



Einführung in die Elektricitätslehre

Vorträge

Dynamische Elektricität

Kolbe, Bruno

Berlin, 1895-

III. Vortrag: Nachweis des Stromgefälles beim galvanischen Strome; Der Stromwender; Gegenseitige Anziehung und Abstossung von Stromleitern; Das Ampère'sche Gestell; Richtkraft beweglicher ...

[urn:nbn:de:hbz:466:1-80924](https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:466:1-80924)

III. Vortrag.

Nachweis des Stromgefälles beim galvanischen Strom; Der Stromwender; Gegenseitige Anziehung und Abstoßung von Stromleitern; Das Ampère'sche Gestell; Richtkraft beweglicher Stromleiter; Wechselwirkung zwischen zwei Stromleitern; Wirkung eines Magnets auf einen beweglichen Stromleiter; Das Solenoid; Elektromagnete; Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom; Ampère's Schwimmregel; Gesetz der Stromrichtung; Ampère'sche Hypothese des Magnetismus; Lodge's Versuch; Das Galvanoskop; Unterschied in den Angaben des Galvanoskops und des Elektrometers; Der Multiplikator.

Wir haben auf unserer zweiten Wanderung eine neue Elektricitätsquelle kennen gelernt: wir sahen, dass unter gewissen Umständen Metalle durch Berührung mit Flüssigkeiten dauernd elektrisch werden können. Die hierbei auftretenden Elektricitätsgrade sind jedoch so gering, dass wir das Aluminium-Elektrometer mit dem Kondensator verwenden mussten, um uns von dem Vorhandensein von freier Elektricität an den herausragenden Enden (den Polen) zu überzeugen. Wir sahen:

Rückblick.

1. Bei der Berührung eines Metalles mit einer geeigneten Flüssigkeit zeigt das hervorragende Ende des Metalles (meist) — E (am stärksten Zink), während die Flüssigkeit die entgegengesetzte Ladung annimmt. Bei gleichzeitigem Eintauchen zweier verschiedener Metallstäbe nimmt das herausragende Ende des einen Metalles eine Ladung + E an, während das andere — E aufweist. Diese elektrische Poldifferenz stellt sich nach ableitender Berührung sofort wieder her und bleibt solange bestehen, als die chemische Wirkung zwischen der Flüssigkeit und den Metallen ungeschwächt vorhält; daher sehen wir in der chemischen Wirkung die Ursache der Elektricitätserregung im galvanischen Element.
2. Die elektrische Niveaudifferenz der freien Pole eines galvanischen Elements ist uns ein Maßstab für die elektromotorische Kraft. Hat der eine freie Pol

den Elektrisierungsgrad $+e$ und der andere $-e$, so tritt die gesamte Niveaudifferenz $+e - (-e) = 2e$ an dem einen Pole auf, wenn der andere zur Erde abgeleitet ist, also das Nullniveau der Erde annimmt.

3. Werden mehrere konstante und gleiche galvanische Elemente parallel geschaltet, so ist die elektromotorische Kraft der Batterie dieselbe, wie bei einem einzelnen Element, wächst dagegen bei der Schaltung hintereinander mit der Anzahl der Elemente. Sind die Elemente von ungleicher elektromotorischer Kraft, so ist bei der Schaltung nacheinander die gesamte elektromotorische Kraft der Kette gleich der algebraischen Summe aller elektromotorischen Kräfte der einzelnen Elemente (auch für den Fall, daß einige Elemente den anderen entgegengesetzt geschaltet sind).

* * *

Unsere bisherigen Versuche beschränkten sich auf den Nachweis der Elektricität an den freien Polen der galvanischen Elemente. Nun wollen wir — wie wir es bereits (S. 9) bei der Influenzmaschine gethan haben —, das Stromgefälle im geschlossenen Stromkreise verfolgen.

Da aber, nach unserer Erfahrung, die Niveaudifferenz der Pole sehr stark abnimmt, wenn eine leitende Verbindung hergestellt und dadurch ein elektrischer Strom hervorgerufen wird, und die Poldifferenz der galvanischen Elemente überhaupt im Vergleich zu der Elektrisiermaschine sehr gering ist, so müssen wir eine Kette von vielen Elementen bilden. Wir wollen kleine Batterieen von Daniell'schen Elementen (vergl. Fig. 17) verwenden. Zehn Batterieen zu je 5 Elementen, alle hintereinander geschaltet, werden genügen, da wir die 50fache elektromotorische Kraft eines Elements haben. Eine kleine Batterie zeigt Ihnen Fig. 18 (a. d. f. S.). Vermittelst der in die Löcher der Messingständer (m) passenden Drähte ($d_1 d_2$) verbinden wir diese Fünfer-Batterieen unter einander. — (Der gemeinsame Holzständer H macht die Batterie stabiler und zugleich transportabler und gestattet auch, nach Belieben Gruppen von parallel geschalteten Elementen zu verwenden.)

Nun fehlt uns noch ein passender Stromleiter. Hier sehen Sie (R, Fig. 19) über dem Experimentiertisch an zwei Schnüren einen Holzrahmen hängen, der oben 10 und unten 11 starke

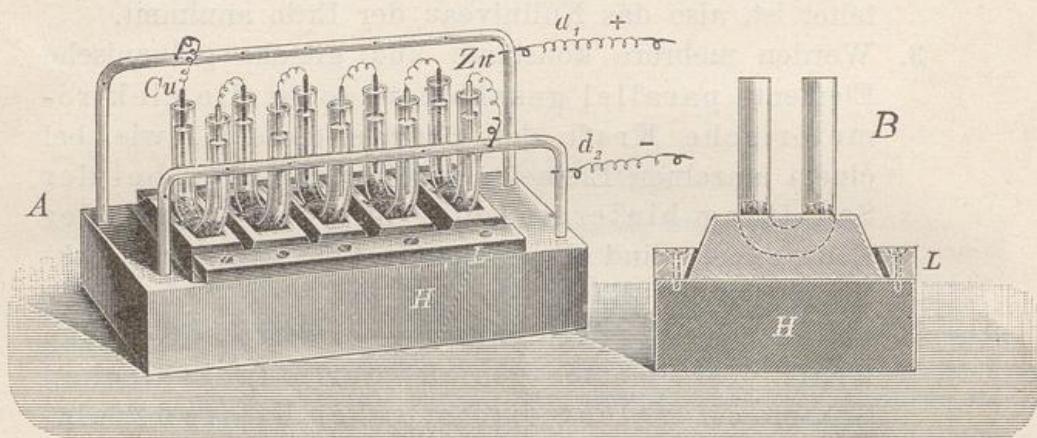


Fig. 18.
Kleine Batterie von 5 Daniell'schen Elementen. (A $\frac{1}{3}$, B $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse.)

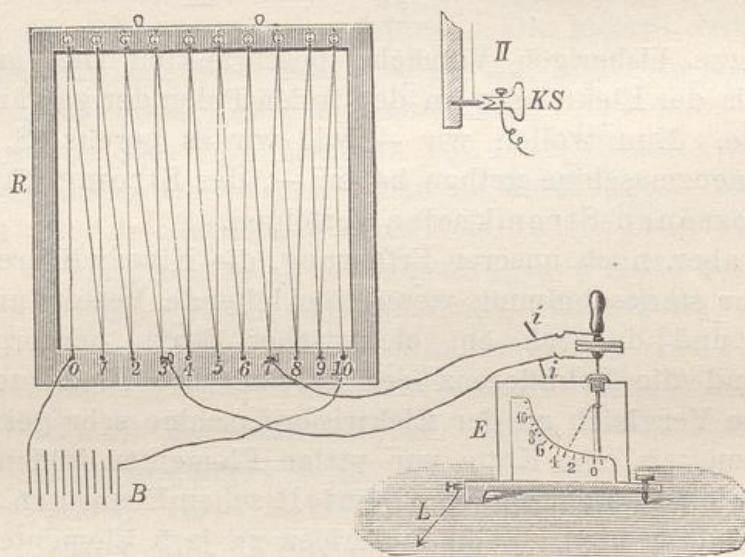


Fig. 19.
Nachweis des Stromgefälles im Stromleiter. $\frac{1}{15}$ natürl. Gröfse
R Stromleiter; B Batterie von 50 Elementen; E Elektrometer; II Kontaktschlüssel.

Neusilberstifte trägt, deren herausragenden Ende etwas zugespitzt sind, sodass sie in die Bohrung eines Kontaktschlüssels (S II) passen. Einen sehr langen feinen Neusilberdraht habe ich möglichst genau in 10 gleiche Teile geteilt und die Teilpunkte fest um die unteren Stifte (0, 1, 2, 3, ..., 10) gewickelt,

die zwischenliegenden Stücke zu Locken aufgewickelt und mit der Mitte an dem betreffenden oberen Stift eingehakt. So stellt der ganze Draht eine sehr lange Leitung dar. Die Stifte 0 und 10 verbinde ich durch biegsame starke Drähte mit der Batterie (B) von 50 Elementchen.

Durch zwei feine umspinnene Kupferdrähte, deren eines Ende an je 1 Kontaktschlüssel befestigt ist, während das andere einen isolierenden Siegellackgriff (ii) trägt, kann ich die Kondensatorplatten des Elektrometers mit je zwei Stiften für einen Moment verbinden, um die elektrische Niveaudifferenz dieser beiden Punkte der Strombahn zu bestimmen. Zwischen den Stiften 0 und 10 (s. Fig. 19) erhalten wir 8,2 Aichungsgrade. Da der ganze Leitungsdraht zwischen diesen beiden Punkten möglichst genau in 10 gleiche Teile geteilt worden ist, so dürfen wir erwarten, dass zwischen den Punkten 0 und 1, 1 und 2 u. s. w. der 10. Teil dieser Niveaudifferenz auftreten wird (s. o. S. 14). Das ist tatsächlich der Fall, denn das Elektrometer zeigt 0,79; 0,80; 0,80; 0,81 u. s. w., d. h. bei einem gleichförmigen Stromleiter ist der Niveauunterschied zwischen gleichweit abstehenden Punkten der Strombahn konstant. (Diese Versuchsanordnung ist — des Kondensators wegen — nicht ganz einwandfrei, doch genügt sie, um Ihnen vorläufig einen Begriff davon zu geben, dass auch hier ein Stromgefälle stattfindet.) — Sehr misslich ist, bei der für diesen Zweck geringen Anzahl von Elementen, der Nachweis, dass die freie Elektricität von dem einen Pole (0) bis zum anderen (10) stetig abnimmt, doch wollen wir es versuchen. Ich verbinde die Elektrometerplatte (Fig. 19) mit dem Stifte 0, aber leite gleichzeitig die obere Platte zur Erde ab. Nach dem Abheben der oberen Platte zeigt das Elektrometer $+E = 3,3$, dagegen beim Stifte (10) $-E = 3,5$; dazwischen sind bei 1 bis 5 die Ladungen abnehmend positiv, von 6 bis 10 wachsend negativ. Der Nullpunkt liegt also im Neusilberdraht zwischen 5 und 6. — Sie sehen, dass wir bei dem galvanischen Strome im wesentlichen dieselben Erscheinungen haben, wie wir sie bei Anwendung der Influenzmaschine beobachteten.

* * *

Nun wollen wir einen Schritt weiter gehen und fragen: welche Wirkungen ruft der elektrische Strom in seiner Umgebung hervor?

Zunächst wollen wir untersuchen, ob die vom elektrischen Strome durchflossenen Leiter sich auch gegenseitig anziehen oder abstossen, wie wir es bei elektrisierten Körpern (z. B. an den elektrischen Pendeln) beobachteten. Zu diesem Zweck müssen wir leicht bewegliche Stromleiter herstellen und zusehen, ob ein genährter zweiter Stromleiter irgend eine Wirkung auszuüben vermag!

Da wir, auch späterhin, oft genötigt sein werden, die Richtung des Stromes in einem bestimmten Leiterstück

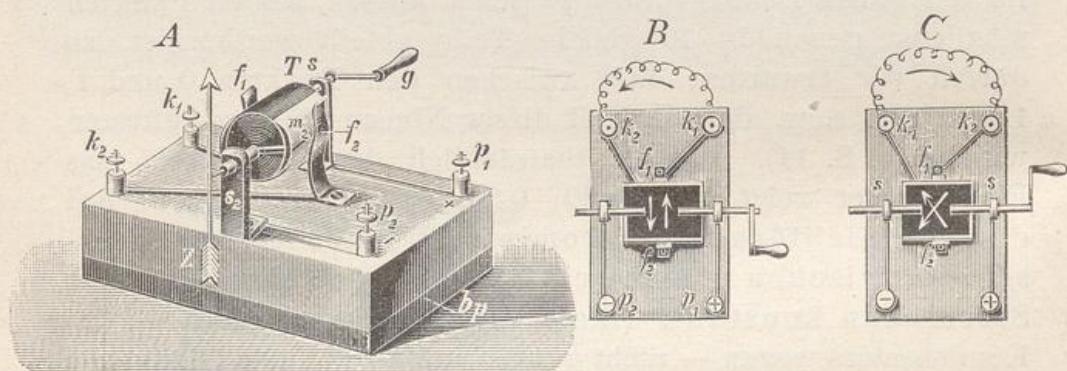


Fig. 20.

Stromwender nach Rühmkorff, mit automatischem Stromrichtungszeiger (Z).
 $\frac{1}{4}$ natürl. Gröfse.

umzukehren, so wollen wir einen Hülfsapparat benutzen, der das gestattet, ohne daß wir die Poldrähte vertauschen müßten. Einen solchen Stromwender oder Kommutator lege ich Ihnen hier vor (Fig. 20).

Ein kleiner Ebonityylinder (T) ist durch zwei nicht durchgehende (also von einander isolierte) Achsen in zwei Messingständern ($s_1 s_2$) vermittelst der Kurbel (g) drehbar. Die Ständer sind durch Kupferstreifen mit den Klemmschrauben $p_1 p_2$ verbunden. Von den Achsen führt je ein Kupferstreif zu zwei Metallplatten ($m_1 m_2$), welche auf dem Cylindermantel so befestigt sind, daß sie sich gegenüberstehen und bei einer gewissen Stellung des Stromwenders mit den Messingfedern ($f_1 f_2$) in Berührung stehen, welche wieder durch Kupferstreifen mit den Klemmschrauben $k_1 k_2$ verbunden sind. Werden die Klemm-

schrauben $p_1 p_2$ mit den Poldrähten eines Elements verbunden und zwischen $k_1 k_2$ ein Leiter eingespannt, so fliesst der Strom bei einer Stellung des Stromwenders (B, Fig. 20) von p_1 über k_1 nach k_2 , dagegen in der anderen Stellung des Cylinders (C, Fig. 20) von p_1 über k_2 nach k_1 , also wird in dem zwischen k_1 und k_2 befindlichen Leiterstück der Strom die Richtung wechseln, wenn die Kurbel (g) eine halbe Drehung macht. In der mittleren Stellung des Cylinders werden die Federn ($f_1 f_2$) nicht berührt, also ist der Strom unterbrochen. Die verlängerte Achse des Cylinders hat eine

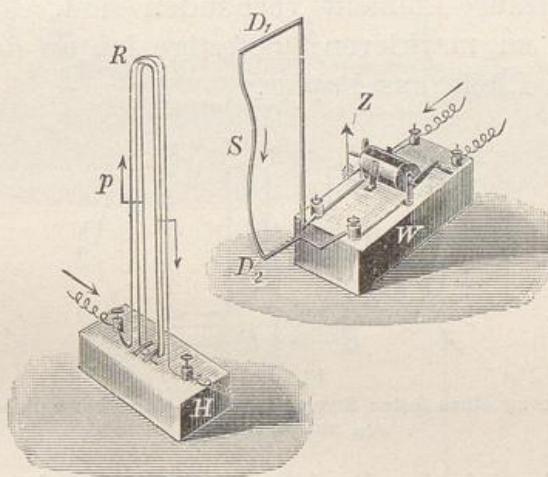


Fig. 21.

Beweglicher Stromleiter (S) nach Mühlenbein. Modifiziert und vereinfacht.
 $\frac{1}{9}$ natürl. Grösse.

axiale Bohrung, in welche ein Stift passt, welcher an einen Neusilberzeiger (Z) gelötet ist. Wird der Stift eingesetzt, so dreht sich der Zeiger mit dem Cylinder und giebt die veränderte Stromrichtung im Leiterstück ($k_1 k_2$, bei A Fig. 20) an, was Sie mithin von Ihren Plätzen aus kontrollieren können.

Einen beweglichen Stromleiter liefert uns ein schmaler Streifen von feinstem Blattzinn (Stanniol), etwa 28 cm lang und 5 mm breit; diesen befestige ich an den Enden passend geformter starker Messingdrähte ($D_1 D_2$, Fig. 21), die am Stromwender angebracht sind, in der Weise, dass er schlaff herabhängt⁶⁾. Verbinde ich

⁶⁾ Mit einer Laubsäge ist in die Messingdrähte ($D_1 D_2$, Fig. 21) eine Spalte von etwa 1 cm Tiefe eingesägt, das 2—3fach zusammengelegte Ende des Stanniolstreifens eingeschoben und die vorstehenden Drahtenden mit biegsamem Kupferdraht zusammengeschnürt.

nun die anderen Klemmschrauben des Stromwenders, die mit einem + und — markiert sind, mit den entsprechenden Polen eines Bunsen'schen Chromsäure-Elements (s. Fig. 31), so fliesst der Strom in der Richtung des Stromzeigers (Z) durch den Stanniolstreifen. — Als fester Leiter dient uns starker, mit Seide oder wachserter Baumwolle umspinnener Kupferdraht, den ich in 4—5 Windungen zu einem Rahmen (R, Fig. 21) zusammenbiege und auf einem Holzklotz (H) aufrecht befestige, nachdem ich die Ecken mit Bindfäden zusammengeschnürt habe. Die Enden dieses Drahtes führe ich zu Klemmschrauben, die mit einem zweiten Chromsäure-Element verbunden sind. Um Ihnen die Stromrichtung zu markieren, befestige ich an den Seiten des Rahmens zwei Pfeile aus Papier.

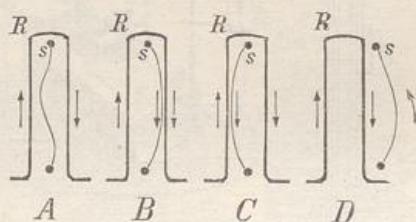


Fig. 22.
Wirkung eines festen Stromleiters auf einen beweglichen.
1/18 natürl. Grösse.

Nun schiebe ich den Drahtrahmen R über den Zinnstreifen, den ich im Auge zu behalten bitte (Fig. 22). — Jetzt schliesse ich am Stromwender den Strom. Während bisher das Zinnblättchen (S, Fig. 22) schlaff herabhangt, bläht es sich jetzt auf und legt sich bald an die eine, bald an die andere Seite des Drahtrahmens an (B und C, Fig. 22), wenn ich die Stromrichtung ändere. Es macht den Eindruck, als ob der Zinnstreifen bald von der rechten, bald von der linken Hälfte des Rahmens angezogen würde. Ein Blick auf den Stromrichtungs-Zeiger des Kommutators ergiebt, dass der bewegliche Leiter nach der Seite des Rahmens gezogen wird, wo der Strom dieselbe Richtung hat.

Nun modifiziere ich den Versuch, indem ich den Drahtrahmen dicht neben den Stanniolstreifen stelle und den Strom schliesse — auch jetzt findet bei gleicher Stromrichtung Anziehung, aber bei entgegengesetzter eine deutliche Abstossung statt (D, Fig. 22), wir erhalten also die Regel:

Gleichgerichtete elektrische Ströme ziehen sich an, entgegengesetzte gerichtete stoßen sich ab.

Falls unsere Beobachtung richtig ist, so müfste ein frei beweglicher Stromleiter das Bestreben haben, sich einem in

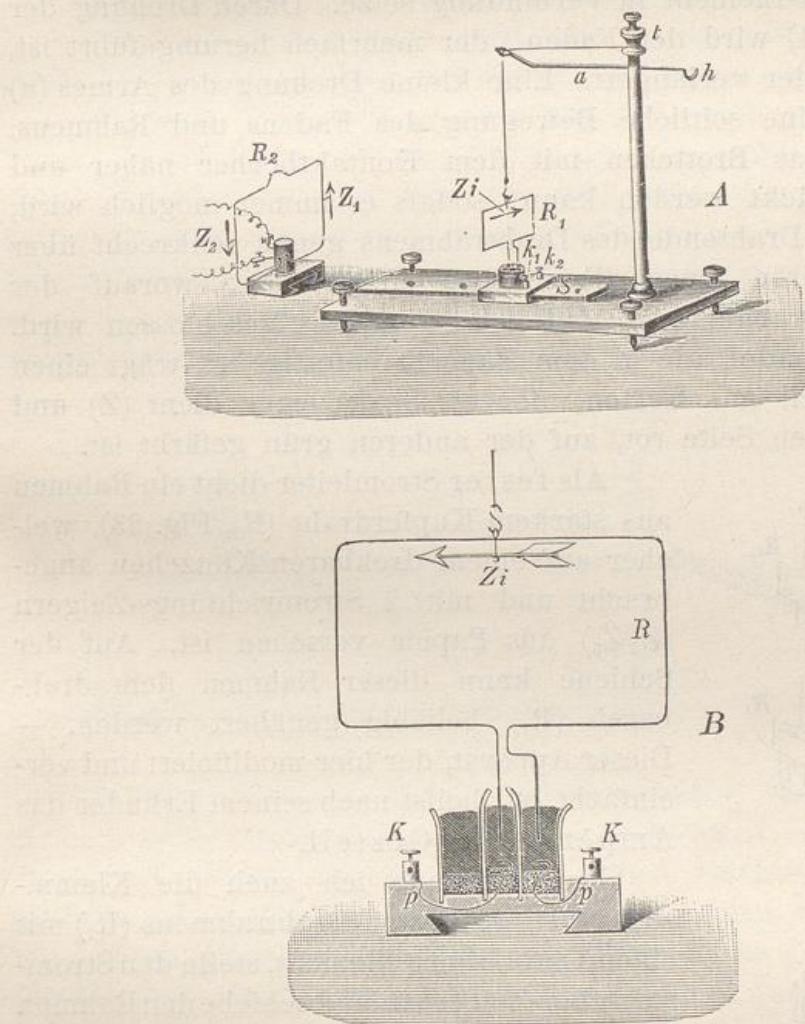


Fig. 23.

Modifiziertes und vereinfachtes Ampère'sches Gestell. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.
B Kontaktbecher. $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse.

der Nähe befindlichen Stromleiter gleichgerichtet parallel zu stellen, also unter Umständen eine Richtkraft zeigen! Das wollen wir doch versuchen.

Ein nicht geschlossener Drahtrahmen (R, Fig. 23) ist so an einem schlichten Frauenhaar (oder an einem ungedrehten Kokonfaden) aufgehängt, dass die freien Enden in zwei Queck-

silbernäpfe (B, Fig. 23) tauchen, von denen der eine den anderen umgibt. Beide Quecksilbergefäße sind von einander isoliert, aber durch Platindrähte mit den Klemmschrauben verbunden, welche ich durch den Stromwender mit einem Chromsäure-Element in Verbindung setze. Durch Drehung der Trommel (t) wird der Faden, der mehrfach herumgeführt ist, verkürzt oder verlängert. Eine kleine Drehung des Armes (a) gestattet eine seitliche Bewegung des Fadens und Rahmens, während das Brettchen mit dem Kontaktbecher näher und weiter gerückt werden kann, sodafs es immer möglich wird, das gerade Drahtende des Drahtrahmens genau senkrecht über dem mittleren Quecksilberbecher einzustellen, worauf der Rahmen herabgelassen und der Stromkreis geschlossen wird. Eine Stecknadel, die in dem Rahmen befestigt ist, trägt einen kleinen Pfeil aus Karton, der als Stromzeiger dient (Z) und auf der einen Seite rot, auf der anderen grün gefärbt ist.

Als fester Stromleiter dient ein Rahmen aus starkem Kupferdraht (R_2 , Fig. 23), welcher auf einem drehbaren Klötzen angebracht und mit 2 Stromrichtungs-Zeigern ($Z_2 Z_3$) aus Papier versehen ist. Auf der Schiene kann dieser Rahmen dem drehbaren (R_1) beliebig genähert werden. — Dieser Apparat, der hier modifiziert und vereinfacht ist, heißt nach seinem Erfinder das Ampère'sche Gestell.

Nun verbinde ich auch die Klemmschrauben des festen Drahtrahmens (R_2) mit einem Chromsäure-Element, stelle den Stromrichtungs-Zeiger ein und schiebe den Rahmen zum beweglichen heran, daß eine vertikale Seite voransteht (A, Fig. 24). Sie sehen, der bewegliche Leiter wendet sich und stellt sich so, daß im genäherten Teile der Strom gleichgerichtet ist. — Ich drehe den festen Rahmen um 180° , und sofort macht der bewegliche Leiter eine Schwenkung und stellt sich wieder entsprechend ein (B, Fig. 24). Nun unterbreche ich den Strom am Kommutator, schiebe den festen Rahmen soweit vor, daß die

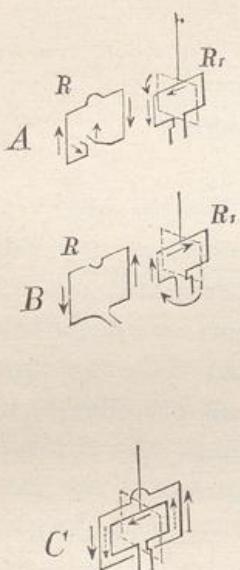


Fig. 24.
Richtkraft eines festen Stromleiters auf einen beweglichen.
 $1/10$ natürl. Grösse.

bewegliche Leiter eine Schwenkung und stellt sich wieder entsprechend ein (B, Fig. 24). Nun unterbreche ich den Strom am Kommutator, schiebe den festen Rahmen soweit vor, daß die

Mittelpunkte beider Rahmen zusammenfallen und schließe den Strom — sofort schwingt der bewegliche Leiter herum, pendelt einige Mal hin und her und stellt sich wieder so, daß die Ströme gleichgerichtet parallel sind (Ampère).

Jetzt verbinde ich beide Chromsäure-Elemente (parallel geschaltet) mit dem Stromwender, also mit dem schwebenden Drahtrahmen und schließe den Strom dem Zeiger entsprechend — der Ring dreht sich langsam und stellt sich so, daß der Pfeil nach Osten zeigt. Sollte das ein Zufall sein? Ich drehe den Pfeil um 180° und gebe dem Strom die umgekehrte Richtung (die also wieder vom Pfeil markiert wird) — der Erfolg ist derselbe! In beiden Fällen fließt also der Strom oben nach Osten oder, wenn Sie von Norden blicken, im umgekehrten Sinne wie die Bewegung der Uhrzeiger. — Woher

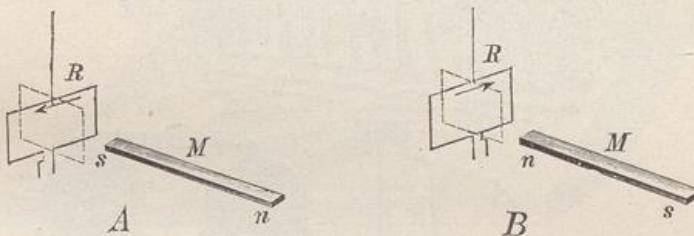


Fig. 25.

Wirkung eines Magnets auf einen beweglichen Stromleiter. $1/10$ natürl. Größe.

kommt das? Der von einem verhältnismäßig starken Strom durchflossene Drahtrahmen zeigt eine Richtkraft, ähnlich wie eine Magnetnadel, nur daß er mit seinen Flächen eine nord-südliche Lage einnimmt, seine Ebene also eine west-östliche ist. Diese Richtkraft kann — da weiter keine Ursache vorhanden ist — nur eine Wirkung des Erdmagnetismus sein. Ist diese Voraussetzung richtig, so muß ein genäherter Magnetstab eine Richtkraft auf den beweglichen Leiter äußern! Die Probe ist einfach. Ich nähre das Südenende eines Magnetstabes der Kante des Drahtrahmens (A, Fig. 25). Sie sehen, wie der Ring sogleich eine Vierteldrehung macht und dem Südpol des Magnets die Fläche zukehrt, welche vorhin nach Norden gerichtet war. Das Umgekehrte tritt ein, wenn ich den Nordpol des Magnets heranbringe (B, Fig. 25). Diese auffallende Erscheinung zeigt uns

Wirkung eines Magnets auf einen bewegl. Stromleiter.

unverkennbar, daß zwischen den elektrischen Strömen und den Magneten eine Beziehung herrscht. Diese zu erforschen soll jetzt unsere Aufgabe sein.

Das Solenoid.

Ich ersetze den Drahtrahmen unseres Apparates durch eine Locke aus hartem, also steifem Kupferdraht (Fig. 26), die so gewickelt ist, daß die Enden, ohne die Windungen zu berühren, nahe zusammenkommen, wo sie durch ein Stückchen Kork geführt und so gebogen sind, daß sie in den Quecksilberkontaktbecher tauchen können. Um Ihnen die Stromrichtung zu markieren, hänge ich zwei farbige Papierscheiben

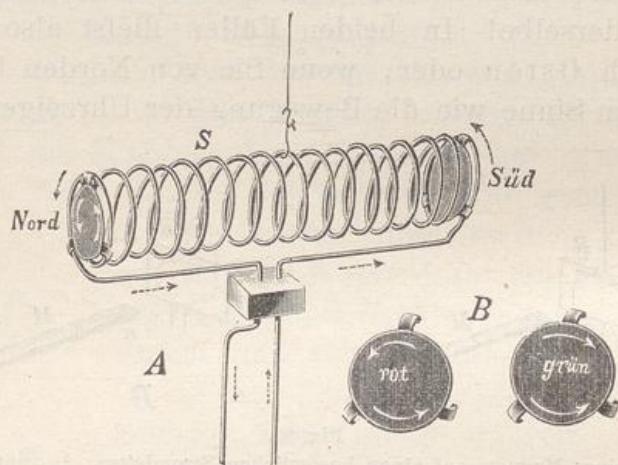


Fig. 26.
Das Solenoid mit markierter Stromrichtung. $\frac{1}{2}$ natürl. Grösse.

(B, Fig. 26) an die Enden des „Solenoids“, wie man diese Vorrichtung nennt. Die rote Papierscheibe zeigt die Pfeile nach links, die grüne nach rechts gerichtet (also letztere den Uhrzeigern entsprechend). — Nun schließe ich den Strom so, daß die Pfeile die Stromrichtung anzeigen — sofort wendet sich das Solenoid und stellt sich von Nord nach Süd, und wiederum fliesst der Strom *oben nach Osten*.

Nun vertausche ich die Papierscheiben und wende den Strom — wieder zeigt das rote Ende nach Norden, und der Strom fliesst, wie wir uns leicht überzeugen, wieder den Pfeilen entsprechend. — Jetzt nähere ich den Nordpol des Magnetstabes von der Seite — das Solenoid schwingt heftig herum und kehrt ihm das grüne Ende zu, wo der Strom im Sinne der Uhrzeiger fliesst. Das Umgekehrte findet bei An-

näherung des magnetischen Südpols statt. Zur Kontrolle nähre ich rasch den Nordpol des Magnets dem roten Ende des Solenoids — dieses wird abgestoßen, ebenso das grüne Ende vom Südpol. Wir erkennen hieraus:

Zwischen einem Magnet und einem vom elektrischen Strom durchflossenen Solenoid finden genau dieselben Erscheinungen der polaren Anziehung und Abstossung statt, welche wir zwischen zwei Magnennadeln beobachteten; und zwar verhält sich das Ende des Solenoids, wo der Strom in der Richtung der Uhrzeiger fließt, wie ein südsuchender Magnetpol; das andere Ende, wo der Strom in umgekehrter Richtung, wie die Uhrzeiger kreist, wie ein nordsuchender Pol (Ampère).

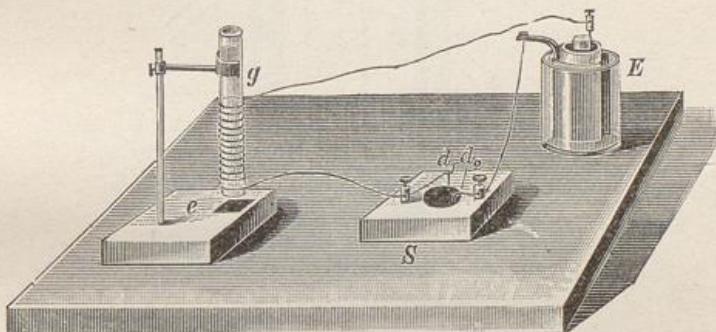


Fig. 27.

Magnetische Wirkung einer Drahtspirale. $\frac{1}{8}$ natürl. Gröfse.
S Quecksilber-Stromschlüssel.

Sollte am Ende das vom Strom durchflossene Solenoid ein Magnet geworden sein? Ich nehme eine Glasröhre (g, Fig. 27) und umwickle sie mit etwa 20 Windungen umspinnenden Kupferdrahtes (von etwa 1 mm Stärke) und verbinde die Enden mit einem Chromsäure-Element, schalte aber einen „Stromschlüssel“ oder „Kontaktschlüssel“ ein, um den Strom nach Belieben schließen und öffnen zu können. Dieser Stromschlüssel (S) besteht aus einem Holzklotz, in den eine napfförmige Vertiefung ausgebohrt und mit Quecksilber gefüllt ist. Zwei Stahldrähte (d_1, d_2) sind so befestigt, dass der eine beständig eintaucht, der andere, hakenförmig gebogene, mit der Spitze nahe über der Quecksilberoberfläche schwiebt und durch einen Druck mit dem Finger zum Eintauchen gebracht wird, wodurch der Stromschluss hergestellt ist.

Ich halte die Drahtspirale nahe über einem kleinen Eisen-

blechstück (e) und schliesse den Strom — das Eisen wird angezogen, fällt aber herab, wenn ich den Strom unterbreche. Nun nähre ich das eine Ende einer aufgehängten Magnetnadel: die Nadelenden werden genau so angezogen, als wäre die Drahtspirale ein Magnet, aber nur solange der Strom in der Spirale kreist. Die Drahtspirale, durch welche ein galvanischer Strom geht, hat also tatsächlich magnetische Eigenschaften, die aber spurlos verschwinden, wenn der Strom unterbrochen wird.

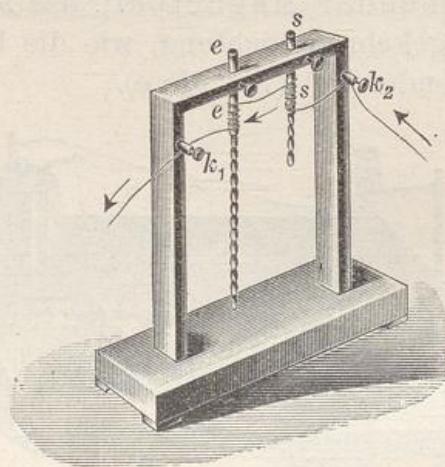


Fig. 28.

Magnetisierung von weichem Eisen (e) und Stahl (s) durch den galvanischen Strom.
 $\frac{1}{5}$ natürl. Grösse.

Nun liegt die Frage nahe, ob wir nicht vermittelst des elektrischen Stromes direkt künstliche Magnete erzeugen können?

Verschiedenes Verhalten von Eisen und Stahl.

Wir haben schon oben (S. 3) gesehen, dass Eisen und Stahl sich beim Magnetisieren verschieden verhalten. Wir wollen daher beide zugleich prüfen. — Ein Holzrahmen (Fig. 28) hat oben zwei Löcher, durch welche ich einen Stab aus weichem Eisen (e) und einen aus Stahl (s) von gleicher Grösse stecke und durch Schrauben festklemme. Nun umwickle ich jeden Stab mit 15 Windungen umspinnenden Kupferdrahtes und führe die Drahtenden zu den Klemmschrauben (k_1 k_2), die ich — unter Einschaltung des Kontaktschlüssels (vergl. S. Fig. 27) — mit einem Chromsäure-Element verbinde. — Schliesse ich den Strom, so zeigen sich beide Stäbe magnetisiert; während aber der weiche Eisenstab (e, Fig. 28)

eine ganze Reihe von Eisenstücken zu tragen vermag, kann ich am Stahlstäbe (s) nur ein Stück anlegen, denn das zweite will nicht haften. Doch — jetzt gelingt es! Nach einer kleinen Weile kann ich wieder ein Eisenstück zulegen, doch bleibt die Tragkraft des Stahlstabes immerhin bedeutend kleiner als die des weichen Eisenstabes. — Nun unterbreche ich den Strom — — am Eisenstäbe fallen, mit Ausnahme des obersten, alle Eisenstücke ab, beim Stahle kein einziges!

Ich reisse von beiden Stäben die Eisenstücke ab und halte sie wieder an die Polflächen: der Stahlstab hat seine magnetische Kraft behalten, das Eisen ist, scheint's, völlig unmagnetisch geworden. Wir wollen den Versuch wiederholen, aber vorher auf die Polflächen beider Stäbe Stückchen von feinem Papier kleben. Beide Stäbe zeigen eine etwas geringere Tragkraft als vorhin, und beim Öffnen des Stromes fallen am Eisenstäbe alle Stücke ab, während am Stahlstäbe alle hängen blieben, d. h. weiches Eisen wird durch einen ihn umkreisenden elektrischen Strom sehr stark magnetisch, aber nur so lange der Strom dauert; der Stahl dagegen behält (wenigstens zum grossen Teil) seinen Magnetismus.

Die aus einem weichen Eisenkern und einem ihn umkreisenden elektrischen Strom gebildeten Magnete heißen Elektromagnete. Ihre Tragkraft wächst anfangs mit der Anzahl der benutzten galvanischen Elemente und übersteigt die aller anderen künstlichen Magnete. Die Wirkung wird, wie auch bei Stahlmagneten, verstärkt, wenn beide Polflächen die angelegte Eisenplatte, den sogenannten Anker, berühren. Solche hufeisenförmige Elektromagnete zeigt Fig. 29 in zwei typischen Formen. Der eine (B) hat breite flache Polflächen, die sich sehr nahe stehen, und zeigt — da er außerdem aus besonders weichem Eisen hergestellt ist —, obgleich er nur 5 Windungen starken Kupferdrahtes hat, eine außerordentliche Tragkraft. Das Ihnen vorliegende Exemplar wiegt blos 890 g. Wir wollen seine Stärke erproben. Ich lasse den Strom des einen grossen Chromsäure-Elementes durch den Draht gehen: versuchen Sie es, den Anker abzureißen! Einem einzelnen von Ihnen gelingt es kaum. Nun spanne ich noch das zweite Element vor — jetzt haben zwei von Ihnen genug damit zu thun. Ein früherer Versuch zeigte,

dass dieser kleine Elektromagnet in diesem Falle eine Tragkraft von über 120 kg, also mehr als das 100fache seines Gewichtes tragen kann. Sie sehen, welche riesige dynamische Wirkung unsere unscheinbare Elektricitätsquelle hervorzubringen vermag und werden es begreiflich finden, dass die Elektromagnete berufen sind, in der Technik eine wichtige Rolle zu spielen — doch davon später. Jetzt

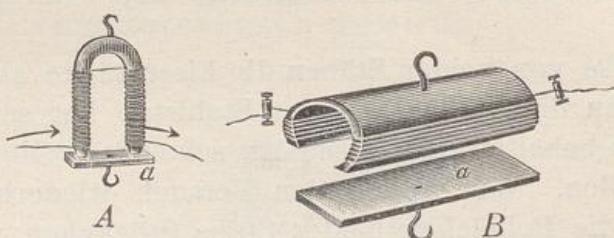


Fig. 29.

A Hufeisenförmiger Elektromagnet. B Joule'scher Elektromagnet. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

will ich nur noch erwähnen, dass man mit Hülfe großer Elektromagnete u. a. die magnetischen Eigenschaften solcher Körper nachweisen konnte, die für gewöhnlich sich völlig unmagnetisch erweisen und deshalb lange für überhaupt nicht magnetisch galten, wie Holz, Glas u. s. w. (Anh. 1).

* * *

Wir haben gesehen, dass ein Magnet auf einen beweglichen Leiter, der von einem elektrischen Strom durchflossen wird, eine Richtkraft ausübt. Sollte nicht auch der elektrische Strom einen gleichen Einfluss auf eine bewegliche Magnetnadel ausüben? Dass ein Solenoid die Magnetnadel abzulenken vermag, haben wir bereits beobachtet, doch konnte hierbei vielleicht die spiralische Form des Leiters von Einfluss sein.

Ich nehme eine starkwandige Glaskugel (g, Fig. 30) und klemme vermittelst zweier Korken (k_1 u. k_2) einen starken umsponnenen Kupferdraht (h) so ein, dass er eine Schleife bildet, von der ein Stück geradlinig ist. Auf dieses klebe ich mit Wachs einen roten Papierpfeil (p) und verbinde die freien Enden durch Klemmen mit den Poldrähten eines Elements so, dass der (positive) Strom in der Richtung des Pfeiles die Draht-

schleife durchfliesst. Nun fasse ich diesen Stromleiter und nähre ihn in vertikaler, aufwärts gerichteter Stellung des Pfeiles dem von Ihnen abgekehrten Südende einer Magnetnadel (A, Fig. 31) — die Nadel wird abgelenkt, und zwar wendet sich der nordsuchende Pol derselben (der durch eine rote Papierspitze markiert ist), nach Westen. Nun führe ich den Leiter, ohne die Stromrichtung zu ändern, in derselben Ebene um die Nadel herum — — die Ablenkungsrichtung der Magnetnadel bleibt unverändert. Jetzt wiederhole ich den

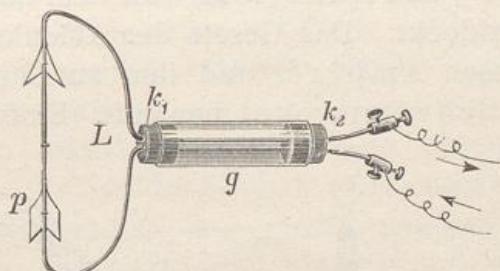


Fig. 30.

Stromleiter für Versuche über die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom. $1/5$ natürl. Gröfse

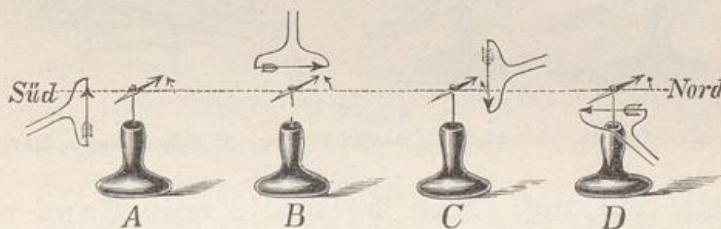


Fig. 31.

Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom.

Versuch, halte aber die Drahtschlinge so, dass der Pfeil, und mithin der Strom, die umgekehrte Richtung hat — der nordsuchende Pol ist nun in allen Lagen des Stromleiters nach Osten abgelenkt, während er vorhin nach Westen zeigte.

Zur Kontrolle halte ich (A Fig. 32) die Drahtschleife so, dass ihre Ebene eine nord-südliche Lage hat und der Strom, den ich nun schliesse, die ganze Nadel umkreist und zwar über der Nadel nach Norden fliesst. Sie sehen, dass der nordsuchende Pol, wie beim letzten Versuch, nach Westen abgelenkt bleibt; drehe ich aber die Drahtschleife um 180° , lasse also den Strom über der Nadel nach Süden fliessen,

Ampère's
Schwimmregel.

so wendet sich der Nordpol nach Osten (B, Fig. 32). Für alle von uns beobachteten Fälle können wir das Gesetz der Ablenkung so ausdrücken: Denken wir uns mit dem (positiven) Strome so vorwärts schwimmend, dass wir das Gesicht der Magnetnadel zuwenden, so wird der nordsuchende Pol der nach links abgelenkt (Ampère).

Diese, wie Sie bald sehen werden, aufserordentlich wichtige Erscheinung der Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom wurde zu Anfang unseres Jahrhunderts (vor 1804) von Romaguesi⁷⁾, und später (1820) von dem dänischen Gelehrten Oersted entdeckt. Das Gesetz der Ablenkung verdanken wir dem Franzosen Ampère, und ihm zu Ehren wird es die Ampère'sche Schwimmregel benannt. Einfacher vielleicht

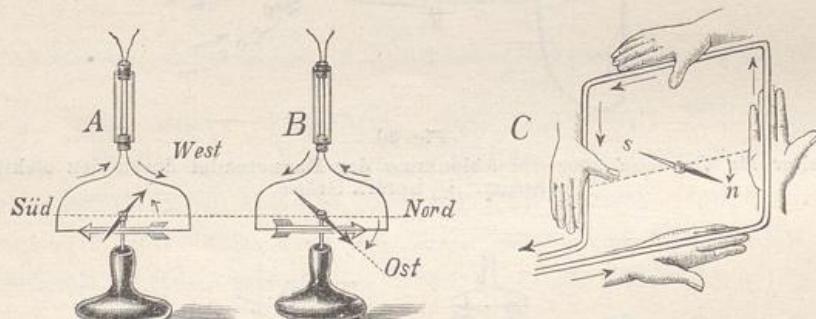


Fig. 32.
Ampère'sches Gesetz. A und B $1/10$ natürl. Grösse. C Schematische Darstellung.

ist folgende Fassung: Man halte die *rechte* Hand mit der inneren Fläche zur Magnetnadel gekehrt so, dass die Fingerspitzen die Richtung des (positiven) Stromes angeben, dann zeigt der ausgestreckte Daumen die Richtung an, in welcher der nordsuchende Pol abgelenkt wird (C, Fig. 32).

Wir können auch — was uns später oft von Nutzen sein wird — aus der Ablenkung der Magnetnadel auf die Richtung des elektrischen Stromes im Leiter schliessen:

⁷⁾ Allgemein gilt Oersted als Entdecker der Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom, da seine Publikation bekannt wurde, während Romaguesi seine Beobachtungen nicht selbst veröffentlicht zu haben scheint; wenigstens wird er von einem Zeitgenossen nur gelegentlich erwähnt (vergl. Anh. 5).

Legen wir die *rechte* Hand so an den ablenkenden Stromleiter, dass die Handfläche der Magnetnadel zuwändt und der ausgestreckte Daumen die Richtung des abgelenkten nordsuchenden Poles anzeigt, so fließt der (positive) Strom von der Handwurzel in der Richtung der *Fingerspitzen* (vergl. C, Fig. 35).

Gesetz der Stromrichtung.

Fassen wir, der Übersicht wegen, nun unsere Beobachtungen zusammen:

1. Gleichgerichtete elektrische Ströme ziehen sich an und entgegengesetzt gerichtete stoßen sich ab. Bewegliche Stromleiter suchen sich so zu stellen, dass die elektrischen Ströme gleichgerichtet parallel sind.
2. Ring- oder lockenförmige bewegliche Stromleiter (Solenoide) zeigen eine magnetische Richtkraft, werden von einem genäherten Magnetstabe ebenso angezogen und abgestoßen, wie eine Magnetnadel.
3. Ein elektrischer Strom lenkt eine genäherte Magnetnadel in gesetzmässiger Weise ab und erzeugt in einem Stück Eisen, das er umkreist, starken Magnetismus, und zwar ist der Nordpol des Elektromagnets an dem Ende, wo der (positive) Strom in umgekehrter Richtung fließt, wie die Bewegung der Uhrzeiger erfolgt.

Wie sollen wir uns nun den Zusammenhang zwischen den Magneten und den elektrischen Strömen erklären?

Ampère, der geniale Entdecker der elektro-magnetischen Gesetze, nahm an, dass jedes Molekül eines Magnets von einem in sich selbst zurückkehrenden (geschlossenen) elektrischen Strome umkreist werde, und zwar wird ein Teil dieser „Molekularströmchen“ durch die magnetisierende Wirkung des Streichens mit einem starken Magnet oder durch einen elektrischen Strom zu einander gleichgerichtet parallel gestellt (A, Fig. 33). So wirken denn diese Molekularmagnete, wie bei unserem Versuch (S. 5) die Stahl-Feilspäne, verstärkend aufeinander. Magnetisieren heißt also: die Molekularströme gleichgerichtet parallel stellen. Die — nie zu erreichende — Grenze der Magnetisierbarkeit wäre daher er-

Ampère's Hypothese.

reicht, sobald alle Molekularströme gleichgerichtet parallel gestellt sind. Das verschiedene Verhalten des Eisens und des Stahls beim Magnetisieren (s. o. S. 3) röhrt davon her, daß die Eisenmoleküle beweglicher sind, als die Stahlmoleküle, weshalb letztere der Richtkraft einen gröfsen Widerstand entgegensetzen, aber in der einmal angenommenen Stellung verharren, während die Eisenmoleküle sich nach dem Aufhören der äufseren Kraftwirkung wieder in ihre gewöhnliche Stellung zurückdrehen, bei welcher die Molekularströme alle möglichen Richtungen haben, mithin sich in ihrer Wirkung nach außen aufheben, sodaß das Eisen unmagnetisch erscheint.

Diese Ampère'sche Hypothese des Magnetismus erklärt nun auf das Ungezwungenste die von uns beobachteten Gesetze der magnetischen Anziehung zwischen ungleichnamigen Polen und

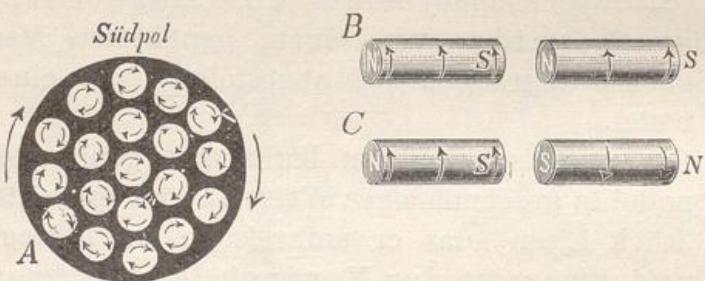


Fig. 33.

Richtung der Ampère'schen Molekularströme.

Richtung der Erdströme.

der Abstossung gleichnamiger, denn im ersten Falle (B, Fig. 36) sind die Ströme in den zugekehrten Polflächen einander gleichgerichtet parallel, dagegen im zweiten Falle (C, Fig. 33) entgegengesetzt. Ebenso ergeben sich die gegenseitigen Beziehungen zwischen elektrischen Strömen und Magneten als eine notwendige Folge der Richtkraft, welche zwei elektrische Ströme aufeinander ausüben. Fassen wir, nach Ampère, die ganze Erdkugel als einen grossen Magnet auf, dessen nordsuchender Pol im Süden liegt, so müssen die Erdströme von Ost nach West (also mit der Sonne) gehen.

Die Einfachheit der Ampère'schen Hypothese ist bestechend, allein bei näherer Betrachtung ergeben sich doch manche Schwierigkeiten. Woher stammen z. B. diese beständigen Molekularströme der Eisen- und Stahlmoleküle, und wodurch erhalten sie sich konstant? Wir können die Annahme der

Molekularströme nur als einen geistreichen Versuch betrachten, die magnetischen und die elektrodynamischen Erscheinungen auf eine gemeinschaftliche Ursache zurückzuführen. Indessen liefert sie uns ein vortreffliches Hülfsmittel zur Orientierung. Denken wir uns z. B. einen vertikal stehenden stark magnetisierten Stahlstab (M, bei A Fig. 34) dessen nordsuchender Pol nach oben gerichtet ist, so bildet der umgebende Raum, soweit wir die magnetische Fernewirkung wahrnehmen können, das magnetische Feld des Magnets. Könnten wir nun, parallel zum Magnetstabe, einen sehr biegsamen, fadenförmigen

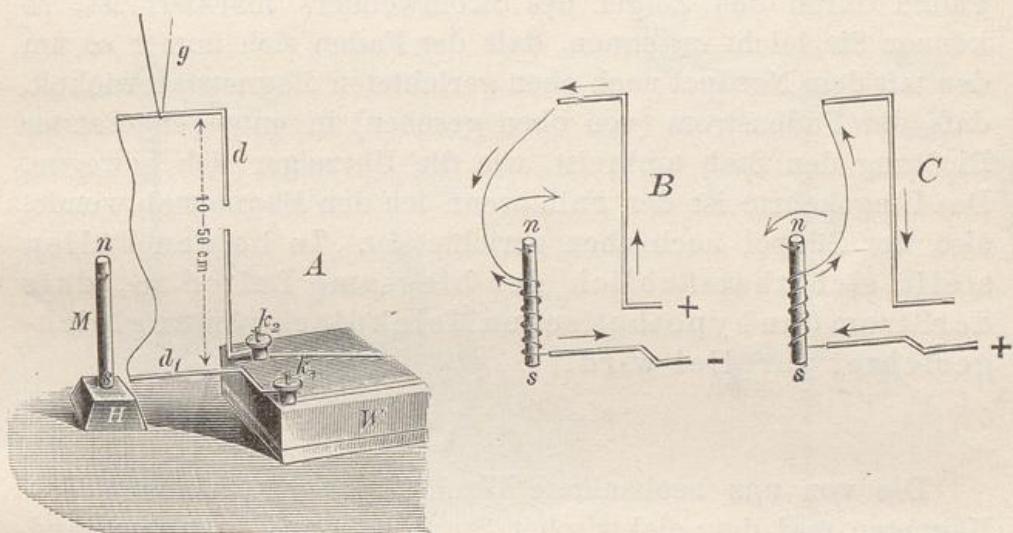


Fig. 34.

Wirkung eines Magnets auf einen beweglichen Stromleiter nach Lodge; modifiziert.
 $\frac{1}{10}$ natürl. Grösse.

Stromleiter schlaff herabhängend anbringen, so müfste dieser Leiter das Bestreben zeigen, eine solche Lage anzunehmen, daß der ihn durchfließende Strom den Molekularströmen gleichgerichtet parallel wird, also müfste der Leiter sich um den Magnetstab zu wickeln suchen! Das können wir probieren.

In die Klemmen des Stromwenders (A, Fig. 34; vergl. Fig. 21) befestige ich zwei rechtwinklig gebogene starke Drähte (d und d₁), von denen der letztere durch eine Gummischnur (g) gehalten wird. Die freien Enden, deren Abstand etwa 75 cm beträgt, sind durch einen feinen, platten Metallfaden (Anh. 4) von 85 cm Länge verbunden (f). Ich stelle den in einen Holzblock ein-

geklemmten Magnetstab (M) nahe zum schlaff herabhängenden Stromleiter und schliesse den Strom — sofort wirbelt der Metallfaden um den Magnet und legt sich in Schraubenwindungen an. Nun kehre ich den Strom um — der Faden wickelt sich los, beschreibt einen grossen Bogen und wickelt sich in umgekehrter Richtung um den Magnet (B, Fig. 34). Durch Herabdrücken des oberen Drahtendes (d) vermindere ich nach Bedarf die Spannung des Fadens, sodass er bis 20 Windungen um den Magnetstab beschreiben kann. Wenn Sie nun darauf achten, dass (wie beim Versuch Fig. 21) die Stromrichtung im Faden durch den Zeiger des Stromwenders markiert ist, so können Sie leicht erkennen, dass der Faden sich immer so um den mit dem Nordpol nach oben gerichteten Magnetstab wickelt, dass der Fadenstrom (von oben gesehen) in entgegengesetzter Richtung den Stab umkreist, wie die Uhrzeiger sich bewegen. Das Umgekehrte ist der Fall, wenn ich den Magnetstab wende, also der Südpol nach oben gerichtet ist. In beiden Fällen stellt sich thatsächlich der biegsame Leiter so, dass der Strom den hypothetischen Molekularströmen gleichgerichtet parallel wird!

* * *

Die von uns beobachtete Wechselwirkung zwischen den Magneten und dem elektrischen Strom lässt uns — an der Hand der Ampère'schen Hypothese — den Zusammenhang zwischen magnetischen und elektrischen Erscheinungen ahnen. Die Ablenkung der Magnetnadel bietet uns aber auch ein Helfsmittel, um die schwächsten elektrischen Ströme nachzuweisen. Apparate dieser Art werden Stromprüfer oder Galvanoskope genannt.

Das von uns schon benutzte Ampère'sche Gestell (Fig. 35) kann uns hierbei gute Dienste leisten. An Stelle des Quecksilberkontaktbechers setze ich ein leeres Glasrörchen (g) mit verengter, glatter Öffnung. An das Haar hake ich einen Aluminiumdraht (a), der einen kurzen Magnet (m), ein Stück einer magnetisierten Stricknadel, trägt. Das obere Ende des Aluminiumdrahtes ist durch einen Strohhalm (Z) gesteckt, der als Zeiger dienen soll; das untere Ende reicht bis in die Glasröhre, wodurch ein Hin- und Herpendeln des Magnets vermieden wird.

Ein Ring aus starkem Kupferdraht (R) läßt sich so stellen, daß der Magnet sich in seiner Mitte befindet. Nun schiebe ich die Papierskala (S) in die richtige Entfernung und drehe das ganze Gestell so, daß der Magnet in der Ringebene schwebt. Da Sie sich westlich vom Apparat befinden, so können Sie leicht die Ablenkung der Magnetnadel an der Bewegung der Papierspitze (p) verfolgen (Fig. 38).

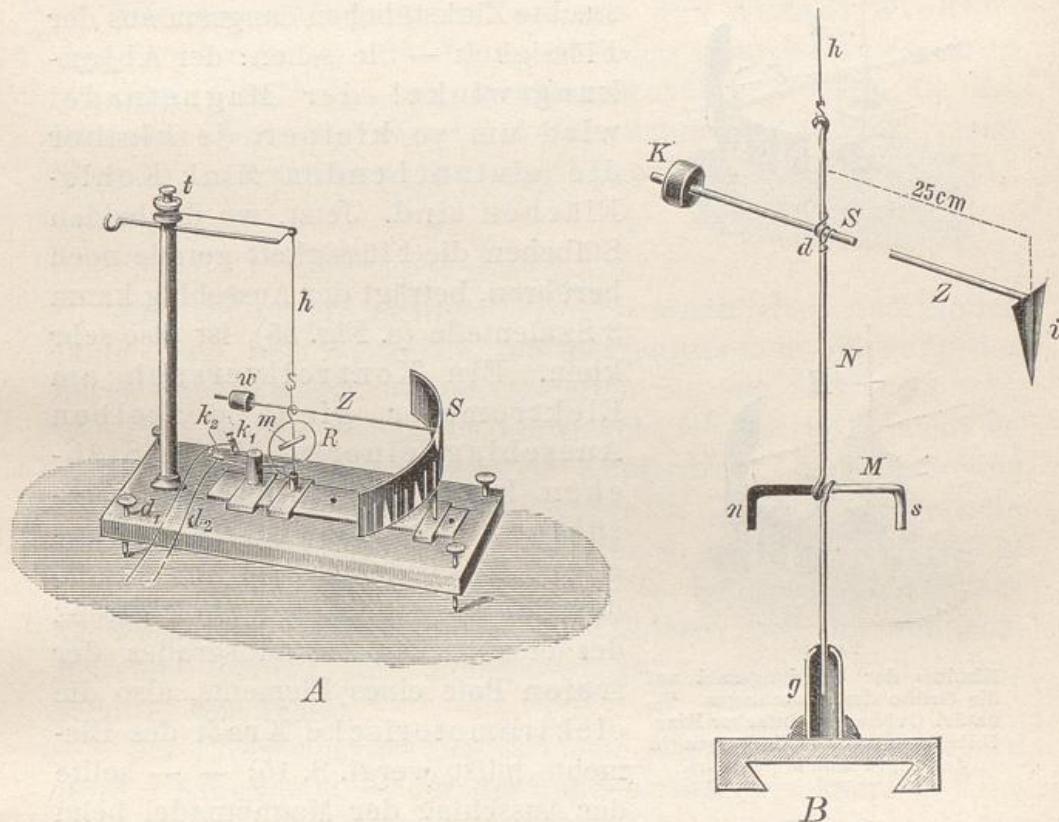


Fig. 35.

A Das Ampère'sche Gestell als Galvanoskop. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse. Z Zeiger aus Stroh mit Papierspitze (p) und Gegengewichtchen (w) aus Kork. S grobe Skala (ein mit Papier überzogener Zink-Blechstreifen). B Zweckmäßige Form des Magnets (M). $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse.

Sie erinnern sich noch dessen, wie schwierig es war, das Vorhandensein von freier + E und — E an den Polen eines Elements nachzuweisen, da das so empfindliche Aluminium-Elektrometer bei direkter Berührung keinen Ausschlag gab, und erst bei Anwendung des Kondensators eine schwache Ladung zeigte.

Jetzt wende ich ein kleines Zink/Kohle-Elementchen derselben Art an (vergl. Fig. 17), wie wir sie neulich benutzten.

Kaum berühre ich mit den Poldrähten des Elementchens die Klemmen (k_1 u. k_2 , Fig. 34) des Drahtringes, so schwingt die Nadel heftig zur Seite, schwankt hin und her und stellt sich endlich fast rechtwinklig zur Drahtebene ein, indem der Zeiger über die Skala hinausfährt.

Nun achten Sie auf den Zeiger!

Ich hebe das durch einen Korken gesteckte Zinkstäbchen langsam aus der Flüssigkeit — Sie sehen: der Ablenkungswinkel der Magnetnadel wird um so kleiner, je kleiner die eintauchenden Zink/Kohle-Flächen sind. Jetzt, wo die beiden Stäbchen die Flüssigkeit gerade noch berühren, beträgt der Ausschlag kaum 3 Skalenteile (s. Fig. 35), ist also sehr klein. Ein Kontrollversuch am Elektrometer giebt denselben Ausschlag, einerlei ob die Stäbchen kaum die Flüssigkeit berühren, oder fast ganz eintauchen! Was bedeutet das? Wir wissen, dass das Elektrometer die Differenz des elektrischen Zustandsgrades der freien Pole eines Elements, also die elektromotorische Kraft des Elements misst (vergl. S. 15) — — sollte der Ausschlag der Magnetnadel beim

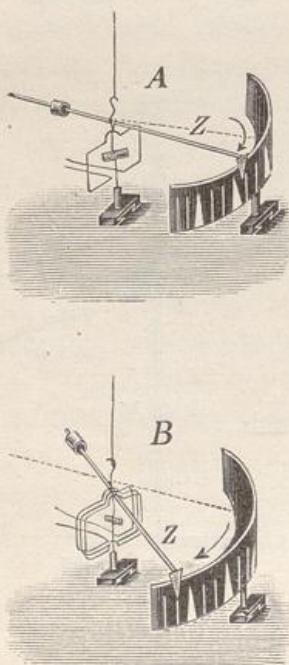


Fig. 36.

Einfluss der Windungszahl auf die Größe des Ausschlag. $1/10$ natürl. Größe. A einfacher Ring. B Rahmen mit 10 Windungen (in der Figur nur 3 sichtbar).

Galvanoskop etwas anderes bedeuten, also nicht von der elektromotorischen Kraft abhängen?

Wir wollten das Galvanoskop als Stromprüfer benutzen und seine Empfindlichkeit mit der des Elektrometers vergleichen, gerieten aber zu widersprechenden Angaben beider Instrumente, was uns reizt, die Bedeutung der Angaben des Galvanoskops zu studieren. Zuvor möchte ich Sie aber auf ein Hülfsmittel aufmerksam machen, das uns gestattet, nötigen Falls die Empfindlichkeit des Galvanoskops bedeutend zu steigern.

Ich hebe das Zinkstäbchen wieder soweit aus der Flüssig-

keit, dass es sie kaum berührt, der Ausschlag ist sehr klein. Nun stelle ich einen anderen Ring (A, Fig. 36) ein, der kleiner ist, also der Magnetnadel näher steht — der Ausschlag ist schon etwas größer. Nun setze ich an seine Stelle einen Rahmen (B, Fig. 36), der aus 10 Windungen umspinnenen Kupferdrahtes besteht (in Fig. 36, B sind nur 3 Windungen angedeutet) — der Ausschlag wächst bedeutend.

Der Ausschlag nimmt zu mit der Anzahl Windungen des Drahtes, d. h. führen wir den elektrischen Strom in mehreren Windungen um die Magnetnadel, so wird die ablenkende Wirkung vervielfacht, daher nennt man einen solchen Apparat einen „Multiplikator“ (Schweigger 1821).

* * *

Ehe wir unsere heutige Tagereise abschließen, möchte ich Ihnen noch, zum Vergleich, die magnetisierende Wirkung des durch die Influenzmaschine erzeugten Stromes zeigen.

Zwei gleiche Eisenstäbe umwickle ich mit je 15 nicht zu dichten Windungen von starkem Kupferdraht, der durch eine dicke Schicht von Guttapercha isoliert ist. Beide Stäbe klemme ich zwischen Gummistücke in Ständer so ein, dass sie vertikal stehen. Durch den einen Draht leite ich den Strom eines Chromsäure-Elements, durch den anderen den der Influenzmaschine (wobei eine Funkenstrecke von 5—10 mm eingeschaltet sein muss).

Der Elektromagnet des Elements zeigt eine Tragkraft von über 8 Kilogramm — der der Influenzmaschine kaum $\frac{1}{5}$ Kilogramm, denn der mit einer Messingschale verbundene Anker wiegt mit dem zum Abreissen erforderlichen Gewicht nicht einmal 200 g. — Sie sehen hieraus, dass — in Bezug auf diese dynamische Wirkung — das Chromsäure-Element der Influenzmaschine bei weitem überlegen ist!

Unser heutiges Ziel ist erreicht. Nächstens wollen wir versuchen, das Rätsel zu lösen, welches uns in der Verschiedenheit der Angaben des Elektrometers und des Galvanoskops entgegengrat.