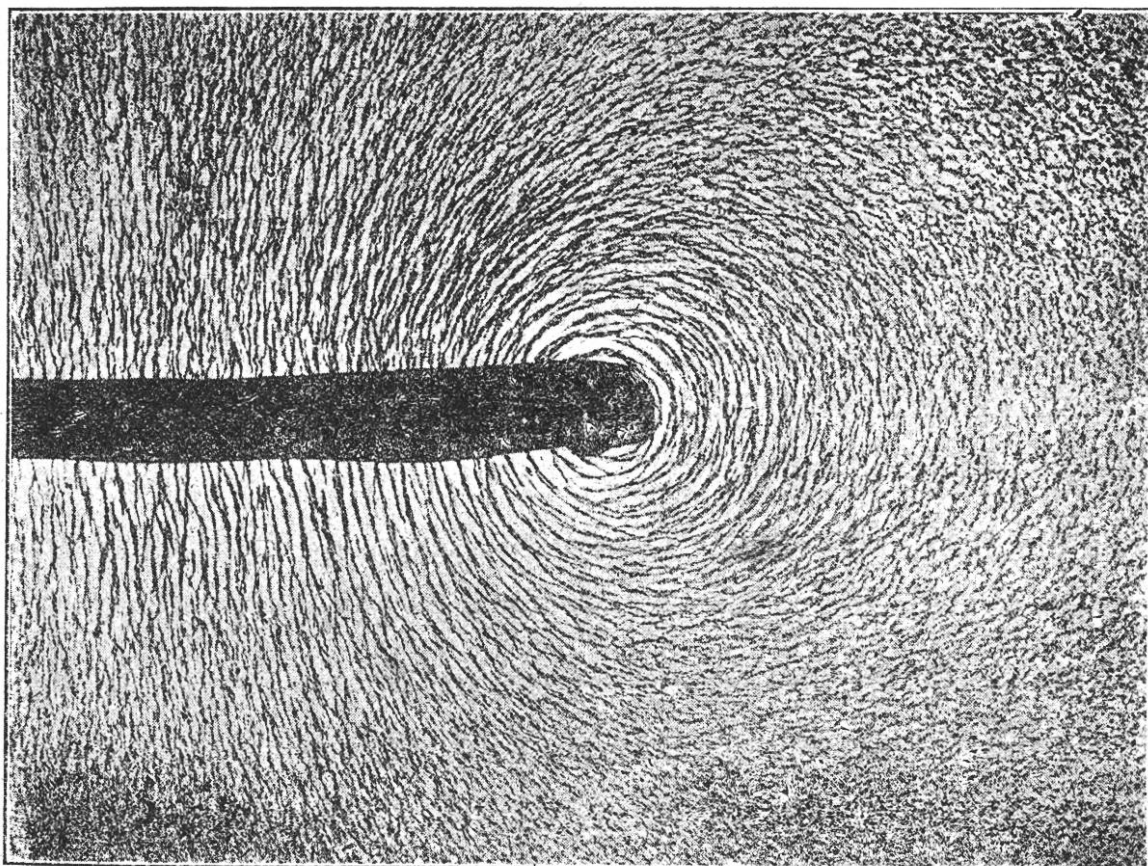


Fig. 7

Die Richtung der Kraftlinien kann mit der an einem Faden hangenden kleinen Magnethadel nachgewiesen werden. Wir führen sie um den Leiter herum. Der Nordpol gibt die Richtung der Kraftlinien an (Fig. 8). Wenn wir die Stromrichtung ändern, so ändert sich auch die Richtung der Nadel. Wir gewinnen die Handregel: Halten wir die rechte Hand so an den Leiter, daß der Daumen in der Richtung des Stromes zeigt, dann geben die Finger die Richtung der Kraftlinien an.

Das Kraftfeld der Drahtschleife und der Drahtspule.

Biegen wir den Leiter zu einer Schleife (einem Ring) (Fig. 9) so treten die Kraftlinien auf der einen Seite in den Hohlraum ein, auf der andern Seite aus, wie mit der kleinen Magnetnadel nachgewiesen werden kann und wie sich auch aus der Handregel ergibt. Die Schleife hat eine Nord- und

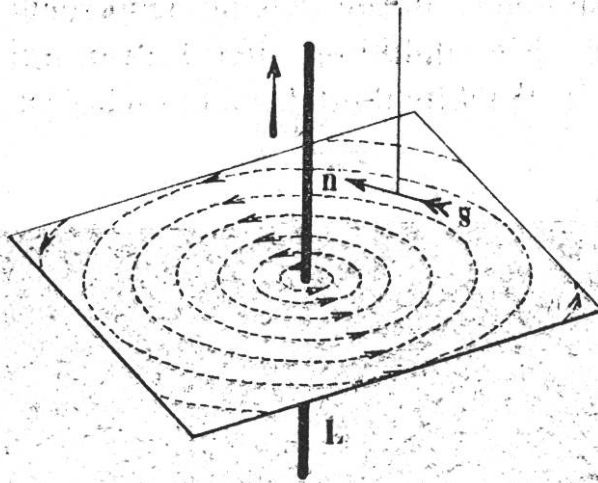


Fig. 8

eine Südseite, sie gleicht einem flächenförmigen Magneten. Von der Südseite gesehen kreist der Strom mit dem Uhrzeiger, als Zeigerstrom, von der Nordseite gesehen gegen den Uhrzeiger als Gegenzeigerstrom.

Hängen wir die Schleife im Ampèreschen Gestell frei drehbar auf, so stellt sich ihre Ebene in die Ost-West-

richtung, ihre magnetische Achse in den magnetischen Meridian ein, wie eine Magnetnadel angibt, die wir in der Schleife aufhängen. Kehren wir den Strom um, so macht zuerst die Magnetnadel, dann die Schleife eine Drehung von 180° . Warum stellt sich die im Ampèreschen Gestell aufgehängte Schleife in die Ost-Westrichtung? Wie die freibewegliche Magnetnadel zeigt, stellt sich ein frei beweglicher magnetischer Körper in einem magnetischen Feld immer so, daß eine möglichst große Zahl von Kraftlinien des Feldes im gleichen Sinne wie die eigenen Kraftlinien durch ihn hindurchgehen, also beim Südpol ein- und beim Nordpol austreten. Das Kraftfeld, nach dem sich die Schleife einstellt, ist das Erdfeld. Am meisten Kraftlinien des Erdfeldes gehen durch die Ebene des Drahtviereckes, wenn sich dessen Fläche senkrecht zum Erdfeld stellt und von der Südseite gesehen der Strom mit dem Uhrzeiger kreist. Daher macht die Schleife auch eine Drehung von 180° , wenn die Stromrichtung umgekehrt wird.

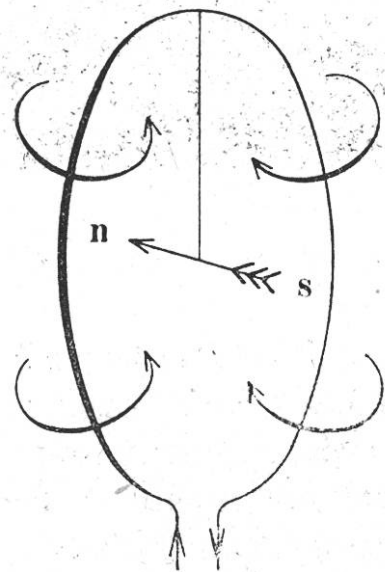


Fig. 9

Die Vereinigung vieler Schleifen ergibt eine Spule (ein Solenoid). Die Kraftfelder der einzelnen Schleifen setzen sich

zusammen zu einem Kraftfeld. Die Spule hat ein Kraftfeld, das dem des Stabmagneten entspricht (Fig. 10). Bei der Spule können wir aber die Kraftlinien durch das Innere verfolgen. Wenn wir in die Spule einen Kartonstreifen legen, der mit Eisenfeilspänen bestreut ist, so bemerken wir, daß sich diese in parallelen Linien in der Längsrichtung der Spule anordnen.

Mit der kleinen Magnetenadel können wir die Richtung der Kraftlinien und damit die Pole der Spule bestimmen. Wir finden die Regel: Legen wir die rechte Hand an die Spule, so daß die Finger in der Stromrichtung zeigen, dann weist der Daumen nach dem Nordpol. Am Südpol ist der Strom ein Zeigerstrom, am Nordpol ein Gegenzeigerstrom.

Die Übereinstimmung der magnetischen Verhältnisse von Magnet und stromdurchflossener Spule führte Ampère zur Aufstellung seiner Theorie des Molekularmagnetismus. Legen wir die rechte Hand so an den Magneten, daß der Daumen in der Richtung des Nordpols zeigt, dann geben die Finger die Richtung der hypothetischen Ampèreschen Ströme an.

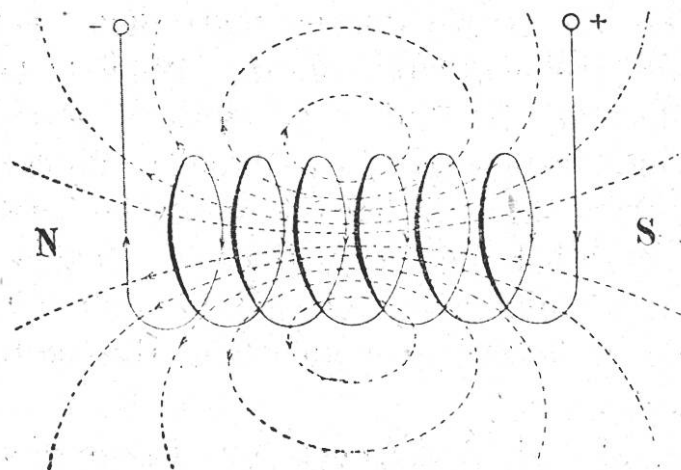


Fig. 10

Die an die Mündung der Spule gehaltene Magnetenadel wird in die Spule hineingezogen, wenn der Strom durchgeschickt wird. Wenn die Stromrichtung umgekehrt wird, so wird die Nadel zuerst abgestoßen, dann macht sie eine ganze Drehung und wird wieder angezogen. Stücke von weichem Eisen, eine Rolle aus Eisenblech, schweben frei in der stromdurchflossenen Spule. Hängt man einen Eisenkörper an einer Feder auf, so daß er wenig in die Spule hineinragt, so wird er beim Schließen des Stromes hineingezogen, um so tiefer, je stärker der Strom ist. Der Versuch erklärt das Prinzip der Feder-Volt- und Ampèremeter und der Regulierung der Bogenlampe.

Bringt man in das Innere der Spule einen Eisenkern, so laufen die Kraftlinien durch seine Länge. Die Molekularmagnete des Eisens werden durch die Kraftwirkung der Spule geordnet, der Eisenkern wird magnetisch. Wir umwickeln

eine Glasröhre von 2 bis 3 mm lichter Weite und der Länge einer Stricknadel mit einer Lage isolierten Kupferdrahtes. Eine in die Glasröhre gelegte stählerne Stricknadel wird durch den Strom kräftig magnetisiert. Wenn wir den Sinn der Wicklung mehrmals ändern, in unserem Apparat geschieht dies dreimal, so entstehen längs der Nadel mehrere Pole, sogenannte Folgepole, wie wir mit Hilfe der Magnetnadel und durch Herstellen des Kraftlinienbildes nachweisen können.

Der Elektromagnet.

Der Elektromagnet ist weit wirksamer als der künstliche Magnet. Der im Vortrag verwendete Elektromagnet (Fig. 16, 26, 30) trägt bei Verwendung des Gleichrichters als Stromquelle 180 kg. Er ist geeignet, den Schülern eine Vorstellung von der Größe der magnetischen Kraft zu geben. Man kann mit Hubmagneten ganze Bündel von Röhren, Stöße von Blechen, Haufen von Masseln u. s. w. direkt anheben und weitertransportieren. Manche Werkzeugmaschinen sind mit elektromagnetischen Spannplatten versehen, die ein aufgelegtes Werkstück sofort festhalten. Solche magnetische Aufspannvorrichtungen eignen sich besonders für Stücke, welche durch die üblichen mechanischen Hilfsmittel nicht leicht festzuhalten sind.

Durch Aufstreuen von Eisenfeilspänen auf die Pole des Elektromagneten kann gezeigt werden, daß die Kraftlinien in den Raum hinauswachsen. Ein Haufen kleiner Nägel wird an den Polen zu einer plastischen Masse; man muß die Schüler diese formen lassen. Schlüssel, große Nägel, die man aus einiger Höhe zwischen die Halbanker fallen läßt, werden angehalten. Kleinere Nägel stellen sich zwischen den Halbankern in die Richtung der Kraftlinien. (Verpacken der Nägel in der Nagelfabrik.) Es gelingt kaum, mit der Messerklinge das Kraftfeld zwischen den nahe gestellten Halbankern zu durchschneiden.

Das verschiedenartige Verhalten von weichem Eisen und von Stahl beim Magnetisieren kann durch folgenden Versuch nachgewiesen werden: An einem Gestell sind zwei Rundstäbe gleicher Dimensionen aus weichem Eisen und aus Stahl befestigt. ($D = 1$ cm.) Sie sind mit der gleichen Zahl Windungen des gleichen isolierten Kupferdrahtes versehen, die hintereinander geschaltet sind. Man schickt den Strom durch und

hält an das untere Ende der Stäbe eine Schachtel mit kleinen Nägeln. Beide Stäbe beladen sich mit solchen; wenn man aber den Strom unterbricht, fallen am Eisenstab die Nägel bis auf einen oder zwei ab, während vom Stahlstab fast keine Nägel abfallen. Eisen ist nur so lange magnetisch, als der Strom andauert, Stahl dagegen behält einen großen Teil des Magnetismus bei, er wird dauernd magnetisch. Im weichen Eisen kehren die Molekularmagnete leicht wieder in ihre frühere Lage zurück; im Stahl widerstreben die Molekularmagnete einer Umlagerung, sie verharren in der einmal angenommenen Lage. Stabmagnete und Magnetnadeln, die ihren Magnetismus zum Teil verloren haben, kann man auffrischen, in dem man sie für kurze Zeit in eine passende, stromdurchflossene Spule legt. Als Kern für Elektromagnete, die ihren Magnetismus rasch verlieren sollen, wie in Telegraphenapparaten, Läutwerken etc., eignet sich aus diesem Grunde nur weiches Eisen, während für Dauermagnete Stahl, besonders Wolframstahl, verwendet wird.

Auf die verschiedenen Verwendungen des Elektromagneten einzutreten, gehört nicht in den Rahmen dieses Vortrages.

Wechselwirkung zwischen stromdurchflossenem Leiter und Magnet.

Da der stromdurchflossene Leiter von einem magnetischen Felde umgeben ist, übt er auf die freibewegliche Magnetnadel eine Wirkung aus; sie wird aus ihrer Richtung abgelenkt. Diese von Oersted 1820 beobachtete Erscheinung wird bekanntlich in der Ampèreschen Schwimmerregel oder der Daumenregel zusammengefaßt: Legt man die rechte Hand so an den Leiter, daß die Handfläche der Magnetnadel zugekehrt ist und der Strom in der Richtung der Finger fließt, dann wird der Nordpol der Nadel in der Richtung des Daumens abgelenkt. Der denkende Mensch begnügt sich aber nicht mit der Kenntnis der Tatsache, er möchte die Ursache kennen. Wir müssen dem Schüler zeigen, warum die Nadel in der Richtung des Daumens und nicht in der des kleinen Fingers abgelenkt wird. Die Erklärung gibt das Kraftlinienbild in einer Ebene, die wir senkrecht zu Magnet und Leiter am Nordpol legen.

Der Stabmagnet wird zu diesem Zwecke mit dem Nordpol nach oben im Stativ befestigt. Etwa 5 cm entfernt wird parallel

dazu ein stromdurchflossenes Leiterbündel geführt. Auf den Magneten wird ein Blatt Papier gelegt, das den Leiter senkrecht schneidet. Streuen wir Eisenfeilspäne auf, so erhalten wir ein Kraftlinienbild, das durch das Zusammenwirken der beiden Kraftfelder (Fig. 11 a) entsteht (Fig. 11 b). Wenn im Leiter der Strom von unten nach oben fließt, so vereinigen sich die beiden Felder auf der rechten Seite, sie fließen hier ineinander, während links die Kraftlinien aufeinander stoßen, einander ausweichen. Im Kraftfeld um den Magneten herrscht rechts eine Zugwirkung, links eine Stoßwirkung. Wenn der Magnet beweglich ist, so wird somit sein Nordpol nach rechts

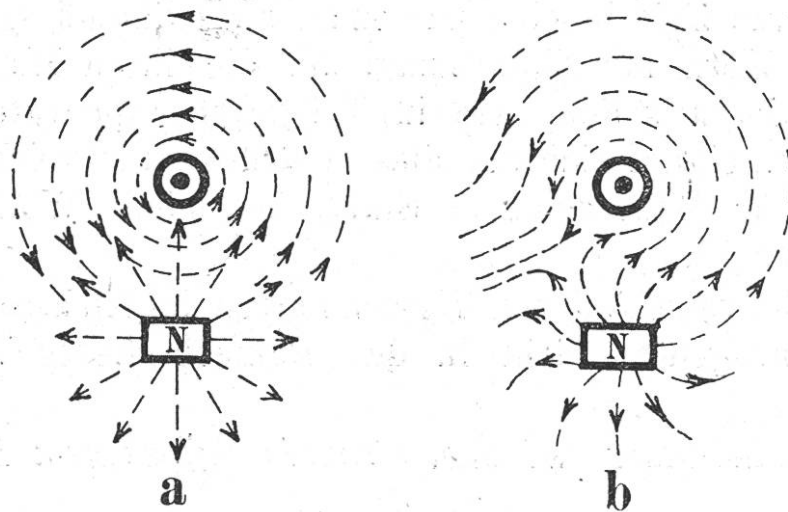


Fig. 11

getrieben. Fließt der Strom im Leiter von oben nach unten (Fig. 12), so fließen die Kraftlinien links ineinander und stoßen sich rechts ab. Der Nordpol des beweglichen Magneten weicht nach links aus.

Nach dem Gesetz von Wirkung und Gegenwirkung vermag natürlich auch der Magnet dem Stromleiter einen Bewegungsantrieb zu geben. Wenn man unter den horizontalen Schenkel des Drahtvierecks, das im Ampèreschen Gestell aufgehängt ist, die Magnetnadel bringt, so wird sie abgelenkt, wenn das Drahtviereck festgehalten wird. Wenn man aber die Magnetnadel festhält, so wird das Drahtviereck in der entgegengesetzten Richtung abgelenkt.

Die Wechselwirkung zwischen Strom und Magnet kann auch mit Hilfe der Wage nachgewiesen werden. Man legt einen Stabmagneten auf die eine Wagschale und stellt Gleichgewicht her. Führt man nun vor dem Nordpol einen Strom von rechts nach links, senkrecht auf die Richtung des Magneten,

so bewegt sich der Magnet nach unten. Das Kraftlinienbild (Fig. 13 a) erklärt uns die Erscheinung. Oben im Kraftfeld treffen die Kraftlinien von Magnet und Stromleiter aufeinander, sie stoßen einander ab. Unten aber fließen die Kraftlinien im gleichen Sinn und ziehen einander an. Oben erfolgt also ein Druck, unten ein Zug, dem der Magnet folgt. Wenn der Strom von links nach rechts fließt (Fig. 13 b), so kehren sich

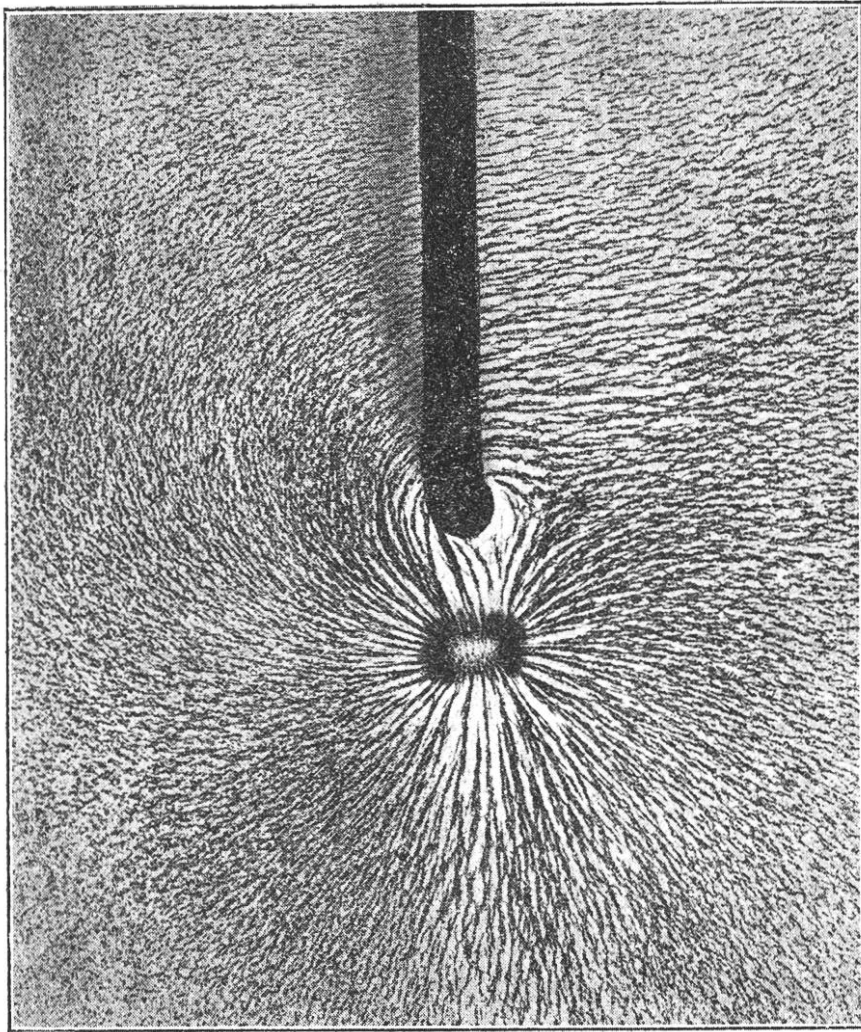


Fig. 12

die Verhältnisse um, die Abstoßung erfolgt unten, die Anziehung oben, die Wagschale mit dem Magneten steigt. Hält man den Stromleiter, in dem der Strom von rechts nach links fließt, über den Nordpol, einige Zentimeter innerhalb des Endes (Fig. 13 c), so haben die Kraftlinien rechts im Feld des Stromleiters die gleiche Richtung wie die aus dem Magneten nach der obern Seite austretenden, die Bewegung erfolgt nach oben. Wenn man den Stromleiter bei gleicher Richtung des Stromes unter den Magneten hält (Fig. 13 d), so stoßen

die Kraftlinien des Stromes rechts auf die nach der untern Seite austretenden Kraftlinien des Magneten und treiben sie aufwärts. Die Wagschale mit dem Magneten steigt also wieder.

Daß der Magnet einem Leiter einen Bewegungsantrieb erteilen kann, können wir auch mit einem geschmeidigen Leiter nachweisen. Neben dem im Stativ senkrecht befestigten Stabmagneten lassen wir einen Lamettafaden herunterhängen. Schicken wir den Strom durch den Lamettafaden, so wickelt er sich in der Richtung der Ampèreschen Ströme in Spiralen um den Magneten. Kehrt man den Strom um, so wickelt

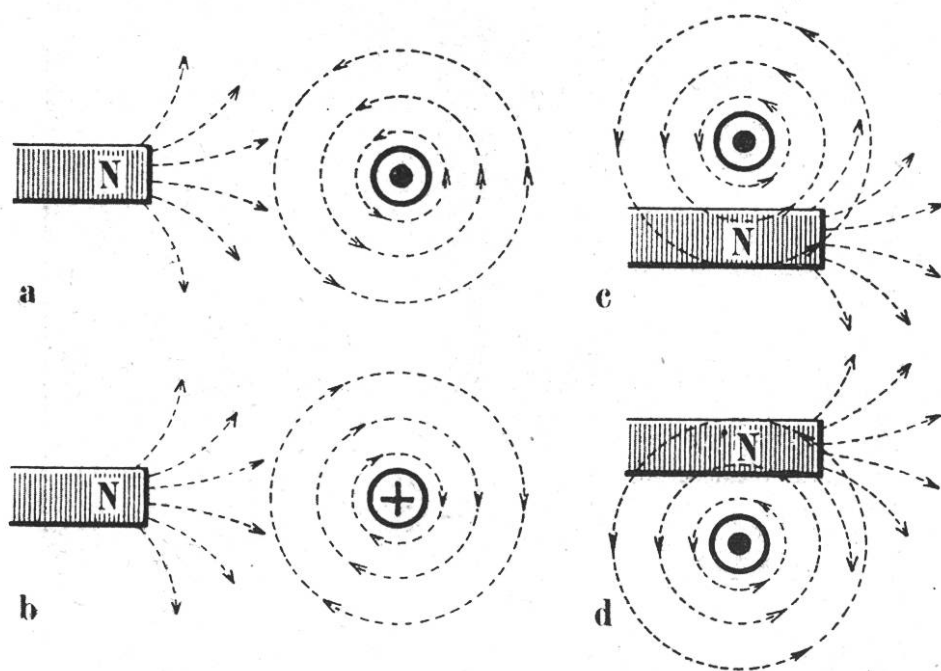


Fig. 13

sich der Faden zunächst ab und dann in entgegengesetzter Richtung wieder auf. Wenn wir zwei Stabmagnete mit den gleichnamigen Polen zusammenschrauben, so kehrt der Leiter in der Mitte seine Richtung um.

Die Bewegung eines Leiters im magnetischen Feld zeigen auch folgende Versuche:

Wenn man dem am Wagebalken befestigten ringförmigen Leiter, der vom Strom durchflossen ist, einen Magnetpol nähert, so wird der Leiter angezogen, wenn der Strom und die Ampèreschen Ströme gleichgerichtet sind (Fig. 14 a), abgestoßen, wenn sie entgegengesetzt gerichtet sind (Fig. 14 b). Die Erklärung ergibt sich auch aus folgender Betrachtung: Wenn der ringförmige Leiter auf der dem Magneten zugekehrten Seite von einem Zeigerstrom durchflossen wird, so ist diese Seite die Südseite (Fig. 15 a). Nähert man den

Nordpol des Magneten, so liegen ungleichnamige Pole einander gegenüber, die Kraftlinien laufen in gleicher Richtung; es erfolgt Anziehung. Nähert man den Südpol (Fig. 15 b), so befinden sich gleichnamige Pole einander gegenüber, die Kraftlinien fließen in entgegengesetzter Richtung; es erfolgt Abstoßung.

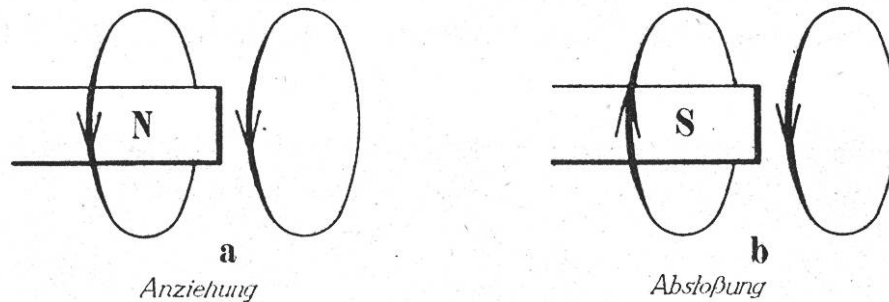


Fig. 14

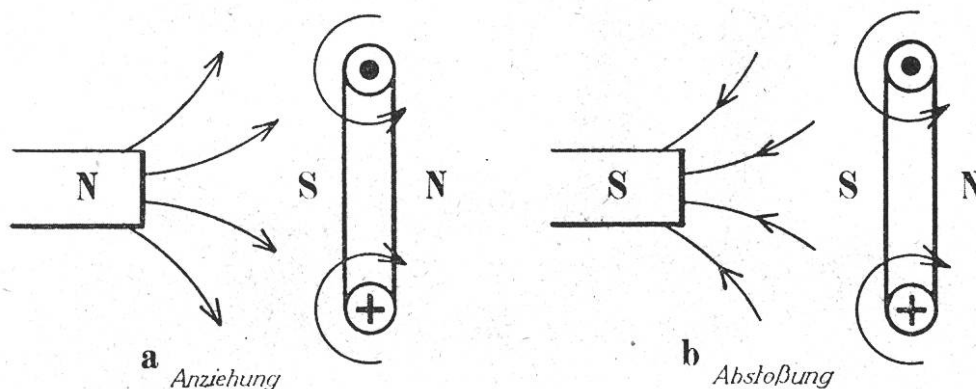


Fig. 15

Die Richtung der Bewegung, die ein stromdurchflossener Leiter im magnetischen Kraftfeld ausführt, erkennen wir durch folgenden Versuch: Zwischen die nahestellten Halbanker des Elektromagneten bringen wir eine Seite des am Wagebalken befestigten Drahtvierecks (Fig. 16.) Wenn der Strom geschlossen wird, so erfolgt eine Abstoßung, entweder nach oben oder nach unten. Haben die Kraftlinien die Richtung von uns weg, und fließt der Strom von links nach rechts, so wird der Leiter nach oben aus dem Kraftfeld geworfen. Wenn die Stromrichtung im Leiter umgekehrt wird, oder wenn die Pole des Elektromagneten gewechselt werden, dann bewegt sich der Leiter nach unten. Versucht man, den Leiter zwischen die Pole zu bringen, so verspürt man einen starken Widerstand, eine unsichtbare Kraft setzt sich der Bewegung entgegen.

Das Kraftlinienbild muß uns wieder Aufschluß darüber geben, was im Kraftfeld des Magneten vorgeht, wenn ein stromdurchflossener Leiter das Feld senkrecht zu den Kraftlinien schneidet. Der Versuch wird in folgender Weise angeordnet: Der rechteckige Leiter wird senkrecht eingespannt. Links und rechts von einem seiner Schenkel werden auf zwei Zigarrenkistchen zwei Stabmagnete in einer Geraden gelegt, die entgegengesetzten Pole einander zugekehrt; ihr Abstand

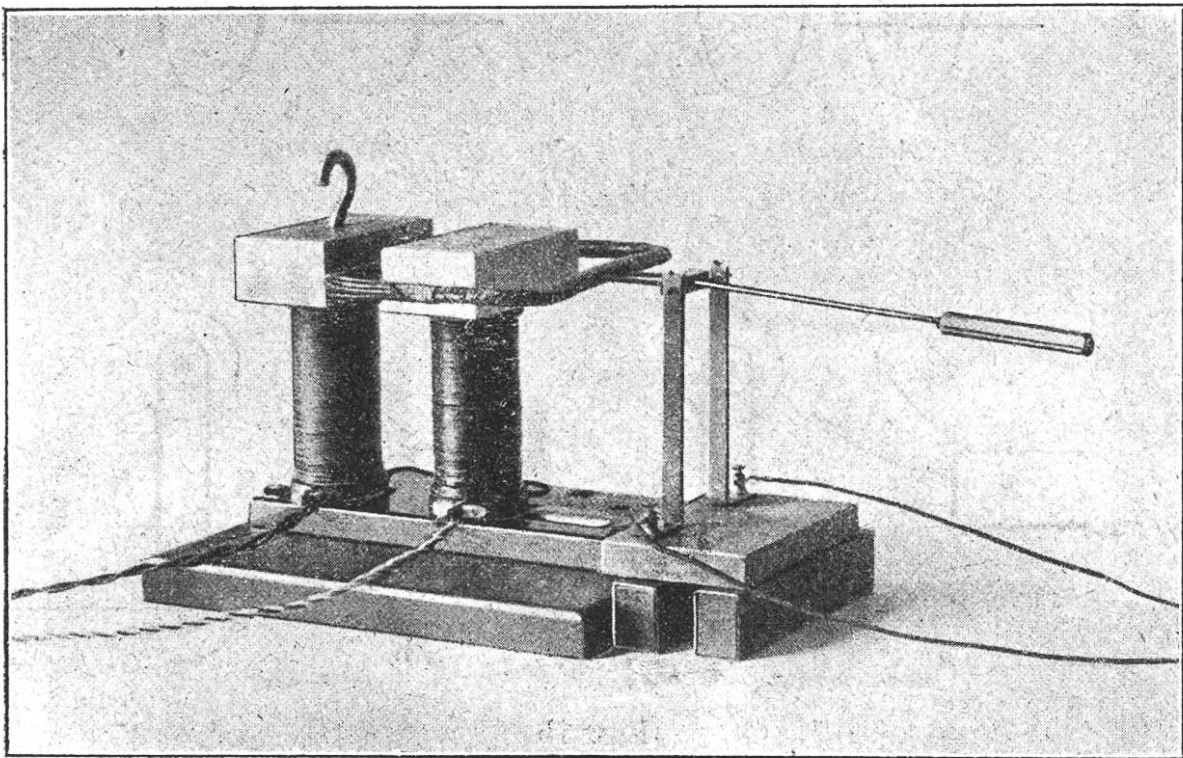


Fig. 16

soll 8 bis 10 cm betragen. Die Magnete werden mit einem Bogen steifen Papiers überdeckt, der für den Leiter einen Ausschnitt hat. Das Kraftlinienbild, das man beim Aufstreuen von Eisenfeilspänen bekommt (Fig. 17), zeigt, daß die Kraftlinien der Magnete durch die des Stromes eine starke Ablenkung erfahren. Links vom Schenkel des Drahtvierecks liegt ein Nordpol. Im Schenkel fließt der Strom von unten nach oben. Seine Kraftlinien kreisen deshalb in Gegenzeigerichtung. Die aus dem Nordpol fließenden Kraftlinien werden in ihrer Richtung abgelenkt, sie weichen nach unten aus. Da sie sich zu verkürzen suchen, wird der Leiter nach oben getrieben. In der schematischen Fig. 18 a wird das magnetische Feld als homogen angenommen die beiden Kraftliniensysteme,

das vom Strom und das der Magnete sind übereinandergezeichnet. Fig. 18b gibt das Ergebnis an; der Leiter wird nach oben getrieben.

Die Richtung der Bewegung des Leiters wird durch die Rechte-Hand-Regel ausgedrückt: Legt man die rechte Hand in der Richtung der Kraftlinien so an den Leiter, daß der Daumen in der Richtung des Stromes zeigt, dann erfolgt die Bewegung von der Handfläche weg.

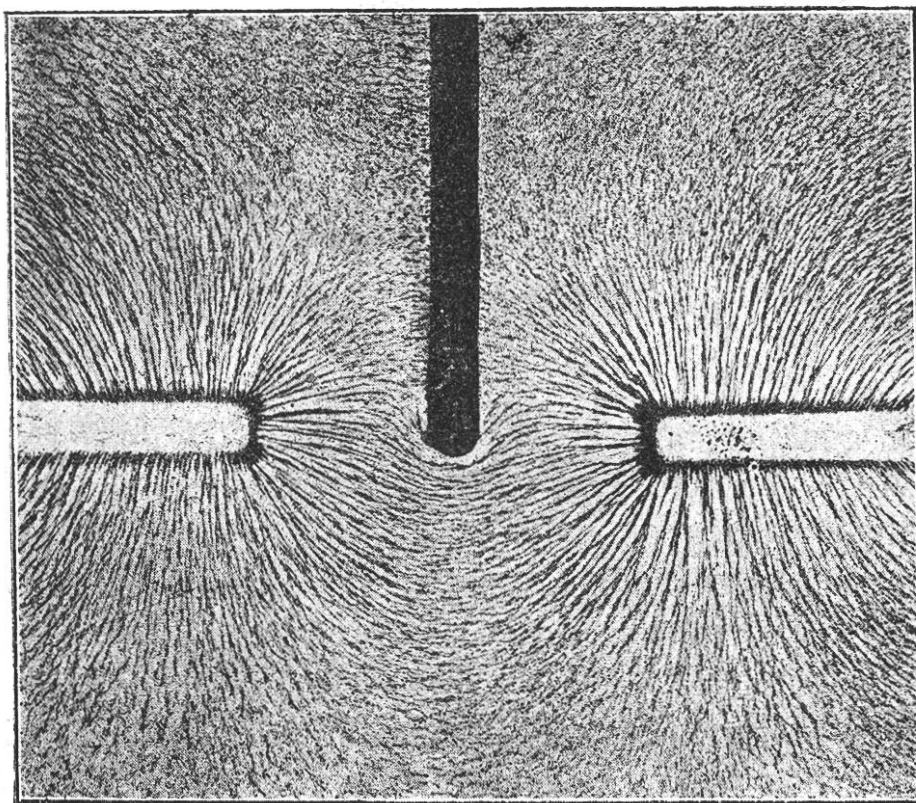


Fig. 17

Wechselwirkung zwischen stromdurchflossenen Leitern.

Das Kraftlinienbild, das wir von zwei benachbarten, stromdurchflossenen Leitern, in denen die Ströme in entgegengesetzter Richtung fließen, erhalten, läßt erkennen, daß sich die Ströme abstoßen (Fig. 19, links und rechts). Die beiden Kraftfelder haben keine gemeinsamen Kraftlinien, sie drängen sich gegenseitig weg. Das Bild entspricht dem Kraftlinienbild von zwei gleichnamigen Magnetpolen.

Wenn die Ströme gleichgerichtet sind (in den beiden mittleren Schenkeln), so umschließen die ersten Kraftlinien den Leiter für sich, die andern gehen ineinander über

und bilden geschlossene Linien. Die Kraftlinien treiben die beiden Systeme zusammen. Das Bild entspricht dem von ungleichnamigen Magnetpolen. (Fig. 19 zeigt zwei Drahtvierecke von oben. In den Schenkeln jedes der Vierecke sind die Ströme entgegengesetzt gerichtet — links und rechts in der Zeichnung —, die Kraftlinien stoßen sich ab. In den zwei

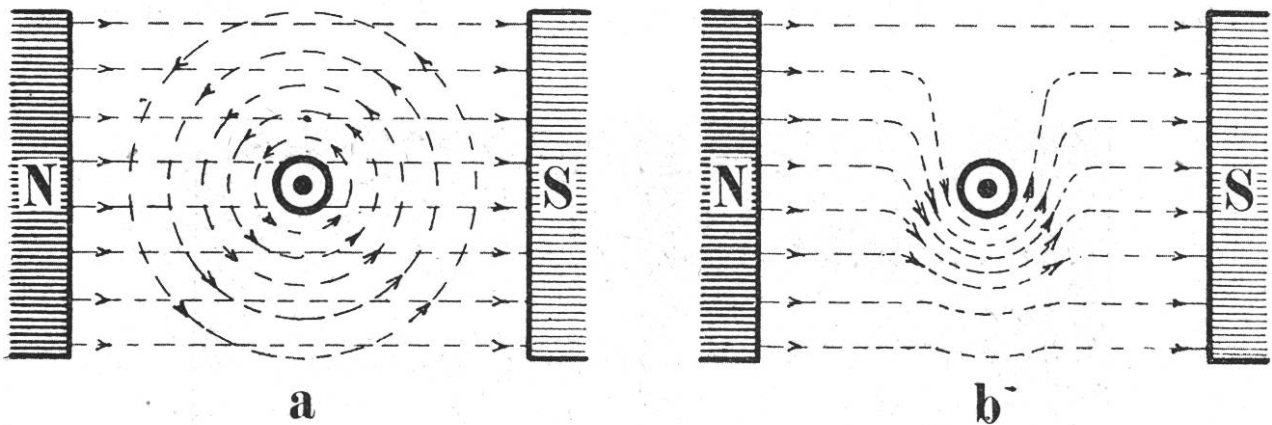


Fig. 18

einander genäherten Schenkeln der beiden Drahtvierecke — in der Mitte der Zeichnung — sind die Ströme gleichgerichtet, die Systeme ziehen einander an.)

Die sich ergebende Regel lautet: Gleichgerichtete Ströme ziehen einander an, entgegengesetzt gerichtete Ströme stoßen einander ab.

Die Wechselwirkung benachbarter Stromleiter wird auch durch folgende Versuche nachgewiesen:

Dem im Ampèreschen Gestell beweglich aufgehängten, stromdurchflossenen Drahtviereck nähert man ein zweites stromdurchflossenes Drahtviereck. Je nach der Stromrichtung findet Anziehung oder Abstoßung statt.

Die Rogetsche Spirale (Fig. 20) besteht aus Aluminium- oder Kupferdraht. Ihr unteres Ende taucht in ein Näpfchen mit Quecksilber, durch das der Strom geleitet wird. Schickt man den Strom durch die Spirale, so ziehen sich die Windungen an, da in ihnen der Strom gleichgerichtet ist. Dadurch verkürzt sich die Spirale und das untere Ende tritt aus dem Quecksilber, wodurch der Strom unterbrochen wird. Infolge des Eigengewichtes streckt sich die Spirale; das untere Ende taucht wieder in das Quecksilber, so daß sich das Spiel wiederholt. Wir können auch jede Windung der Spirale als einen flachen Magneten betrachten, der auf der

Seite, wo der Strom in Zeigerrichtung kreist, einen Südpol, auf der andern einen Nordpol besitzt. Da in der stromdurchflossenen Spirale Süd- und Nordpole aufeinander folgen, ziehen sich die Windungen an.

Wenn man dem an einem Wagebalken befestigten ringförmigen Leiter (siehe Seite 20) einen zweiten ringförmigen Stromleiter nähert, so erfolgt, je nach der Stromrichtung, Anziehung oder Abstoßung.

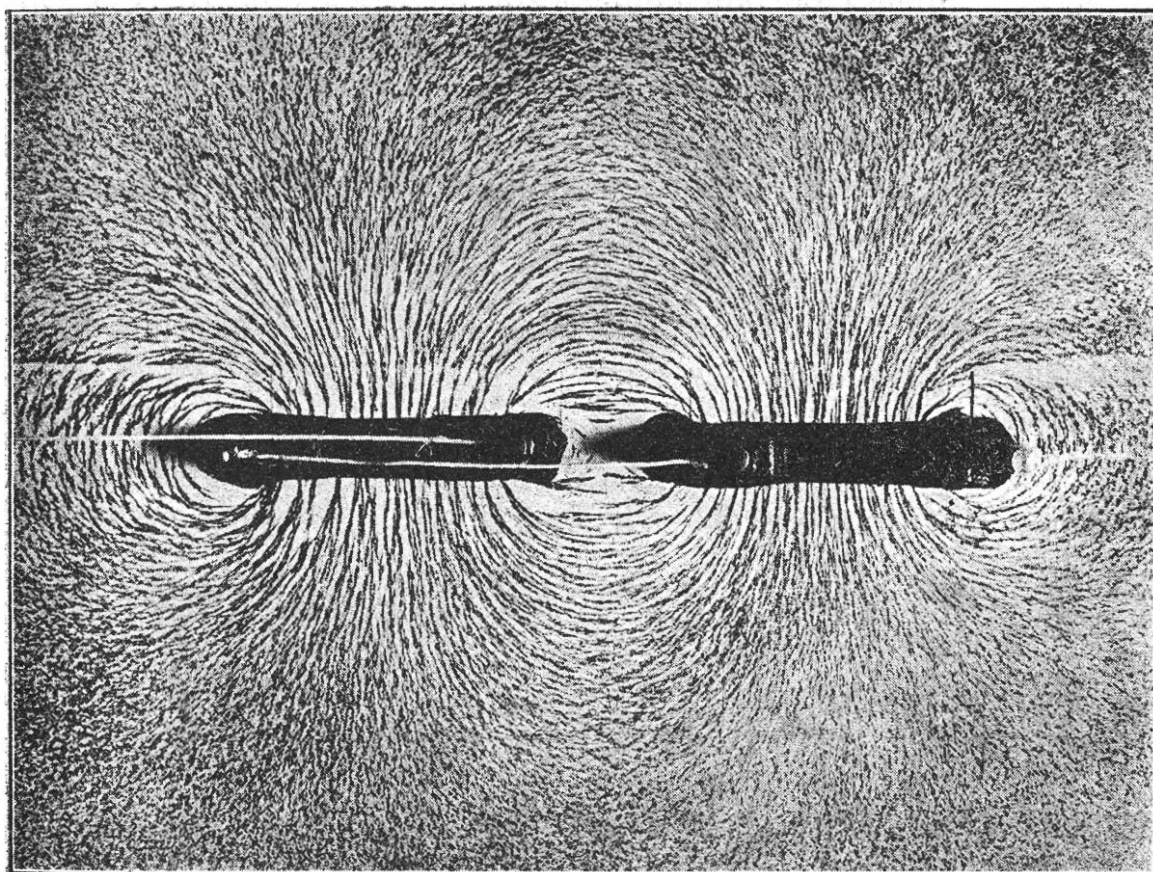


Fig. 19

Wenn in zwei Drahtvierecken, die an beweglichen Leitern so aufgehängt sind, daß die Windungen sich berühren, der Strom im entgegengesetzten Sinne kreist, so stoßen sich die Vierecke ab, das eine macht eine Drehung von 180° , worauf sie sich aneinander legen. Die Anziehung der von gleichgerichteten Strömen durchflossenen Drahtvierecke erfolgt auf einige Entfernung.

Den Schülern macht es immer große Mühe, festzuhalten, daß sich gleichgerichtete Ströme anziehen, während gleichnamige elektrische Zustände und gleichnamiger Magnetismus sich abstoßen. Durch Gegenüberstellung der bezüglichen Kraft-

linienbilder kann Klarheit verschafft werden. Wenn die Ströme parallel verlaufen (Fig. 21 a), so sind zwischen den Leitern

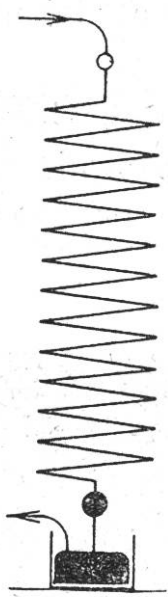


Fig. 20

die Kraftlinien entgegengesetzt gerichtet, sie heben sich zum größten Teil auf, das magnetische Feld zwischen den Leitern ist daher nur schwach. Die von den Leitern entfernten Kraftlinien vereinigen sich zu einem gemeinsamen Kraftlinienzug, der beide Leiter umschließt und, indem er sich zu verkürzen sucht, die Leiter zusammenzieht. Einen ganz ähnlichen Verlauf nehmen die magnetischen Kraftlinien (Fig. 21 b), wenn ungleichnamige Pole einander gegenüberliegen. Zwischen den beiden Magneten laufen die Kraftlinien von den Nordhälften zu den gegenüberliegenden Südhälften. Aus den Nordpolen quellen Kraftlinienzüge, die im Bogen zu den Südpolen verlaufen. Es entsteht also auch hier ein geschlossener Strom von Kraftlinien, der die Magnete zusammenzieht.

Wenn die Ströme einander entgegengesetzt gerichtet sind (Fig. 22 a), so ziehen die Kraftlinien der beiden Leiter in gleicher Richtung durch den Zwischenraum, indem sie sich

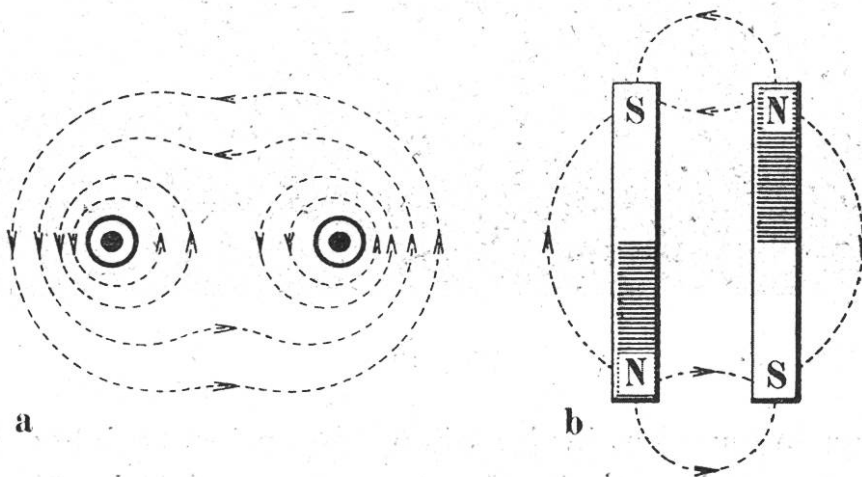


Fig. 21

gegenseitig abstoßen. Es findet eine eigentliche Stauung der Kraftlinien statt, die einen Druck nach beiden Seiten bewirkt. Wenn gleichnamige magnetische Pole einander gegenüberliegen (Fig. 22 b), so haben die magnetischen Kraftlinien zwischen den beiden Magneten ebenfalls die gleiche Richtung, sie zwingen sich durch den engen Zwischenraum, indem sie sich abstoßen. So haben auch hier die beiden Felder nichts gemeinsam.

Galvanische Induktion.

Einleitendes.

Den Induktionserscheinungen, dem heute unbedingt wichtigsten Gebiet der Elektrizitätslehre, ist besondere Sorgfalt zu widmen, wenn die Entstehung der Induktionsströme nicht als etwas Geheimnisvolles erscheinen soll. Durch eine eingehende Behandlung der magnetischen und der elektrischen Induktion wird dem Verständnis der galvanischen Induktion wesentlich vorgearbeitet. Dort sind die Versuche übersichtlich und sie lassen sich leicht in Schülerübungen durchführen. Auch die Versuche, durch Einführung eines Stabmagneten in eine

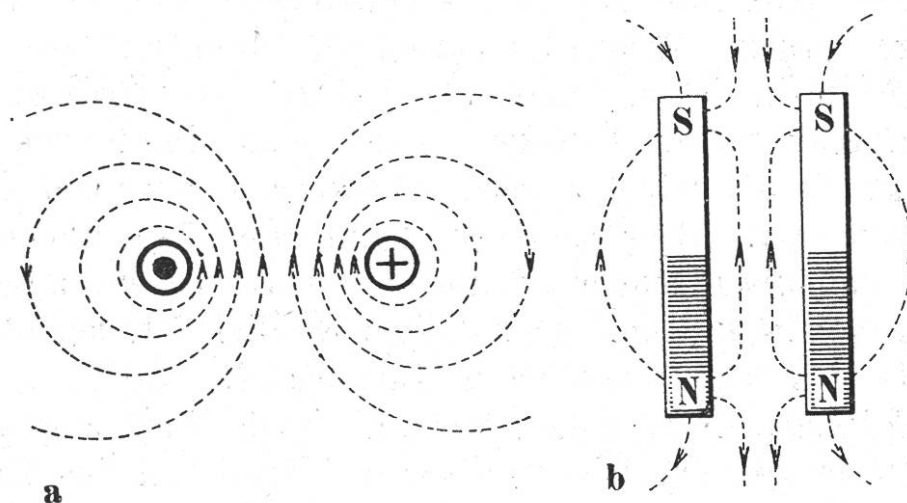


Fig. 22

Drahtspule Induktionsströme hervorzurufen, eignen sich vorzüglich zu Schülerübungen. Solche Grundversuche, die sich mit einfachen Hilfsmitteln durchführen lassen, müssen vom Schüler selbst ausgeführt werden. Nur durch eigene Betätigung, eigenes Erproben erhält der Schüler klare Anschauungen und wird er befähigt, verwickeltere Erscheinungen auf die Ursachen zurückzuführen. Ich übergehe diese Versuche, da sie allgemein bekannt sind, und setze voraus, daß das Gesetz abgeleitet ist: Der Induktionsstrom ist bei Annäherung dem primären Strom oder den Ampèreschen Strömen entgegengesetzt, bei Entfernung gleichgerichtet.

Nur einen Versuch will ich vorausschicken, weil er historisches Interesse besitzt. Faraday hat bei ähnlicher Anordnung des Versuches als Erster Induktionsströme wahrgenommen.

In den Hohlraum der Induktionsspule des Induktionsapparates für Schülerübungen oder des Schlittenapparates werden drei Eisenstäbe von den Dimensionen der Stabmagnete gelegt. Die Spule wird mit dem Vertikalgalvanoskop verbunden und der Elektromagnet auf weite Stellung gebracht. Die Enden der Eisenstäbe werden auf die Pole aufgelegt, so daß sich die Spule zwischen den Polen befindet. Wenn der Strom geschlossen wird, schlägt die Nadel energisch aus. Beim Öffnen des Stromes erfolgt ein Ausschlag in entgegengesetzter Richtung. Im Augenblick, da der Strom geschlossen wird, entsteht um die Eisenstäbe ein magnetisches Feld. Die Kraftlinien schießen durch die Spule und rufen einen Strom hervor. Solange der primäre Strom andauert, liegen die Kraftlinien still, die Nadel des Galvanoskops kehrt in die Ruhelage zurück. Wenn der Strom unterbrochen wird, sinkt das Kraftfeld in sich zusammen, die Kraftlinien werden gleichsam aufgesaugt, sie bewegen sich somit in umgekehrter Richtung; daher ist der neue Induktionsstrom dem ersten entgegengesetzt. Der Versuch kann auch so abgeändert werden, daß die Eisenstäbe mit der Induktionsspule aufgelegt und abgehoben werden. Damit dies möglich ist, müssen auf die Pole des Elektromagneten Kartonstücke gelegt werden. Die Nadel macht Ausschläge, wenn die Stäbe bloß angenähert und entfernt werden. Wenn Öffnen und Schließen des Stromes oder Annähern und Entfernen der Stäbe im Takte der Galvanometer-nadel ausgeführt werden, so macht diese sehr große Ausschläge.

Da der Gleichstrom, den der Gleichrichter liefert, ein in der Stärke schwankender, ein pulsierender Gleichstrom ist, bewirkt er in benachbarten Leitern Induktionserscheinungen, die wir mit dem Telephon nachweisen können. Verbinden wir die beiden Klemmen des Telephons mit einem Leitungsdraht, und legen wir diesen in nur einer Windung um eine Spule des Elektromagneten, so hören wir im Telephon ein schwaches Geräusch. Vermehren wir die Zahl der Windungen, so wird das Geräusch stärker. Legen wir das Induktionsviereck um die Spule, so wird das Geräusch unangenehm stark, es ist auf einige Entfernung hörbar. Mit dem Drahtviereck können wir das Feld der Spule absuchen. Zwischen den Halbankern ist die Induktionswirkung weniger lebhaft als zwischen den Spulen, da das magnetische Feld den Schwankungen nicht völlig zu folgen vermag.

Wirbelströme.

Nicht bloß in linearen Leitern, sondern auch in massiven Metallmassen treten Induktionsströme auf, wenn sich in deren Nähe Änderungen in einem magnetischen Feld vollziehen. Bewegt sich ein Magnet in der Nähe einer Metallmasse, oder

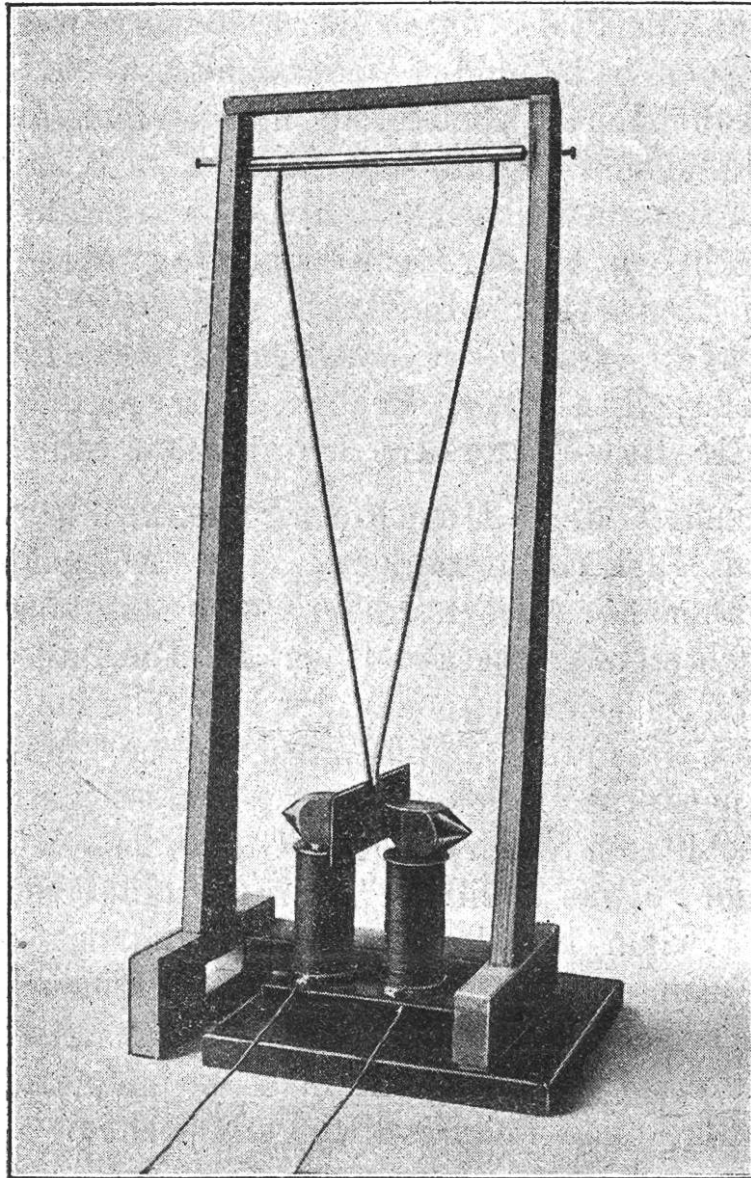


Fig. 23

eine Metallmasse in der Nähe eines Magneten, so entstehen in der Metallmasse Induktionsströme. Diese verlaufen nicht in vorgeschriebenen Bahnen, sondern fließen in der Richtung des kleinsten Widerstandes durch die Masse. Man nennt diese Ströme Wirbelströme oder Foucaultsche Ströme, da sie zuerst von Foucault, nach dem der Pendelversuch benannt ist, eingehend untersucht worden sind.

Die Entstehung und Wirkung der Wirbelströme kann mit dem Waltenhofenschen Pendel nachgewiesen werden (Fig. 23). Zwischen den kleinen Polschuhen des Elektromagneten schwingt eine Kupferplatte. Bei nicht erregtem Elektromagnet schwingt die Kupferplatte ungehemmt. Im magnetischen Feld steht sie fast plötzlich still; es ist, als ob sie sich durch eine zähflüssige Masse bewegen würde. Wenn man versucht, die Platte durch das Feld zu bewegen, so verspürt man einen bedeutenden Widerstand. Die in der Kupferplatte entstehenden Wirbelströme finden einen nur geringen Widerstand, sie sind deshalb sehr stark. Das Waltenhofensche Pendel bestätigt die Richtigkeit des Lenzschen Gesetzes: Bewegt sich ein Leiter in einem magnetischen Feld, so wird in demselben ein Strom von solcher Richtung hervorgerufen, daß die Bewegung des Leiters gehemmt wird, daß also Arbeit aufgewendet werden muß, um die Bewegung des Leiters zu unterhalten.

Man benützt diese Dämpfung vielfach bei Meßinstrumenten und Elektrizitätszählern. Die Ablesungen feiner Spiegelgalvanometer wurden früher durch das lange Hin- und Herschwingen der Magnetnadel um die Ruhelage erschwert. An Stelle der Flüssigkeits- oder der Luftdämpfung verwendet man jetzt die Dämpfung durch Wirbelströme. Man gibt dem Magneten die Form eines einerseits geschlossenen, der Länge nach aufgeschlitzten Stahlzylinders (Glockenmagnet), und läßt ihn in einer etwas weitem Bohrung eines Kupferblocks schwingen. Schon bei der ersten Schwingung entstehen in der dicken Kupferwand niedergespannte Ströme von großer Stromstärke, welche die Drehung des Glockenmagneten hemmen. Der Magnet dreht sich langsam in seine endgültige Stellung und bleibt dort ohne Pendelschwingung stehen.

Die zur Bewegung des Waltenhofenschen Pendels verausgabte mechanische Energie wird in Stromenergie und diese fast völlig in Wärmeenergie verwandelt. Wird ein starkwandiger, hohler Kupferzylinder, der mit Wasser gefüllt ist, im magnetischen Felde gedreht, so erwärmt er sich so stark, daß das Wasser ins Sieden gerät und einen die Öffnung des Zylinders verschließenden Pfropf hinaustreibt. Von der Umwandlung der Energie der Wirbelströme in Wärme macht man Gebrauch in den Induktionsöfen. Zur Erzeugung von Elektrostahl, um Ferromangan zu schmelzen, um Legierungen

von Eisen mit Nickel, Chrom, Wolfram u. dergl. herzustellen, verwendet man Induktionsöfen (System Röchlin-Rodenhausen), die im wesentlichen eine besondere Ausführung eines Wechselstromtransformators sind. Das Metallbad bildet die sekundäre Wicklung des Transformators. Die mächtigen Wirbelströme, die im Bade entstehen, sind mit der Entwicklung einer großen Wärmemenge verbunden, die zur Durchführung des betreffenden metallurgischen Prozesses ausreicht.

Wenn die Kupferplatte des Waltenhofenschen Pendels durch Einschnitte vom obern und untern Rand unterteilt wird, machen sich die Wirbelströme nur noch wenig fühlbar, das Pendel wird fast gar nicht mehr gebremst. Dadurch ist das Mittel gegeben, die Entstehung von Wirbelströmen an Orten, wo sie hinderlich sind, zu verhüten. Die Eisenkerne von Trommelankern, Transformatoren, Motoren u. s. w. werden unterteilt, d. h. sie werden aus Eisenblech von 0,3 bis 0,5 mm Dicke aufgebaut. Die Lagen sind durch einen Anstrich mit Lack oder durch eine Zwischenlage von dünnem Papier gegeneinander isoliert.

Selbstinduktion.

Es gibt noch eine Art von Induktion, die von Wichtigkeit ist. Wenn in einem stromdurchflossenen Leiter eine Veränderung der Stromstärke eintritt, so ruft diese eine Veränderung des magnetischen Feldes hervor, und diese wiederum induziert im Leiter eine elektromotorische Kraft. Man nennt diese Art der Induktion Selbstinduktion. Die Selbstinduktion ist besonders stark, wenn der Leiter zu einer Spule gewickelt ist. Jede Windung beeinflußt die Nachbarwindung. Bei Stromzunahme quellen die Kraftröhren gleichsam aus dem Leiter heraus, bei Stromabnahme ziehen sie sich wieder zurück, sie schneiden dabei die Leiter. Die Induktionswirkung wird durch einen Eisenkern, den man in die Spule legt, bedeutend verstärkt.

Der beim Schließen oder Anwachsen des Hauptstromes entstehende Induktionsstrom ist nach dem Gesetz von Lenz dem Hauptstrom entgegengesetzt; der bei Öffnen oder Abnehmen des Hauptstromes entstehende Induktionsstrom ist ihm gleichgerichtet. Der beim Schließen des Hauptstromes entstehende Gegenstrom verzögert das Entstehen des Hauptstromes, er erreicht aber niemals dessen Stärke. Anders ist es bei der plötzlichen Unterbrechung des Hauptstromes. Die

Spannung des dem Hauptstrom gleichgerichteten Selbstinduktionsstromes erreicht einen sehr hohen Betrag, sie kann die des induzierenden Stromes weit übertreffen. Bei plötzlicher Unterbrechung des Stromes ist die Zeit sehr kurz, daher die Induktionsspannung sehr groß. Der Selbstinduktionsstrom, auch Extrastrom genannt, kann vermittelt seiner physiologischen Wirkungen nachgewiesen werden. Der Versuch wird nach Fig. 24 angeordnet. In den Stromkreis ist eine Spule S

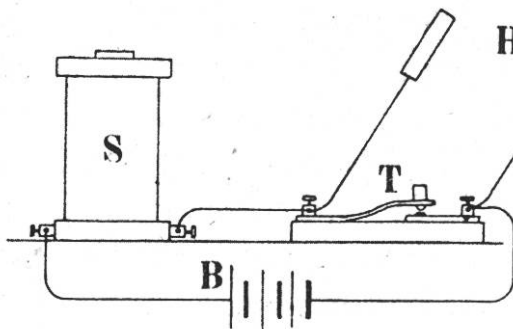


Fig. 24

und ein Taster T eingeschaltet. An die beiden Klemmen des Tasters sind die Handhaben H geschlossen. Solange kein Eisenkern in der Spule ist, sind die Empfindungen beim Öffnen des Stromes nur schwach; sie werden unangenehm, wenn

ein Eisenkern in die Spule gebracht wird, während man beim Schließen nichts wahrnimmt. In der Wechselstromtechnik spielt die Selbstinduktion eine große Rolle (Drosselspulen). Infolge der Selbstinduktion in den Spulen können Spuleninstrumente nicht zum Messen des pulsierenden Gleichstromes des Gleichrichters verwendet werden.

Drahtspulen sind frei von Selbstinduktion, wenn sie bifilar gewickelt sind. Der Draht wird hierbei in der Mitte umgebogen und doppelt aufgewickelt. Die Ströme benachbarter Windungen haben dann entgegengesetzte Richtung. Dadurch werden die Wirkungen der gegenseitigen Induktion fast völlig aufgehoben.

Der Leiter im magnetischen Feld.

Wie ein vom Strom durchflossener Leiter im magnetischen Feld eine Bewegung ausführt, so ist die Bewegung eines stromlosen Leiters durch ein magnetisches Feld die Ursache für die Entstehung eines Stromes.

In einfachster Form, in der er sich besonders zur Ausführung in Schülerübungen eignet, kann der Versuch wie folgt durchgeführt werden: Ein Schenkel des Induktionsdrahtvier-ecks (das dem beschriebenen Drahtviereck ähnlich gebaut ist, nur daß es aus über hundert Windungen von 0,2 mm dickem Draht besteht) wird zwischen den Polen des Hufeisenmagneten auf- und abbewegt. Die Nadel des Galvanoskops, mit dem

es verbunden ist, macht Ausschläge. Diese erfolgen in entgegengesetzter Richtung, wenn das Kraftfeld von oben nach unten und von unten nach oben geschnitten wird. Sie erfolgen in entgegengesetzter Reihenfolge, wenn entweder der Magnet oder das Viereck um 180° gedreht wird. Aus der Richtung des Induktionsstromes ergibt sich folgende Handregel: Man hält die rechte Hand so in die Richtung der Kraftlinien, daß sich der Leiter gegen die Handfläche bewegt; dann hat der Induktionsstrom die Richtung des Daumens.

Da bei dieser Ausführung des Versuches das magnetische Feld nur schwach ist, erhält man nur geringe Ausschläge der Magnetnadel. Die Wirkungen werden sehr kräftig, wenn der Elektromagnet verwendet wird. Auf die beiden Pole werden die Halbanker in etwa 2 cm Entfernung gelegt, die Längsseiten einander gegenüber. Zwischen ihnen bewegt man einen Schenkel des mit dem Galvanoskop verbundenen Induktionsdrahtvierecks auf und ab.

Der Versuch wird erweitert, indem man den Leiter das eine Mal rasch, das andere Mal langsam durch das Kraftfeld führt. Da im Schließungskreis alle Verhältnisse unverändert sind, müssen wir schließen, daß der stärkere Ausschlag im ersten Fall die Folge der rascheren Bewegung ist. Führen wir bei weitgestellten Magneten den Leiter in der Richtung der Kraftlinien, oder verschieben wir den Leiter in seiner eigenen Richtung, so entstehen nur ganz schwache Ausschläge. Es gelingt uns nämlich nicht, die Bewegung so auszuführen, daß gar keine Kraftlinien geschnitten werden. Die Induktionswirkung wird verstärkt, wenn man die Halbanker hochkant stellt und das Induktionsviereck wagrecht auf und ab bewegt, so daß es den einen Halbanker umschließt.

Die Beobachtungen ergeben das Gesetz: Wird ein Leiter so bewegt, daß er magnetische Kraftlinien schneidet, so wird darin eine elektromotorische Kraft hervorgerufen, die so lange einen Induktionsstrom durch den Leiter treibt, als die Bewegung dauert. Die Stärke des Induktionsstromes wächst mit der Länge des im Magnetfeld verschobenen Leiters, mit seiner Geschwindigkeit, sowie mit der Stärke des Feldes, und hängt auch ab von der Richtung der Verschiebung gegenüber der Kraftlinienrichtung.

Was geht im Kraftfeld während der Verschiebung des Leiters vor? Wir können das Kraftlinienbild nicht mit Eisenfeilspänen darstellen im Augenblick, da der Leiter durch das Feld bewegt wird, dafür ist die Zeit viel zu kurz. Wir müssen einen Zustand der Ruhe annehmen. Daß ein Induktionsstrom entsteht, wurde nachgewiesen, seine Richtung wurde festgestellt. Statt des nur momentanen Induktionsstromes schicken wir einen andauernden direkten Strom in der Richtung des Induktionsstromes durch den Leiter und stellen das Kraftlinienbild her. Es entspricht dem Bild, das wir vom stromdurchflossenen Leiter im magnetischen Feld erhalten haben (Fig. 17, 18).

Der das Kraftfeld durchdringende Leiter verschiebt die Kraftlinien. Wir können uns diese als aus Gummifäden bestehend vorstellen, die zwischen Nord- und Südpol ausgespannt sind. Durch den Leiter werden sie auseinander gezogen und leisten dem Eindringen Widerstand. Dieser ist um so größer, je mehr Kraftlinien abgelenkt werden und je stärker die Ablenkung ist. Die abgelenkten Kraftlinien umkreisen den Leiter im Sinne ihrer Ablenkung und rufen einen Induktionsstrom hervor, dessen Kraftlinien dem Sinne dieser Wirbel entsprechen. Halten wir die rechte Hand so in das Kraftfeld, daß die Finger in der Richtung der Kraftlinien zeigen und der Leiter sich gegen die Handfläche bewegt, daß also die Krümmung der Hand die Richtung der abgelenkten Kraftlinien hat, dann zeigt der Daumen in der Richtung des Induktionsstromes. Der Widerstand, den die Kraftlinien ihrer Verdrängung entgegensetzen, muß überwunden werden. Die hierfür verausgabte Arbeit erscheint in der Form von elektrischer Energie.

Daß der Induktionsstrom beim Entstehen des magnetischen Feldes eine Abstoßung erfährt, daß er aber beim Verschwinden des Feldes angezogen wird, zeigt folgender Versuch: Das Drahtviereck am Wagebalken (Fig. 16) wird kurz geschlossen und sein längerer Schenkel wird zwischen die Halbanker des Elektromagneten gebracht. Wenn man den Strom schließt, wird der Schenkel nach oben aus dem Feld bewegt. Wenn der Strom geöffnet wird, erfolgt die Bewegung nach unten. Die zweite Bewegung ist kräftiger als die erste. Im ersten Fall wirkt die Selbstinduktion der Spule dem Induktionsstrom entgegen, im zweiten Fall verstärkt der Selbstinduktionsstrom den Induktionsstrom.

Wechselströme.

Die Ströme, die wir bei der Bewegung eines Leiters durch ein magnetisches Feld erhalten haben, ändern mit der Richtung der Bewegung auch ihre Richtung, es sind Wechselströme. Es handelt sich nun darum, die Versuchsanordnung so zu treffen, daß rasch sich folgende Wechselströme entstehen.

Das im magnetischen Feld rotierende Drahtviereck.

Drehen wir im magnetischen Feld ein Drahtviereck um eine Achse, die senkrecht auf den Kraftlinien steht, so schneidet

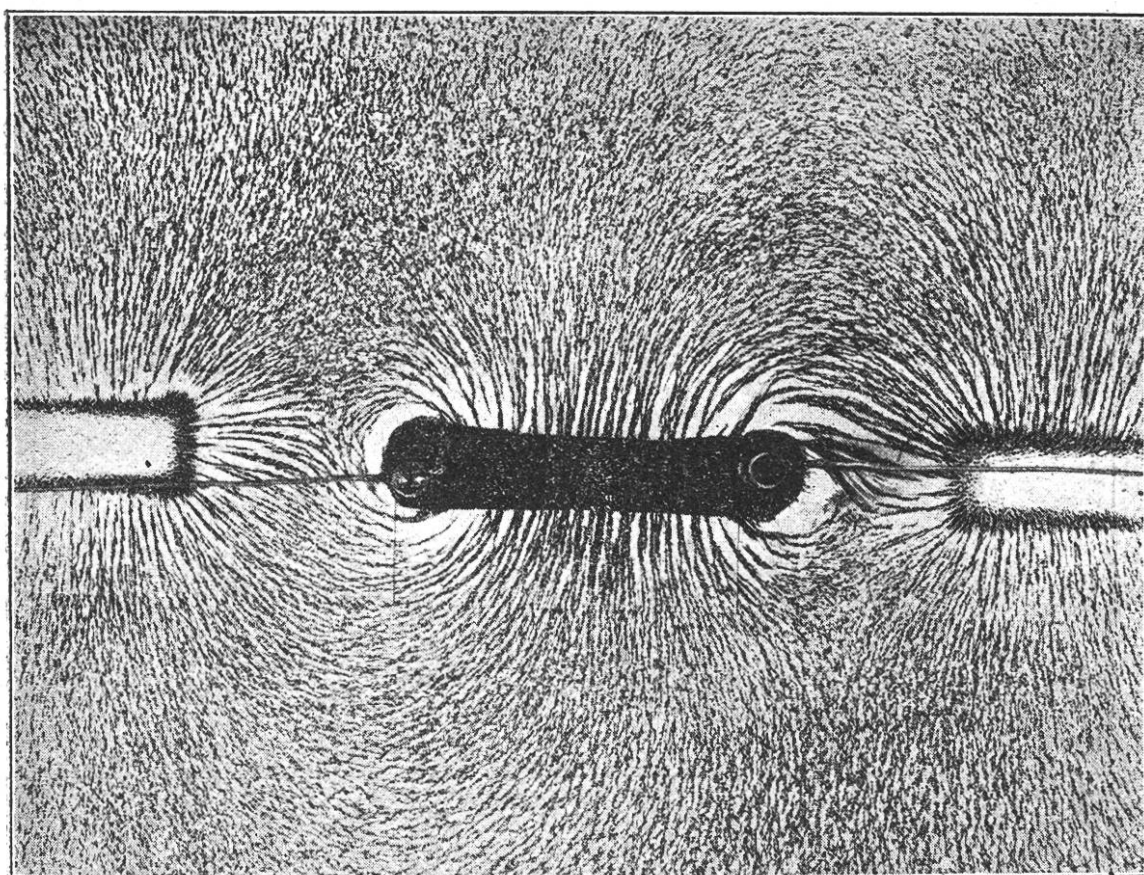


Fig. 25

die eine Seite (1) des Rechtecks die Kraftlinien von oben nach unten, die andere Seite (2) von unten nach oben. Die beiden Induktionsströme sind in der Richtung entgegengesetzt, setzen sich aber im Rechteck zu einem Strom zusammen. Wenn die Ebene des Rechtecks senkrecht zu den Kraftlinien steht, so werden keine Kraftlinien geschnitten, in diesem Augenblick entsteht kein Strom. Beim Weiterdrehen vertauschen die beiden Seiten ihre Stellungen miteinander. Die Seite 2 schneidet das Kraftfeld von oben nach unten, die

Seite 1 von unten nach oben. Der neue Stromstoß ist dem vorhergehenden entgegengesetzt. Bei fortgesetztem Drehen entstehen Wechselströme.

Das Kraftlinienbild klärt uns über die Vorgänge im Kraftfeld auf. Den nur momentanen Induktionsstrom ersetzen wir wieder durch einen Gleichstrom. Das Drahtviereck wird vertikal gestellt. Im Abstand von etwa 5 cm von den vertikalen Längsseiten werden in der Ebene des Vierecks zwei Stab-

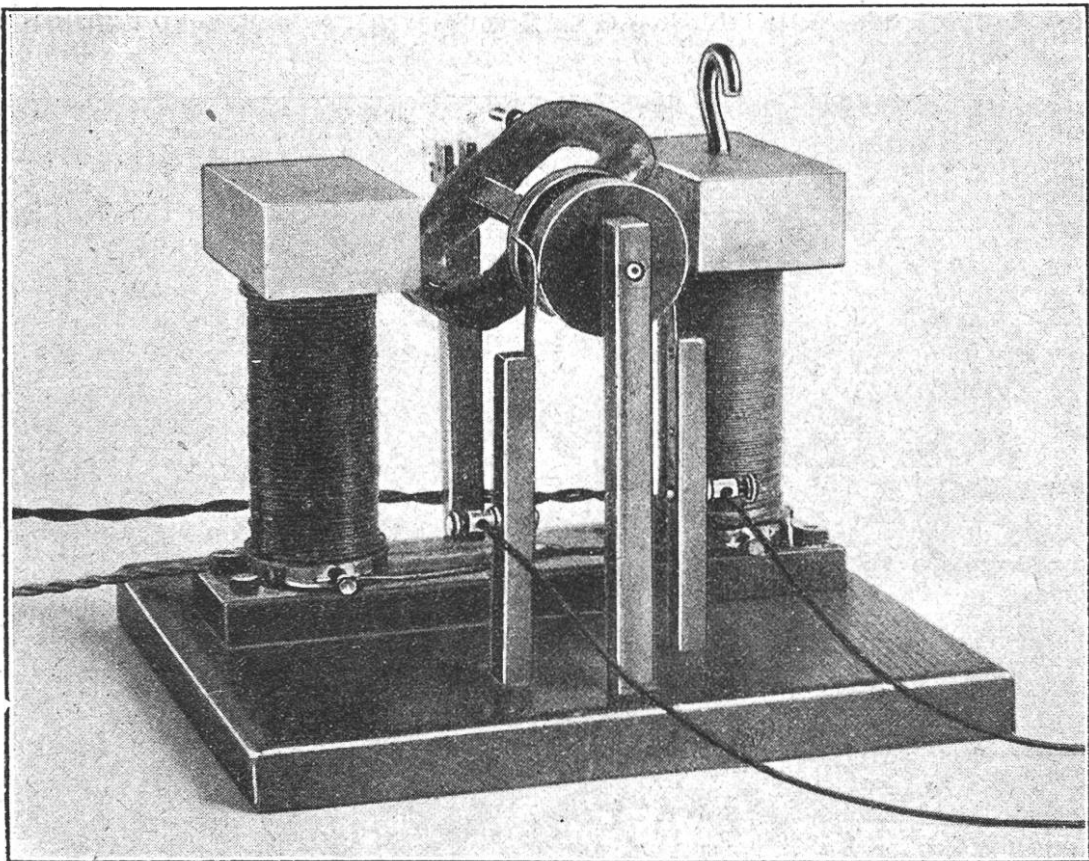


Fig. 26

magnete mit den ungleichnamigen Polen einander gegenüber gelegt. Die Magnete werden mit zwei Papierblättern bedeckt, die am Rande Ausschnitte für die Rechteckseiten besitzen. Das Kraftlinienbild, das die zwei Magnete für sich erzeugen, ist vollständig verändert (Fig. 25). Vom einen Magnetpol aus, im Bild vom linksliegenden, geht der Hauptzug der Kraftlinien als erster Zug eines großen S nach unten in großem Bogen um den ersten Rechteckschenkel; er verläuft zwischen den beiden Schenkeln durch und geht als zweiter Schenkel des S zum andern Pol. Links oben und rechts unten treffen die Kraftlinien der beiden Systeme aufeinander und weichen

einander aus. Das Kraftlinienbild zeigt, daß die Rechteckseiten bei der Rotation, die in unserem Versuch in Gegenzeigerrichtung gedacht ist, einen Widerstand zu überwinden haben. Die hierfür verausgabte Energie erscheint in Gestalt von elektrischer Energie.

Das Modell der Wechselstrommaschine (Fig. 26).

Um das Drahtviereck leicht und rasch drehen zu können, wird es mit einer Achse versehen (a—b in Fig. 27). Die

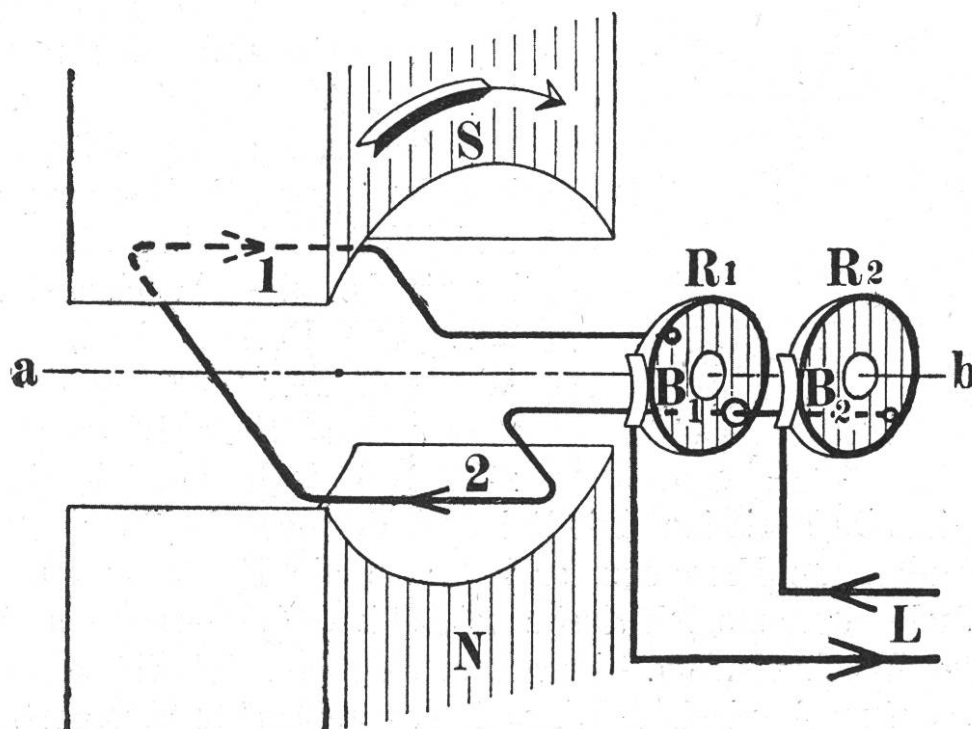


Fig. 27

Enden des Drahtes werden zu isoliert auf der Achse befestigten Schleifringen R_1 und R_2 geführt. Bürsten B_1 und B_2 entnehmen von diesen den Strom und führen ihn der Leitung zu, in die ein Vertikalgalvanoskop geschaltet ist. Da dieses keine Wechselströme rascher Folge anzeigen kann, muß bei der Drehung immer angehalten werden, wenn das Rechteck senkrecht zu den Kraftlinien steht. Die Nadel des Vertikalgalvanoskops schlägt im Takte unserer Drehung nach links und rechts aus.

Über die Natur des erzeugten Wechselstromes.

Wenn das Drahtviereck (Fig. 28) aus der Lage 0—6 senkrecht zu den Kraftlinien zu rotieren anfängt, so ist die Zahl der in einer gewissen Zeit von den Rechteckseiten 1 und 2 geschnittenen Kraftlinien klein. Sie nimmt zu und

erreicht ihren Höchstwert, wenn die Rechteckfläche in die Richtung der Kraftlinien fällt, in der Lage 3–9. Nachher nimmt die Zahl der in der gleichen Zeit geschnittenen Kraftlinien wieder ab. Die Spannung sinkt auf Null, wenn die Ebene

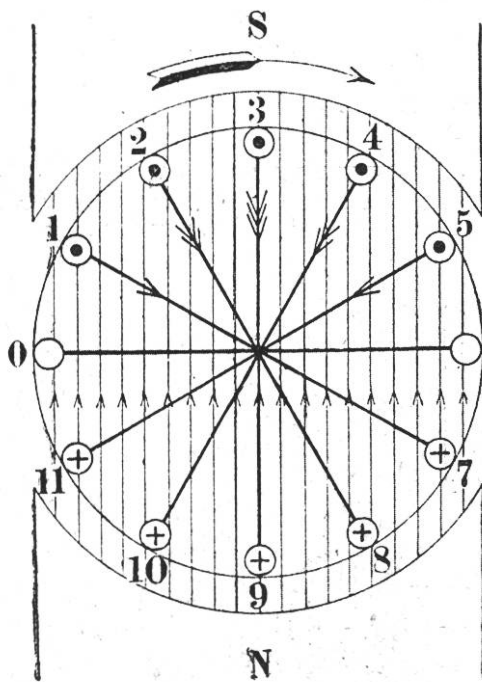


Fig. 28

des Rechtecks wieder senkrecht zu den Kraftlinien steht, in der Stellung 6–0. Bei der Weiterdrehung kehrt der Strom seine Richtung um, er schwillt an und fällt wieder auf Null zurück.

Die Schaulinie des Stromes ist eine Wellenlinie (Fig. 29). Ein Wellenzug derselben, a—e, bestehend aus Wellenberg a b c und Wellental c d e, stellt eine Periode des Wechselstromes dar. Die Periode besitzt zwei Wechsel. Der Wechselstrom des kantonalen Elektrizitätswerkes zählt 100 Wechsel in der Sekunde,

er besitzt 50 Perioden. Die Zahl der Perioden in einer Sekunde nennt man die Frequenz, er hat also die Frequenz 50.

Jede dynamoelektrische Maschine (Generatormaschine) erzeugt Wechselstrom. Der Wechselstrom ist die ursprüngliche, auf mechanischem Wege hervorgebrachte Stromart. Der

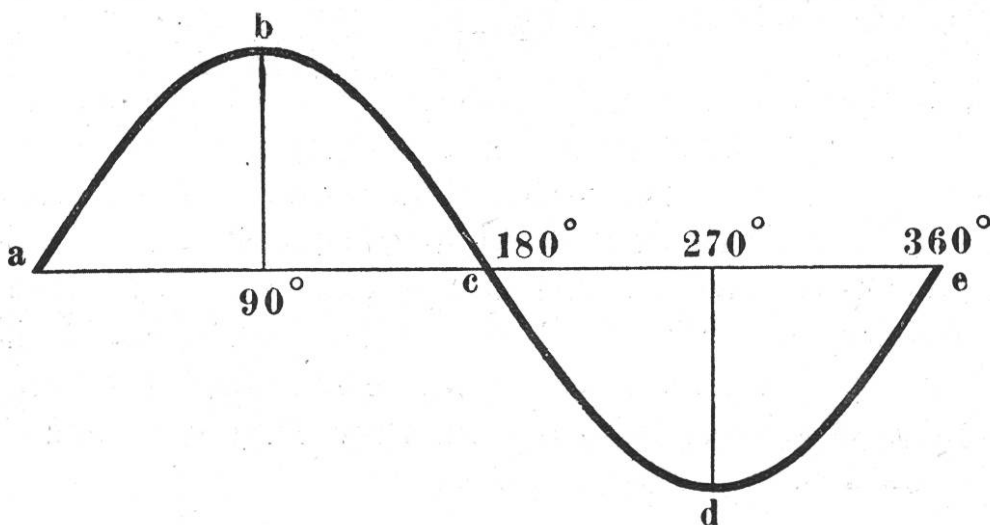


Fig. 29

Wechselstrom galt aber lang als ein widerhaariger Geselle, mit dem nichts anzufangen sei. Wie feindlich sich selbst leitende Persönlichkeiten dem Wechselstrom gegenüber verhielten, zeigt drastisch folgender Vorfall: Im Herbst 1889

besuchte Edison Berlin. Bei einer Aufforderung, sich den neuen, von Dolivo-Dobrowolsky erfundenen Wechselstrommotor anzusehen, sträubte er sich buchstäblich mit Händen und Füßen dagegen. „Nein, nein, Wechselstrom ist ein Unding, hat keine Zukunft, ich will nichts von Wechselstrom wissen, noch sehen!“ Und er kam nicht. (Aus einem Vortrag von Dolivo-Dobrowolsky.)

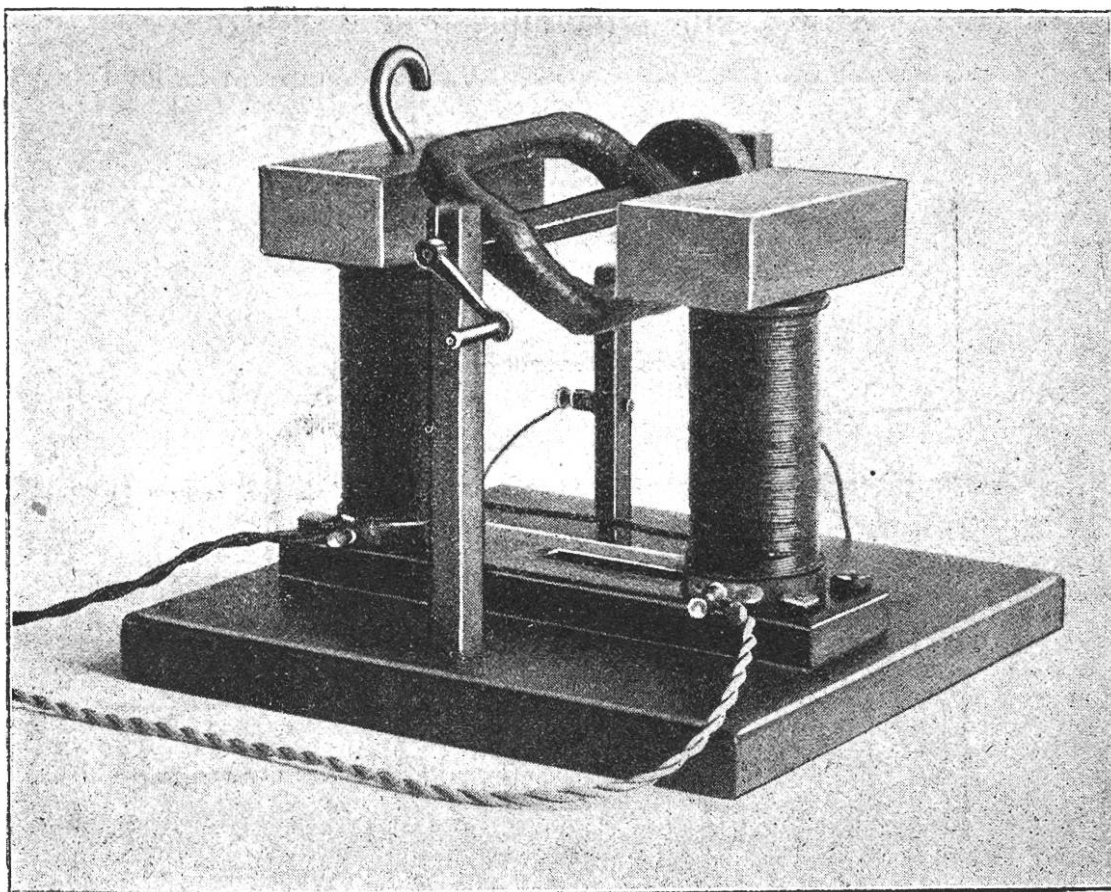


Fig. 30

Die Gleichstromerzeuger.

Die Verwandlung des Wechselstromes in Gleichstrom.

Der Wechselstrom wurde und wird noch heute zum Teil in Gleichstrom verwandelt. In unserm Modell (Fig. 30) sind die Drahtenden des Drahtvierecks, das zwischen den Halbankern des Elektromagneten rotiert, mit zwei auf der Achse sitzenden isolierten Halbringen verbunden (Fig. 31, K, 1 und 2). An diesen schleifen die Bürsten (B_1 und B_2), die den Strom der Leitung zuführen. Im Augenblick, da im Drahtviereck der Strom umkehrt, gehen die Bürsten auf die andern Halbringe über, so daß der Strom in der Leitung gleichgerichtet ist

(vergl. Fig. 175 des Lehrmittels). Der Strom ist ein pulsierender Gleichstrom; Fig. 32 zeigt seinen Verlauf. Die in den Stromkreis eingeschaltete Galvanomernadel schlägt nach der gleichen Richtung aus, ihre Unruhe verrät aber, daß der Strom schwankend ist. Drehen wir das Drahtviereck in der entgegengesetzten Richtung, dann schlägt die Nadel des Galvanometers ebenfalls in entgegengesetzter Richtung aus. (Der Gleichstrom, der mit dem Modell [Fig. 30] erhalten wird, hat bei rascher Drehung eine Spannung von 6 Volt.)

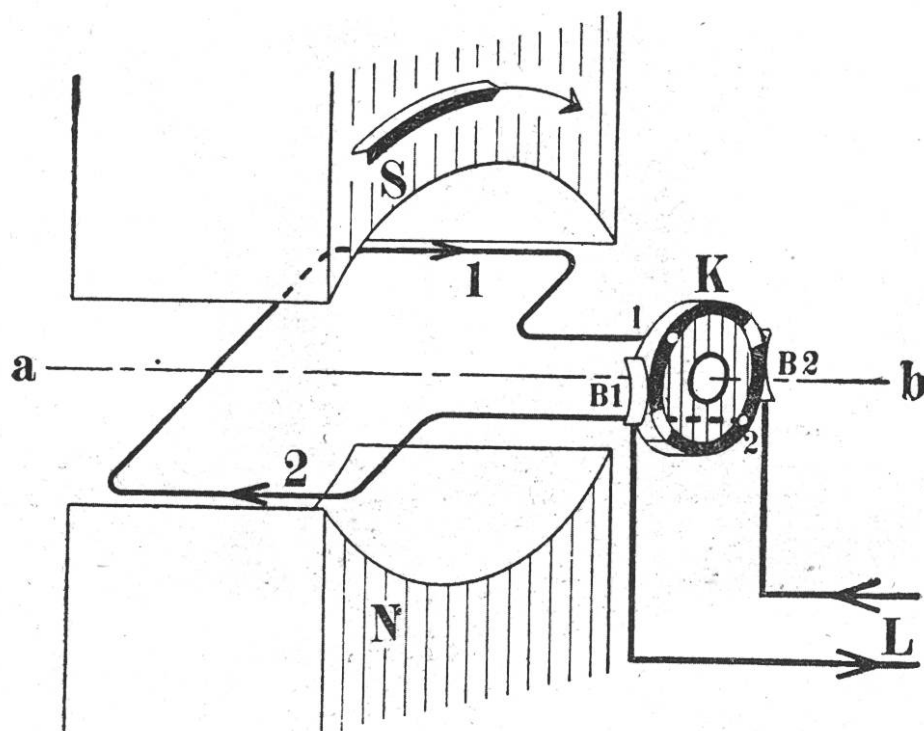


Fig. 31

Der Trommelanker.

An unserem Modell der Gleichstrommaschine muß die Achse eine halbe Umdrehung machen, bis wieder ein Stromstoß erfolgt. Wenn zwei Drahtvierecke rechtwinklig zueinander auf der Achse angebracht werden, so erfolgt ein neuer Stromstoß nach einer Drehung um 90° , bei drei Rechtecken, deren Ebenen sich unter einem Winkel von 60° schneiden, bei einer Drehung um 60° . Um sehr rasch aufeinanderfolgende Stromstöße zu erhalten, bringt man eine sehr große Zahl von Drahtvierecken, symmetrisch verteilt, auf der Achse an. Ihre Enden sind mit einer entsprechenden Zahl isolierter Lamellen auf der Achse so verbunden, daß eine zusammenhängende Strom-

bahn entsteht. Die isolierten Lamellen bilden zusammen den Kollektor. Bürsten, die auf ihm schleifen, stellen die Verbindung mit der äußeren Stromleitung her.

Bei Verwendung einer großen Zahl von Drahtvierecken wird der pulsierende Gleichstrom, den wir in unserem Modell

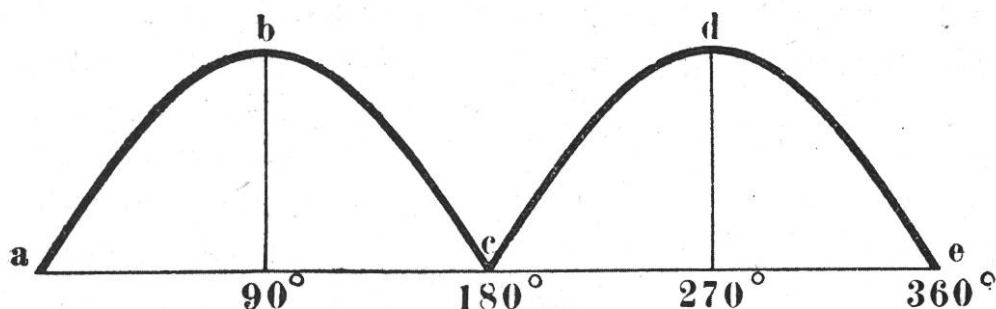


Fig. 32

erhalten, in einen nur wenig schwankenden Gleichstrom verwandelt. Die Summierung von drei pulsierenden Gleichströmen, die um $\frac{1}{3}$ Wellenlänge gegeneinander verschoben sind, zeigt Fig. 33. Bei etwa 40 Spulen und Kollektorlamellen beträgt die Pulsation nur noch einige Zehntelprozent der Bürstenspannung.

Die Drahtvierecke oder Wicklungen werden in Längsnuten einer trommelförmigen Eisenmasse verlegt. Eisenkern, Wicklungen und Kollektor

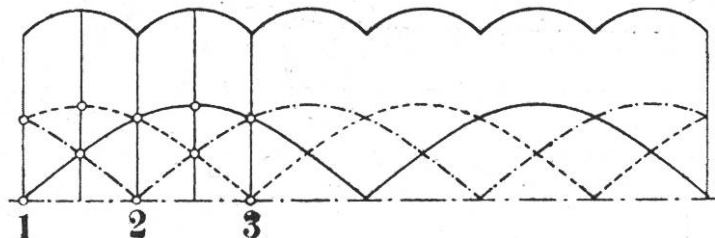


Fig. 33

bilden zusammen den Trommelanker. (v. Hefner-Alteneck 1872. Anker heißt allgemein der Teil einer Dynamomaschine, der die Drahtwicklungen enthält, in denen durch Induktion Strom hervorgerufen wird.) Um die Arbeitsverluste durch Wirbelströme zu vermindern wird der Trommelanker aus

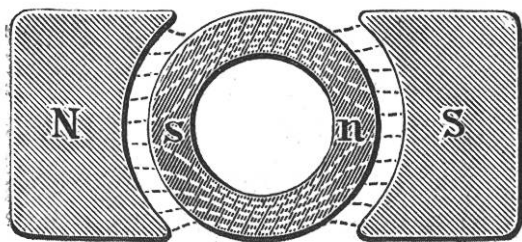


Fig. 34

Eisenblechen von 0,3 bis 0,5 mm Dicke zusammengesetzt, die durch einen Anstrich mit Lack oder durch Papier voneinander isoliert sind. Der Eisenkern bewirkt, daß die Kraftlinien verdichtet werden (Fig. 34); er übernimmt deren Leitung, so

daß keine durch den Luftraum verlaufen und somit alle durch die Wicklungen geschnitten werden.

Fig. 35 stellt einen Trommelanker mit vier Wicklungen schematisch dar. In den Leitern, die vor dem Nordpol liegen, entstehen nach unserer Handregel Induktionsströme, die von rechts nach links laufen. Die Ströme in der oberen Hälfte des Trommelankers fließen durch die Verbindung nach der oben liegenden Lamelle des Stromsammlers und durch die Bürste in die Leitung. Aus dieser kehrt der Strom durch die unten liegende Bürste zurück und tritt durch die unten liegende

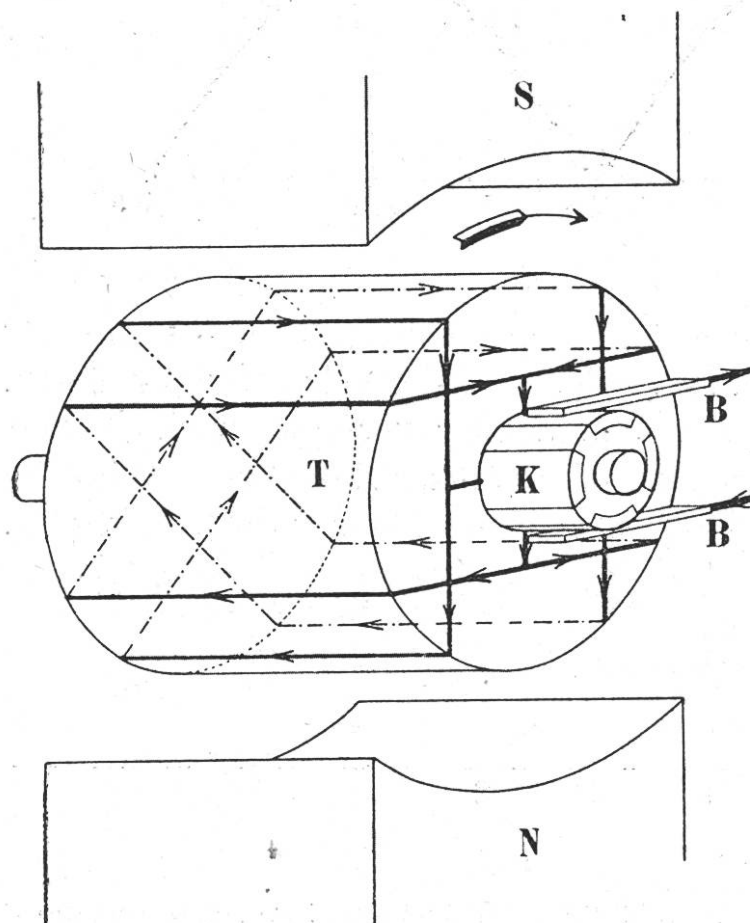


Fig. 35

Kollektorlamelle in die Leiter auf der untern Seite der Trommel. Nach einer Drehung von 90° haben die Leiter ihren Platz vertauscht. Die jetzt auf der Vorderseite der Trommel senkrecht verlaufenden Leiter liegen dann wagrecht und der Strom fließt durch die jetzt stromlosen Lamellen in die Leitung und zurück.

Der von der Gleichstrommaschine im Trommelanker erzeugte Strom ist ein

Wechselstrom. Dieser wird mit Hilfe des Kollektors in Gleichstrom verwandelt, ehe er die Maschine verläßt. Der Kollektor ist also ein wesentlicher Bestandteil einer Gleichstrommaschine.

Die ursprüngliche Ankerwicklung ist die Ringwicklung. Sie wurde von Pacinotti (1860) erfunden und von Gramme (1869) angewendet, weshalb sie oft nach einem der beiden benannt wird (Grammescher Ring). Heute ist fast ausschließlich die beschriebene Trommelwicklung im Gebrauch. Sie hat vor der Ringwicklung den Vorzug, daß bei gleicher Leistung und gleichen Verlusten in der Ankerwicklung das Kupfergewicht geringer ist und daß bei der Anfertigung die wohlfeilere Schablonenwicklung angewendet werden kann.

Wenn eine Maschine für eine größere Leistung bestimmt ist, so verwendet man nicht nur ein einziges, aus einem Nord- und einem Südpol bestehendes Polpaar, sondern man bringt mehrere Pole an, die symmetrisch um den Anker angeordnet sind. Dabei wechseln Nordpol und Südpol miteinander ab. Fig. 178 des Lehrmittels stellt eine vierpolige Gleichstrommaschine dar.

Verschiedene Arten von Gleichstrommaschinen.

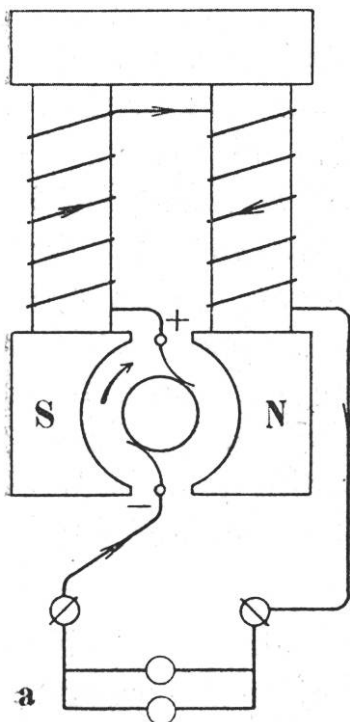
In den zuerst gebauten Gleichstrommaschinen wurde das Kraftfeld, in dem sich der Anker dreht, durch künstliche Magnete hervorgerufen; man nennt sie deshalb magnet-elektrische Maschinen. Da die Stahlmagnete nicht hoch magnetisiert werden können, eignen sie sich nur für kleine Leistungen. Wir finden diese Maschinen nach einem halben Jahrhundert immer noch im Gebrauch, nicht bloß als Demonstrationsapparat in den Schulsammlungen, sondern in umfangreichem Maße in den verschiedenen Gebieten der Signaltechnik, so im Telephonverkehr und neuerdings als Zündmaschine für die Benzinmotoren. Sie zeichnen sich aus durch gedrungene Form und zuverlässige Arbeit.

Es lag nahe, die Stahlmagnete durch die weit wirksameren Elektromagnete zu ersetzen. Um diese zu erregen, brauchte es aber einen Erregerstrom. Dieser konnte einer beliebigen Gleichstromquelle entnommen werden. Die Maschine wurde fremd erregt. Da gab die Entdeckung des dynamo-elektrischen Prinzips durch Werner Siemens (1867) den Anstoß zu einem der bedeutendsten Fortschritte in der Technik. Werner Siemens ging davon aus, daß Eisen, welches einmal magnetisch gemacht wurde, eine Spur Magnetismus zurückbehält. Dieser Rest von Magnetismus leitet die Wirkung ein. Er erzeugt im rotierenden Anker einen schwachen Induktionsstrom. Indem dieser durch die Magnetwicklung geführt wird, verstärkt er die magnetische Wirkung und damit den Induktionsstrom. Induktionsstrom und Magnetisierung der Eisenkerne steigern sich gegenseitig bis zu einem Maximum der Magnetisierung. In diesen Maschinen wird die aufgewendete Arbeit, Dynamis, direkt in elektrischen Strom verwandelt. Man nennt deshalb Maschinen dieser Art nach Werner Siemens dynamoelektrische Maschinen oder *Dynamomaschinen*.

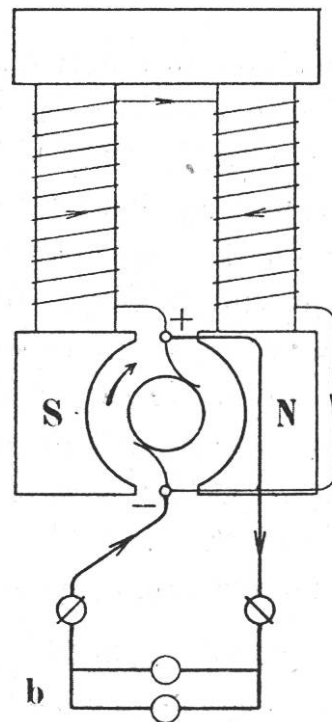
Schickt man, wie angenommen wurde, den gesamten aus dem Anker kommenden Strom zuerst durch die Magnetwicklung und dann in die Leitung zu den Verbrauchsstellen, so nennt man die Maschine eine Hauptstrommaschine (Fig. 36 a). Bei ihr muß die Magnetwicklung aus dickem Draht hergestellt werden, da sonst ihr Widerstand den Strom zu sehr schwächen würde.

Gleichstromgeneratoren.

Hauptstrommaschine



Nebenschlußmaschine



Verbundmaschine

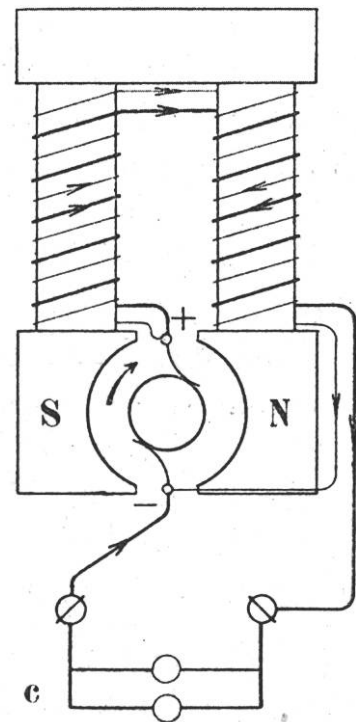


Fig. 36 (nach Blattner)

Benutzt man aber nur einen Teil des Ankerstromes zur Erregung der Elektromagnete, indem man den Strom nach Verlassen der positiven Bürste in zwei Teile spaltet, von denen der schwächere als Erregerstrom durch die aus dünnem Draht bestehende Magnetwicklung, der stärkere als Nutzstrom in das Netz geschickt wird, so nennt man die Maschine eine Nebenschlußmaschine (Fig. 36 b).

Man kann endlich auch die beiden Wicklungsarten miteinander verbinden, indem man auf die Magnetschenkel beide Wicklungen legt, eine aus Drähten mit großem Querschnitt, durch welche der Hauptstrom fließt, und eine mit Drähten von kleinem Querschnitt, durch welche ein Nebenschlußstrom geschickt wird. Maschinen mit gemischter Wicklung nennt man Verbundmaschinen, Doppelschlußmaschinen oder Compoundmaschinen (Fig. 36 c).

Die Hauptstrommaschinen werden hauptsächlich für hohe Spannungen bei Kraftübertragungen benützt. (Als Elektromotoren spielen die Hauptstrommaschinen eine große Rolle.) Nebenschlußmaschinen dienen hauptsächlich bei Beleuchtungsanlagen und zum Laden von Akkumulatoren. Verbundmaschinen endlich werden als Generatoren für rasch wechselnde Belastung, wie z. B. bei elektrischen Bahnen verwendet.

Die Spannung der Gleichstromerregemaschine richtet sich in erster Linie nach ihrer Bestimmung. Maschinen, die vorwiegend oder ausschließlich Strom für Lampen liefern, arbeiten mit Klemmenspannungen von 105 bis 120 Volt und von 210 bis 230 Volt. Eine Bogenlampe verlangt nämlich Strom von bestimmter Spannung, in der Regel mit dem Vorschaltwiderstand von 50 bis 60 Volt. Werden zwei Lampen hintereinander geschaltet, so muß die Netzspannung 100 bis 120 Volt, bei vier hintereinander geschalteten Lampen das Doppelte betragen. Glühlampen und Motoren können für jede Spannung gebaut werden, sie werden der Netzspannung angepaßt. Dynamomaschinen, die Strom für elektrolytische Zwecke liefern, weisen wesentlich kleinere Spannungen auf. Generatoren für elektrische Straßenbahnen sind für Spannungen von 450 bis 650 Volt gebaut. Man kann Gleichstrommaschinen für höhere Spannung bauen, immerhin hält es schwer, Maschinen mit über 1500 Volt dauernd betriebsfähig zu erhalten. Bei mangelhafter Wartung können sich die Funken, die am Kollektor entstehen, zu einem Lichtbogen vereinigen, können also einen Kurzschluß mit all seinen schädlichen Folgen erzeugen.

Die Wechselstromerzeuger.

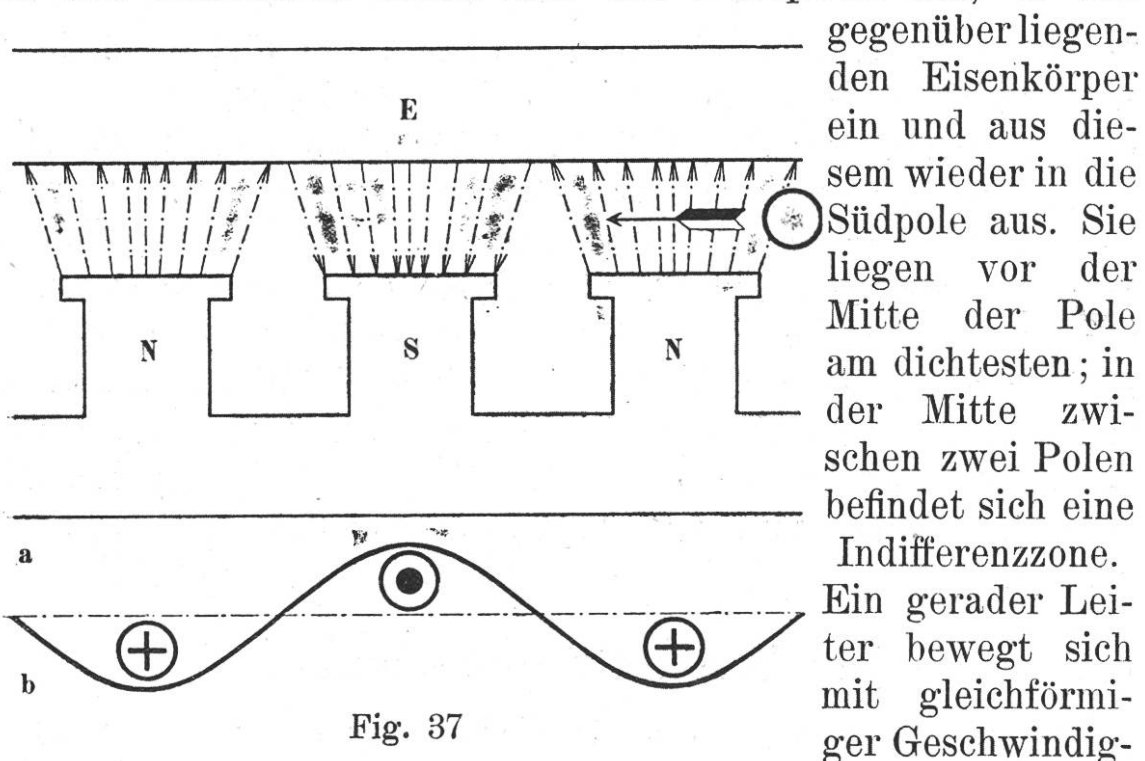
Erzeugen von Wechselstrom durch Bewegen eines Leiters durch ein Feld mit abwechselnden Polen und allgemeiner Aufbau der Wechselstrommaschinen.

Technische Gründe führten dazu, den Wechselstrommaschinen einen von den Gleichstrommaschinen abweichenden Bau zu geben. Ihre Konstruktion beruht darauf, daß es möglich ist, bei anderer Anordnung Wechselstrom zu erzeugen. Die zur Erklärung dienende Versuchsanordnung ist folgende:

Man führt einen mit dem Galvanoskop verbundenen Stromleiter (für unsere Stromverhältnisse wieder ein Bündel von Leitern, das Induktionsdrahtviereck) am einen Pol des

Elektromagneten wagrecht vorbei, so daß die aus dem Pol nach oben austretenden Kraftlinien senkrecht geschnitten werden. Die Galvanometernadel schlägt aus. Der Ausschlag erfolgt in entgegengesetzter Richtung, wenn der Leiter bei der Weiterbewegung am andern Pol vorbeigeführt wird. Die Ausschläge der Nadel erfolgen in umgekehrter Reihenfolge, wenn der Leiter in umgekehrter Richtung durch die Felder bewegt wird. Führt man den Leiter von rechts nach links durch das Kraftfeld vor dem Nordpol, so fließt der Strom, in Übereinstimmung mit unserer Handregel, von uns weg, vor dem Südpol fließt er auf uns zu.

Man ordnet nach Fig. 37 a eine Reihe von Polen nebeneinander an, so daß abwechselnd Nord- und Südpole aufeinander folgen. Ihnen gegenüber liegt eine glatte Eisenmasse E. Die Kraftlinien treten aus den Nordpolen aus, in den



Vor dem Nordpol entsteht ein Induktionsstrom, der von vorn nach hinten, von uns weg, fließt. Beim Eintritt des Leiters in das Kraftfeld ist der Strom noch schwach, gegen die Mitte des Kraftfeldes, wo die Kraftlinien dichter liegen, wird er stärker, vor der Mitte des Poles erreicht er das Maximum, dann nimmt er wieder ab. An der Indifferenzzone ist der Leiter stromlos. Wie er in das Kraftfeld vor dem Südpol tritt, kehrt der Strom um, er fließt von hinten nach vorn, auf uns zu. Vor dem folgenden Nordpol kehrt die Stromrichtung wieder um.

Fig. 37

Wir erhalten also im Leiter Induktionsströme von wechselnder Richtung. Fig. 37 b stellt die Stromverhältnisse dar. Ströme, die von uns weg fließen, sind unter der Wagrechten. Ströme, die auf uns zufließen, sind über der Wagrechten dargestellt. Wenn der Leiter an einem Nordpol vorbeigeht, entsteht eine halbe Stromwelle, vor dem folgenden Südpol entsteht die entgegengesetzte halbe Welle. Sie bilden zusammen eine Periode.

Wenn man statt des geradlinigen Leiters einen rechteckigen Leiter, dessen gegenüberliegende Seiten um den Polabstand von einander entfernt sind, durch das Kraftfeld führt, so tritt die eine Rechteckseite in das Kraftfeld vor dem Nordpol, während die andere in das vor dem Südpol tritt. Die induzierten Ströme haben entgegengesetzte Richtung, vereinigen sich aber im Leiter zu einem Strom.

In den Wechselstrommaschinen bewegt sich nun nicht der Leiter an den Magnetpolen vorbei, sondern die Leiter liegen still, und die Magnetpole bewegen sich an ihnen vorbei. Die Leiter sind in Nuten des feststehenden Gestells der Maschine, dem Anker oder Ständer verlegt. Die Magnetpole sitzen auf dem drehbaren Polrad oder Läufer. Die Zahl der Pole ist immer gerade, weil zu einem Nordpol immer auch ein Südpol gehört. Sollen nun die Ströme die in Figur 37 angegebene Richtung haben, so muß sich das Polrad im Sinne des Uhrzeigers drehen.

Da die Ankerwicklungen, in denen die Wechselströme erzeugt werden, ruhen, so können ihre Enden zu Klemmen geführt werden, die irgendwo passend am Maschinengestell angebracht sind. Von ihnen wird der Wechselstrom abgenommen und zu den Stromverbrauchern geführt. Schleifringe, Kollektor und Bürsten sind also nicht vorhanden, störende Funkenbildung kommt nicht vor, dadurch wird es möglich, in der Maschine selbst hohe Spannungen zu erzeugen.

Als Erregerstrom kann nun natürlich nicht mehr wie bei den Gleichstrommaschinen der Strom der Maschine selbst verwendet werden. Er muß einer besondern Gleichstromquelle, einer Gleichstrommaschine, die auf der gleichen Achse angebracht werden kann, oder einer Akkumulatorenbatterie, entnommen werden.

Die Einphasengeneratoren haben im Anker nur eine fortlaufende Wicklung. Die Zweiphasengenera-

toren haben zwei vollständig voneinander unabhängige Wicklungen, die so liegen, daß in ihnen zwei um 90° voneinander abstehende Einphasenwechselströme entstehen und die Anker der Dreiphasengeneratoren sind ausgerüstet mit drei Wicklungen, in denen drei in der Phase um 120° verschobene Einphasenwechselströme erzeugt werden.

Erklärung der Einphasenwechselstrommaschine an der Zeichnung.

Die Zeichnung (Fig. 38) stellt einen Teil des Polrades und der Ankerwicklung schematisch dar. Die Drehung des Polrades erfolgt in Uhrzeigerrichtung. Indem die Pole sich den Schenkeln der Wicklung nähern, entsteht darin ein Strom.

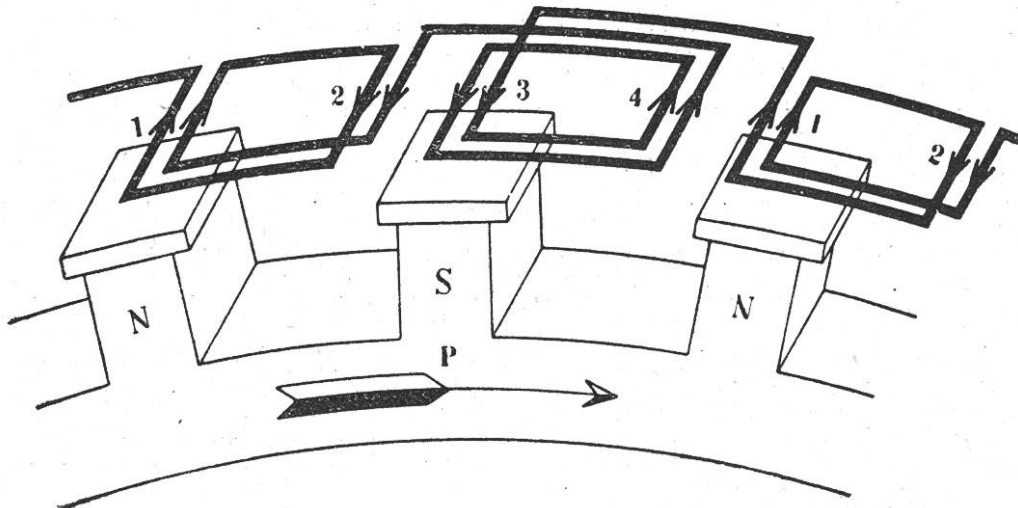


Fig. 38

Dieser erreicht ein Maximum, wenn der Pol am Schenkel der Wicklung vorbeigeht. Dann nimmt der Strom ab und geht auf Null zurück. Indem sich der Pol dem folgenden Wicklungsschenkel nähert, entsteht ein Strom in entgegengesetzter Richtung. Die Nordpole rufen in den vor ihnen liegenden Wicklungsschenkeln 4 und 1 Ströme hervor, die von vorn nach hinten, die Südpole in den Schenkeln 2 und 3 solche, die von hinten nach vorn fließen. Wie aus der Figur hervorgeht, kreisen die gleichzeitig entstehenden Stromstöße in der ganzen Leitung im gleichen Sinn. Wenn sich aber das Polrad weiter dreht, gelangen die Nordpole vor die Schenkel 2 und 3, die Südpole vor die Schenkel 4 und 1. Die Stromrichtung wird umgekehrt. Ein neuer Richtungswechsel tritt ein, wenn die Nordpole wieder vor die Schenkel 4 und 1 gelangen. Den Stromverlauf des Einphasenwechselstroms veranschaulicht Fig. 29.

Bei der Elektrifikation der Bundesbahnen hat man sich für das Einphasenwechselstromsystem entschieden, gestützt auf die guten Erfahrungen, die damit am Lötschberg und auf ausländischen Bahnen gemacht wurden. Die Zentralen erzeugen Einphasenwechselstrom von 15,000 Volt Spannung und $16\frac{2}{3}$ Perioden in der Sekunde. Die Spannung zwischen Fahrdrabt und Erde, die Fahrdrabtspannung, beträgt 15,000 Volt. Für die Speiseleitungen wird der Strom in den Zentralen auf 60,000 Volt hinauftransformiert. In den Speisepunkten wird der Strom auf die Fahrdrabtspannung herabgeformt. In den Lokomotiven wird dieser Strom auf die Spannung herabtransformiert, die für die Triebmotoren am günstigsten ist, auf 300 bis 600 Volt.

Erklärung der Dreiphasenwechselstrommaschine am Modell.

Das Modell (entsprechend der Fig. 39) besteht, den neuern Maschinenformen entsprechend, aus einem äußern, ringförmigen, feststehenden Teil, dem induzierten Teil, auch Anker oder Ständer genannt, und dem umlaufenden Teil als induzierendem System, auch Magnetrad, Polrad oder Läufer genannt. Dem Modell fehlt die Tiefe, es ist gleichsam ein Querschnitt. Der Gleichstrom, der die Elektromagnete erregt, wird von außen durch die mit G bezeichneten Drähte zugeführt. Auf der Achse befinden sich zwei isolierte Schleifringe R, die die Stromzufuhr übernehmen. Dieser Gleichstrom ist von niedriger Spannung. Die Wicklungen der Elektromagnete sind so angeordnet, daß abwechselnd Nord- und Südpole aufeinander folgen.

Die drei Wicklungen des Ankers sind im Modell durch drei Farben: rot, gelb und weiß unterschieden, in der Figur sind sie durch eine dicke Linie I, eine dünne Linie II und eine punktierte Linie III dargestellt. Sie beginnen bei den drei Anschlußklemmen LI, LII und LIII und sind im gleichen Sinn geführt. Wir nehmen zunächst an, jede der drei Wicklungen schließe an einen äußern Stromkreis an, dann besitzen wir drei voneinander völlig getrennte Stromkreise. Für die Zuleitung der Ströme sind bei dieser Annahme drei Drähte, und für deren Ableitung ebenfalls drei Drähte erforderlich.

Die Polschuhe der Elektromagnete reichen über drei Nuten weg. In den Wicklungsschenkeln, die vor den Nordpolen liegen, fließt der Strom von vorn nach hinten, in den Schenkeln,

in ihnen fließt ein starker Strom von vorn nach hinten. In den Schenkeln 5, die vor der Mitte der Südpole liegen, fließt der Strom von hinten nach vorn. Er kreist also im Anker gegen den Zeiger, links herum. Dreht sich das Polrad in Zeigerrichtung, so entfernen sich die Mitten der Pole von den Wicklungsschenkeln 2, der Strom wird infolgedessen in ihnen schwächer. Wenn sich die Nordpole den Schenkeln 5 nähern, fließt in ihnen der Strom von vorn nach hinten, er erreicht die größte Stärke, wenn die Mitte der Nordpole vor den Schenkeln 5 liegt. Dann liegen die Südpole vor den Schenkeln 2, in diesen fließt der Strom von hinten nach vorn. In der Wicklung hat also der Strom die Richtung umgekehrt, er kreist jetzt in Zeigerrichtung, rechts herum. Bei einer ganzen Umdrehung des Polrades entstehen 6 Wechsel oder 3 Perioden.

Ganz der gleiche Vorgang vollzieht sich in den beiden andern Wicklungen, nur sind die Perioden zeitlich gegeneinander verschoben. In der Stellung, die die Figur angibt, nähern sich die Nordpole den Schenkeln 3, in ihnen ist der Strom im Zunehmen begriffen, sie entfernen sich von den Schenkeln 1, in denen der Strom im Abnehmen ist. Wie im Schenkel 2, so fließt auch in den Schenkeln 1 und 3 der Strom von vorn nach hinten. In beiden Wicklungen kreist der Strom rechts herum, in Zeigerrichtung.

Wir stellen diese und die weiteren Beobachtungen in einer Tabelle zusammen (z = Zeigerrichtung, gz = Gegenzeigerrichtung):

Nordpole vor Schenkel:	Stromstärke und Richtung in Wicklung:			
	I	II	III	
2	Maximum	gz zunehmend z	abnehmend z	Fig. 41
			null	
3	abnehmend	gz Maximum z	zunehmend gz	„ 40
	null			
4	zunehmend z	abnehmend z	Maximum gz	„ 42
		null		
5	Maximum z	zunehmend gz	abnehmend gz	
			null	
6	abnehmend z	Maximum gz	zunehmend z	
	null			
1	zunehmend gz	abnehmend gz	Maximum z	
		null		

In der Schaulinie des Dreiphasenwechselstromes (Fig. 43) sind die in Zeigerichtung kreisenden Ströme über der Wagrechten, die in Gegenzeigerichtung kreisenden unter der Wagrechten dargestellt. Die Zeichnung beginnt mit den

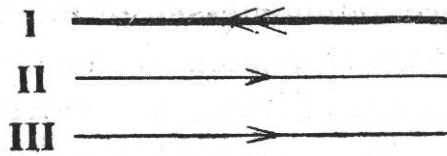


Fig. 40

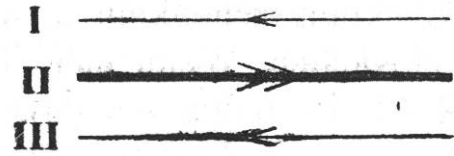


Fig. 41

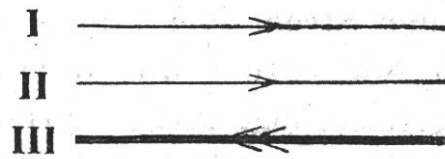


Fig. 42

Stromverhältnissen, die in der Tabelle zwischen Zeile 2 und 3 notiert werden müßten, mit dem Moment, da die Wicklung I stromlos ist.

Aus der Tabelle, und noch überzeugender aus der Schaulinie, ergibt sich, daß immer, wenn in einem Stromkreis der

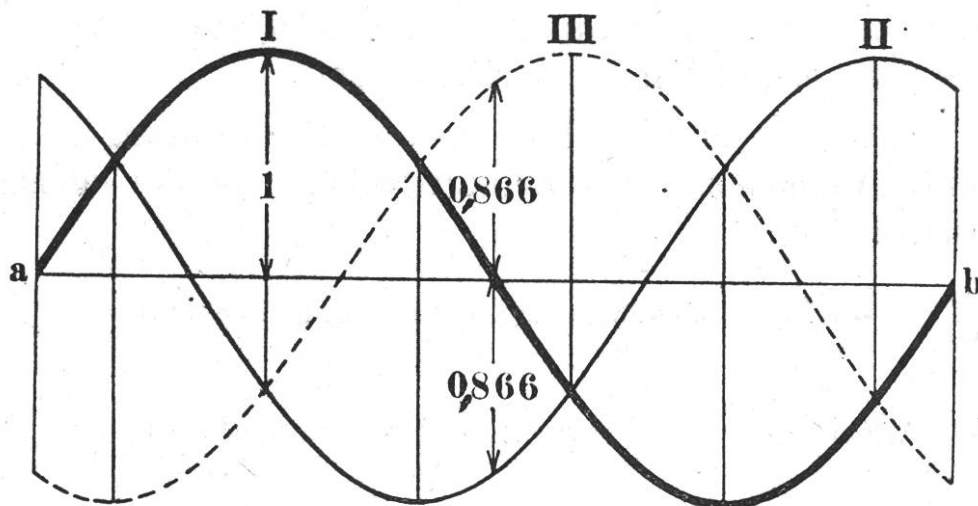


Fig. 43

Höchstwert erreicht wird, die andern beiden Ströme je nur halb so stark sind und in der dem ersten entgegengesetzten Richtung fließen. Auch außer diesen Momenten sind die Ströme von zwei Stromkreisen zusammen immer so stark wie der im dritten Stromkreis und diesem entgegengesetzt. Oder: In jedem Augenblick ist die algebraische Summe der Ströme in den drei Phasen gleich Null.

Diese Tatsache ermöglicht eine wesentliche Vereinfachung der Leitung. Die drei Wicklungen haben sechs Enden. Es schienen deshalb für die Fortleitung und die Zurückleitung der Ströme 6 Drähte notwendig zu sein. Durch geeignete Verbindung der drei Phasen kann nun die Zahl der Leitungsdrähte von 6 auf 3 reduziert werden. Diese Verkettung ist auf zwei Arten möglich, durch Sternschaltung und durch Dreieckschaltung. Bei der Sternschaltung, von der im folgenden einzig die Rede ist, werden die Enden der drei Wicklungen in einem Punkt, dem Nullpunkt, vereinigt (P in Fig. 39 und 44). In jedem Augenblick fließt von diesem Punkt gerade soviel Strom ab, als zufließt. Für die Fernleitung des Dreiphasenwechselstromes sind daher nur drei Drähte notwendig (sie werden an die Klemmen L I, L II, L III, Fig. 39, angeschlossen). Auch in den Dreiphasenwechselstromtransformatoren werden die Enden der Niederspannungswicklung sowie die Enden der Hochspannungswicklung je miteinander verkettet.

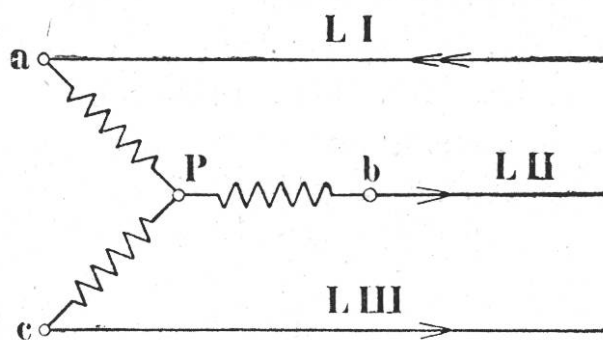


Fig. 44

In der Zeit, da sich das Polrad um den Polabstand dreht, entsteht in den Wicklungen ein Stromwechsel. Wenn es sich um zwei Polabstände weiterdreht, entsteht eine Periode. In unserem Beispiel entstehen also bei einer ganzen Drehung des Polrades drei Perioden. Soll der Strom 50 Perioden in der Sekunde haben, so muß das Polrad in einer Sekunde $16\frac{2}{3}$ Touren ausführen, oder in der Minute 1000 Touren. Hat das Polrad 8 Elektromagnete, so entstehen bei einer Umdrehung 4 Perioden. Damit in einer Sekunde 50 Perioden entstehen, muß sich das Polrad in einer Sekunde $12\frac{1}{2}$ mal drehen, oder in der Minute 750 Touren ausführen. Bei 24 Polen entstehen bei einer Drehung 12 Perioden, das Polrad muß in der Sekunde $4\frac{1}{6}$ Touren, oder in der Minute 250 Touren machen. Die Generatormaschine kann somit der Antriebmaschine angepaßt werden. Je langsamer diese läuft, um so mehr Pole muß das Polrad besitzen.

Motoren.

Der Gleichstrommotor.

Wenn der rechteckige Leiter unter Aufwendung von Arbeit im Kraftfeld gedreht wird (Seite 35), so entstehen darin Induktionsströme. Wenn nun umgekehrt von außen Strom durch das Drahtviereck geschickt wird, so bewirken die im Kraftfeld hervorgebrachten Veränderungen eine Drehung in entgegengesetzter Richtung. Was hierbei im Kraftfeld vorgeht, erkennen wir aus dem Kraftlinienbild Fig. 25.

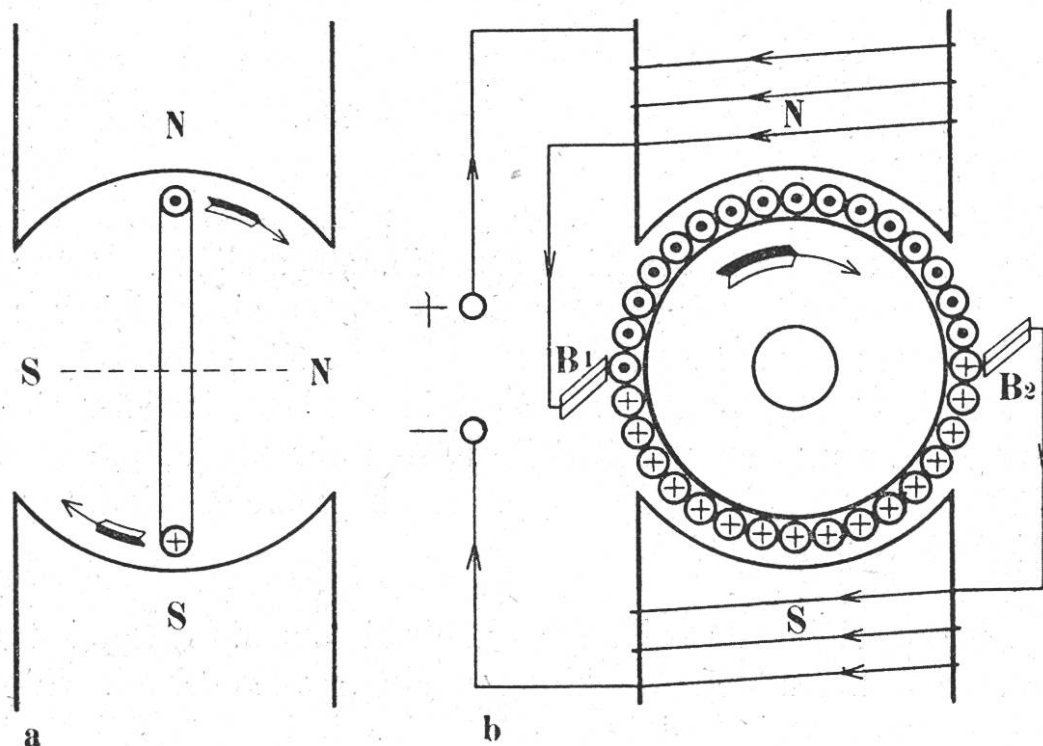


Fig. 45

Indem sich die Kraftlinien zu verkürzen suchen, stoßen sie die Stromleiter ab, so daß eine Drehung in Zeigerrichtung erfolgen muß.

Die Entstehung eines Drehmomentes kann auch noch auf andere Weise erklärt werden. Wenn im obern Schenkel des Drahtviereckes der Strom auf uns zu und im untern Schenkel von uns weg fließt (Fig. 45 a), so besitzt das Drahtviereck rechts einen Nordpol, links einen Südpol. Der Nordpol des Elektromagneten stößt den Nordpol des Drahtvierecks ab und zieht dessen Südpol an. Es wirkt also oben ein rechtsdrehendes Moment, unten entsprechend ein linksdrehendes Moment; deshalb entsteht eine Drehung in Zeigerrichtung.

Nach einer Vierteldrehung ist das Drahtviereck im toten Punkt angelangt. Die Figuren 46 und 47 stellen die Kraftlinienbilder in dieser Stellung dar. In beiden Figuren weist der Nordpol des obern Magneten nach unten, der Südpol des untern Magneten nach oben. In Fig. 46 fließt im Rechteckschenkel links der Strom von unten nach oben, im Schenkel rechts von oben nach unten, von uns weg. Die aus dem Nordpol des Magneten quellenden Kraftlinien stoßen auf die Kraft-

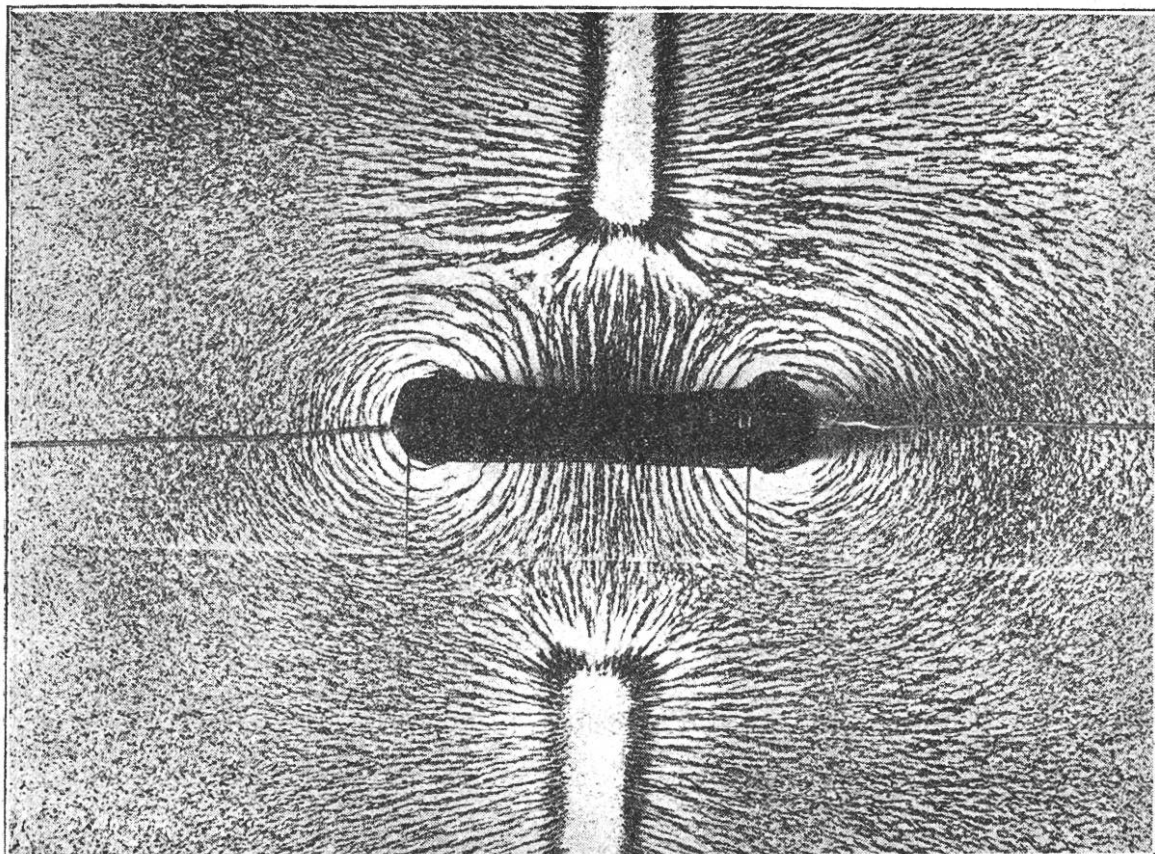


Fig. 46

linien des Leiters, sie werden nach außen getrieben, umfließen in weitem Bogen die Rechteckschenkel und dringen in den Südpol ein. Da sie sich zu verkürzen suchen, werden die beiden Schenkel gegeneinander getrieben, aber ein Drehmoment ist nicht vorhanden.

In Fig. 47 fließt der Strom im linken Rechteckschenkel abwärts, von uns weg, rechts aufwärts. Die Kraftlinien von Magnet und Stromleiter haben zwischen den Schenkeln die gleiche Richtung, daher werden die Kraftlinien der Magnete in den Hohlraum abgelenkt. Die beiden Rechteckseiten werden voneinander getrieben, aber ein Drehmoment ist wieder nicht vorhanden.

Wenn im Augenblick, da sich das Rechteck im toten Punkt befindet, der Strom umgekehrt wird, so treibt das neu entstehende Drehmoment in Verbindung mit dem Beharrungsvermögen das Drahtviereck weiter.

In unserm Modell der Gleichstrommaschine sind die Reibungswiderstände zu groß, als daß es als Motor laufen würde. Hingegen kann die Drehung am Ampèreschen Gestell nachgewiesen werden. An diesem wird das Drahtviereck auf-

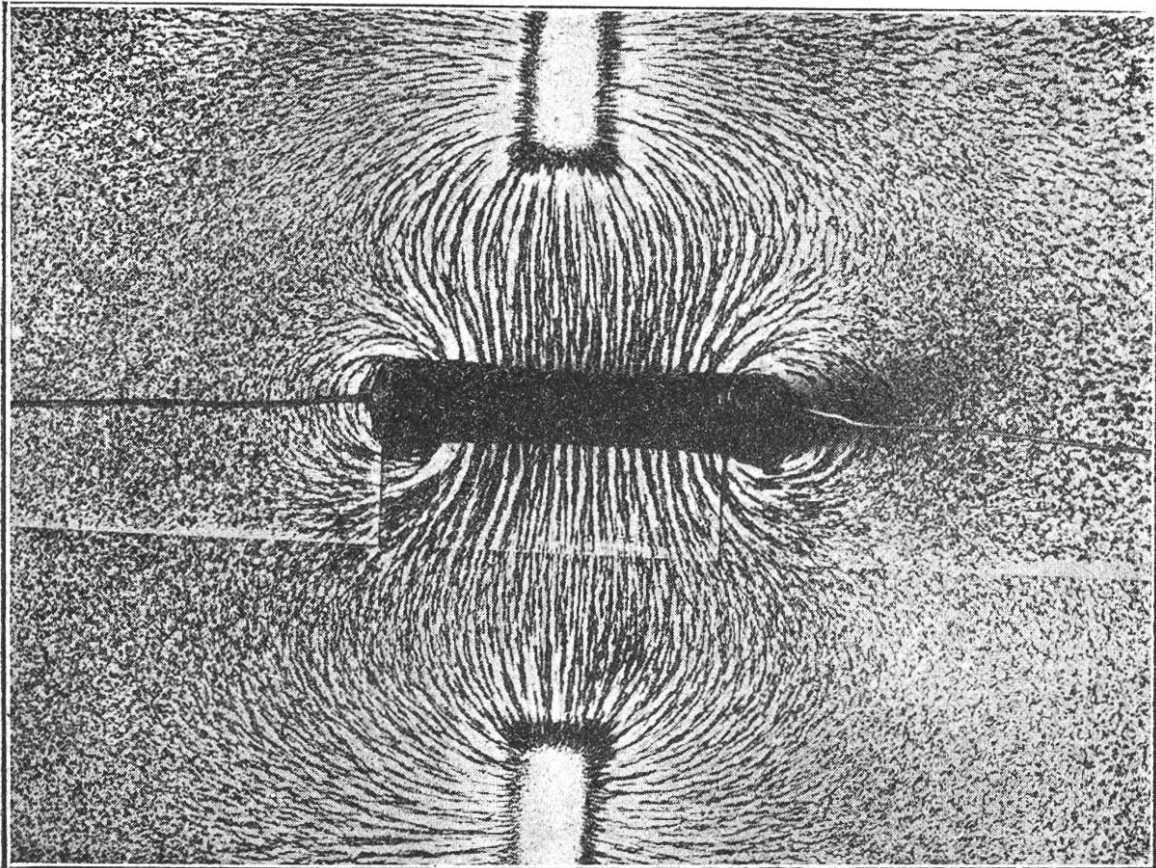


Fig. 47

gehängt und in die Stromleitung ein Stromwender eingeschaltet. Außen an das Drahtviereck werden in Ost-Westrichtung zwei Stabmagnete gelegt, so daß die entgegengesetzten Pole einander zugekehrt sind und daß zwischen den Polen und den Rechteckschenkeln nur wenig Spielraum ist. Das stromdurchflossene Rechteck stellt sich senkrecht zu den Magneten. Wenn aber je im Augenblick, da es im toten Punkt ankommt, die Stromrichtung umgekehrt wird, so rotiert es weiter. Der Stromwender vertritt die Stelle des Kommutators. Aus dem Gesagten folgt, daß jede Hauptstrommaschine ohne weiteres als Motor gebraucht werden kann; die Hauptstrommaschine ist, wie man sagt, umkehrbar.

Unsere Figur 45 b stellt schematisch einen Gleichstrommotor dar. In ununterbrochener Leitung sind auf dem Trommelanker eine große Zahl Drahtvierecke aufgewickelt. Der Strom tritt bei der mit $+$ bezeichneten Klemme ein, umkreist den obern Elektromagneten in Gegenzeigerrichtung, so daß er nach innen zum Nordpol wird. Bei der Bürste B_1 tritt er in die Ankerwicklung ein, umkreist sie so, daß vor dem Nordpol der Strom gegen uns gerichtet ist. Er tritt durch die Bürste B_2 aus, umkreist den untern Elektromagneten in Zeigerrichtung, so daß nach innen ein Südpol entsteht, und kehrt durch die mit $-$ bezeichnete Klemme in die Leitung zurück. Der Anker rotiert in Uhrzeigerrichtung (wie in Fig. 45 a). Man nennt einen Gleichstrommotor dieser Bauart einen Hauptstrommotor. Diese Motoren finden fast ausschließlich im Straßenbahnbetrieb Anwendung.

Daß eine Gleichstromgeneratormaschine als Motor läuft, können wir mit der Handdynamomaschine der Schulsammlung zeigen. Wir schicken durch ihre Klemmen den Gleichrichterstrom, wobei der Anker in lebhafte Drehung gerät.

Der Wechselstrommotor.

Wie der Gleichstrommotor, so besteht auch der Wechselstrommotor aus einem feststehenden Teil, dem Ständer, und dem rotierenden Teil, dem Anker. Der Ständer ist gebaut wie derjenige der Wechselstromgeneratormaschine. Von außen wird ihm Wechselstrom zugeführt. Während aber bei den Gleichstrommotoren auch dem Anker von außen Strom zugeführt wird, steht bei den Wechselstrommotoren, die für uns in Betracht kommen, den Asynchronmotoren oder Induktionsmotoren, der drehbare Teil, der Anker, nicht in Verbindung mit der äußeren Stromquelle.

Um die Wirkung des Asynchronmotoren zu verstehen, müssen wir das Drehfeld kennen lernen. Wir kehren zu Fig. 39 zurück. In je drei aufeinanderfolgenden Wicklungsschenkeln hat der Strom die gleiche Richtung, in den folgenden drei Schenkeln fließt er in entgegengesetzter Richtung. So fließt der Strom in der in der Zeichnung angegebenen Stellung in den Schenkeln 1, 2 und 3 von uns weg, in den Schenkeln 4, 5 und 6 auf uns zu. In den mittlern der drei Schenkel, in 2 und 5, hat der Strom das Maximum (Fig. 48, 1. Reihe). Im nächsten Moment, wenn sich das Polrad um 20° gedreht

hat, fließt der Strom in den Schenkeln 2, 3 und 4 von uns weg und in 5, 6 und 1 auf uns zu; das Maximum herrscht in 3 und 6 (Fig. 48, 2. Reihe). Nach einer weiteren Drehung um 20° fließt der Strom in 3, 4 und 5 von uns weg und in 6, 1 und 2 auf uns zu (Fig. 48, 3. Reihe) u. s. w. Genau die gleichen Verhältnisse treten auf, wenn Dreiphasenwechselstrom von außen in die Wicklungen des Ständers geleitet wird. Die in gleicher Richtung vom Strom durchflossenen Wicklungsgruppen rufen magnetische Felder hervor mit abwechselnden Nord- und Südpolen. Diese Felder wandern im Kreise, wie namentlich Fig. 48 in den verschiedenen Reihen veranschaulicht. Ein Magnetfeld, das mit gleichbleibender

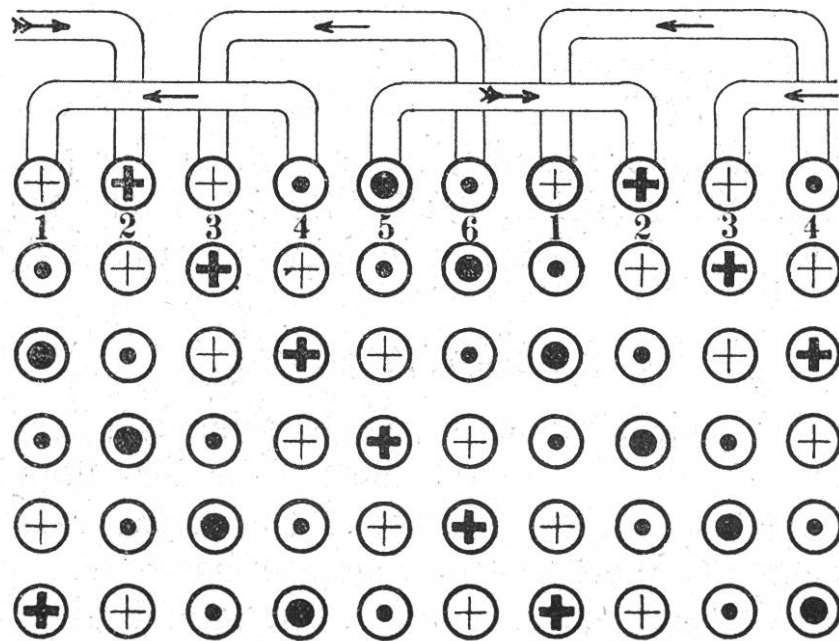


Fig. 48

Winkelgeschwindigkeit kreist, heißt Drehfeld. Wir verdanken seine Erfindung dem italienischen Physiker Galileo Ferraris (1887), der damit der Verwendung der Wechselströme neue Bahnen gewiesen und die Elektrotechnik um ein bedeutendes Stück vorwärts gebracht hat. Die Bezeichnung Drehstrom für den Dreiphasenwechselstrom rührt her von Dolivo-Dobrowolsky, dem Erfinder des Dreiphasenwechselstrommotors (1889).

Die Erzeugung eines Drehfeldes mit Hilfe von Gleichstrom und damit das Experimentieren mit dem Drehfeld auch unter bescheidenen Verhältnissen wird möglich gemacht durch den Drehfeldschalter nach Kuhfahl (Fig. 49), den Kollege Herr Volkart im Jahrbuch 1917 der Sekundarlehrerkonferenz

abgebildet und beschrieben hat. Ich verweise hiemit auf jene Veröffentlichung.

Unser Drehfeldapparat, Abbildung 50, ist in Fig. 51 schematisch dargestellt. Er besteht aus einem Ring von dünnem, weichem Eisendraht (in der Figur schraffiert), auf den 6 Drahtspulen gewickelt sind, 1—6, so daß jede einen Sechstel des Umfanges einnimmt. Die Enden von je zwei einander gegenüberliegenden Spulen sind miteinander ver-

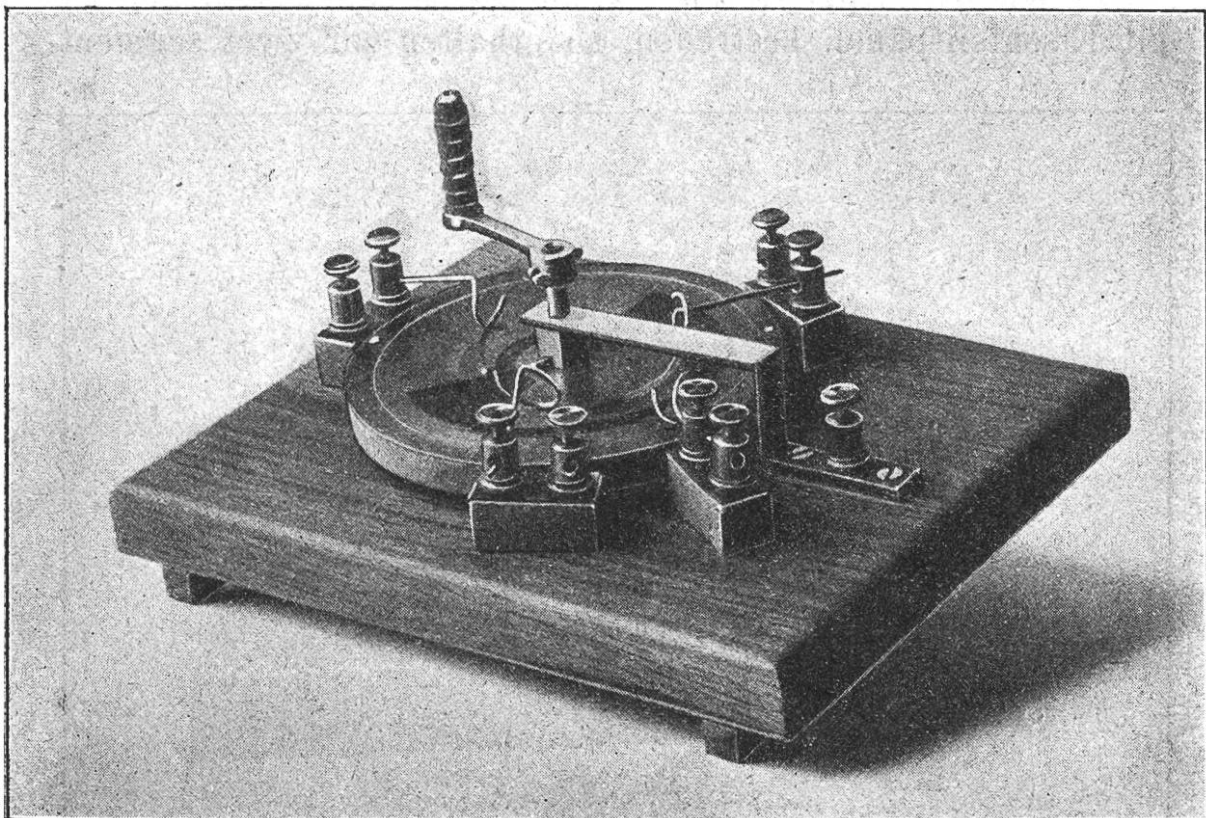


Fig. 49

bunden, 1 mit 4, 2 mit 5, 3 mit 6, so daß drei voneinander unabhängige Wicklungen entstehen. In der Zeichnung sind die drei Wicklungen durch verschiedene Darstellung unterschieden, am Apparat sind sie in drei Farben, blau, rot und gelb ausgeführt. Die Anfänge der drei Wicklungen sind zu den drei Anschlußklemmen I, II und III geführt. (In der Abbildung sind zwei derselben links und rechts sichtbar.) Ihre Enden sind im Punkt P, dem Nullpunkt (nächste Klemme der Abbildung), vereinigt, wie bei der Sternschaltung der Drehstrommaschine. Auf eine Nadelspitze im Mittelpunkt können eine Magnetnadel, ein Eisenblechbügel (siehe Abbildung), eine Eisenblechschachtel, eine Kupferblechschachtel und eine Aluminiumblechschachtel aufgesetzt werden.

Wenn wir nur ein zusammengehörendes Spulenpaar einschalten, indem wir z. B. den Anfang der blauen Wicklung I und den Nullpunkt P mit dem Drehfeldschalter verbinden (statt des Drehfeldschalters genügt für diesen Versuch auch ein Stromwender), so entsteht ein magnetisches Feld, dessen Achse senkrecht zu der Verbindungslinie der Mitten unserer Spulen liegt. Wenn man den Drehfeldschalter dreht, so kehrt das Feld die Pole um, liegt aber an der gleichen Stelle. Wenn wir den Apparat mit einem Karton bedecken, den wir mit Eisenfeilspänen bestreuen, so erhalten wir zwei segment-

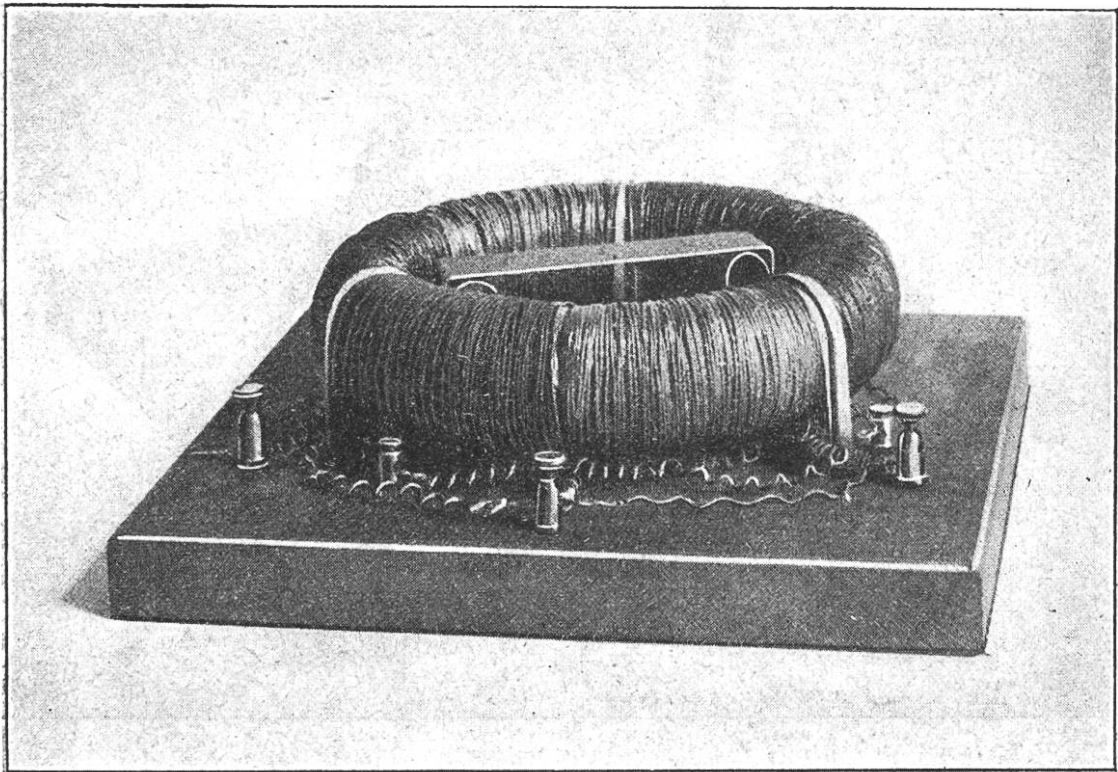


Fig. 50

förmige Kraftlinienbilder, die immer an der gleichen Stelle liegen, beim Drehen des Schalters erlöschen und sich wieder bilden. Legen wir die Magnetnadel oder einen Eisenblechbügel auf die Nadelspitze in der Mitte, so stellen sich diese in die Richtung der magnetischen Achse. Die Magnetnadel bleibt aber stehen, auch wenn man die Pole des magnetischen Feldes umkehrt; da sie genau in der Richtung der magnetischen Achse liegt, fehlt das Drehmoment. Wenn wir sie aber in Drehung versetzen, so gelingt es vielleicht, sie in Drehung zu erhalten. Es gelingt vielleicht auch, eine Blechbüchse, die an die Nadelspitze aufgehängt wird, in Drehung zu erhalten. Magnetnadel, Blechbügel und Büchse laufen nur

im gleichen Tritt mit dem Magnetfeld, nur synchron. Unser Versuch veranschaulicht die Verhältnisse des Einphaseninduktionsmotors. Dieser läuft, wie die auf die Nadelspitze aufgesetzten Gegenstände, nicht von selbst an, er muß in Gang versetzt werden und läuft nur synchron, d. h. er muß sich vollständig im Tritt mit dem Generator drehen. Bleibt der Motor infolge Überlastung oder aus andern Ursachen zurück, so fällt er außer Tritt und steht fast

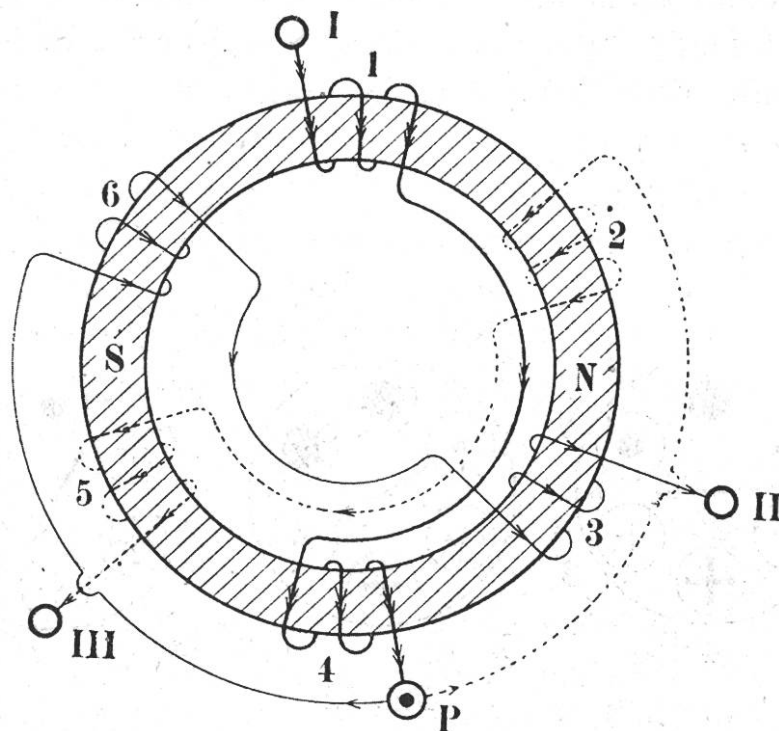


Fig. 51

plötzlich still. Einphaseninduktionsmotoren sind für viele Zwecke, z. B. für den Bahnbetrieb, nicht geeignet. Die Anwendung des Einphasenstroms für Traktionszwecke wurde erst durch Einführung des Einphasenkollektormotors ermöglicht (1903).

Wenn wir die Anfänge von zwei Spulenpaaren (z. B. der blauen und der roten) und den Nullpunkt mit dem Drehfeldschalter verbinden, so erhalten wir das Modell eines Zweiphasenmotors, allerdings mit unsymmetrischer Verteilung der Spulen. Wenn wir den Karton mit Eisenfeilspänen auflegen, erkennen wir wieder die zwei magnetischen Segmente, die durch eine Indifferenzzone voneinander getrennt sind; aber diese Segmente liegen nicht mehr still, sondern sie wandern beim Drehen des Schalters im Kreise. Wegen der unsymmetrischen Anordnung der Spulen, die eingeschaltet

sind, ist die Winkelgeschwindigkeit nicht die gleiche. Die in das Innere gebrachte Magnetnadel und der Blechbügel folgen diesen Feldern, sie drehen sich also im Kreise, wenn auch nicht gleichmäßig. Die Eisenblechbüchse aber rotiert wegen des größeren Beharrungsvermögens gleichmäßig. Bringen wir die Kupferblechbüchse ins Innere, so entstehen in ihrer Wandung Wirbelströme, die bewirken, daß sie im Sinne der Rotationsrichtung mitgenommen wird.

Verbindet man die Anfänge von allen drei Wicklungen des Drehfeldapparates mit dem Schalter, wobei die Verbindung mit dem Nullpunkt wegfällt, so ist das Drehfeld geschlossen.

In der Stellung, die in Fig. 51 angegeben ist, tritt der Strom durch die Anschlußklemme I in die Spule 1. Auf der

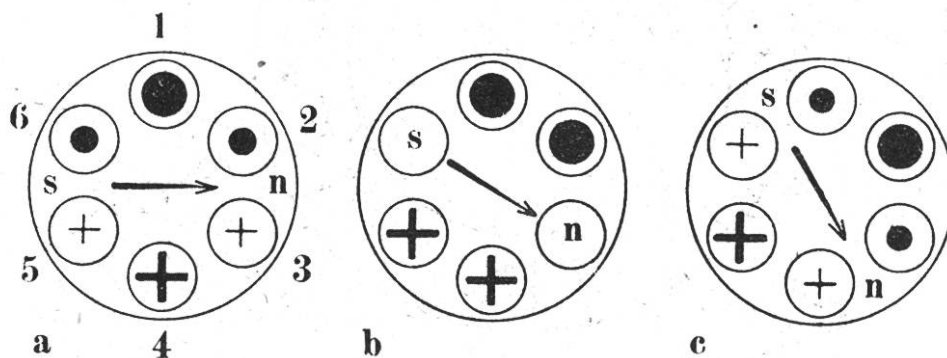


Fig. 52

uns zugewendeten Seite, die im folgenden immer gemeint ist, fließt der Strom nach innen. Die Fig. 52 gibt diese Stromrichtung durch einen Kreis mit rundem Fleck an. Er durchströmt die Spule 4 in der Richtung nach außen. In der Fig. 52 ist diese Richtung durch einen Kreis mit Kreuz bezeichnet. Im Punkt P teilt sich der Strom in zwei gleiche Zweige. Die eine Stromhälfte fließt durch die Spule 6 in der Richtung nach innen und durch die Spule 3 in der Richtung nach außen. Durch die Anschlußklemme II kehrt der Strom zum Drehfeldschalter zurück. Die andere Hälfte des Stromes fließt nach der Spule 2, umkreist sie in der Richtung nach innen, und hierauf die Spule 5 in der Richtung nach außen. Durch die Klemme III kehrt er zurück. In den Spulen 6, 1 und 2 kreist der Strom nach innen, in den Spulen 3, 4 und 5 nach außen. In den mittlern der drei Spulen fließt der ganze Strom, in den äußern der halbe (siehe Fig. 52). Das entstehende magnetische Feld hat nach

der Handregel rechts den Nordpol; der Nordpol der Magnetnadel zeigt auf die Mitte zwischen den Spulen 2 und 3.

Wenn der Drehfeldschalter gedreht wird, so wird die Wicklung II (Fig. 51) stromlos, da die zuleitende Feder auf die Isolierung gelangt. Der Strom tritt immer noch durch die Anschlußklemme I ein, er umkreist die Spulen 1 und 4 in der vorigen Richtung. Vom Punkt P aus fließt der ganze Strom nach Spule 2, umkreist sie nach innen und Spule 5 nach außen. Die Stromverhältnisse sind in Fig. 52b angegeben. Die magnetische Achse hat sich um $\frac{1}{12}$ der Umdrehung gedreht, die Magnetnadel zeigt auf die Mitten der stromlosen Spulen.

In der folgenden Stellung des Drehfeldschalters schleifen die mit den Anschlußklemmen I und II in Verbindung stehenden Federn auf dem stromzuleitenden Abschnitt. Durch die Klemmen I und II tritt deshalb je nur der halbe Strom ein. In den Spulen 1 und 3 kreisen halbe Ströme nach innen, in den Spulen 4 und 6 nach außen. Die beiden Stromhälften vereinigen sich im Punkt P. Von dort aus fließt der Gesamtstrom nach Spule 2, er umkreist sie nach innen, und nachdem er Spule 5 in der Richtung nach außen durchflossen hat, kehrt er durch die Anschlußklemme III zurück. In den Spulen 1, 2 und 3 fließt der Strom nach innen (Fig. 52 c), in den Spulen 4, 5 und 6 nach außen; in 2 und 5 fließt der ganze Strom, in den andern je die Hälfte. Die magnetische Achse hat sich wieder um $\frac{1}{12}$ der Umdrehung verschoben, der Nordpol der Magnetnadel zeigt zwischen die Spulen 3 und 4.

Im nächsten Moment ist die Wicklung I stromlos, der Strom tritt durch die Spule 3 ein und durch 6 aus, gelangt über P nach Spule 2, fließt dort nach innen und durch 5 nach außen. Der Nordpol der Magnetnadel zeigt nach der Mitte der stromlosen Spule 4. In der folgenden Stellung des Drehfeldschalters tritt der Strom durch die Anschlußklemme II ein, er umkreist die Spule 3 nach innen und 5 nach außen, teilt sich im Punkt P in zwei gleiche Zweige. Der eine Zweig fließt durch Spule 2 nach innen und Spule 5 nach außen, der andere durch Spule 4 nach innen und Spule 1 nach außen. Der Nordpol der Magnetnadel zeigt auf die Mitte zwischen den Spulen 4 und 5.

In der Spule 1 kreisen nacheinander der ganze Strom nach innen, dann der halbe Strom nach innen, dann wurde

sie stromlos; hierauf kreiste der halbe Strom nach außen, dann wird der ganze Strom nach außen kreisen und hierauf wieder der halbe. Die gleichen Stromverhältnisse herrschen in den andern Spulen, nur mit dem Unterschied, daß die Phasen gegeneinander verschoben sind. Die Schaulinie des Stromes unseres Drehfeldapparates zeigt Fig. 53. Im Unterschied

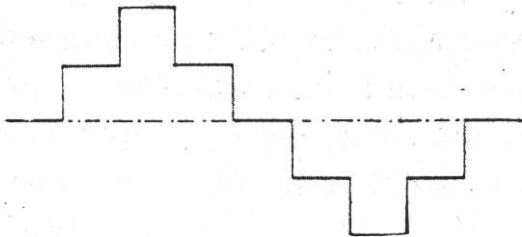


Fig. 53

zum Strom der Wechselstrommaschine verändert der Strom des Drehfeldapparates seine Stärke sprungweise. Auch das Drehfeld dreht sich sprungweise, während dasjenige der Drehstrommaschine sich in gleich-

bleibender Winkelgeschwindigkeit dreht.

Legt man auf den Drehfeldapparat einen Karton mit Eisenfeilspänen, so bemerkt man auf seinem Durchmesser eine Indifferenzzone. In ihrer Nähe sind die Eisenfeilspäne nur wenig aufgerichtet, sie neigen nach der Indifferenzzone. In der Mitte des magnetischen Feldes stehen die Feilspäne senkrecht. Beim Drehen des Schalters richten sich die Feilspäne auf, stehen senkrecht, neigen sich nach der andern Seite, legen sich flach, um wieder aufzustehen; sie marschieren gleichsam im Kreise. Setzt man den Blechbügel auf die Nadelspitze, so bewegt er sich wie die Magnetnadel beim langsamen Drehen des Schalters in regelmäßigen Abständen. Bei rascherem Drehen wird die Bewegung gleichförmig. Bringt man die Eisenblechbüchse auf die Nadelspitze, so dreht sie sich mit der gleichen Geschwindigkeit, mit der wir drehen, rechts und links herum. In gleicher Weise dreht sich die Kupferblechbüchse und eine Aluminiumblechscheibe, aber ihre Drehung erfolgt langsamer als die Drehung des Schalters.

Die Kupferblechbüchse erklärt uns die Verhältnisse eines Dreiphasenmotors, des Kurzschlußankers oder Käfigläufers. Dieser besteht in einem aus Eisenblech aufgebauten Zylinder, der an der Mantelfläche mit längsverlaufenden Nuten oder Bohrungen versehen ist. In diese werden massive Kupferstäbe gelegt, die auf der Stirnseite durch massive Kupferringe metallisch verbunden, kurzgeschlossen sind. Das rotierende magnetische Feld des Ständers schneidet den Läufer und ruft in ihm kräftige Ströme hervor. Das magnetische Feld

übt auf die Ströme eine Zugkraft aus, die mit den zunehmenden Ankerströmen wächst. Unter ihrer Einwirkung setzt sich der Anker in Bewegung und rotiert mit wachsender Geschwindigkeit. Je rascher er rotiert, je mehr sich seine Schnelligkeit der des magnetischen Feldes nähert, um so weniger Kraftlinien werden geschnitten, um so kleiner wird der Ankerstrom und damit die Zugkraft. Wenn sich der Anker genau gleich schnell dreht, wie das Drehfeld, wenn er synchron läuft, dann werden keine Kraftlinien geschnitten und die elektromotorische Kraft sinkt auf Null. Da nun aber zur Überwindung der Reibungsverluste des leerlaufenden Motors eine gewisse Arbeit notwendig ist, so kann der Leerlaufstrom nicht Null werden, es wird also auch bei Leerlauf eine relative Verschiebung zwischen Drehfeld und Ankerstäben bestehen, der Anker wird etwas hinter dem Drehfeld zurückbleiben. Man nennt das Zurückbleiben des Ankers hinter dem Drehfeld die Schlüpfung. Diese wird um so größer, je mehr der Motor belastet wird. Damit steigen die elektromotorischen Kräfte des Ankers und die Stromstärke des Ständers. Die aus dem Netz aufgenommene elektrische Leistung steigt und fällt deshalb mit der mechanischen Leistung des Motors.

Beim Kurzschlußanker fallen Kollektor und Bürsten weg, Erhitzung und Funkenbildung (und damit auch Stromverluste) werden vermieden, daher besitzt der Kurzschlußanker eine große Lebensdauer.

Wenn an unserem Modell zwei Drähte, die nach dem Motor führen, miteinander vertauscht werden, so läuft der Motor in entgegengesetzter Richtung. Beim Montieren eines Kurzschlußankers kann es vorkommen, daß der Anker in verkehrter Richtung läuft. Man hat in diesem Fall also bloß zwei Zuleitungsdrähte miteinander zu vertauschen.

Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß große elektrische Zentralen wirtschaftlicher arbeiten als kleine. Der Wirkungsradius dieser modernen Zentralen wird immer größer. Wo Wasserkräfte für die Erzeugung elektrischer Energie verwendet werden, ist die Entfernung zwischen Zentrale und Verbrauchsstelle meistens sehr groß, für die Stadt Zürich z. B. 140 km. Die Elektrotechnik hat also die Aufgabe zu

lösen, die Energie auf weite Entfernungen mit möglichst geringen Kosten zu übertragen. Nun setzt die Leitung dem Durchgang der Elektrizität einen Widerstand entgegen. Es entstehen Verluste, die bei gleichem Material abhängig sind von der Länge und dem Querschnitt der Leitung. Durch Vergrößerung des Querschnittes könnten die Verluste auf einen geringen Betrag herabgesetzt werden, aber dadurch würden die Anlagekosten steigen. Wirtschaftlicher ist, die Stromstärke herabzusetzen, wobei die Spannung im gleichen Verhältnis wachsen muß, da die zu übertragende Leistung das Produkt aus Stromstärke und Spannung ist. Für große Entfernungen können deshalb nur hohe Spannungen in Frage kommen.

Bei Gleichstrom läßt sich im allgemeinen keine hohe Spannung erzielen. Wegen der Schwierigkeit der Isolation am Kollektor kann nicht über etwa 1200 Volt gegangen werden. Man hat zwar für Zwecke der Energieübertragung Gleichstrom-Hauptstrommaschinen hintereinander geschaltet. Die bedeutendste Anlage dieser Art in der Schweiz ist die Übertragungsanlage von St. Maurice nach Lausanne. Wo aber von einer Zentrale aus eine große Zahl von Ortschaften und Einzelabonnenten zu bedienen sind, ist das Wechselstromsystem dem Gleichstromsystem weit überlegen.

Bei Wechselstrom kann man in den Maschinen selbst schon Strom von hoher Spannung, bis 15,000 Volt, erzeugen. Dann ist es möglich, durch ruhende Transformatoren die Maschinenspannung auf jeden gewünschten Grad, auf 100,000 und mehr Volt, zu erhöhen und ebenso die Leitungsspannung wieder auf Gebrauchsspannung herabzusetzen. Der Stromverlust bei der Transformation ist sehr gering.

In den Beleuchtungsanlagen ist eine ganz gleichmäßige Belastung der drei Phasen vollständig ausgeschlossen. Die Folge einer ungleichen Belastung wäre eine Verschiedenheit in der Spannung an den Verbrauchskörpern, die um so größer sein müßte, je mehr die Belastungen der drei Phasen von einander abweichen. Man macht deshalb im Ortsnetz vom Nullleiter Gebrauch. Vom Nullpunkt der Niederspannungswicklung des Transformators aus wird ein Leiter geführt und die Lampen werden zwischen eine Phase und den Nulleiter eingeschaltet. Die Lampen werden also mit Einphasenwechselstrom versorgt. Die Spannung zwischen der Phase und dem Nulleiter ist gleich der Phasenspannung, im kantonalen Werk also 145 Volt. Bei

gleichmäßiger Belastung fließt durch diese Ausgleichsleitung fast kein Strom. Bei ungleicher Belastung wirkt sie ausgleichend, derart, daß sie je nach den Verhältnissen überschüssigen Strom zum Transformator oder fehlenden zu den Lampen führt.

Motoren aber werden zwischen die drei Hauptleiter eingeschaltet, und zwar werden kleinere Motoren, wie z. B. zum Antrieb von landwirtschaftlichen Maschinen, Heiz- und Kocheinrichtungen, von der Lichtleitung aus gespiesen. Größere Motoren mit rasch wechselnder Belastung würden im Lichtnetz Störungen verursachen, sie werden deshalb an eine von der Lichtleitung getrennte Leitung angeschlossen. Im Motor werden die drei Enden der Leitung miteinander verbunden, verkettet. Es ist dies möglich, weil die drei Phasen gleich belastet sind und daher durch eine Phase immer so viel Strom zufließt, als durch die beiden andern abfließt. Die Spannung zwischen zwei Hauptleitern ändert jeden Augenblick ihren Wert (Fig. 43). Wenn sie in einer Phase den Maximalwert 1 erreicht, so ist sie in der andern Phase 0,5. Der Spannungsunterschied zwischen zwei Phasen ist somit in diesem Augenblick $1 + 0,5 = 1,5$. Wenn in der einen Phase die Spannung auf Null sinkt, beträgt sie in den beiden andern Phasen $+0,866$ und $-0,866$. Der Momentanwert der verketteten Spannung ist dann zweimal $0,866 = 1,732 = \sqrt{3}$. Es ist dies der Höchstwert der verketteten Spannung. Die Phasenspannung verhält sich also zum Höchstwert der verketteten Spannung wie $1 : 1,732$ oder wie $1 : \sqrt{3}$. Für diesen Höchstwert müssen die Motoren gebaut werden. In einem Verteilungsnetz von 145 Volt Phasenspannung verwendet man also neben Lampen für 145 Volt Spannung Motoren, die für eine Spannung von $145 \cdot 1,732$ Volt oder rund 250 Volt Spannung gebaut sind. Der Lichtspannung von 200 Volt entspricht eine Motorenspannung von rund 350 Volt.

Phasenspannungen	110	127	145	200 Volt.
Verkettete Spannungen ca.	190	220	250	350 Volt.

Eine Sekundärleitung im Dorfnetz besteht aus 5 Drähten, drei dickern oben und zwei dünnern unten. Die drei dickern Drähte sind die Hauptleiter für die Hausbeleuchtung und die Kleinkraftabgabe. Einer der dünnen Drähte ist der Hauptleiter für die Dorfbeleuchtung, der andere ist der Nulleiter; er ist für die Hausbeleuchtung und die Dorfbeleuchtung

gemeinsam. Von einem der dicken Drähte, oder wenn das Haus viele Lampen und Glühkörper zählt, von zwei derselben und vom Nulleiter zweigen in jedes Haus Drähte ab. Die Lampen u. s. f. sind zwischen den Hauptleiter und den Nulleiter eingeschaltet. An passend verteilten Masten zweigen von allen drei dicken Drähten Abzweigungen ab, die zu einem Kontakt führen, an den fahrbare Motoren zum Betrieb von Dreschmaschine, Holzfräse etc. angeschlossen werden können.

Literatur.

- Dr. *E. Blattner*. Lehrbuch der Elektrotechnik. 2 Teile. 3. Auflage. Bern, K. J. Wyß Erben.
- Dr. *L. Grütz*. Die Elektrizität. Stuttgart. Engelhorn.
- E. Grimsehl*. Lehrbuch der Physik. 2 Bände. Leipzig, B. G. Teubner.
- J. Herrmann*. Elektrotechnik. Einführung in die Starkstromtechnik. Sammlung Götschen, Band 196, 197, 198, 657.
- Dr. *Friedrich C. G. Müller*. Technik des physikalischen Unterrichts. Berlin, Otto Salle.
- Dr. *Karl Rosenberg*. Experimentierbuch für den Unterricht in der Naturlehre. 2 Bände. Wien, Alfred Hölder.
- Dr. *Wilh. Volkmann*. Anleitung zu den wichtigsten physikalischen Schulversuchen. Berlin, Mückenberger.

(Die Photographien zu einem Teil der Abbildungen wurden von Herrn Sekundarlehrer Paul Hertli und meinem Sohn Max aufgenommen.)
