



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Einführung in die Elektrizitätslehre

Vorträge

Dynamische Elektrizität

Kolbe, Bruno

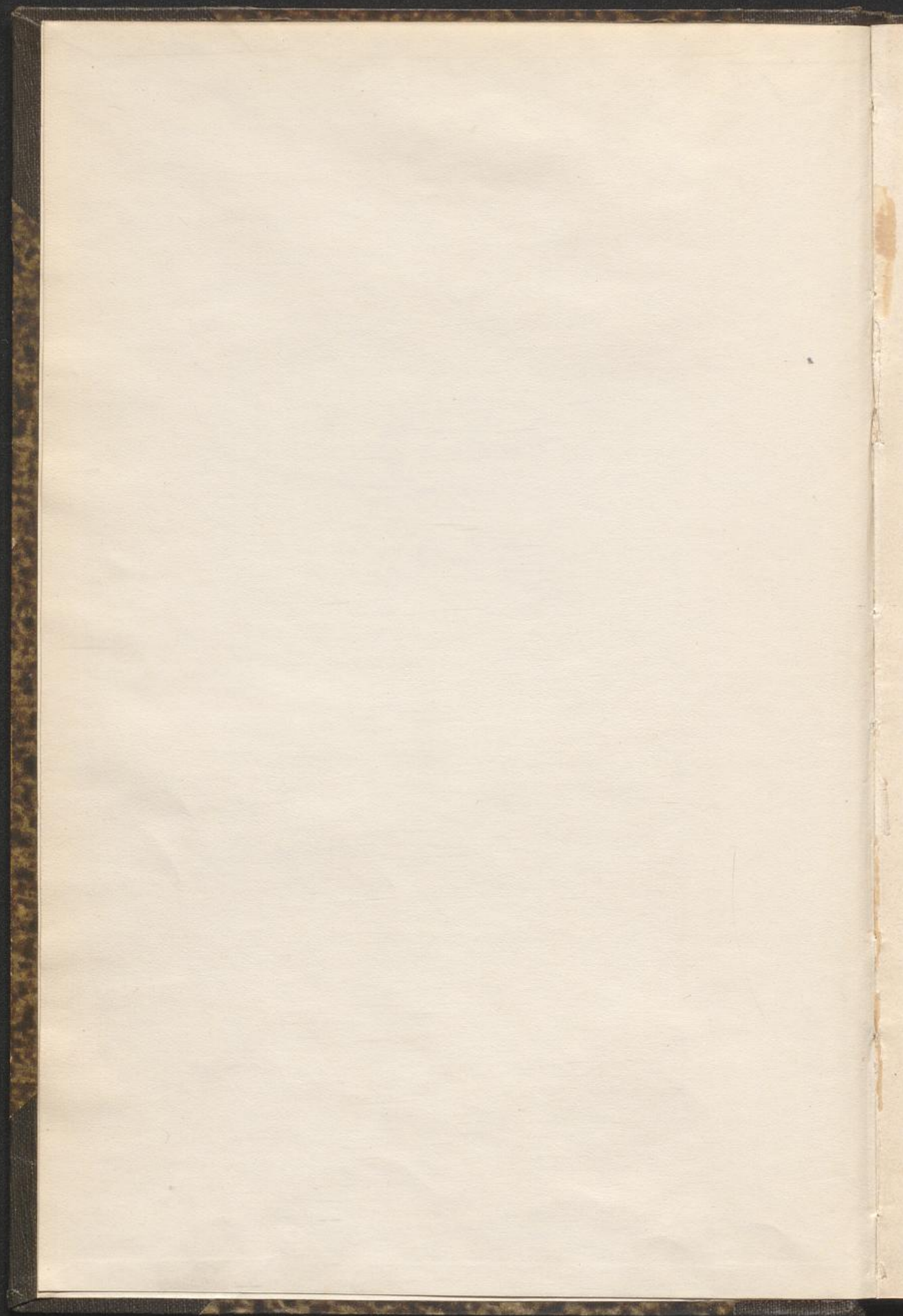
Berlin, 1895-

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



z. K. 4425

1423/II



1423/
II

E. K. 4425

1423/
II

Einführung
in die
Elektricitätslehre.

Vorträge

von

Bruno Kolbe,

Oberlehrer der Physik an der St. Annen-Schule in St. Petersburg.

II.

Dynamische Elektricität.

Mit 75 in den Text gedruckten Holzschnitten.

Berlin.
Julius Springer.

1895.

München.
R. Oldenbourg.



03

M

35101

Vorwort.

Der erste Teil dieser im Winter 1890/91 gehaltenen Vorträge, welcher die statische oder Reibungs-Elektricität behandelt, erschien vor zwei Jahren allein, da Kränklichkeit und Berufsarbeiten den Verfasser an der für den Druck erforderlichen Umarbeitung des zweiten Theiles hinderten. Leider verzögerte sich die Ausgabe der vorliegenden „dynamischen Elektricität“ aus denselben Gründen länger, als vorausgesetzt war, doch kam diese Verspätung insofern der Arbeit zu gute, als mancher neue Versuch durchprobiert und eingefügt werden konnte (so z. B. die anschauliche Demonstration der Wirkungsweise des Telephons nach Bosschard, Fig. 74).

Da die Fülle des Stoffes eine Ausscheidung des minder Wichtigen dringend erforderte, so wurde aus dem Magnetismus nur das zum Verständniss der elektro-magnetischen Erscheinungen Nötige besprochen und einige Ergänzungen und praktische Winke im Anhange behandelt. In der Darstellung selbst ist der historischen Entwicklung möglichst Rechnung getragen. Bei der Einleitung in die dynamische Elektricität suchte der Verfasser dadurch einen engeren Anschluß an die statische Elektricität zu erzielen, daß er die ersten Versuche über das Stromgefälle im Leiter und die Abhängigkeit der Leitungsfähigkeit eines Leiters von seinem Querschnitt mit Hülfe der Influenz-Elektrisirermaschine anstellte (wie das u. a. von F. Poske in d. Zeitschr. f. d.

phys. u. chem. Unt: empfohlen worden). Da also hierbei ein Apparat verwandt wurde, der als wichtigste Quelle der statischen Elektrizität bekannt ist, so konnte von vornherein darauf hingewiesen werden, daß bei den elektro-dynamischen Erscheinungen keine neue Art von Elektrizität, sondern nur eine neue Form ihrer Wirkungsweise auftritt.

Aus der Analogie der hierbei beobachteten Erscheinungen mit den hydrodynamischen ergab sich ungezwungen der Begriff der elektromotorischen Kraft.

Die Experimente stehen — dem eingeschlagenen induktiven Gange entsprechend — im Vordergrund; doch ist auch hier eine möglichst geringe Anzahl von Apparaten benutzt worden, von denen einige — speciell für den Schulgebrauch konstruiert — sich bereits den Beifall der Fachgenossen errungen und eine größere Verbreitung gefunden haben. Mit Ausnahme des Demonstrations-Galvanometers sind alle am Schluß aufgeführten neueren Apparate vom Verfasser eigenhändig angefertigt, also leicht herstellbar. — Um den Zuhörern den Überblick zu erleichtern, wurden verschiedenfarbige Poldrähte und stellbare Stromrichtungs-Zeiger angebracht (am Stromwender ein automatisch wirkender). Überhaupt war Verfasser bemüht, die Versuche zu vereinfachen; so wurden durch Anwendung eines vor den Augen der Zuschauer *graduerten* Galvanometers alle Rechnungen vermieden, wodurch u. a. das Ohm'sche Gesetz unmittelbar zur Anschauung gebracht wurde.

Daß der Verfasser die magneto-elektrische Induktion, den neueren Anschauungen gemäß, auf die Kraftlinien zu begründen suchte, wird man gerechtfertigt finden; weniger vielleicht, daß er manches traditionelle Experiment, wie das mit der Volta'schen Säule oder gar „Volta's Fundamentalversuch“ über Bord geworfen hat. Letzteres geschah, weil es dem Verfasser widerstrebte, Anderen etwas klar machen zu

wollen, was er selbst nie begriffen hat — — und dazu gehört die „Kontakt-Theorie“! Da die Anschauungen über die Ursache der elektromotorischen Kraft für das Verständnis der Wirkungen des galvanischen Stromes bedeutungslos sind, so ist der Schaden nicht groß. (Übrigens ist in Österreich vom Ministerium neuerdings die Besprechung des Volta'schen Fundamentalversuchs in den Schulen als „zweifelhaft“ für unzulässig erklärt.)

Zur Vermeidung von Mißverständnissen sind die Ausdrücke „elektrische Spannung“ und „Klemmenspannung“ vermieden und durch die längeren, aber eindeutigen Bezeichnungen „elektrische Niveaudifferenz“ (Potentialdifferenz) und „Poldifferenz“ ersetzt.

Vielfache Anregung verdankt der Verfasser der physikalischen Sektion des pädagogischen Museums der Militär-Lehranstalten in St. Petersburg und der „Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht“.

Herrn Prof. Dr. O. Chwolson, sowie den Oberlehrern Herren N. von Drenteln und A. Nating in St. Petersburg, und Herrn Prof. Dr. F. Poske in Berlin ist der Verfasser zu besonderem Dank verpflichtet für die Liebenswürdigkeit, mit der erstere ihn bei der Durchsicht des Manuskriptes, letztere bei der Korrektur der Druckbogen unterstützt haben.

Die Verlagshandlung hat in aner kennenswerter Weise für die Ausstattung gesorgt und die Figuren nach Originalzeichnungen des Verfassers neu schneiden lassen.

St. Petersburg, im März 1895.

Der Verfasser.

I n h a l t.

	Seite
I. Vortrag: Die wichtigsten Erscheinungen des Magnetismus; Vergleich der magnetischen und der elektrostatischen Erscheinungen; Die Influenz-Elektrisiermaschine als Elektrizitätsquelle; Verlauf des Elektrisierungsgrades entlang einem die Pole der Maschine verbindenden Halbleiter; Analogie zwischen hydrodynamischen und elektrodynamischen Erscheinungen; Begriff der elektromotorischen Kraft; Elektrisches Gefälle im Stromkreise; Abhängigkeit des elektrischen Gefälles von der Länge des Stromleiters; Ursache des elektrischen Stromes; Abhängigkeit des elektrischen Gefälles von der Leitungsfähigkeit des Stromleiters	1—19
II. Vortrag: Elektrisierung von Metallen bei Berührung von Flüssigkeiten; Wirkung zweier gleichzeitig eingetauchter Metalle; das Volta'sche Element; Poldifferenz; Ursache der elektromotorischen Kraft des Elements; Chemische Theorie; Historisches: Kontakttheorie Volta's; Konstante Elemente; Schaltung parallel und hintereinander; Elektromotorische Kraft einer Batterie bei der Schaltung parallel und hintereinander; Vergleich der elektromotorischen Kräfte einiger konstanter Elemente	20—37
III. Vortrag: Nachweis des Stromgefälles beim galvanischen Strome; Der Stromwender; Gegenseitige Anziehung und Abstofsung 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 38—61

IV. Vortrag: Graduierung des Galvanoskops; Herstellung der Aichungsskala; das Galvanometer. — Wirkung der Schaltung hintereinander und parallel bei sehr kurzer und bei langer Drahtleitung, sowie bei Einschaltung einer Flüssigkeitssäule (Stromdämpfer); Begriff der Stromstärke; Vergleich der hydrodynamischen und der elektrodynamischen Erscheinungen; Äußerer und innerer Widerstand; Herleitung des Ohm'schen Gesetzes; Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetz. — Das spezifische Leitungsvermögen verschiedener Körper; prakt. Einheit des Widerstandes, das „Ohm“; Definition der prakt. Einheit der Stromstärke, das „Ampère“. — Bestimmung des inneren Widerstandes eines Elements oder einer Batterie; Stromstärke in Leiterverzweigungen; Messung großer Stromstärken 62—95

V. Vortrag: Wärmewirkung des galvanischen Stromes; Glühlampen; Elektrolyse des Wassers; Knallgas- und Wasserstoff-Voltameter; Das Kupfer-Voltameter; Das Volt, das Ohm und das Ampère als Einheiten der elektromotorischen Kraft, des Widerstandes und der Stromstärke; Elektrochemische Äquivalente; Aichung des Elektrometers nach Volt; Vergleichung der Aichungsskala des Galvanometers mit der Gradskala; Die Tangens-Busssole; Reduktionsfaktor der Busssole. — Galvanoplastik und Galvanotypie; Der Telegraph (Lesage, Sömmering, Schilling, Gauß und Weber, Steinheil, Wheatstone, Morse); Polarisationsströme; Sekundäre Elemente; Akkumulatoren; Thermo-elektrische Ströme 96—121

VI. Vortrag: Faraday's Fundamentalversuch. — Demonstrations-Multiplikator; Astatische Nadel; Aperiodische Schwingung der Magnetnadel. — Erzeugung magneto-elektrischer Induktionsströme durch Bewegung eines Leiters im magnetischen Felde; Richtung der Induktionsströme (Regeln von Lenz und Faraday). — Induktionswirkung einer schwingenden Magnetnadel auf eine Kupferscheibe (Dämpfung der Schwingungen bei Galvanometernadeln). — Selbstinduktion einer Drahtspule (Extrastrom); Induktionsrolle (Wirkung des Wechselstromes auf Geissler'sche und Puluj'sche Röhren). Magneto-elektrische Maschinen.

— Siemens' dynamo-elektrisches Princip. — Einfluß der Anwesenheit von weichem Eisen im magnetischen Felde auf den Verlauf der magnetischen Kraftlinien; der Pacinotti'sche und der Gramme'sche Ring; v. Hefner-Alteneck's Trommelinduktor. — Verschiedene Schaltungsweise bei der Dynamomaschine. — Verwendung dynamoelektrischer Ströme; elektrische Arbeitsübertragung. — Das Telephon; das Mikrophon. — Schluß (Wandlungen der Hypothesen; Faraday's Anschauung über elektrische Fernwirkung; Hertz' Entdeckung)	122—166
---	---------

Anhang (Ergänzungen und praktische Winke):

1. Diamagnetismus. — 2. Volta's Gesetz der Spannungsreihe. — 3. Recept für Chromsäurelösung. — 4. Lamettafäden, ihr Ersatz. — 5. Zur Entdeckung der Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom. — 6. Fleeming's Normaldaniell; Kurzschluß. — 7. Zum Graduieren des Galvanometers. — 8. Zur Erfindung der elektrischen Glühlampe. — 9. Das Demonstrations-Galvanometer als Sinus-Busssole. — 10. Zur Erfindung des magneto-elektrischen Telegraphen. — 11. Das Universalgestell als Tangentenbusssole (nach Helmholtz-Gaugain) und als empfindliches Galvanometer mit astatischer Nadel und Kupferdämpfung. — 12. Einige Eigenschaften der Wechselströme	167—176
Empfehlenswerte Bücher zur Fortbildung	177
Bezugsquellen und Preisliste der benutzten neueren Apparate	178—179
Alphabetisches Sachregister	180—187

I. Vortrag.

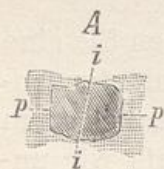
Die wichtigsten Erscheinungen des Magnetismus; Vergleich der magnetischen und der elektrostatischen Erscheinungen; Die Influenz-Elektrisiemaschine als Elektrizitätsquelle; Verlauf des Elektrisierungsgrades entlang einem die Pole der Maschine verbindenden Halbleiter; Analogie zwischen hydrodynamischen und elektrodynamischen Erscheinungen; Begriff der elektromotorischen Kraft; Elektrisches Gefälle im Stromkreise; Abhängigkeit des elektrischen Gefälles von der Länge des Stromleiters; Ursache des elektrischen Stromes; Abhängigkeit des elektrischen Gefälles von der Leitungsfähigkeit des Stromleiters.

In der statischen oder Reibungs-Elektricität haben Sie eine Reihe von Erscheinungen kennen gelernt, welche mit den zunächst zu besprechenden magnetischen Erscheinungen zum Teil eine so auffallende Übereinstimmung zeigen, daß wir unwillkürlich dazu gedrängt werden, zwischen beiden Gebieten einen inneren Zusammenhang zu vermuten. Bei genauerer Betrachtung werden sich aber bald gewichtige Unterschiede zeigen. Wir werden daher gut thun, die wichtigsten magnetischen und elektrostatischen Erscheinungen einander gegenüber zu stellen. Da die Magnete und ihre Haupteigenschaften Ihnen schon bekannt sind, so können wir uns auf das für das Folgende Notwendige beschränken.

Hier ist ein Stück Magneteisenerz, das aus einer chemischen Verbindung des Eisens mit Sauerstoff (Fe_3O_4) besteht. Durch Abschleifen hat man zwei gegenüberstehende Flächen eben gemacht. Ich fasse das Magneteisenstück in der Mitte und drücke es in ein Häufchen Eisenfeilspäne. Nach dem Herausheben sehen Sie (A Fig. 1) die Eisenteilchen daran haften, aber nicht gleichmäßig. Dichtere Büschel hängen an den Endflächen, besonders an deren Kanten. In der Mitte zwischen beiden Endflächen sehen wir ringsum eine freie Zone, wo keine Eisenteilchen haften, die Indifferenzzone (ii bei A Fig. 1). Die Flächen, wo die magnetische Anziehung am kräftigsten ist, nennen wir die Polflächen oder Pole (pp). Nähere

ich eine Polfläche — nachdem ich die Feilspäne abgestreift habe — einem Stück Eisen, so wird dieses stark angezogen und ist seinerseits wieder imstande, Eisen anzuziehen (B Fig. 1). Jede der beiden Polflächen kann ich so mit einer Kette von Eisenstücken versehen und die Endglieder zeigen ebenfalls gegenseitige Anziehung und haften nach der Berührung aneinander (B Fig. 1, rechts).

Die magnetische Anziehung äußert sich schon in der Nähe der Polfläche. Ich befestige ein Stück weiches Eisen in einem Ständer (A Fig. 2) und halte eine Polfläche nahe darüber. Nun kann ich an dieses Stück Eisen ein zweites, an dieses ein drittes hängen. Sobald ich aber den Magnet entferne, fallen



B



Fig. 1.

Magnetische Anziehung.
 $\frac{1}{10}$ nat. Gröfse.

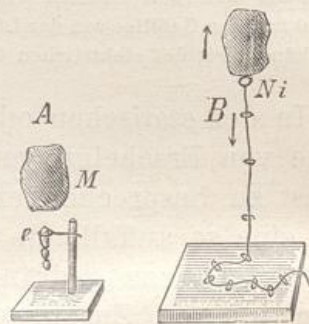


Fig. 2.

A magnetische Influenz. B verschiedene
Anziehungskraft d. Magnete auf Eisen u.
Nickel.

die freien Eisenstücke ab — ebenso, wenn ich bei dem vorigen Versuch das oberste Eisenstück festhalte und den Magnet fortnehme. Diese durch die Annäherung eines Magnets bewirkte Erscheinung heisst die magnetische Influenz. (Wir kommen noch darauf zurück.)

Die magnetische Anziehungskraft äußert sich beim Eisen sehr stark, bei einigen Metallen (Kobalt und Nickel) schwach und ist bei anderen Körpern nur mit Hülfe sehr starker Magnete nachweisbar. Um Ihnen den Unterschied zwischen Eisen und Nickel zu zeigen, nehme ich von jedem Metall nahezu gleich große Stücke, die rund gefeilt und mit einem Haken versehen sind; diese hake ich in die Öse einer feinen seidenen Schnur, an welche ich in Abständen Bleistücke von gleichem Gewicht befestigt habe (B Fig. 2). Berühre ich die Eisenkugel mit einer Polfläche des Magnets, so kann ich eine

Kette von über 10 Bleistückchen aufheben, während die Nickelskugel herabfällt, sobald das vierte Bleistückchen gehoben werden soll.

Wir sahen: Bei der Berührung mit einem Magnet, ja selbst durch Annäherung eines solchen, wird weiches Eisen ebenfalls magnetisch, verliert aber diese Eigenschaft sofort nach Entfernung des Magnets. Auch wiederholtes Streichen mit dem Magnet ändert hierin nichts, dagegen zeigt ein Stahlstab in diesem Falle bleibenden Magnetismus. Das setzt uns in den Stand, künstliche Magnete von bequemerer Gestalt herzustellen.

Diese Stricknadel ist ein vortreffliches Versuchsobjekt. Ich breche sie in der Mitte durch und erhalte zwei handliche Stahlstäbchen, die ich magnetisiere, indem ich sie in der Mitte fasse, dicht bei den Fingern auf die eine Polfläche des Magnets lege und abziehe, sodaß das Ende der Stahlnadel zuletzt die Polkante verläßt. Dieses wiederhole ich 20—30 mal. Ebenso verfare ich mit der anderen Nadelhälfte, nur streiche ich sie an der entgegengesetzten Polfläche des natürlichen Magnets. — So! Jetzt sind beide Nadeln genügend stark magnetisiert, um Eisenstücke zu tragen, deren Gewicht größer ist als das der Magnetnadeln selbst. — Nun können wir vermittelst Magnetnadeln die eigentümlichen Eigenschaften der Magnete studieren.

An zwei Ständern, die einen Abstand von etwa 2 m haben, sind an feinen, ungedrehten Seidenfäden kleine Bügel aus Aluminiumdraht befestigt, in welche ich die beiden Magnetnadeln so lege, daß sie horizontal schweben. — Sie sehen: beide Nadeln schwingen einige Mal hin und her und nehmen dann eine parallele Lage ein. An jener Sonnenuhr am Fenster erkennen wir leicht, daß das eine Ende jeder Nadel genau nach Norden zeigt¹⁾.

Um die Enden der Nadeln von einander zu unterscheiden, stecken wir an den „nordsuchenden“ Pol jeder Magnetnadel, den wir auch kurz „Nordpol“ nennen können, einen rot ge-

¹⁾ Die horizontale Abweichung der Magnetnadel vom astronomischen Meridian beträgt jetzt hier in St. Petersburg fast Null (nur etwa $\frac{1}{2}$ Min. westlich) und kann daher für unsere Zwecke vernachlässigt werden. Diese „Deklination“ der Magnetnadel ist für westlicher oder östlicher gelegene Orte bedeutend größer.

färbten Kegel aus leichtem Sonnenblumenmark und an das andere Ende eine grüne Kugel aus demselben Stoff. Jetzt zeigen beide wieder aufgehängten Magnetnadeln mit der Spitze des roten Kegels nach Norden. Der rote Kegel markiert also den Nordpol, die grüne Kugel den Südpol jeder Nadel. —

Uns drängt sich nun die Frage auf: wie verhält sich nun ein solcher beweglicher Magnet bei der Annäherung eines Stückes Eisen, und wie bei der eines zweiten Magnets? Ich nähere einen eisernen Schlüssel der einen Magnetnadel — der eine Pol wird angezogen, aber — — der andere ebenfalls, d. h. *beide Pole des Magnets werden von dem unmagnetischen Eisen angezogen*, wie vorhin das Eisen von jedem der beiden Magnetpole.

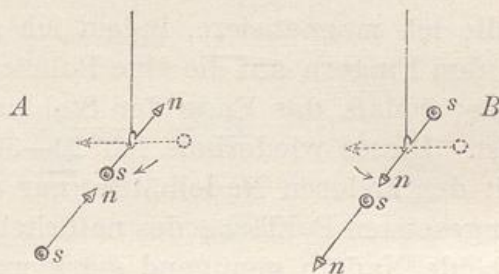


Fig. 3.

Magnetische Anziehung und Abstofsung. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

Jetzt nehme ich eine Magnetnadel vom Bügel und nähere ihren Nordpol der beweglichen Nadel von der Seite — sofort dreht sich diese lebhaft herum, schwingt mit abnehmenden Ausschlägen einige Mal hin und her und bleibt dann in einer solchen Lage stehen, daß ihr Südpol dem zugewandten Nordpole der genäherten Magnetnadel gegenübersteht (A Fig. 3). — Kaum wende ich die feste Nadel, so schwingt auch die bewegliche herum und kehrt ihren Nordpol dem Südpole der genäherten zu (B Fig. 2).

Nachdem die aufgehängte Nadel wieder ihre nord-südliche Ruhelage eingenommen hat, nähere ich ihrem Südpole rasch den Südpol der anderen Magnetnadel — es findet eine lebhafte Abstofsung statt; desgleichen zwischen beiden Nordpolen. Wir sehen hieraus: *Ungleichnamige Magnetpole ziehen sich an, gleichnamige stoßen sich ab!*

Sollte es möglich sein, beide Magnetpole von einander zu trennen? Ich zerbreche die eine Magnetnadel in der Mitte und

nähere die Bruchfläche des mit dem roten Kegel versehenen Nord-Endes der aufgehängten Nadel — es ist hier ein Südpol entstanden; ebenso an der Bruchfläche des anderen Stückes ein Nordpol, d. h. *jedes zerbrochene Stück ist wieder ein vollständiger Magnet!* Ich zerbreche die Stücke nochmals, bis die Nadel in 8 nahezu gleiche Stücke geteilt ist. Nun stecke ich diese in eine dünne Glasröhre so, daß auf einen Südpol immer der Nordpol des nächsten Stückes folgt und hänge die Glasröhre in den freien Bügel; Sie sehen, die 8 Magnetchen verhalten sich wie ein heiler Magnet.

Setzen wir in Gedanken das Zerteilen der Magnetnadel immer weiter fort, so hindert uns nichts an der hypothetischen Annahme, daß jedes Molekül²⁾ des Stahles, aus dem die Nadel besteht, einen Nord- und einen Südpol hat, also *der Magnet aus zum Teil gleichgerichteten Molekularmagneten zusammengesetzt ist* (Ampère).

Was wird nun geschehen, wenn diese Molekularmagnete nicht gleichgerichtet sind, sondern alle möglichen Stellungen einnehmen? Hier sehen Sie ein sehr dünnwandiges Probiergläschen, das mit Stahl-Feilspänen locker gefüllt und durch einen Kork verschlossen ist. Durch längeres Streichen an den Polen eines starken Magnets gelingt es, die aus vielen Tausenden von Stücken bestehende Stahlmasse zu magnetisieren, sodaß die Enden kleine Eisenstücke zu tragen vermögen. — Jetzt lockere ich den Pfropf etwas und schüttele die Röhre so stark, daß die Feilspäne durcheinander geworfen werden und — fast spurlos ist der Magnetismus verschwunden!

Nach dem Vorstehenden dürfen wir annehmen, daß ein unmagnetisches Stück Stahl oder Eisen auch aus Molekularmagneten besteht, die aber alle möglichen Stellungen zu einander haben. Magnetisieren heißt also nur: einen Teil der Molekularmagnete gleichgerichtet parallel stellen. Die (in Wirklichkeit nie zu erreichende) Grenze der Magnetisierbarkeit wäre der Fall, wo alle Molekularmagnete gleichgerichtet sind. Die leichte aber nur vorübergehende Magneti-

Molekular-
magnete.

²⁾ Unter Molekülen verstehen wir die kleinsten unter sich gleichartigen Teilchen, aus denen die Körper zusammengesetzt sind. Die unteilbaren Elementarbestandteile der Moleküle heißen Atome.

sierbarkeit des Eisens könnte eine Folge der leichten Drehbarkeit der Eisenmoleküle sein, während die auch mit Kohlenstoffatomen behafteten Stahlmoleküle vielleicht schwerer drehbar sind, dafür aber — einmal gerichtet — ihre neue Stellung beibehalten. Die Thatsache, daß ein Stück Stahl rascher den Magnetismus annimmt, wenn es während des Magnetisierens erschüttert wird, und daß ein Stahlmagnet durch Stofs oder Fall einen Teil seines Magnetismus verliert, spricht jedenfalls für unsere Annahme.

Magnetisierung
durch Influenz.

Noch haben wir die Frage zu entscheiden: Welchen Pol erhält das mit dem Magnetpol gestrichene Ende der Stahlnadel? Dieses Stück einer Stricknadel ist noch unmagnetisch. Ich fasse es nahe an einem Ende und ziehe es so an dem Nordpol eines Magnets ab, daß das freie Ende zuletzt den Pol verläßt. Die Probe erweist, daß dieses Ende ein Südpol geworden ist. Ebenso ergiebt das Streichen am Südpol des Magnets an der letzten Berührungsstelle des Stahlstäbchens einen Nordpol. Hierzu ist nicht einmal unmittelbare Berührung nötig, denn das Magnetisieren gelingt auch, wenngleich schwächer, an einem Magnetpol, den ich durch eine dünne Glimmerplatte vor der Berührung geschützt habe. Ja sogar ein harter (nicht ausgeglüht) eiserner Nagel, den ich mit dem einen Ende in die Nähe eines Magnetpoles bringe, zeigt nach einiger Zeit etwas bleibenden Magnetismus, und zwar hat das nächststehende Ende des Nagels einen entgegengesetzten, das abgewandte einen gleichnamigen Magnetpol erhalten. Diese Erscheinung nennen wir die magnetische Influenz (s. o. S. 2) und können sagen: Das Magnetisieren durch Streichen oder durch Annäherung eines Magnets ist ein Magnetisieren durch Influenz.

Nun wollen wir noch versuchen, den Magnet durch Berührung mit verschiedenen Körpern zu „entladen“ — es gelingt durchaus nicht. Der Magnetismus ist also nicht ableitbar. Dagegen wird ein Magnet (nahezu) unmagnetisch durch das Erhitzen in einer Flamme.

Wir wollen nun die wichtigsten magnetischen Erscheinungen zusammenfassen und ihnen die uns schon bekannten Erscheinungen der statischen Elektrizität gegenüberstellen (vergl. I. Bd., S. 5).

Magnetische Erscheinungen.

1. Es gibt nur einen magnetischen Zustand, dessen zusammengehörige Äußerungsformen wir als Nord- und Südmagnetismus bezeichnen.

2. Ein magnetisierter Körper zeigt (bei regelmäßiger Magnetisierung zwei) entgegengesetzte Pole (Nord- und Südpol), während dazwischen die Indifferenzzone liegt.

3. Gleichnamige magnetische Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

4. Wird ein Stahlmagnet in beliebig viele Stücke zerbrochen, so ist jedes Stück wieder ein vollständiger Magnet mit einem Nord- und einem Südpol.

5. Eine frei beweglich aufgehängte Magnetnadel stellt sich in den magnetischen Meridian ein, hat also eine Richtkraft.

6. Nur wenige Stoffe lassen sich in merklichem Grade magnetisieren oder wirken auf die Magnetnadel ein (Eisenerze, Nickel, Kobalt u. e. a.).

7. Bei einem Magnet ist jedes Molekül ein Magnet, also der Sitz eines Nord- und eines Südpols (vergl. 4). Magnetisieren heißt also: mehr oder weniger Molekularmagnete gleichgerichtet parallel stellen.

8. Durch Berührung kann einem Magnet der Magnetismus nicht entzogen werden.

9. Durch Streichen mit einem Magnet (Influenzwirkung, s. o.) können beliebig viele Stahlstäbe magnetisiert werden, ohne daß der influierende Magnet an Stärke einbüßt.

Elektrostatistische Erscheinungen:

1. Es gibt zwei verschiedene elektrische Zustände, die wir als Glas- und Harzelektricität (oder als $+E$ und $-E$) bezeichnen.

2. Ein jeder (durch Mitteilung oder durch Reibung) elektrisierte Körper hat entweder $+E$ oder $-E$.

3. Gleichnamig elektrische Körper stoßen sich ab, ungleichnamig ziehen sich an.

(Keine Analogie.)

5. Eine frei bewegliche elektrische Nadel (I. Bd. S. 12) hat, bei Abwesenheit eines elektrischen Körpers (oder Leiters), keine Richtkraft.

6. Alle Körper können elektrisch gemacht werden, wenn sie gehörig isoliert sind.

7. Bei einem isolierten Leiter ist der Sitz der Elektricität die äußere Oberfläche; bei einem Isolator dagegen die Stelle, welche gerieben oder mit einem elektrisierten Körper berührt wurde. — Elektrisieren heißt: in einem Körper einen Überschufs oder einen Mangel an Elektricität im Vergleich zur Umgebung hervorrufen (Unitar. Hypothese) oder: in einem Körper freie $+E$ oder $-E$ erzeugen (Dualistische Hypothese).

8. Durch Berührung mit einem nicht isolierten Leiter kann ein elektrisierter Leiter entladen werden.

9. Durch Influenz können beliebige Mengen $+E$ und $-E$ erzeugt werden, ohne daß der influierende Körper seine Ladung verliert (Elektrophor, Influenz-Elektrisiermaschine).

Sie sehen aus dieser Zusammenstellung: so groß auch in mancher Hinsicht die Ähnlichkeit zwischen den magnetischen und den elektrostatischen Erscheinungen ist, so ergibt sich doch in vielen anderen Stücken eine auffallende Verschiedenheit. Diese zeigt sich besonders in dem Gebundensein des Magnetismus, d. h. in der Unmöglichkeit, einen Körper durch Mitteilung, oder richtiger gesagt, auf Kosten des Magnetismus eines anderen Körpers zu magnetisieren, oder einen Magnet durch Berührung zu „entladen“. Ferner ist der für gewöhnlich zu beobachtende Magnetismus auf einige wenige Körper beschränkt (Anh. 1). Die Elektrizität dagegen ist — wenigstens auf Leitern — beweglich und kann durch Reiben in jedem genügend isolierten festen oder flüssigen Körper hervorgerufen werden. Sollte es da wohl möglich sein, diese so verschiedenen Erscheinungen auf eine gemeinsame Ursache zurückzuführen? Und doch ist das der Fall, wie Sie später sehen werden.

Wir haben nun diejenigen magnetischen Erscheinungen kurz wiederholt, welche zum Verständnis des später Folgenden unerlässlich sind, und wollen uns wieder den elektrischen Erscheinungen zuwenden.

* * *

Auf unseren ersten sechs Wanderungen lernten wir die Erscheinungen der statischen (d. h. im Gleichgewicht befindlichen, also „ruhenden“) Elektrizität kennen. Dieser Name ist sehr gebräuchlich, aber nichts weniger als charakteristisch, denn die sogenannte „ruhende“ Elektrizität konnte abgeleitet werden und — bildlich gesprochen — durch einen Draht auf einen anderen Körper oder zur Erde überströmen, also gewissermaßen sich bewegen. Wir haben auch von dieser Bewegungsfähigkeit der statischen Elektrizität vielfach Gebrauch gemacht, aber immer nur das Endresultat, also wieder einen Gleichgewichtszustand beobachtet. Jetzt wollen wir aber unsere Aufmerksamkeit gerade auf den Vorgang der elektrischen Entladung in Leitern, also auf die sogenannte „strömende Elektrizität“ richten, die, im Gegensatz zur statischen, wohl auch *dynamische Elektrizität* genannt wird.

Um die Erscheinungen der strömenden Elektrizität verfolgen zu können, müssen wir eine genügend ergiebige Elektrizitätsquelle zur Verfügung haben. Die von uns früher vielfach benutzte Influenz-Elektrismaschine kann uns vorläufig zeigen, worauf es zunächst ankommt.

Ich setze die Influenzmaschine in Gang und hänge an die auseinandergezogenen Konduktoren (A Fig. 4) Ösen, die ich in die Enden einer dicken Hanfschnur, die ein Halbleiter ist, geschlungen habe, und befestige die Schnur so an einem von der Decke herabhängenden Seidenfaden (s), daß sie genügend stramm hängt und einen geschlossenen Stromkreis bildet, wenn die Maschine in Thätigkeit gesetzt wird.

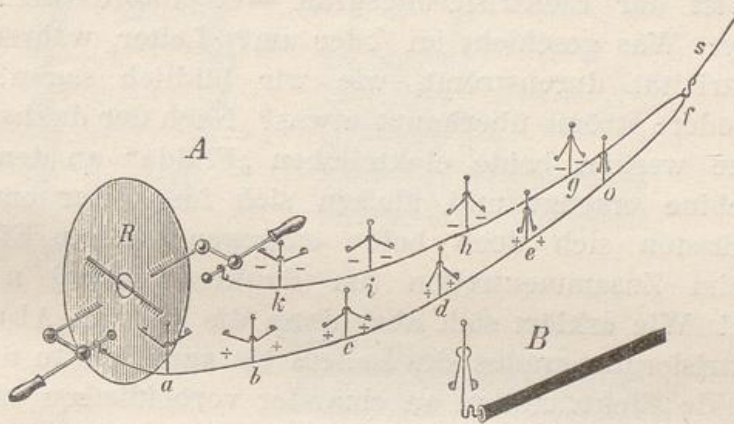


Fig. 4.

Verlauf des Elektrisierungsgrades in einem Stromleiter. $\frac{1}{20}$ natürl. Gröfse.
(B Probierelektroskop. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.)

Das an einem Ebonitstäbchen befestigte einfache Probierelektroskop (B, Fig. 4), dessen Blättchen aus Papierstreifen bestehen, die in Drahtbügeln aufgehängt sind, setze ich mit dem unteren, passend gebogenen Ende auf die Schnur, nahe am positiven Konduktor. Damit ich das Probeelektroskop der Schnur entlang führen kann, bitte ich, daß jemand von Ihnen die Kurbel der Elektrismaschine langsam und gleichmäfsig weiterdreht. — Wir sehen, daß die Blättchen (in der Stellung a, Fig. 4) sehr stark abgelenkt werden. Durch Annäherung des Probierelektroskops an ein auf dem anderen Ende des Tisches befindliches, mit Glas-Elektrizität geladenes Elektroskop erkennen wir, daß die Schnur an der berührten Stelle freie positive Elektrizität aufweist, was vorauszusetzen war.

Nun rücke ich allmählich das Probierelektroskop der Schnur entlang, wobei ich dazwischen die Art der Ladung prüfe — Sie sehen: Die Ladung ist noch immer positiv, nimmt aber stetig ab bis zum Punkte o (Fig. 4), wo die Blättchen ganz zusammenfallen, also das Elektroskop die Ladung 0 hat. Bei weiterem Verschieben heben sich die Blättchen wieder, aber die Ladung ist negativ und wächst stetig, je näher das Elektroskop dem negativen Konduktor kommt (f—i, Fig. 4). Wir schließen hieraus: *Der Elektrisierungsgrad oder die Potentialdifferenz³⁾ mit dem Null-Niveau der Erde nimmt (der absoluten Gröfse nach) in der Strombahn von beiden Polen an stetig ab, bis zum Punkte o.* In o selbst ist der Elektrisierungsgrad = 0. Interessant ist nun die Frage: Was geschieht im (oder am?) Leiter, während ihn die Elektrizität durchströmt, wie wir bildlich sagen? Was strömt? oder: strömt überhaupt etwas? Nach der dualistischen Hypothese werden beide elektrischen „Fluida“ an den Polen der Maschine erzeugt und fließen sich im Leiter entgegen. Dann müssten sich doch beide entgegengesetzten Elektricitäten beim Zusammentreffen (im Punkte o etwa) neutralisieren! Wie erklärt sich aber dann die stetige Abnahme des Elektrisierungsgrades des Leiters bis zum Punkte o? Oder sollen beide Elektricitäten an einander vorbeifließen und sich unterwegs allmählich neutralisieren? Das widerspricht nun völlig unseren bisherigen Beobachtungen. Sie werden zugeben, dass die dualistische Hypothese die inneren Vorgänge bei der sogenannten „strömenden Elektrizität“ nicht zu erklären vermag. Die Macht der Gewohnheit hat aber die ihr entlehnten Ausdrücke: „strömende oder fließende Elektrizität“ (oder kurz: elektrischer Strom) sowie „+ E und — E“ u. s. w. geheiligt, sodaß wir — in Ermangelung eines zutreffenderen Bildes — diese Bezeichnungen beibehalten, wie wir auch noch immer von einem Auf- und Untergang der Sonne sprechen, wiewohl

³⁾ Die elektrische Potentialdifferenz zweier Körper messen wir durch die mechanische Arbeit, welche erforderlich ist, um die positive Einheit der elektrostatischen Elektrizitätsmenge von dem niederen elektrischen Niveau auf das höhere zu befördern. Der Arbeitswert der elektrischen Potentialdifferenz eines Körpers mit der Erde ist also ein mechanisches Maß für seinen Elektrisierungsgrad (vergl. I. Bd. S. 134).

wir schon durch Kopernicus eines besseren belehrt worden sind.

Wie gestaltet sich nun die Sache nach der unitarischen Hypothese? Erlauben Sie mir, Ihnen zuvor an einem Beispiel aus der Hydromechanik die Vorgänge klar zu machen, welche eine Analogie zu den elektrodynamischen bilden, deren Untersuchung uns jetzt beschäftigt.

Stellen wir uns einen horizontalen ringförmigen Kanal vor (A, Fig. 5), der bis zur Hälfte seiner Wandhöhe mit Wasser gefüllt ist. An einer Stelle (M) sei in einem Damme ein weites Rohr vom Querschnitt des Kanals eingesetzt, in dessen Mitte ein

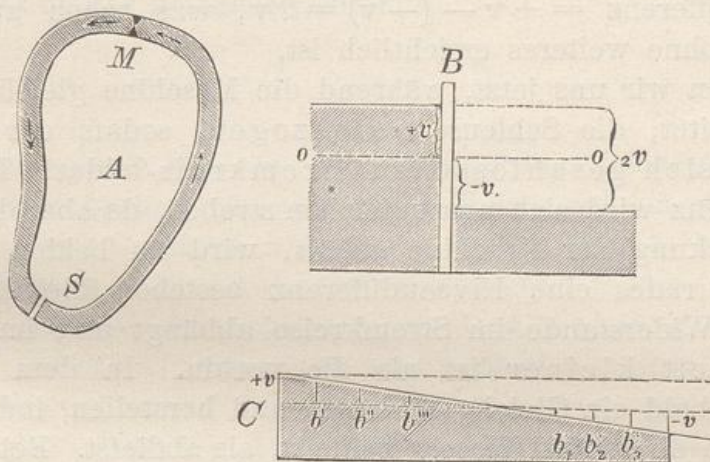


Fig. 5.
Hydrodynamische Erscheinungen.

Flügelrad (Schiffsschraube) sich befindet und durch eine Maschine in Bewegung gesetzt werden kann. An einer anderen Stelle (S) befinde sich eine Schleuse, welche vorläufig geschlossen sein mag.

Was wird geschehen, wenn wir das Flügelrad in Bewegung setzen? Offenbar wird das Flügelrad das Wasser im Kanal vorwärts treiben (z. B. in der Richtung des Pfeiles links bei M). Dadurch fließt das Wasser in die linke Hälfte des Kanals und wird sich dort aufstauen, während auf der anderen Seite der Wasserspiegel fallen muß. An der Schleuse wird sich eine Niveaudifferenz bilden (B, Fig. 5), deren Größe von der das Wasser treibenden Kraft, der „aquamotorischen Kraft“ der Maschine abhängt. Diese Niveaudifferenz wird so lange zunehmen, bis der Gegendruck des Wassers auf das Flügelrad der „aquamotorischen Kraft“ der Ma-

schine das Gleichgewicht hält; von da ab dient die weitere Arbeit der Maschine nur zur Erhaltung der Niveaudifferenz. Die Niveaudifferenz an der geschlossenen Schleuse kann also als Maßstab für die aquamotorische Kraft der Maschine dienen. Da wir nun die nach dem mechanischen Arbeitswert gemessene Niveaudifferenz als Potentialdifferenz bezeichnen, so können wir sagen: *Die Potentialdifferenz an den Endpunkten des Kanals ist ein Maß für die aquamotorische Kraft.* — Ist nun (nach mechanischem Maß) die Niveauerhöhung auf der einen Seite der Schleuse $= +v$ (vergl. B, Fig. 5), auf der anderen die Niveauniedrigung $= -v$, so ist die gesamte Niveau- oder Potentialdifferenz $= +v - (-v) = 2v$, was schon aus der Fig. 5, B ohne weiteres ersichtlich ist.

Denken wir uns jetzt, während die Maschine gleichförmig weiterarbeitet, die Schleuse aufgezogen, sodaß der Kanal einen in sich geschlossenen Stromkreis bildet! Die Niveaudifferenz wird sich auszugleichen streben, da aber die treibende Wirkung der Maschine anhält, wird zu beiden Seiten des Wasserrades eine Niveaudifferenz bestehen bleiben, die von dem Widerstande im Stromkreise abhängt und im allgemeinen weit kleiner ist als die vorhin. In dem Kanal muß sich bald ein Gleichgewichtszustand herstellen, indem an jeder Stelle ebensoviel Wasser zufließt, als abfließt. Bei einem gleichbleibenden Querschnitt des Kanals wird die Niveauabnahme oder das Stromgefälle ein gleichmässiges sein müssen. [C, Fig. 5, zeigt einen senkrechten Querschnitt durch die Achse des Kanals; o—o ist das ursprüngliche Niveau des Wassers in der Ruhelage (Nullniveau).]

Hieraus ergeben sich nun zwei Folgerungen:

1. Denken wir uns in dem vom ringförmigen Kanal umschlossenen Raume einen Teich gegraben, dessen Wasserspiegel mit dem ursprünglichen Niveau des Kanals in gleicher Höhe sich befindet, und vergleichen wir die Wasserhöhe oder den Füllungsgrad des Kanals mit dem des Teiches, so ergibt sich: Der Füllungsgrad des Kanals ist in der linken Hälfte grösser, in der rechten kleiner als der des Teiches. Die Niveaudifferenz beider nimmt (wenn wir links vom Flügelrade beginnen) stetig ab, wird an einem Punkte $= 0$ und geht in eine stetig zunehmende negative Differenz über. Ver-

glichen mit dem Nullniveau haben wir — bildlich gesprochen — in der linken Kanalhälfte Plus-Wasser, in der rechten Minus-Wasser, oder einen positiven und einen negativen Füllungsgrad.

2. Zwischen je zwei gleichweit von einander entfernten Punkten der gleichförmigen Strombahn ($b_1 b_2$ oder $b' b''$... bei C, Fig. 5) herrscht ein gleiches Stromgefälle oder eine gleiche Füllungsgrad-Differenz, d. h. das Stromgefälle ist konstant. *Ein beliebiger Punkt des Stromkreises hat, mit stromaufwärts gelegenen Punkten verglichen, ein tieferes Niveau, also einen negativen Füllungsgrad; dagegen einen positiven im Vergleich zu stromabwärts gelegenen Punkten.*

* * *

Kehren wir nun zu den elektrischen Erscheinungen zurück. Die Analogie zu der ersten Folgerung aus den hydrodynamischen Gesetzen haben wir bereits (Fig. 4) kennen gelernt, indem der Elektrisierungsgrad (oder das elektrische Potential) im Stromleiter stetig abnahm, gleich Null wurde und schließlich einen wachsenden negativen Wert annahm.

Jetzt wollen wir noch das Stromgefälle zwischen zwei Punkten des Stromkreises untersuchen.

Das Papier-Elektrometer (E, Fig. 6), dessen Gehäuse aus Blech besteht, stelle ich auf einen Paraffinblock. [Bei allen Versuchen mit dem Elektrometer wird ein stark vergrößertes Bild der Aichungsskala und des Blättchens auf einem weißen Schirm entworfen. Vergl. I. Teil Fig. 15]. Auf dem Ebonitstabe (l) sind zwei verschiebbare Messingklemmen angebracht, an welche zwei starke Neusilberdrähte ($m_1 m_2$) mit hakenförmig gebogenen Enden gelötet sind. An diese befestige ich zwei sehr feine, blanke Kupferdrähte ($d_1 d_2$) und führe sie über kleine Haken, die durch Seidenfaden an Holzleisten befestigt sind, welche an Schnüren hängen. Das Ende des einen Drahtes (m_1) befestige ich an der Klemmschraube des Blechgehäuses, das des anderen an dem Leitungsstabe des Elektrometers.

Nun bitte ich jemand von Ihnen, wieder die Influenz-

maschine langsam und gleichmäfsig zu drehen, und lege die Drahtgabel auf die Hanfschnur, wie Fig. 6 zeigt — als bald sehen Sie einen Ausschlag am Elektrometer, der fast völlig unverändert bleibt, wenn ich die Drahtgabel hin- und herschiebe oder entlang der ganzen Schnur führe! Das mit dem stromabwärts gelegenen Neusilberdraht (m_2) verbundene Elektrometer zeigt dabei, wie die Probe erweist, beständig $-E$.

Nun drehe ich den Ebonitstab so, daß m_2 an seiner Stelle bleibt, aber m_1 stromabwärts zu liegen kommt — das Elektrometer zeigt ungefähr denselben Ausschlag, jedoch $+E$. Auch

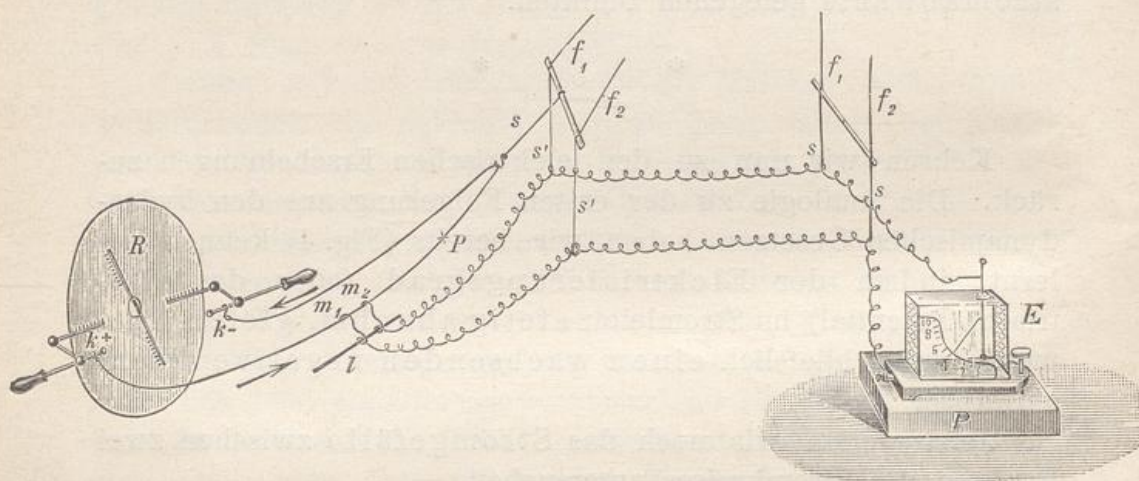


Fig. 6.

Elektrisches Stromgefälle im Stromkreise. $\frac{1}{20}$ natürl. Gröfse.

jetzt bleibt der Ausschlag fast unverändert, wenn wir die Drahtgabel der Schnur entlang fortrücken. Berücksichtigen wir hierbei, daß die Influenzmaschine wahrscheinlich nicht vollkommen gleichmäfsig wirkt, und daß die Schnur stellenweise vielleicht dünner ist oder fester gedreht sein kann, so werden wir annehmen dürfen, daß bei einer völlig konstanten Elektrizitätsquelle in einem gleichförmigen Stromleiter das Stromgefälle im ganzen Stromkreise konstant ist.

Beziehung
zwischen Strom-
gefälle und
Länge des
Leiters.

Wir wollen den Versuch mit einer kleinen Abänderung wiederholen. Die Schnur ist 210 cm lang. In einer Entfernung von 70 cm vom positiven Konduktor, d. h. in $\frac{1}{3}$ der Schnurlänge, ist mit einer roten Bleifeder ein Punkt markiert (P, Fig. 6). Hier setze ich eine Klemmschraube an, die durch

einen Draht mit der Erdleitung verbunden ist. Dieser Punkt (P) des Stromkreises muß also, wenn die Maschine in Thätigkeit gesetzt wird, den Elektrisierungsgrad der Erde, also das Potential $= 0$ annehmen. Sie sehen — das Hülselektroskop zeigt hier in der That keinen Ausschlag. Dagegen weist es von P bis $+K$ stets $+E$, von P bis $-K$ immer $-E$ auf. — Ich lege die Drahtgabel an die Schnur — die Erscheinung ist dieselbe wie vorhin, auch wenn der mit dem Elektrometer verbundene Draht m_2 auf den Punkt P zu liegen kommt. Nun tritt aber eine auffallende Erscheinung auf: In jedem der beiden ungleichen Teile der Schnur (d. h. zwischen $+K$ und P, sowie zwischen P und $-K$) zeigt das Elektrometer einen (nahezu) unveränderlichen Ausschlag, aber im kleineren Schnurteile beträgt er 3,4 und im grösseren 1,8 Skalenteile, d. h.: In dem kürzeren Stromleiter ist das Stromgefälle fast doppelt so groß als in dem längeren Leiter. Nun ist letzterer zwei Mal länger als ersterer; wir sehen hieraus: Bei gleichartigen, aber ungleich langen Stromleitern ist die Niveaudifferenz zwischen je zwei gleichweit entfernten Punkten umgekehrt proportional zu der Länge der Stromleiter.

Die Kraft, durch welche hier die Elektrizität der Maschine erzeugt wird, ist, wie wir schon (I. Bd. S. 96) wissen, die Muskelkraft Ihres Kameraden, der so freundlich war, die Maschine zu drehen. Als eine die Elektrizität durch den Stromleiter treibende Kraft, können wir sie die *elektromotorische Kraft* nennen, wie wir vorhin die Kraft, welche das Wasser in Bewegung setzte, als die *aquamotorische Kraft* bezeichneten. Wir hatten in der Niveaudifferenz, welche bei geschlossener Schleuse, also bei unterbrochenem Strom auftrat, einen Maßstab für die aquamotorische Kraft gefunden. In gleicher Weise wollen wir die elektrische Niveaudifferenz (oder Potentialdifferenz) an den nicht verbundenen Polen der Elektrizitätsquelle als Maß der elektromotorischen Kraft betrachten.

Um die elektromotorische Kraft der Influenzmaschine zu bestimmen, müßten wir also die Potentialdifferenz an den freien Polen messen (während der Apparat gleichmäßig wirkt). Leider reichen hierzu die uns zu Gebote stehenden Hilfsmittel nicht aus. Die Skala unseres Elektrometers reicht nur bis

Elektro-
motorische
Kraft.

10 Volt³⁾ bei Anwendung des Normalkondensators, oder (da die Verstärkungszahl des Kondensators etwa = 200 ist) bis 2000 Volt ohne den Kondensator. Hier handelt es sich aber, je nach der Funkenstrecke, um elektrische Poldifferenzen von 4—50 000 Volt. — Wir wollen daher zu unseren weiteren Versuchen andere Elektrizitätsquellen aufsuchen, zuvor aber einen Blick rückwärts werfen.

Bei der statischen oder Reibungs-Elektrizität hatten wir gefunden:

Ein elektrisierter isolierter Leiter hat auf seiner ganzen Oberfläche und in seinem Inneren (auch im Hohlraume) denselben Elektrisierungsgrad, d. h. *ein konstantes Potential*. Hier dagegen beobachteten wir in dem Stromleiter ein Potentialgefälle, das wir, der Anschaulichkeit wegen, als elektrisches Stromgefälle bezeichnet haben, obgleich wir gar nicht wissen, was sich im Leitungsdraht bewegt. — Worin besteht nun der Unterschied zwischen statischer (ruhender) und dynamischer (strömender) Elektrizität?

Ich habe zur Einführung in die dynamische Elektrizität absichtlich eine Elektrizitätsquelle gewählt, welche wir schon früher zur Erzeugung der statischen Elektrizität benutzten. Sie werden daher ohne weiteres zugeben, daß in beiden Fällen dieselbe Elektrizität wirksam war! Wenn nun im folgenden neue Elektrizitätsquellen, welcher Art sie auch sein mögen, im wesentlichen dieselben Erscheinungen zeigen, so müssen wir annehmen, daß es — bildlich gesprochen — sowohl in der statischen, als auch in der dynamischen Elektrizität nur eine einzige Sorte von Elektrizität giebt. Die Verschiedenheit der elektrostatischen und der elektrodynamischen Erscheinungen beruht also lediglich auf der verschiedenen Wirkung, welche *dieselbe Elektrizität* ausübt, wenn sie sich im Zustande der Ruhe oder in dem der Bewegung befindet. Hierbei ist es völlig gleichgültig, wodurch die Elektrizität in dem betreffenden Leiter in Bewegung gesetzt (zum „Strömen“ gebracht) wird.

³⁾ Das Volt ist die praktische Einheit der Potentialdifferenz und damit der praktische Arbeitswert des Elektrisierungsgrades. Es ist 1 Volt = $\frac{1}{300}$ elektrost. Potential-Einheiten (vergl. I. Bd. S. 135).

Führe ich z. B. den elektrisierten Flintglasstab über einem unelektrischen Elektroskop hin und her (I. Bd. S. 39), so wird — während der Glasstab der Kugel des Elektroskops genähert wird — durch Influenz die entgegengesetzte Elektrizität in die Kugel herangezogen, die gleichnamige Elektrizität in das untere Ende des Leitungsstabes und in die Blättchen abgestoßen. In dem Maße, wie der influierende Körper sich entfernt, strömt von beiden Enden des Leitungsstabes die Elektrizität wieder zurück. Wir haben also in diesem Falle in jeder Hälfte des Elektroskopenstabes hin- und hergehende elektrische Ströme. Ebenso wird, wenn wir einen elektrisierten isolierten Leiter ableitend berühren, die Elektrizität von allen Oberflächen teilen zu dem Berührungspunkt hinströmen und abfließen. Das Umgekehrte findet beim Laden des Leiters statt. Wir können also sagen: *Ein elektrischer Strom tritt immer ein, wenn in einem Leiter der elektrische Zustand (das Potential) an irgend einer Stelle geändert wird!*

* * *

Wir haben vorhin (beim Versuch Fig. 6) angenommen, daß eine Elektrizität im Stromleiter „fließt“, und nannten den Vorgang, durch welchen ein elektrisch höheres Niveau mit einem niedrigeren sich auszugleichen strebt, den elektrischen Strom. Nach dieser, der unitarischen Hypothese entnommenen Annahme ließen sich die beobachteten Erscheinungen recht wohl erklären. Wir wollen aber, der Bequemlichkeit halber, den Ausdruck — E beibehalten, aber unter „Stromrichtung“ die Richtung verstehen, in welcher die $+E$ durch den Leiter fließt. Daß wir hierbei, wie allgemein üblich, mit Franklin die *Glaselektrizität als $+E$ annehmen*, ist rein willkürlich und es ist sehr möglich, ja nach den neuesten Untersuchungen sogar wahrscheinlich, daß es sich umgekehrt verhält.

Nun wollen wir noch den Einfluß kennen lernen, welchen die Dicke der Schnur auf das Stromgefälle hat. Zu diesem Zweck habe ich hier (Fig. 7) drei Hanfschnüre an den Enden mit Stanniol bewickelt und mit starken Kupferdrähten zusammengeschnúrt, deren freie Enden Haken bilden, die ich an die Pole der Maschine legen kann. Alle 3 Schnüre sind gleich

lang. Die erste (A) besteht aus einer Hanfschnur, die zweite (B) aus 2 und die dritte aus 3 Schnüren von demselben Stück, also möglichst gleicher Beschaffenheit. Ich befestige die Schnüre nach einander (s. Fig. 6) und bestimme für jede derselben die elektrische Niveaudifferenz an den Berührungspunkten der Drahtgabel, deren Zinkenabstand natürlich unverändert bleibt. Während nun die Maschine möglichst gleichförmig ge-



Fig. 7.

Stromleiter von verschiedenem Querschnitt.

dreht wird, erhalten wir folgende Ausschläge am Elektrometer: bei A 8,5; bei B 5,5; bei C 2,7. Wir sehen hieraus: Die elektrische Niveaudifferenz zwischen je zwei gleichweit entfernten Punkten der Strombahn nimmt ab, wenn der Querschnitt des Stromleiters vergrößert wird.

Hier stelle ich ein geladenes Papierelektroskop (Fig. 8) vor Sie hin, fasse die abgenommene einfache Schnur (A) an

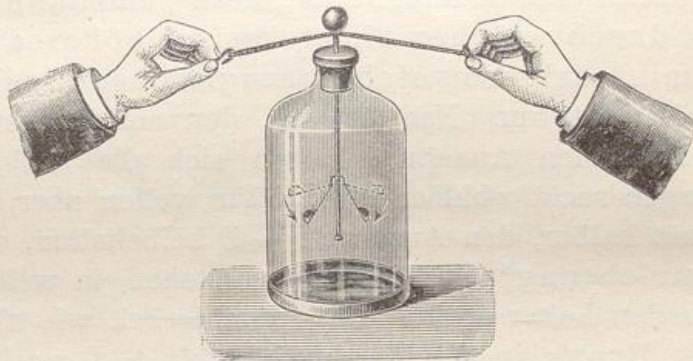


Fig. 8.

Leitungsfähigkeit von Schnüren verschiedener Dicke. $\frac{1}{7}$ natürl. Gröfse.

den Drahthaken und lege die Mitte der Schnur an den Leitungsstab des Elektroskops. — Sie sehen, wie die Blättchen langsam zusammenfallen. Ich wiederhole den Versuch mit der doppelten Schnur B, die Blättchen fallen merklich rascher zusammen; noch rascher ist das bei der dreifachen Schnur C der Fall, also leitet die dreifache Schnur die Elektrizität besser als die doppelte, und diese besser als die einfache.

Jetzt können wir die obige Beobachtung genauer ausdrücken:

Für eine bestimmte Strecke der Strombahn ist die elektrische Niveaudifferenz der Endpunkte um so kleiner, je größer die Leitungsfähigkeit des Stromleiters ist. [Hierbei dürfen wir ja nicht an eine Analogie mit dem Falle denken, wo in einem Wasserkanal durch Bodensenkung eine von der aquamotorischen Kraft unabhängige Niveau- (also auch Potential-) Differenz eintritt, sondern nur mit dem Fall, wo der horizontale Kanal sich verbreitert.]

Interessant sind einige Folgerungen, die sich an unsere Beobachtung knüpfen. Was wird geschehen, wenn wir einen guten Leiter, z. B. einen Kupferdraht statt der Schnur verwenden? Offenbar muß die elektrische Niveaudifferenz an unserer Gabel unmerklich klein werden. Der Versuch bestätigt das vollkommen. Sie sehen jetzt, warum ich eine Schnur benutzte. — Verbinde ich dagegen die Pole der Maschine durch einen Nichtleiter (Isolator), so tritt die ganze elektromotorische Kraft als Niveaudifferenz an den Polen auf, und der Isolator wirkt hier, wie die herabgelassene Schleuse beim Wasserkanal!

Damit wollen wir für heute schließen.

II. Vortrag.

Elektrisierung von Metallen bei Berührung von Flüssigkeiten; Wirkung zweier gleichzeitig eingetauchter Metalle; das Volta'sche Element; Poldifferenz; Ursache der elektromotorischen Kraft des Elements; Chemische Theorie; Historisches: Kontakttheorie Volta's; Konstante Elemente; Schaltung parallel und hintereinander; Elektromotorische Kraft einer Batterie bei der Schaltung parallel und hintereinander; Vergleich der elektromotorischen Kräfte einiger konstanter Elemente.

Eine Tagereise liegt hinter uns. Werfen wir einen Blick rückwärts, um die wichtigsten Punkte nochmals ins Auge zu fassen und sie unserem Gedächtnis besser einzuprägen.

Rückblick.

1. Die magnetischen und die elektrostatischen Gesetze der Anziehung und der Abstossung, sowie die Influenz zeigen eine auffallende Übereinstimmung, doch ergeben sich auch große Verschiedenheiten: So zeigt ein Magnet stets beide entgegengesetzte Pole, auch bildet jedes Stück eines zerbrochenen Magnets wieder einen vollständigen Magnet mit beiden Polen. Ferner erweisen sich nur gewisse Stoffe (Eisen und seine Erze, Nickel u. e. a.) deutlich magnetisierbar, während alle genügend isolierten festen Körper elektrisierbar sind.
2. Zwischen einem von Elektrizität durchströmten Leiter und der Wasserströmung in einem Kanal besteht eine unverkennbare Analogie, die auch dann bestehen bleibt, wenn die Stromleitung unterbrochen (beim Kanal die Schleuse geschlossen) ist. Bei der Elektrisiermaschine tritt in diesem Falle an den Enden der Poldrähte eine elektrische Niveaudifferenz auf, welche von der elektromotorischen Kraft des Apparates abhängt und als Maßstab für sie benutzt werden kann.
3. Wird an zwei Punkten A und B eine elektrische Niveaudifferenz erzeugt (und erhalten), so zeigt, bei leitender Verbindung von A und B, die Elektrizität das Bestreben, die Niveaudifferenz auszugleichen. Den Vorgang, durch

welchen das geschieht, nennen wir den elektrischen Strom. — In dem Leiter, welcher beide Pole des Apparates verbindet, ist der Elektrisierungsgrad (die elektrische Differenz mit dem Null-Niveau der Erde) verschieden. Am positiven Pol ist er am stärksten $+E$, nimmt immer mehr ab, erreicht an einer Stelle den Wert Null und wird nach dem negativen Pole zu immer stärker $-E$. In dem Stromleiter haben wir demnach ein elektrisches Gefälle (Stromgefälle). — Ist der Stromleiter gleichförmig, so ist das Stromgefälle konstant, d. h. die Niveaudifferenzen für gleichweit absteigende Punkte des Leiters sind einander gleich. Für zwei in einem bestimmten Abstand befindliche Punkte der Strombahn ist die elektrische Niveaudifferenz um so größer, je geringer die Leitungsfähigkeit des betreffenden Leiterstückes ist.

* * *

Jetzt sollen Sie eine neue Elektrizitätsquelle kennen lernen, welche auf den ersten Blick unscheinbar und wenig ergiebig zu sein scheint, in Wirklichkeit aber größere Elektrizitätsmengen zu liefern vermag als die beste Influenzmaschine, und in der Technik eine wichtige Verwendung gefunden hat.

Auf das Aluminium-Elektrometer (Fig. 9) schraube ich eine Zinkplatte und lege auf diese zwei sehr dünne Glimmerscheiben (g), welche die Platte allseitig überragen. Darauf lege ich ein Stück Filtrierpapier (f), auf welches ich einige Tropfen verdünnter Schwefelsäure tröpfele.

Nun nehme ich einen biegsamen Zinkdraht (d), welcher mit zwei isolierenden Griffen (i) aus Siegellack versehen ist, und berühre die Zinkplatte (Zn) und das feuchte Filtrierpapier (f). Nach Entfernung des Zinkdrahtes und dem Abheben der oberen Glimmerscheibe zeigt das Elektrometer eine schwache Ladung $-E$ (in Fig. 9 ist die Stellung des Blättchens punktiert angegeben), während das feuchte Filtrierpapier $+E$ aufweist⁴⁾. — Wiederholen wir den Versuch mit

⁴⁾ Hier und im folgenden ist, bei allen Versuchen am Elektrometer, das Blechgehäuse desselben (durch den Draht L in Fig. 9) mit der Erd-

einer Kupferplatte und Kupferdraht, so erhalten wir am Elektrometer ebenfalls — E, aber eine merklich schwächere Ladung, dagegen würde Platin + E zeigen. Je nachdem wir statt der verdünnten Schwefelsäure: reines Wasser oder Lösungen von Salzen nehmen, ist die Wirkung bei den einzelnen Metallen etwas verschieden, sowohl was die GröÙe als was das Vorzeichen der Ladung anlangt — aber immer wird das *Zink* von allen Metallen durch Berührung mit geeigneten Flüssigkeiten am stärksten *negativ elektrisch*!

Was wird nun geschehen, wenn zwei verschiedene Metalle in Berührung mit derselben Flüssigkeit stehen?

Hier lege ich Ihnen zur Ansicht einige Stäbchen aus verschiedenem Metall, sowie einige aus harter Retortenkohle vor,

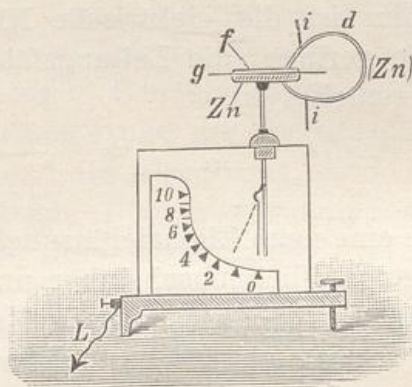


Fig. 9.

Nachweis der Elektrisierung von Metallen bei Berührung mit Flüssigkeiten, nach Buff. $\frac{1}{10}$ natürl. GröÙe.

welche an dem Ende mit angelöteten biegsamen Kupferdrähten versehen sind. Diese Drähte sind bei den Zinkstäbchen mit grüner, bei den übrigen mit roter Seide umspinnen. Auf jedes Stäbchen sind zwei schmale Gummiringe (Stücke eines dünnen Gummischlauches) geschoben, sodafs je 2 Stäbchen aneinander gelegt werden können, ohne sich zu berühren.

Volta'sches
Element.

Nun tauche ich ein Zink/Kupfer-Paar in ein dickwandiges Reagenzgläschen (Fig. 10), welches zur Hälfte mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist, setze das Gläschen in ein passendes

Leitung verbunden (vergl. Bd. I S. 44). Auch wird durch Projektion ein stark vergrößertes Bild der Skala und des Blättchens auf einem weissen Schirm erzeugt (I. Bd. Fig. 15).

Loch eines Holzklötzchens und — ein sogenannter „Volta'scher Becher“ oder ein „Volta'sches Element“ ist fertig!

An den Enden der Leitungsdrähte (d_1, d_2) sind steife Neusilberdrähte angelötet, welche zuerst zu einer Art Öse (o) gebogen und am Ende zugespitzt wurden. Stecke ich nun die Spitze eines Neusilberdrahtes in die Öse eines anderen Elements, so sind die betreffenden Metallstäbe in sicherer leitender Verbindung (Kontakt). Das ist, wie Sie bald sehen werden, hier von der grössten Bedeutung. — Zunächst stecke ich in die Öse

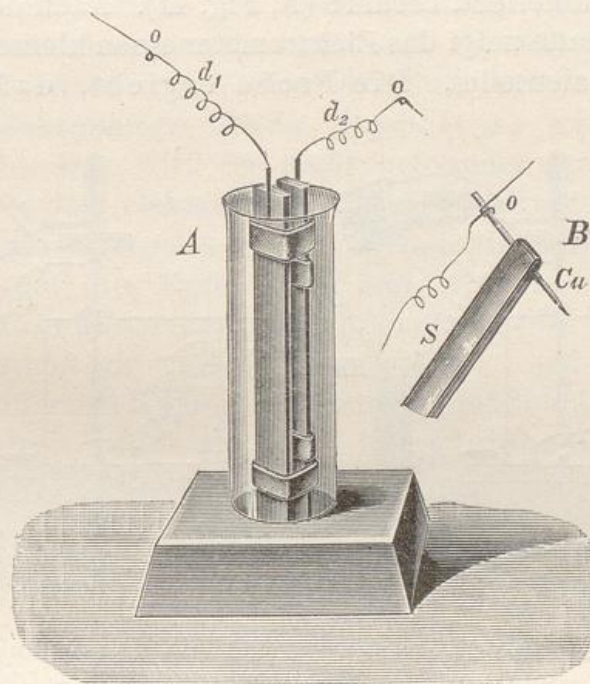


Fig. 10.

A Kleines Volta'sches Element. $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse.
B Verbindung des Leitungsdrahtes mit einem isolierten Draht.

der Pohldrähte des Elements je einen Drahtstift, der an beiden Enden etwas zugespitzt und in der Mitte mit einem Stück Siegellack versehen ist (B, Fig. 10). Indem ich nun diesen isolierenden Griff (S) fasse, kann ich den Stift an den Ableitungsdraht des Elektrometers halten, ohne den Leitungsdraht des Elements zu berühren.

Diese Vorsicht werde ich bei allen Versuchen am Elektrometer beobachten, auch wenn ich nicht dessen erwähne.

Nun wollen wir sehen, ob unser „Element“ wirkt. Ich

bringe die Leitungsdrähte mit der Kugel des Aluminium-Elektrometers abwechselnd in Berührung — es erfolgt keine merkliche Wirkung. Entweder wurde überhaupt keine Elektrizität erzeugt oder — das Elektrometer ist zu unempfindlich. Wir müssen es also mit dem Kondensator versuchen (I. Bd. S. 66).

Ich ersetze die Kugel des Elektrometers durch eine Kondensatorplatte. Nun berühre ich den Leitungsdraht des Elektrometers mit dem Poldraht des Kupferstabes, während ich die obere Platte ableitend berühre (A, Fig. 11). Nach dem Abheben der oberen Platte zeigt das Elektrometer einen kleinen Ausschlag (etwa 0,9 Skalenteile). Die Probe ergibt, daß der Lei-

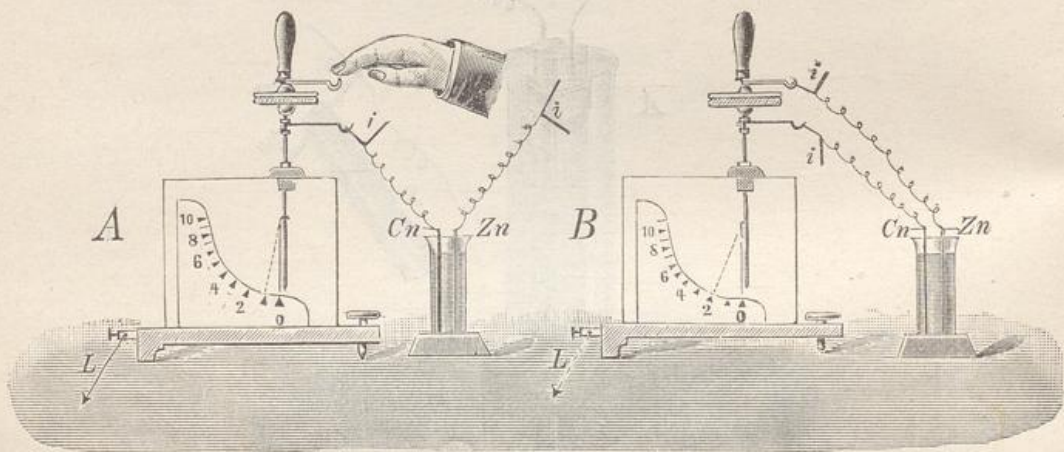


Fig. 11.

Nachweis der Elektrizität an den Polen eines Volta'schen Elements. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

tungsdraht des Kupfers das Elektrometer mit + E geladen hat. (Hierbei ragte der Draht des Zinkstabes frei in die Luft, war also isoliert.) — Vertauschen wir bei einem Kontrollversuch die Poldrähte, wobei ich natürlich den Ableitungsdraht des Elektrometers mit dem Poldraht des Zinkstabes berühre, so zeigt das Elektrometer — E.

Beim vorigen Experiment (Fig. 9) erhielten wir von einem einzelnen Zink- oder Kupferstäbchen bei Berührung mit der Flüssigkeit — E, hier aber beim Kupferstabe + E! Wie wir schon sahen, erhält die Flüssigkeit die entgegengesetzte Ladung. (Beim Zink, Fig. 9, etwa + 1,1 und beim Kupfer + 0,3 ca.) Wir können nur annehmen, daß der Überschufs

($1,1 - 0,3 = 0,8$) auf irgend eine Weise durch die Flüssigkeit zum Kupferstäbchen übergeführt wird, wodurch dieses die Differenz-Ladung $+E = 0,8$ annimmt, während das Zink die entsprechende Ladung $-E = 0,8$ erhält. Daß wir einen etwas abweichenden Wert (0,9) beobachteten, kann auf unvermeidlichen Messungsfehlern beruhen.

Ich wiederhole den Versuch, leite aber den nicht mit dem Elektrometer verbundenen Leitungsdraht des Elements zur Erde ab, indem ich ihn an der Erdleitung befestige oder — was bequemer ist — ich berühre damit gleichzeitig den Ableitungsdraht der oberen Platte (B, Fig. 11). Nach Entfernung der Drähte und dem Abheben der oberen Platte zeigt das Elektrometer einen doppelt so großen Ausschlag (1,7). Das wird Sie nicht befremden, wenn Sie bedenken, daß das elektrische Niveau des Kupferpoles ($+e$) über, das des Zinkpoles ($-e$) um denselben Betrag unter dem Nullniveau (der Erde) liegt und wir im zweiten Falle die ganze Niveaudifferenz Kupfer/Zink ($+e - (-e) = 2e$) messen, während wir vorher, beim isolierten anderen Pol, nur die Niveaudifferenz Kupfer/Erde oder Erde/Zink beobachteten.

Wir sehen hieraus, daß bei gleichzeitigem Eintauchen zweier verschiedener Metalle (in eine geeignete Flüssigkeit) an den herausragenden Metallteilen eine elektrische Niveaudifferenz hervorgerufen und erhalten wird, wobei das eine Metall (hier Kupfer) $+E$, das andere (Zink) $-E$ zeigt. Ein solches „Element“ ist mithin eine selbstthätige Elektrisiermaschine im kleinen. Die aus der Flüssigkeit hervorragenden, ungleichnamig elektrischen Metallstäbe bilden die Pole, daher nennen wir die daran befestigten Leitungsdrähte kurz die Poldrähte.

Die elektrische Niveaudifferenz oder „Poldifferenz“ ist bei einem solchen Element außerordentlich klein, dafür genügt aber eine momentane Berührung der Poldrähte mit den Platten eines großen Kondensators, um sie auf dieselbe Niveaudifferenz zu bringen, welche die Pole haben. Wenn Sie sich jetzt dessen erinnern, wie langsam das Laden eines Kondensators mit Hülfe eines Glasstabes oder auch der Elektrisiermaschine geschah (I. Bd. S. 82 u. 89), so wird Ihnen einleuchten, daß wir es hier mit einer Elek-

tricitätsquelle von geringem Elektrisierungsgrade, aber, im Vergleich zu den elektrostatischen Elektrizitätsquellen, bedeutenden Elektrizitätsmenge zu thun haben, wie Ihnen später klar werden wird. — Bildlich gesprochen, gleicht der durch die Influenzmaschine erzeugte elektrische Strom vielen, dicht hintereinander folgenden Wassertropfen, die beim Stauen mit grosser Gewalt, also bedeutender Geschwindigkeit (wie durch eine Spritze) fortgeschleudert werden, während bei unseren Elementen der elektrische Strom in einem die Pole verbindenden Draht einer grossen Wassermenge entspricht, welche mit fast unmerklichem Gefälle dahingleitet. Der Strahl einer starken Dampfspritze ist imstande, eine Ziegelmauer zu zerbröckeln, würde aber — des auf eine verhältnismässig kleine Fläche wirkenden Druckes wegen — nicht geeignet sein, ein Mühlrad treiben. — Wir werden demnach erwarten dürfen, dass unsere „Elemente“ unter Umständen viel grössere dynamische Wirkungen zeigen werden als die Influenzmaschine; dass dieses thatsächlich der Fall ist, werden Sie bald sehen.

Wir haben das vorige Mal erkannt, dass die elektrische Niveaudifferenz (Poldifferenz) an den freien Polen einer Elektrizitätsquelle einen Massstab abgibt für die Grösse der elektromotorischen Kraft des Apparates. Nun haben wir — mit Hilfe desselben Kondensators, der zur Herstellung der Aichungsskala benutzt wurde — für unser Volta'sches Elementchen Kupfer/Zink eine Poldifferenz von 1,7 Skalengrad gefunden. Nachdem einige Minuten verflossen, wiederhole ich den Versuch und erhalte nur 1,3. Nun verbinde ich in der oben (B, Fig. 10) angegebenen Weise die Poldrähte miteinander, sodass ein geschlossener Stromkreis (Kupfer — Draht — Zink — verdünnte Schwefelsäure — Kupfer) entsteht, und messe nach einigen Minuten — der Ausschlag beträgt kaum 0,5. Schliesse ich nochmals die Stromleitung (auf etwa 10 Min.), so ist die Poldifferenz nur noch 0,3; d. h. die elektromotorische Kraft unseres Volta'schen Elements hat sehr rasch abgenommen, die Wirkung des Elements ist nicht konstant. Wie entsteht der elektrische Strom überhaupt und warum nimmt seine Wirkung ab? Um diese Frage zu entscheiden, müssen wir versuchen, den inneren Vorgang im Ele-

ment zu erkennen oder wenigstens untersuchen, ob und welche Veränderungen mit den eintauchenden Teilen der beiden Metalle vor sich gehen!

Ein flaches Glasgefäß (G, Fig. 12), das aus einem Gummischlauch (g) und zwei Spiegelglasplatten besteht, die durch zwei Gummiringe (r) zusammengehalten werden, kann durch eine Pipette mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt werden. Zwei verlötete Stücke aus Kupfer- und Zinkdraht putze ich mit Schmirgelpapier blank, biege sie in der Mitte zusammen, daß die Schenkel parallel stehen und stecke diese durch einen passenden Kork, den ich auf den Rand des Gefäßes setze (Cu, Zn, Fig. 12). Die ganze Vorrichtung bringe ich statt des Elektrometers auf ein Projektionstischchen (T, Fig. 13 a. d. f. S.). Sobald

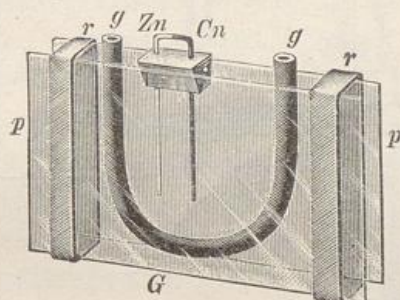


Fig. 12.

Projektions-Elementchen. $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse.

ich die verdünnte Säure in das flache Gefäß (a) giefse, sehen Sie auf dem Projektionsschirm (S, Fig. 13) eine heftige Bewegung der Flüssigkeit eintreten und am Kupferdraht sich Blasen bilden, welche ihn bald dicht umhüllen und dann herabsinken; — das ist jedoch nur scheinbar, weil das projicierte Bild ein umgekehrtes ist — in Wirklichkeit steigen die Blasen in die Höhe, wie Sie sich beim Nähertreten überzeugen können. Nach einiger Zeit hebe ich die Drähte heraus und spüle sie mit Wasser ab — der Kupferdraht erscheint unverändert, der Zinkdraht dagegen sieht wie zerfressen aus und ist stellenweise schwärzlich geworden. Letzteres ist eine Folge von metallischen Beimengungen, welche das käufliche Zink meist hat. Ich amal'gamiere das Zink, d. h. ich tauche es in Schwefelsäure, bringe darauf einen Tropfen Quecksilber, den ich verreib, sodaß die Zinkfläche (soweit sie eintauchen soll)

wie versilbert erscheint. Nun wiederhole ich den Versuch. Der Erfolg ist derselbe, doch bleibt der Zinkstab jetzt blank; dennoch würden wir bei längerer Einwirkung bemerken, daß der Zinkstab merklich an Dicke abnimmt — er wird verbraucht. Was ist hier geschehen?

Die chemischen Untersuchungen haben nun ergeben, daß die am Kupferstäbchen aufsteigenden und es schließlich fast ganz einhüllenden Bläschen aus Wasserstoff bestehen, während die Flüssigkeit jetzt aufgelöstes Zinkvitriol (schwefel-

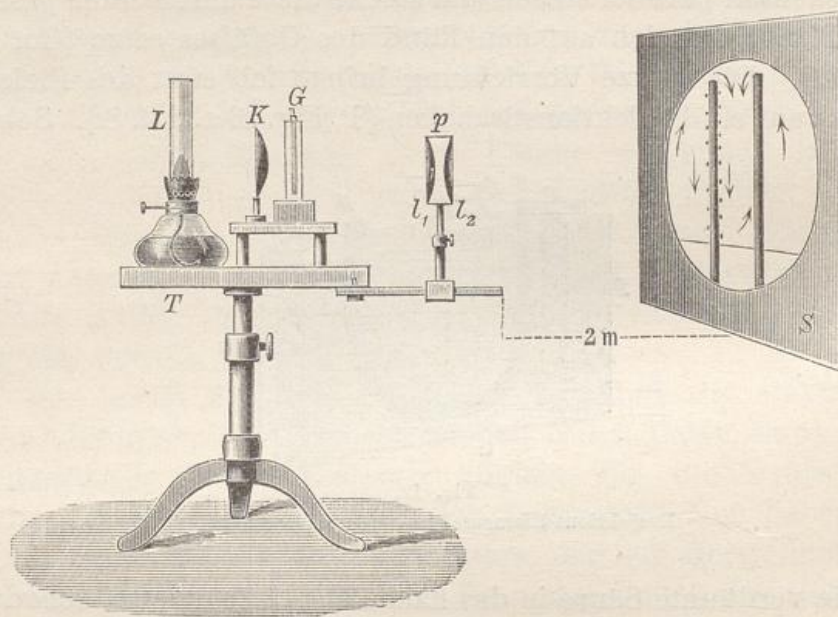


Fig. 13.

Projektion eines Volta'schen Elements. $\frac{1}{13}$ (der Skala $\frac{1}{20}$) natürl. Größe.
[Die beiden Blendschirme (bei L und p) sind fortgelassen].

saures Zink, ZnSO_4) enthält. Durch die Hülle von Wasserstoffbläschen mußte das Kupferstäbchen allmählich von der Flüssigkeit isoliert werden. Hierdurch wird aus dem Kupferstabe, der isolierenden Schicht und der Flüssigkeit gewissermaßen ein Kondensator gebildet, wodurch sich denn die Schwächung der Elektrizitätserregung erklärt.

Woher stammt aber nun der elektrische Strom des Elements?

Chemische
Theorie des
elektrischen
Stromes.

In unserem Falle wurde Zink verbraucht (oder, wie der Chemiker sagt, oxydiert, d. h. mit Sauerstoff [Oxygen] verbunden). Ebenso zeigten Versuche, die man mit den ver-

schiedensten Kombinationen je zweier Metalle bei verschiedenen Flüssigkeiten anstellte, daß ein elektrischer Strom nur dann auftritt, wenn zwischen dem einen Metall und der Flüssigkeit eine chemische Wechselwirkung stattfindet, und zwar zeigt immer dasjenige Metall an seinem hervorragenden Ende — E, welches von der Säure stärker angegriffen wird. Da sich außerdem zeigte, daß die erzeugte Elektrizitätsmenge umso größer ist, je mehr von dem chemisch angegriffenen Metall, als welches meist Zink verwandt wird, verbraucht wird, so können wir annehmen, daß die chemische Wirkung der Flüssigkeit auf die betreffenden Metalle (oder umgekehrt) die Ursache der Elektrizitätserregung ist; und zwar ist die durch die Auflösung des Zinkes verbrauchte chemische Energie die Ursache der elektromotorischen Kraft oder, richtiger gesagt, der elektrischen Energie. Diese Anschauung, der wir uns anschließen wollen, nennt man die *chemische Theorie* des elektrischen Stromes. (De la Rive und Faraday 1836.)

Als Ludwig Galvani, Professor in Bologna (1789), eine bereits früher von Coldani (1756) veröffentlichte Beobachtung: daß frisch getötete Frösche in Zuckungen geraten, wenn in der Nähe eine Elektrysiermaschine entladen wird, durch eine zufällige Beobachtung bestätigt fand (oder von neuem entdeckte?), suchte er diese Erscheinung weiter zu verfolgen. Zu diesem Behuf hängte er präparierte Froschschenkel an einem Kupferdraht nahe bei dem eisernen Geländer seines Balkons auf. Sobald nun die vom Winde bewegten Froschschenkel das Geländer berührten, zuckten sie zusammen. Jetzt glaubte Galvani das Vorhandensein einer tierischen Elektrizität gefunden zu haben, die als „Flüssigkeit“ von den Nerven zu den Muskeln geht. Dies erwies sich aber als ein Irrtum!

Geschichtliches:
Galvani.

Wie Sie sich nach dem Gesehenen schon selbst denken können, spielte hier die Verbindung zweier verschiedener Metalle durch die feuchte Muskelmasse des Frosches die Hauptrolle. Das Verdienst, dieses richtig erkannt zu haben, gebührt Volta, Professor zu Pavia (1793), dem Erfinder des Kondensators. Er fand, daß die einfache Berührung zweier verschiedener Metalle schon genüge, um beide Metalle mit entgegengesetzter Elektrizität zu laden. Hiernach ist die

Volta's
Kontakttheorie.

Berührung (der „Kontakt“) zweier verschiedener Metalle unter sich die eigentliche Ursache der elektromotorischen Kraft, und die Flüssigkeitsschicht der Elemente kommt erst in zweiter Linie in betracht. Diese „Kontakttheorie“ trug nach heftigem Streit, bei welchem viele Frösche das Leben lassen mußten, den Sieg über Galvani's Theorie davon und hat noch jetzt (wenn auch in veränderter Form) viele Anhänger. Da jedoch Beobachtungen neuerer Zeit (Exner, Ostwald u. A.) ergaben, daß bei der scheinbar direkten Berührung zweier verschiedener Metallplatten (Volta's „Fundamentalversuch“; vergl. Anh. 2) eine mikroskopische Feuchtigkeitsschicht oder eine Schicht von verdichteten Gasen bei dem Zustandekommen der elektrischen Niveaudifferenz der Metalle eine wesentliche Rolle spielt, und daß die Natur der die Platten (vor der Berührung) umgebenden Gase nicht nur von Einfluß auf die Größe, sondern auch auf das Vorzeichen der Ladung beider Metallplatten ist, so wollen wir uns an die chemische Theorie halten und nicht näher auf die Kontakttheorie eingehen. Wir können das um so eher thun, als die chemische Theorie einfacher, und die Wahl der Theorie für das Verständnis des Folgenden ohne Belang ist.

Die mit Hülfe der Elemente erzeugte dynamische Elektricität erhielt Galvani zu Ehren den Namen „*Galvanismus*“ oder „*galvanische Elektricität*“ (doch hätte sie besser Volta'sche Elektricität heißen sollen, wie manche Gelehrte sie auch nennen). Ehe die chemische Theorie aufkam bezeichnete man sie als „Kontaktelektricität“. Dieser Ausdruck findet sich auch jetzt noch häufig.

Wir haben unsere einfachen Zink/Kupfer-Elementchen Volta'sche Elemente genannt und wollen diese Bezeichnung beibehalten, im Gegensatz zu den in der Technik gebräuchlichen (konstanten) „galvanischen Elementen“, welche Sie nun kennen lernen werden.

* * *

Kehren wir jetzt zu unseren Versuchen zurück.

Wir beobachteten die störende Wirkung des Wasserstoffs beim Kupfer. Sollte die Bildung oder wenigstens die Ansammlung dieses Gases nicht verhindert werden können?

Allerdings, und zwar giebt uns die Chemie die nötigen Mittel an die Hand. Das Kupfervitriol (schwefelsaures Kupfer, Cu SO_4) löst sich leicht im Wasser. Tauchen wir den Kupferstab in eine Lösung von Kupfervitriol, die wir durch irgend eine poröse Scheidewand von der verdünnten Schwefelsäure trennen, in welcher der Zinkstab sich befindet, so treten keine Wasserstoffblasen auf; dagegen wird Kupfer aus der Lösung gefällt und schlägt sich an der Kupferplatte nieder. [Hierauf kommen wir noch zurück.] A, Fig. 14, zeigt Ihnen ein solches Element nach Daniell (1836), wo ein poröser Thoncylinder T beide Flüssigkeiten trennt. Dieses Element ist sehr kon-

Daniell'sches
Element.

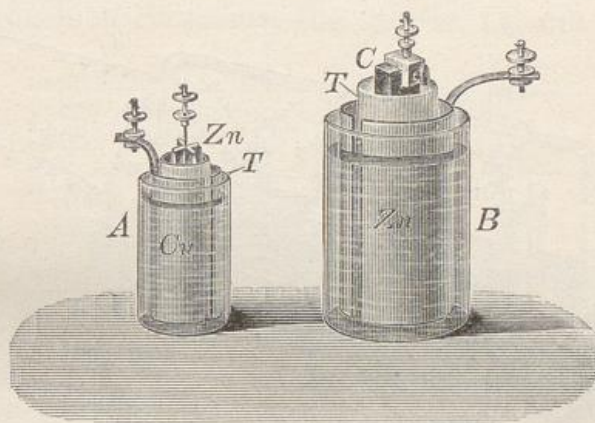


Fig. 14.

A Daniell'sches Element [Zink (Zn) in 10% Schwefelsäure (oder in Lösung von Zinkvitriol); Kupfer (Cu) in gesättigter Lösung von Kupfervitriol]. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse. B Bunsen'sches Chromsäure-Element. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse. Kohle (C) in Lösung von doppelt chromsaurem Natrium; Zink (Zn) in verdünnter Schwefelsäure.

stant, besonders wenn das Zink amalgamiert worden (s. o.) und (statt in verdünnte Schwefelsäure) in eine Lösung von Zinkvitriol in Wasser zu stehen kommt.

Noch wirksamer ist das in seiner äußeren Form ähnliche konstante Bunsen'sche Chromsäure-Element (B, Fig. 14), wo statt des Kupfers eine Platte aus harter Retortenkohle verwandt wird, welche in einer Lösung von doppelt chromsaurem Natrium zu stehen kommt, während das amalgamierte Zink in verdünnte Schwefelsäure taucht. (Meist hat der hier aufsen befindliche Zinkeylinder [Zn] einen angelöteten Kupferstreifen, an welchem die Klemmschraube für den Leitungsdraht befestigt ist.) Da der Chromsäure auch Schwefelsäure zugesetzt wird (vergl. Anh. 3), so genügt es auch, die beiden Platten (Zn

Chromsäure-
Element.

und C) in eine solche Lösung zu tauchen, um eine Zeitlang die Wirkung des Elements einigermaßen konstant zu erhalten. Hierdurch sind wir in den Stand gesetzt, sehr handliche Tauchelemente herzustellen, deren wir uns späterhin oft bedienen werden (s. w. u. Fig. 41).

Hier stelle ich eine kleine Tauchbatterie (Fig. 15) hin, deren einzelne Elemente dem besprochenen (Fig. 10, S. 23) gleichen, nur ist das Kupfer hier durch einen Kohlenstab⁵⁾ ersetzt. Ein Brettchen (B) ist mit passenden Löchern versehen, in welche dickwandige Reagenzgläser gesteckt sind. Zwei Messingstäbe (S_1 , S_2) haben Ableitungsdrähte (d_1 , d_2) und sind mit je

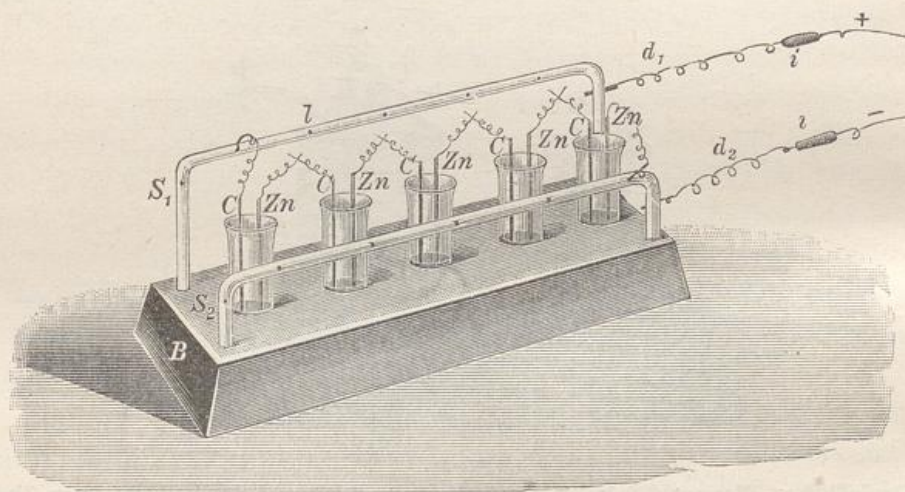


Fig. 15.

Einfache, kleine Tauchbatterie. $\frac{1}{3}$ natürl. Gröfse.

6 Löchern (l) versehen, in welche die Ableitungsdrähte und die Poldrähte der einzelnen Elemente hineingesteckt werden können.

Genügende
Isolierfähigkeit
des Holzes für
galvanische
Ströme.

Wie Sie sehen, sind hier die Messingständer nur durch eine Holzschicht von einander getrennt, dennoch genügt das hier völlig, um sie von einander zu isolieren — d. h. für die galvanischen Ströme! Bei Anwendung sehr hochgradiger Elektrizitätsquellen, wie z. B. der Influenzmaschine und der uns

⁵⁾ Bei den Kohlenstäben ist das obere Ende etwa 8 mm breit (galvanisch) verkupfert worden, worauf — nach völligem Trocknen — das Anlöten der Drähte sehr leicht ist. Vorteilhaft ist hier, wie bei Drähten, die Anwendung von reinem Zinn, obgleich das Löten damit etwas schwerer ist. Die (abgespülte) Lötstelle bleibt nämlich blank.

erst viel später begegnenden Induktionsströme, wäre die Isolierfähigkeit des Holzes bei weitem nicht genügend, da der Druck, mit dem die Elektrizität abzufließen sucht, mit dem Elektrisierungsgrade wächst.

Wie bei dem Volta'schen Becher sind die Poldrähte des Zinkes mit grüner, die anderen mit roter Seide umspinnen; ebenso sind die Ableitungsdrähte (d_1 , d_2 , Fig. 15) und deren isolierende Siegellackgriffe (i_1 , i_2) rot und grün, sodafs Sie von Ihren Plätzen aus genau verfolgen können, in welcher Weise ich die Elemente unter einander verbinde.

Zuerst wollen wir die Poldifferenz oder elektromotorische Kraft der einzelnen Elemente, die (s. Fig. 14) mit Nummern 1,

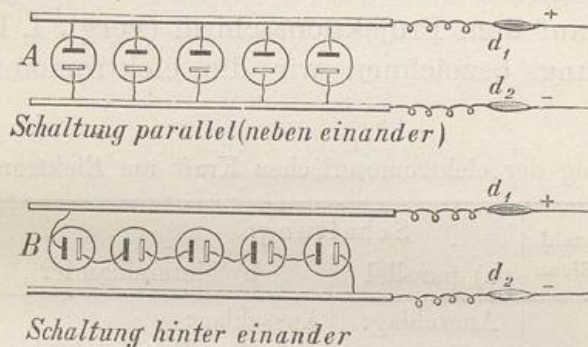


Fig. 16.

Verschiedene Schaltung galvanischer Elemente einer Batterie.

2 ... 5 versehen sind, am Aluminium-Elektrometer bestimmen; wir erhalten 1,95; 1,93; 1,95; 1,96; 1,94; d. h. diese frisch zusammengesetzten, aus ganz gleichem Material bestehenden Elementchen zeigen eine — bis auf die unvermeidlichen Ablesungsfehler — genau gleiche elektromotorische Kraft.

Jetzt tritt die Frage an uns heran: Wird die elektromotorische Kraft sich ändern, wenn wir die Elemente zu zweien, dreien u. s. w. kombinieren?

Wie sollen wir sie aber nun zusammenstellen? Hierbei können wir zwei verschiedene Wege einschlagen. Wir können nämlich entweder alle Kohlenstäbe unter einander und alle Zinkstäbe unter einander verbinden (A, Fig. 16); oder wir verbinden den Zinkstab des ersten Elements mit dem Kohlenstab des zweiten, dessen Zinkstab mit der Kohle des dritten u. s. w. (B, Fig. 16). — Die erste Art der Kombination oder „Schaltung“

Schaltung
parallel und
hintereinander.

heißt die Schaltung parallel oder nebeneinander, weil sie gleichlaufen den Wasserkanälen entspricht, die gemeinschaftlich ausmünden. Die andere Schaltung, bei welcher der elektrische Strom (der im Leitungsdraht von der Kohle zum Zink fließt) die einzelnen Elemente nacheinander passieren muß (in den Elementen selbst also vom Zink durch die Flüssigkeit zur Kohle), nennt man die Schaltung hintereinander (oder successive). Eine solche Gruppe von verbundenen Elementen heißt Batterie oder Kette.

Wir wollen nun unsere Elemente zuerst parallel und dann hintereinander schalten und die Wirkung am Elektrometer verfolgen. Dabei können wir, der besseren Übersicht wegen, die Resultate gleich tabellarisch ordnen. Den Ausschlag sehen Sie deutlich auf dem Projektionsschirm (vergl. I. Bd., Fig. 15). Zur Abkürzung bezeichnen wir die elektromotorische Kraft mit E.

Messung der elektromotorischen Kraft am Elektrometer:

Anzahl d. Elem.	Schaltung:	
	a) parallel	b) hintereinander
	Ausschlag:	Ausschlag:
1	1,95	1,95; $E_1 = 1$ gesetzt
2	1,95	3,91; $E_2 = 2$ (genau)
3	1,94	5,85; $E_3 = 3$ (genau)
4	1,95	7,75; $E_4 = 4$ (nahezu)
5	1,94	9,75; $E_5 = 5$ (genau)

Hieraus sehen wir, daß die elektromotorische Kraft bei paralleler Schaltung unverändert bleibt, dagegen bei der Schaltung hintereinander mit der Anzahl der Elemente zunimmt, und zwar ihr proportional.

Wir haben hier ganz gleiche Elemente benutzt. Vielleicht tritt ein Unterschied auf, wenn wir Elemente verschiedener Art kombinieren.

Ein einfaches Daniell'sches Elementchen zeigt Fig. 17. Die U-förmige Glasröhre ist in einen Holzklotz eingelassen und an der Biegung mit Glaswolle (G W) verstopft, sodaß die Flüssigkeiten langsam durchsickern können, aber sich bei ruhigem Stehen nicht vermischen. In den einen Schenkel

gieße ich eine Lösung von Kupfervitriol, in den anderen von Zinkvitriol und setze die Kupfer- und Zinkstäbe, die durch Korken geführt sind, ein. Die Poldrähte haben Siegellackgriffe (i). Ein ebensolches Gefäß dient uns als Chromsäureelement nach Bunsen (s. o.).

Am Elektrometer erhalten wir als Maß der elektromotorischen Kraft:

$$1 \text{ Daniell} = 1,10; 1 \text{ Chromsäureelement} = 1,95;$$

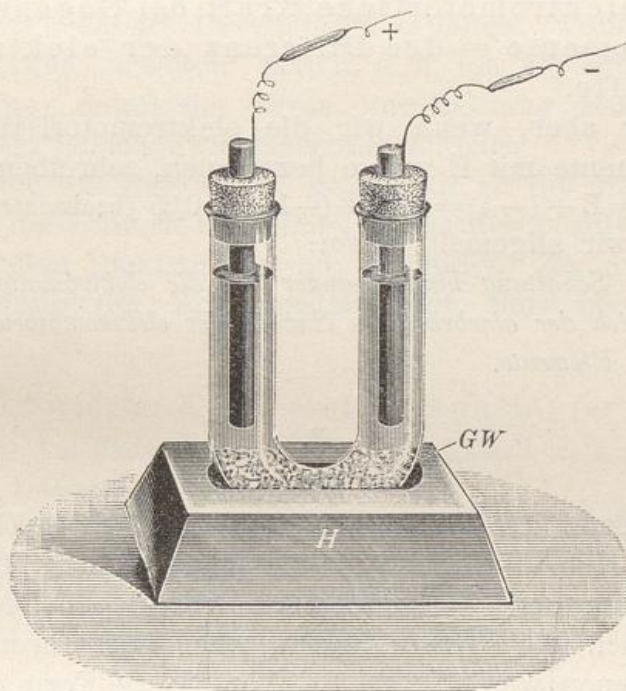


Fig. 17.

Kleines konstantes Element. $\frac{3}{4}$ natürl. Größe.

beide parallel geschaltet geben 1,8; hintereinander 3,04 ($= 1,1 + 1,95$).

Bei paralleler Schaltung ist die elektromotorische Kraft ungleicher Elemente kaum so groß, wie die des stärkeren, dagegen bei der Schaltung hintereinander gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte der einzelnen Elemente.

Was mag aber geschehen, wenn ich ein Element dem anderen entgegen schalte, so daß der Strom des einen Elements dem des anderen entgegen fließt? (Bei dieser Versuchsanordnung sind sehr konstante Elemente erforderlich, wes-

halb ich die früher benutzten Tauchelementen nicht verwenden kann.) Ich verbinde den Zinkstab des Daniell'schen Elementes mit dem Zinkstabe des (U-förmigen) Chromsäure-Elementes und halte den Poldraht der Kohle an die Elektrometerplatte, den des Kupfers an die obere (des Kondensators). — Nach dem Abheben der oberen Kondensatorplatte zeigt das Elektrometer nur 0,84 und zwar + E, wie der elektrisierte Flintglasstab erweist. Nun ist aber $0,84 = 1,95 - 1,10$; d. h. die elektromotorische Kraft bei Gegenschaltung zweier Elemente = der Differenz der elektromotorischen Kräfte.

Da wir aber, wenn wir die elektromotorischen Kräfte beider Elemente mit E und e bezeichnen, schreiben können

$E - e = E + (-e) = 1,95 + (-1,1) = 0,85$ (beobachtet 0,84),
so können wir allgemein sagen:

Bei der Schaltung hintereinander ist die elektromotorische Kraft der Kette gleich der algebraischen Summe der elektromotorischen Kräfte der einzelnen Elemente.

* * *

Die Anzahl der verschiedenen galvanischen Elemente ist sehr groß. Ich bin nicht in der Lage, Ihnen Muster aller, oder auch nur der gebräuchlichsten vorzulegen, da wir uns ausschließlich der Daniell'schen oder der Chromsäure-Elemente bedienen werden. Da es aber auf die Form der Gefäße gar nicht ankommt, so will ich Ihnen, mit Hülfe unserer U-förmigen, mit einer Scheidewand aus Glaswolle versehenen Röhren, wenigstens kleine Modelle der wichtigsten Arten konstanter Elemente zusammenstellen, damit wir ihre elektromotorische Kraft mit dem Daniell'schen Element (Fig. 17) vergleichen können.

1. Leclanché's Element: Kohle in einem Gemisch von gepulvertem Braunstein und Koks, Zink (amalgamiert) in Salmiaklösung (die auch die Lücken des anderen Schenkels erfüllt). Dieses Element ist sehr konstant.
2. Grove's Element: Platin in konzentrierter Salpetersäure, amalgamiertes Zink in verdünnter Schwefelsäure. (Da dieses Element schädliche Dämpfe ent-

wickelt, so müssen dichtschiessende Gummipfropfen angewendet werden.)

3. Bunsen's Element: Harte Kohle statt Platin, sonst wie Grove's Element.
4. Latimer Clarke's Element (als „Normalelement“ oft gebraucht). Platin in Zinkvitriollösung, chemisch reines, nicht amalgamiertes Zink in einem steifen Brei aus Quecksilbersulphat. (Eine poröse Scheidewand ist nicht erforderlich.)

Um vergleichbare Resultate zu erhalten, wollen wir alle Elemente etwas „arbeiten“ lassen, d. h. ich verbinde ihre Pole durch Drähte, damit der Strom eine Zeitlang hindurch geht und eine Art Gleichgewichtszustand eintritt.

Nachdem das geschehen, gehen wir an die Messung, wobei ich nur die Vorsicht beobachte, immer den positiven Poldraht direkt mit dem Elektrometer zu verbinden, da durch wechselnde Ladung der Kondensatorplatten Störungen eintreten können.

Elektromotorische Kraft einiger konstanter Elemente.

a) Am Elektrometer	b) Daniell = 1
1 Daniell 1,1	1
1 Grove 2,0	1,8 Daniell
1 Bunsen 1,95	1,8 Daniell
1 Clarke 1,5	1,36 Daniell
1 Leclanché 1,3	1,2 Daniell

Diese Zahlen mögen Ihnen als ein annähernder Maßstab zur Beurteilung der elektromotorischen Kraft dienen. Maßgebend für den Gebrauch ist entweder die Stärke der Wirkung oder die Bequemlichkeit der Handhabung und endlich — der Kostenpreis. In der Technik werden oft aus letzterem Grunde die Leclanché'schen Elemente bevorzugt.

* * *

So haben wir denn heute die Wirkungsweise der „offenen“ (d. h. nicht durch Leiter verbundenen) Pole der Elemente kennen gelernt und wollen das nächste Mal dem geschlossenen Stromkreise unsere Aufmerksamkeit widmen.

III. Vortrag.

Nachweis des Stromgefälles beim galvanischen Strome; Der Stromwender; Gegenseitige Anziehung und Abstößung 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 Elektrizitätsquelle kennen gelernt: wir sahen, daß unter gewissen Umständen Metalle durch Berührung mit Flüssigkeiten dauernd elektrisch werden können. Die hierbei auftretenden Elektrizitätsgrade sind jedoch so gering, daß wir das Aluminium-Elektrometer mit dem Kondensator verwenden mußten, um uns von dem Vorhandensein von freier Elektrizität 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 Elektrizitätserregung 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 Elektrizität 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

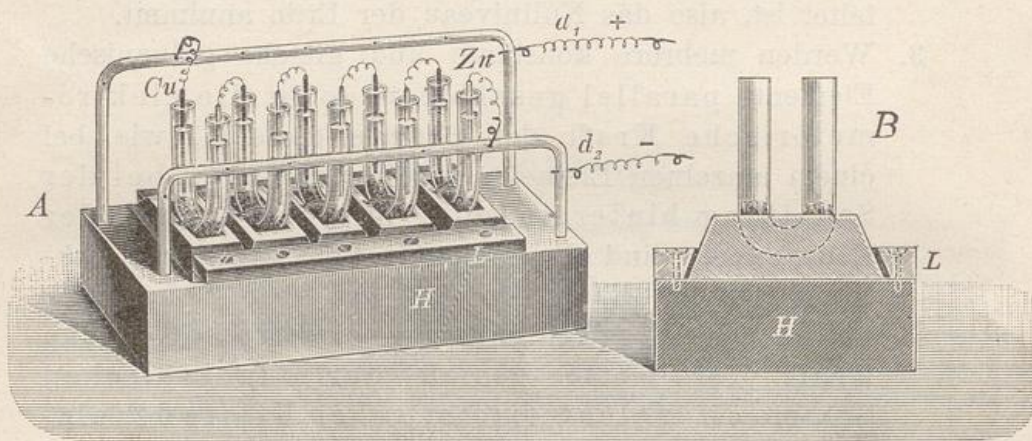


Fig. 18.

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

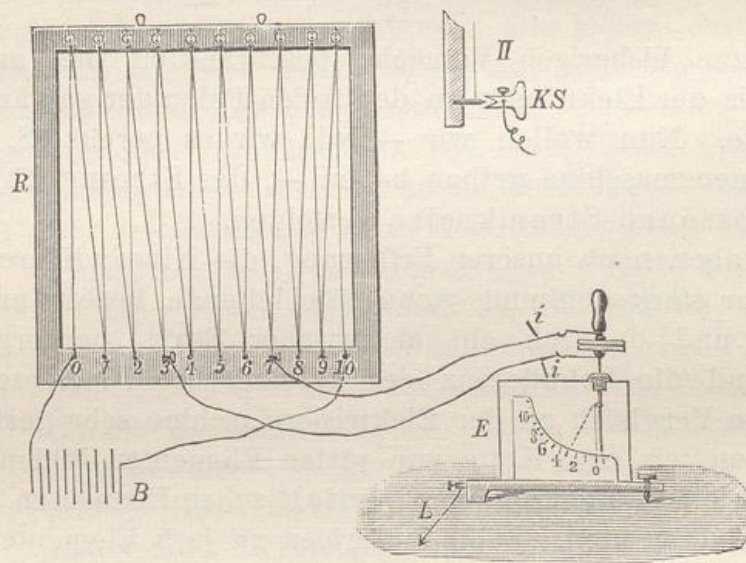


Fig. 19.

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 Elementen.

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 thatsächlich 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 Elektrizität 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

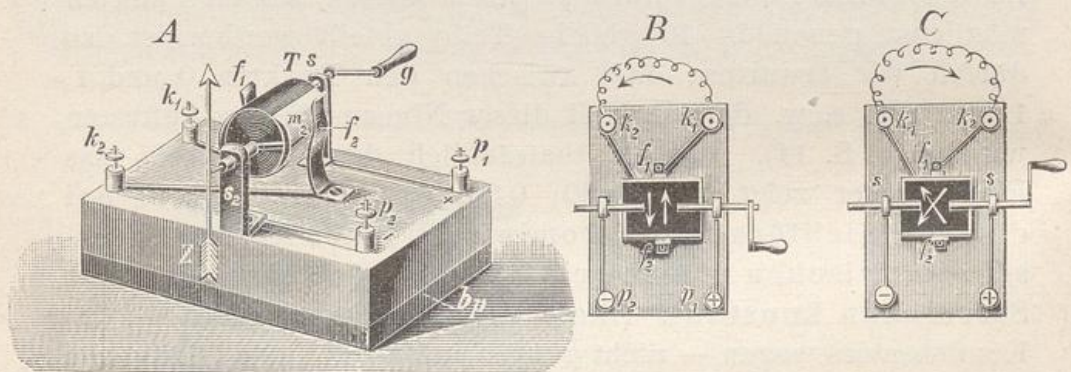


Fig. 20.

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

umzukehren, so wollen wir einen Hilfsapparat 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 Ebonitecylinder (T) ist durch zwei nicht durchgehende (also von einander isolierte) Achsen in zwei Messingständern ($s_1 s_2$) vermittelt 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 Poldrhten 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 verlngerte Achse des Cylinders hat eine

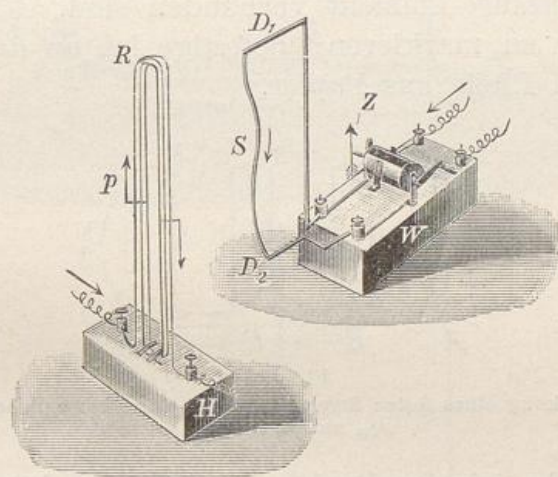


Fig. 21.

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

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 vernderte Stromrichtung im Leiterstück ($k_1 k_2$, bei A Fig. 20) an, was Sie mithin von Ihren Pltzen 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 Messingdrhte ($D_1 D_2$, Fig. 21), die am Stromwender angebracht sind, in der Weise, das er schlaff herabhngt⁶⁾. Verbinde ich

⁶⁾ Mit einer Laubsge ist in die Messingdrhte ($D_1 D_2$, Fig. 21) eine Spalte von etwa 1 cm Tiefe eingesgt, das 2—3fach zusammengelegte Ende des Stanniolfstreifens eingeschoben und die vorstehenden Drahtenden mit biegsamem Kupferdraht zusammengeschnrt.

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 wachsielter Baumwolle umspinnener Kupferdraht, den ich in 4—5 Windungen zu einem Rahmen (R, Fig. 21) zusammenbiege und auf einem Holzklötz (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.

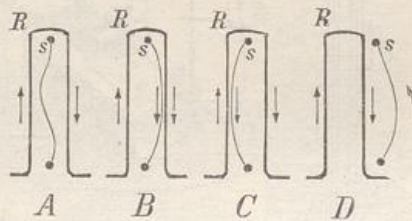


Fig. 22.

Wirkung eines festen Stromleiters auf einen beweglichen.
 $\frac{1}{18}$ natürl. Gröfse.

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 herabhing, 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 Abstofsung statt (D, Fig. 22), wir erhalten also die Regel:

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

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

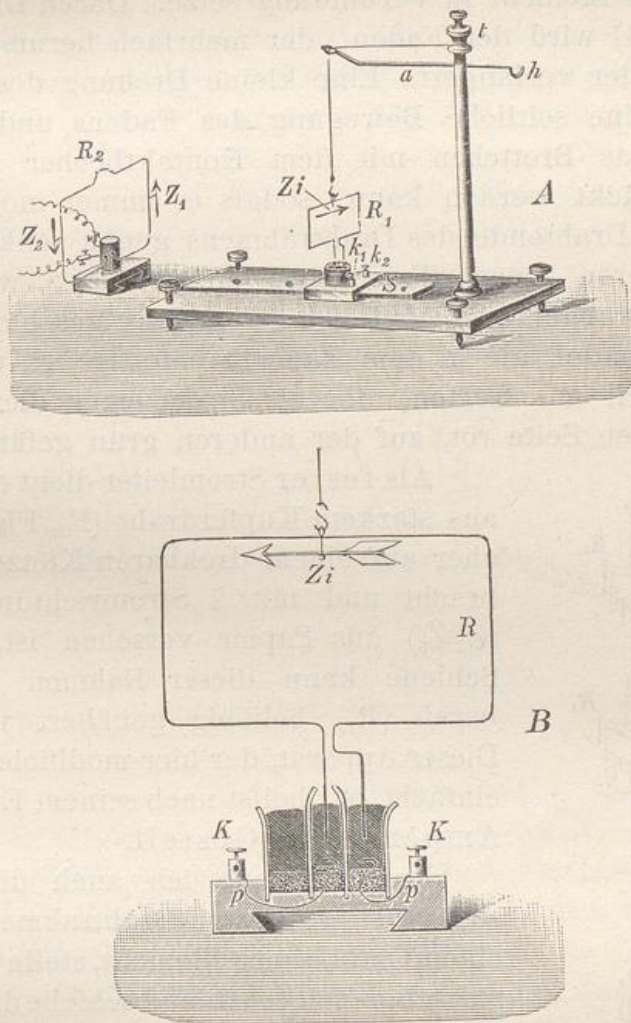


Fig. 23.

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 Quecksilbergefaße 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, sodaß 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.

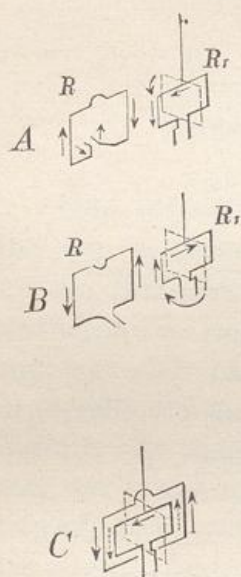


Fig. 24.

Richtkraft eines festen
Stromleiters auf einen
beweglichen.
 $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

Als fester Stromleiter dient ein Rahmen aus starkem Kupferdraht (R_2 , Fig. 23), welcher auf einem drehbaren Klötzchen 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

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

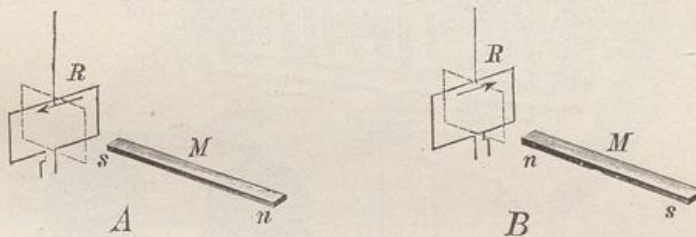


Fig. 25.

Wirkung eines Magnets auf einen beweglichen Stromleiter. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

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 näherte das Südende 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

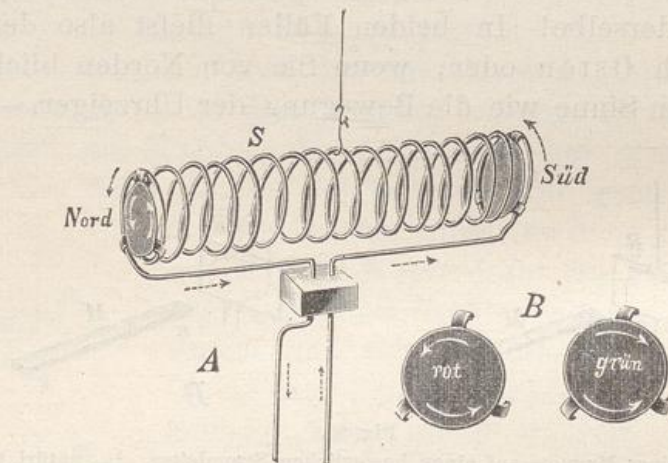


Fig. 26.

Das Solenoid mit markierter Stromrichtung. $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse.

(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 nähere 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 Magnetnadeln 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).

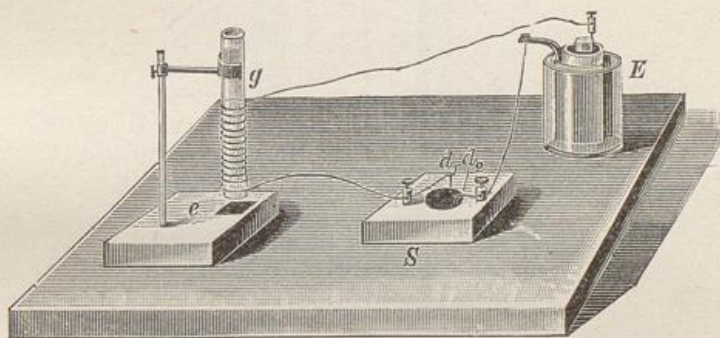


Fig. 27.

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 umspinnenen Kupferdrahtes (von etwa 1 mm Stärke) und verbinde die Enden mit einem Chrmsäure-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 schwebt 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 nähere 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 thatsächlich magnetische Eigenschaften, die aber spurlos verschwinden, wenn der Strom unterbrochen wird.

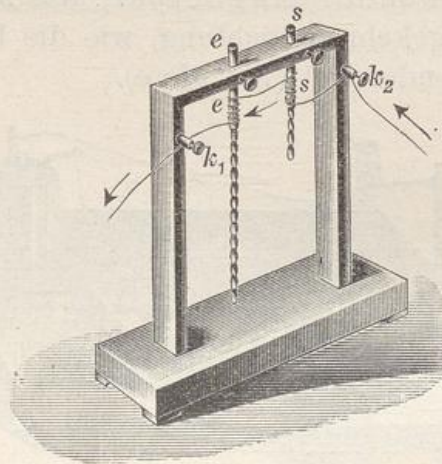


Fig. 28.

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

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

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 Gröfse stecke und durch Schrauben festklemme. Nun umwickele ich jeden Stab mit 15 Windungen umspinnenen 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)

Verschiedenes
Verhalten von
Eisen und
Stahl.

z

eine ganze Reihe von Eisenstücken zu tragen vermag, kann ich am Stahlstabe (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 Eisenstabe 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 Eisenstabe alle Stücke ab, während am Stahlstabe 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 bloß 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,

dafs 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 Elektrizitätsquelle hervorzubringen vermag und werden es begreiflich finden, dafs die Elektromagnete berufen sind, in der Technik eine wichtige Rolle zu spielen — doch davon später. Jetzt

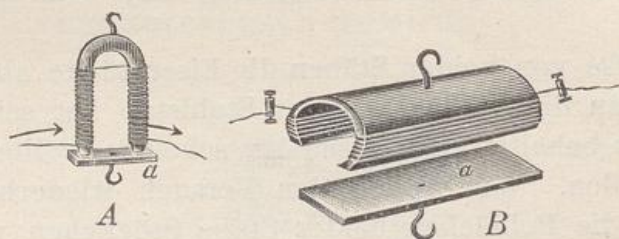


Fig. 29.

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

will ich nur noch erwähnen, dafs man mit Hülfe grofser 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, dafs 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? Dafs 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 Glasröhre (g, Fig. 30) und klemme vermittelst zweier Korken (k_1 u. k_2) einen starken umsponnenen Kupferdraht (h) so ein, dafs 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 Poldrähnen eines Elements so, dafs der (positive) Strom in der Richtung des Pfeiles die Draht-

schleife durchfließt. Nun fasse ich diesen Stromleiter und nähere ihn in vertikaler, aufwärts gerichteter Stellung des Pfeiles dem von Ihnen abgekehrten Südpole 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

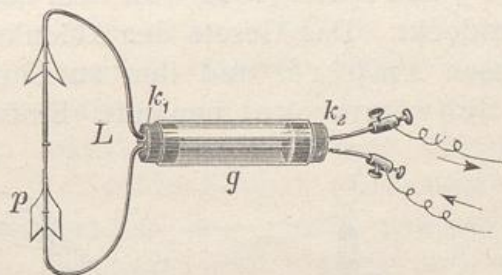


Fig. 30.

Stromleiter für Versuche über die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom. $\frac{1}{5}$ natürl. GröÙe

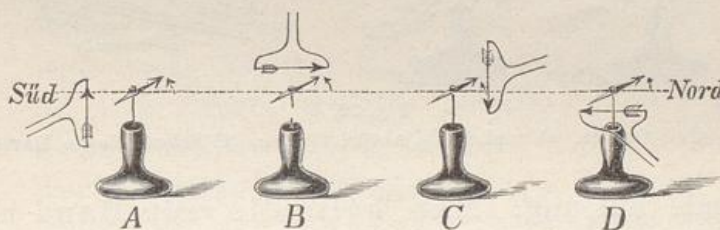


Fig. 31.

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, außerordentlich wichtige Erscheinung der Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom wurde zu Anfang unseres Jahrhunderts (vor 1804) von Romagnesi⁷⁾, 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

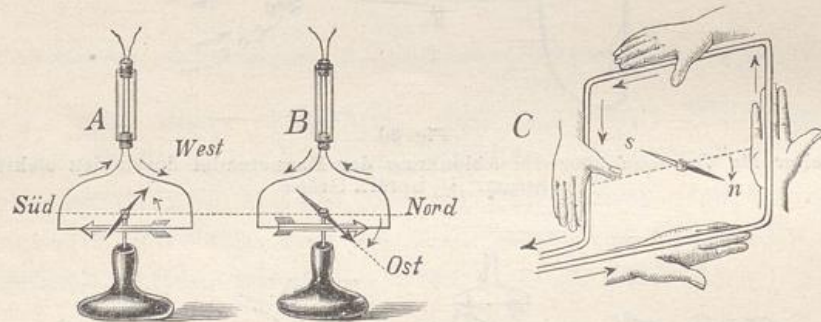


Fig. 32.

Ampère'sches Gesetz. A und B $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse. 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 Romagnesi 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 zugewandt ist 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 (Solenoiden) zeigen eine magnetische Richtung, 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) rührt davon her, daß die Eisenmoleküle beweglicher sind, als die Stahlmoleküle, weshalb letztere der Richtkraft einen größeren Widerstand entgegensetzen, aber in der einmal angenommenen Stellung verharren, während die Eisenmoleküle sich nach dem Aufhören der äußeren 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

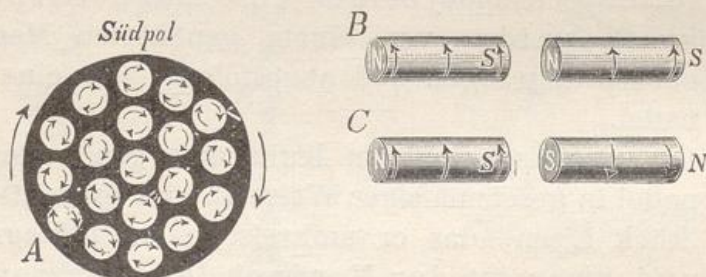


Fig. 33.

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 Hilfsmittel 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 Fernwirkung wahrnehmen können, das magnetische Feld des Magnets. Könnten wir nun, parallel zum Magnetstabe, einen sehr biegsamen, fadenförmigen

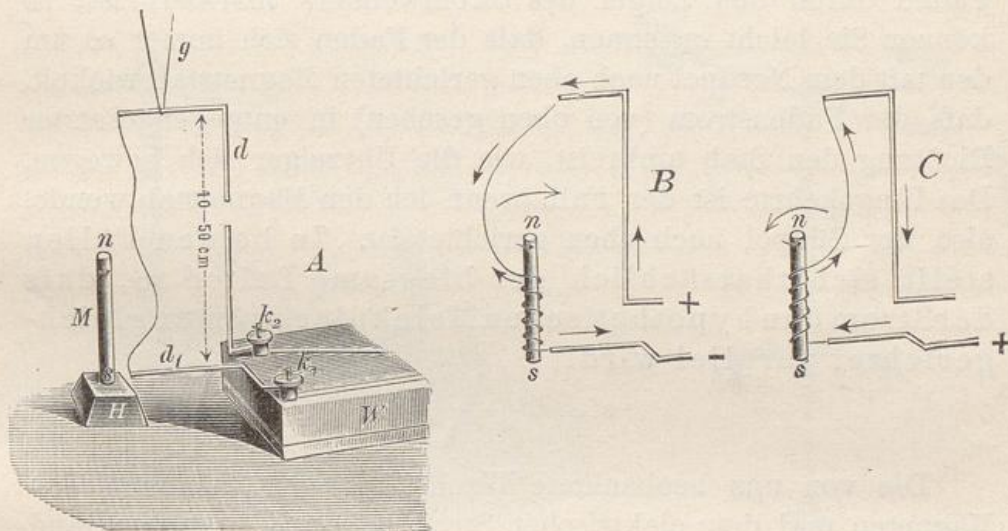


Fig. 34.

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

Stromleiter schlaff herabhängend anbringen, so müfste dieser Leiter das Bestreben zeigen, eine solche Lage anzunehmen, dafs der ihn durchfliefsende 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 Hilfsmittel, 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 Quecksilberkontaktbeckers setze ich ein leeres Glasröhrchen (g) mit verengerter, 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).

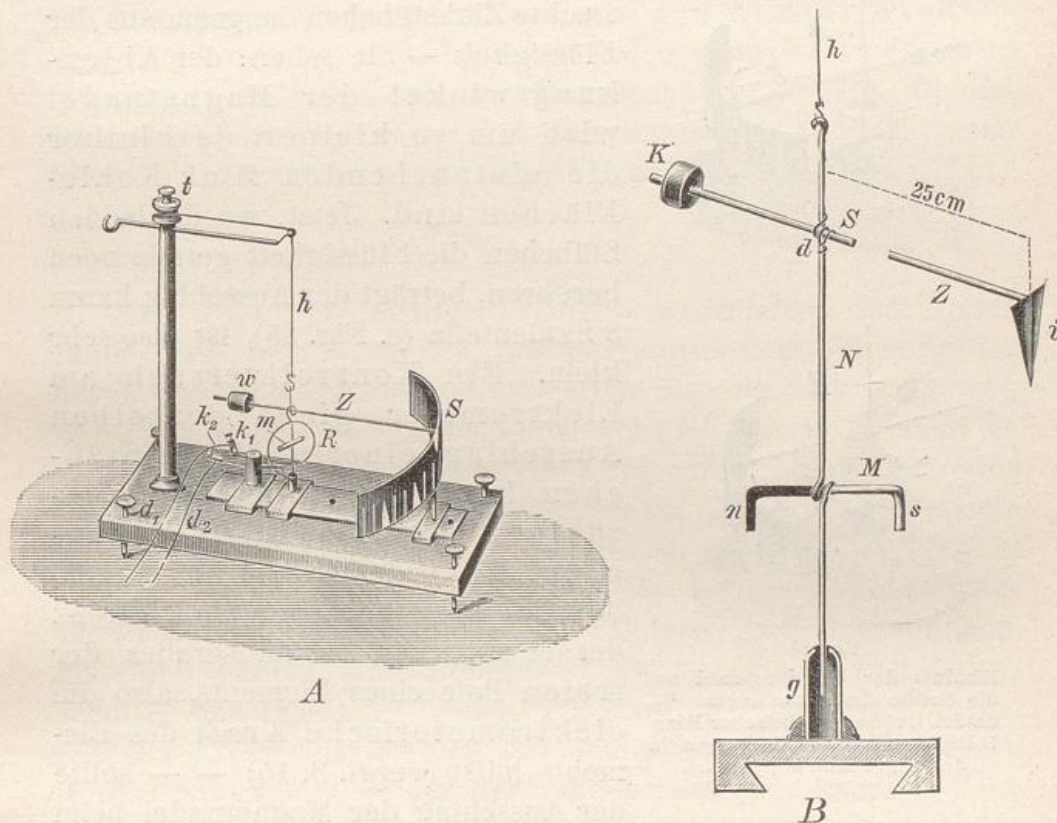


Fig. 35.

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 Poldrähnen des Elementchens die Klemmen (k_1 u. k_2 , Fig. 34) des Drahttringes, 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.

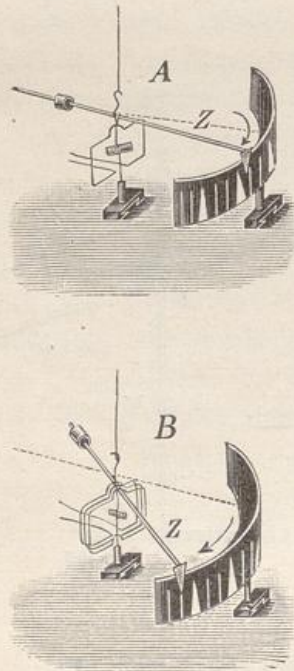


Fig. 36.

Einfluß der Windungszahl auf die Größe des Ausschlags. $\frac{1}{10}$ natürl. Größe. A einfacher Ring. B Rahmen mit 10 Windungen (in der Figur nur 3 sichtbar).

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

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 Hilfsmittel 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 umsponnenen 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“ (Schweiggen 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 entgegentrat.

IV. Vortrag.

Graduierung des Galvanoskops; Herstellung der Aichungsskala; das Galvanometer. — Wirkung der Schaltung hintereinander und parallel bei sehr kurzer und bei langer Drahtleitung, sowie bei Einschaltung einer Flüssigkeitssäule (Stromdämpfer); Begriff der Stromstärke; Vergleich der hydrodynamischen und der elektrodynamischen Erscheinungen; Äußerer und innerer Widerstand; Herleitung des Ohm'schen Gesetzes; Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetz. — Das spezifische Leitungsvermögen verschiedener Körper; prakt. Einheit des Widerstandes, das „Ohm“; Definition der prakt. Einheit der Stromstärke, das „Ampère“. — Bestimmung des inneren Widerstandes eines Elements oder einer Batterie; Stromstärke in Leiterverzweigungen; Messung großer Stromstärken.

Neulich lernten wir einige Wirkungen des geschlossenen galvanischen Stromes kennen, der kontinuierlich den Leitungsdraht durchströmt, und verglichen die Vorgänge im Stromleiter mit den früher beobachteten an den Leitungsschnüren der diskontinuierlich wirkenden Influenzmaschine. Weitere Versuche lehrten uns eine Reihe neuer dynamischer Wirkungen. Fassen wir das Gesehene kurz zusammen:

Rückblick.

1. Wird der Strom einer Batterie von konstanten (hintereinander geschalteten) Elementen durch einen sehr feinen und langen Draht geleitet, der möglichst gleichförmig ist, so ist das Stromgefälle im Leiter konstant, d. h. je 2, gleich weit abstehende Punkte des Stromleiters haben die gleiche elektrische Niveaudifferenz.
2. Gleichgerichtete elektrische Ströme ziehen sich an, entgegengesetzt gerichtete stoßen sich ab, daher haben bewegliche Stromleiter das Bestreben, sich gleichgerichtet parallel zu stellen. Ist der Strom genügend stark, so stellt sich ein beweglich aufgehängter kreis- oder lockenförmiger Stromleiter (Solenoid) — wenn nur der Erdmagnetismus auf ihn einwirkt — so ein, daß der (positive) Strom, von der Südseite aus gesehen, in der Richtung der Uhrzeiger fließt.
3. Ein von elektrischen Strömen umkreistes Stück Eisen wird, solange der Strom währt, ein starker Magnet

(Elektromagnet). Magnete und bewegliche Stromleiter üben auf einander eine solche Richtkraft aus, daß der elektrische Strom und die hypothetischen Ampère'schen Molekularströme sich gleichgerichtet parallel stellen. Die Molekularströme eines Magnets umkreisen diese — wenn man gerade auf den Südpol blickt — in dem Sinne der Uhrzeiger; demnach müssen die erdelektrischen Ströme von Ost nach West gerichtet sein.

Für die Ablenkung der Magnetnadel ergibt sich hieraus folgende (modifizierte) Regel nach Ampère: Halten wir die rechte Hand, mit der inneren Fläche der Magnetnadel zugekehrt, so an den ablenkenden Teil des Stromleiters, daß der (positive) Strom von der Handwurzel zu den Fingerspitzen fließt, so zeigt der ausgestreckte Daumen die Richtung des abgelenkten nordsuchenden Poles an.

Hieraus ergibt sich leicht die Regel für die Stromrichtung:

Legen wir die *rechte* Hand so an den ablenkenden Teil des Stromleiters, daß die innere Handfläche der Magnetnadel zugekehrt ist und der ausgestreckte Daumen die Richtung des abgelenkten *nordsuchenden* Poles markiert, so fließt der (positive) Strom von der Handwurzel zu den Fingerspitzen hin.

* * *

Unsere nächste Aufgabe ist nun, die Angaben des Galvanoskopes genauer zu untersuchen.

Als wir daran gingen, die Erscheinungen der statischen Elektrizität quantitativ zu vergleichen (I. Bd. S. 27), war unser erstes Bestreben, ein genügend empfindliches Elektroskop durch wiederholte Zuführung von gleichen Ladungen empirisch zu aichen, um dann aus den an der Aichungsskala abgelesenen Ausschlägen des Aluminiumblättchens auf die Stärke der Ladung (nach unseren willkürlichen Einheiten des Elektrisierungssgrades) schließen zu können. Auf diese Weise ging

aus dem Elektroskop ein für unsere Zwecke brauchbares Elektrometer hervor. Sollten wir nicht auch imstande sein, das Galvanoskop zu aichen (graduieren) um auf diese Weise ein „Galvanometer“ zu erhalten?

Da unser Ampère'sches Gestell nicht recht handlich ist, so wollen wir ein eigens für Demonstrationszwecke hergestelltes Galvanoskop (A, Fig. 37) benutzen, das einen in seinem Fußs-

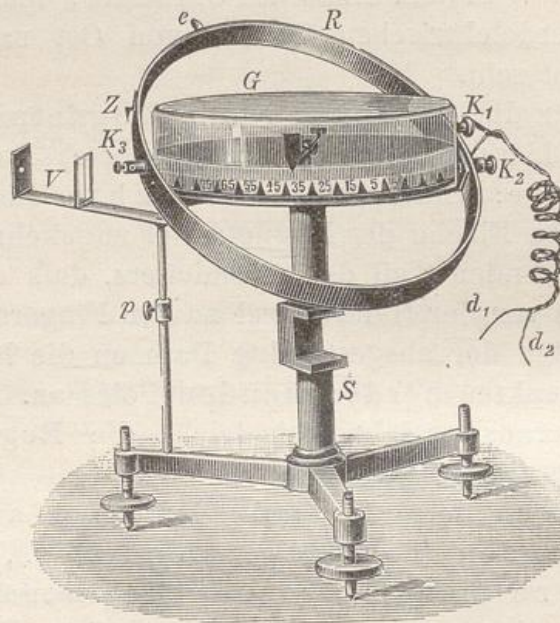


Fig. 37.

Demonstrations-Galvanometer (Sinus-Tangensbusssole). $\frac{1}{7}$ natürl. Gröfse.

gestell drehbaren Messingständer (S) hat, der die Busssole mit der kurzen, auf einer Stahlspitze ruhenden Magnetenadel (B, Fig. 40) trägt. Die Magnetenadel ist — rechtwinklig zu ihrer magnetischen Achse — mit zwei langen Aluminiumzeigern versehen, deren mit farbigem Papier beklebte Enden dicht vor einer Gradteilung spielen, welche auf dem vertikalen Mantel eines Ringes angebracht ist, also von Ihnen bequem von der Seite gesehen werden kann.

Als ablenkender Stromleiter dient ein starker Kupferring (R), der um die horizontale Achse drehbar ist. Die sich nicht berührenden Enden des Ringes sind mit Klemmschrauben versehen (k_1 und k_2). Das am Fußgestell befestigte Visier (V) wird zur genaueren Ablesung der Gradteilung benutzt und markiert zugleich eine etwaige Drehung des Ständers.

Um die Gradteilung weiterhin sichtbar zu machen, sind die Teilstriche bei 0° , 10° , 20° . . . durch Dreiecke markiert, welche bei 0° , 30° , 60° und 90° rot, bei den übrigen schwarz gefärbt sind (G, Fig. 40).

Jetzt wende ich die Bussole so, daß das feste Visier (V) genau auf 0^0 weist, drehe den ganzen Apparat samt dem Fußgestell langsam, bis auch beide Zeiger auf 0 eintreten⁸⁾, und richte den Kupferring (R) vertikal. Die Klemmschrauben ($K_1 K_2$) verbinde ich durch biegsame, umspinnene Leitungsdrähte mit dem Stromwender und diesen mit einem sehr konstanten Fleming'schen Element (Fig. 38). Bei diesem taucht chemisch reines Zink in eine Lösung von Zinkvitriol und Kupfer in

Normal-Daniell
nach
Fleeming.

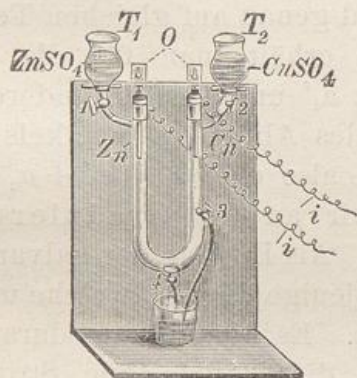


Fig. 38.

Fleeming'scher Normal-Daniell zum Graduieren des Galvanometers. $\frac{1}{5}$ natürl. Gröfse.

eine Lösung von Kupfervitriol, wobei durch Hähne (1 und 2) frische Lösung zufließt, während durch einen dritten Hahn (3) die verbrauchte Lösung abtröpfelt, wodurch eine außergewöhnliche Beständigkeit dieses Elements erzielt wird. [Der vierte Hahn (4) dient zum Entleeren des Apparats.]

Ich schliesse den Strom — der Ausschlag beträgt, nachdem die Nadel sich beruhigt hat, $12,5^0$. Nun neige ich langsam den Kupferring (R, Fig. 37) — der Ausschlag nimmt stetig ab und

8) Durch Sorgfalt des Mechanikers ist der Stahlstift, auf welchem die Magnetnadel schwebt, sehr genau im Teilkreise centriert, und ich habe die Stellung der Zeiger so reguliert, daß beide Zeigerenden kaum um $0,1^{\circ}$ (konstant) abweichen. Diese Differenz kann bei unseren Versuchen übersehen werden, daher brauchen wir späterhin für jede Stromrichtung nur 1 Ablesung zu machen.

wird endlich $= 0$, wenn ich den Ring genau horizontal stelle. Wir haben es also an der Hand, den Ablenkungswinkel der Nadel innerhalb der Grenzen 0° und $12,5^\circ$ beliebig groß zu machen. Wählen wir z. B. 10° — — so! Nun ist diese Ablenkung erreicht. Ich schraube den Ring in dieser Lage fest (vermittelt einer Vorrichtung an der Klemmschraube k_3 , Fig. 40) und wende den Strom. Die Zeiger drehen sich nach der anderen Seite und bleiben bei $9,6^\circ$ stehen⁹⁾. Offenbar liegt die Verbindungslinie beider Zeigerenden nicht genau senkrecht zur magnetischen Achse der Magnetnadel, doch thut das nichts; wir brauchen nur die Ablenkungen für beide Richtungen des Stromes zu notieren und das Mittel aus beiden Ablesungen zu nehmen. [Sollten die beiden Zeigerenden nicht genügend genau auf gleichen Teilstrichen der Gradskala einspielen, so erhält man für die eine Stromrichtung 2 Ablesungen a_1 und a_1' und für die andere a_2 und a_2' . Dann ist der wahre Wert des Ablenkungswinkels das Mittel aus den 4 Einzel-Ablesungen, also $\alpha = (a_1 + a_1' + a_2 + a_2') / 4$.]

Jetzt können wir an die Graduierung (Aichung) des Galvanoskops gehen. Als Einheit der galvanoskopischen Stromwirkung soll uns diejenige dienen, welche unser Fleeming'scher Normaldaniell liefert. Es kommt nun darauf an, den Versuch so anzustellen, daß die Nadel ohne Strom die gleiche Ablenkung erfährt, also bei einem neuen Stromdurchgang die galvanoskopische Wirkung sich zur vorhergehenden addiert, mithin verdoppelt, bei dreimaligem verdreifacht wird, u. s. w.

Ich stelle das Galvanoskop (G, Fig. 39) auf ein niedriges Tischchen der optischen Bank (a b), genau über den Nullpunkt der Millimeterskala. Nun gebe ich der optischen Bank die Richtung von Ost nach West, d. h. eine solche, daß die Aluminiumzeiger (z z Fig. 39, B) ihr parallel stehen, und drehe die Bussole so, daß die Zeiger und das feste Visier (v) genau auf 0° zeigen. Ich schliesse den Strom, der Ausschlag beträgt 10° . Jetzt unterbreche ich den Strom, lege zwei lange Stabmagnete ($m_1 m_2$) auf passende Ständer und nähere sie langsam, bis derselbe Ausschlag $a_1' = 10^\circ$ erzielt ist, darauf schliesse ich den

⁹⁾ Die Zuleitungsdrähte am Galvanometer (Fig. 37) sind umeinander gedreht, um einer etwaigen ablenkenden Wirkung derselben vorzubeugen.

Strom [in derselben Richtung, wie Sie an dem Zeiger des Stromwenders erkennen]. Der zweite Ausschlag $a_2' = 19,8^\circ$. In gleicher Weise erhalten wir $a_3' = 27,9$; $a_4' = 35,1$; $a_5' = 41,5$ u. s. w. Sie erkennen leicht, daß die Abstände zwischen den Aichungsgraden immer kleiner werden, d. h. die Ausschläge des Galvanoskops sind nicht proportional der ablenkenden Wirkung des Stromes — ebensowenig, wie es beim Elektrometer der Fall war.

Auf die angegebene Weise graduieren wir das Galvanoskop bis in die Nähe von 70° vom Nullpunkt, wo die Zunahme zu

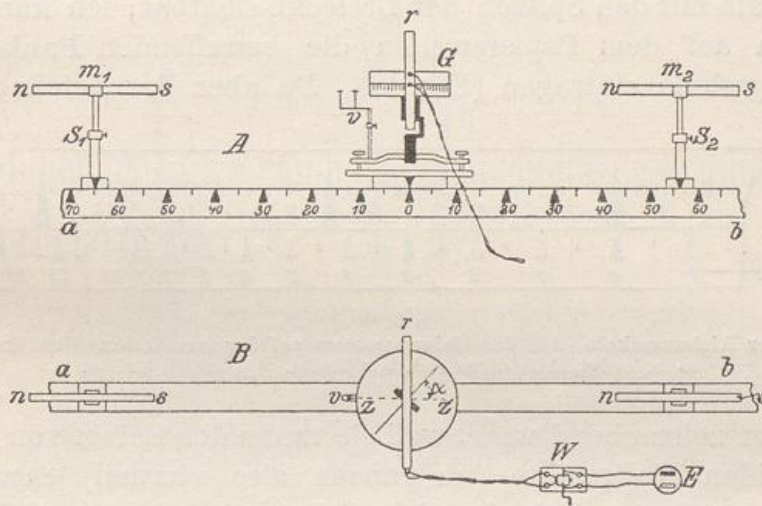


Fig. 39.

Graduierung eines Galvanoskops mit Hülfe zweier Magnete in der Ost-Westlage.
 $\frac{1}{20}$ natürl. Gröfse. A Seitenansicht; B Ansicht von oben.

gering ist, daher brechen wir ab. Nun wiederholen wir die ganze Messung bei umgekehrter Stromrichtung, wobei die Nadel nach der anderen Seite ausschlägt. Bezeichnen wir jetzt die Ausschläge mit a_1'' , a_2'' , a_3'' ..., so erhalten wir die wahre Ablenkung, wenn wir aus den entsprechenden Ausschlägen beider Stromrichtungen das Mittel nehmen, z. B. $a_1 = (a_1' + a_1'')/2$; $a_2 = (a_2' + a_2'')/2$ u. s. w. Wir haben nur noch nötig, die bei der Graduierung erhaltenen Skalenpunkte in geeigneter Weise zu markieren, um eine Aichungsskala zu erhalten, welche uns beim Galvanoskop dieselben Dienste leisten kann, wie die Skala des Elektrometers bei diesem. (Anh. 7.)

Bei einer früheren Versuchsreihe erhielt ich im Mittel aus mehreren Messungen:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	7,5	14,7	21,5	27,8	33,4	38,3	42,7	46,5	49,8	52,7	55,4	57,7	59,8	61,5	63,1	64,5	65,9	67,1	68,2	69,2

Aichungsskala
des
Galvanometers.

Um die Aichungsskala für unser Galvanoskop zu entwerfen, entferne ich zunächst den Glasdeckel der Bussole und die Nadel, hebe den Ring mit der Gradskala ab¹⁰⁾ und lege einen 12mm breiten Streifen Zeichenpapier straff gespannt herum. Da dieser Reif 30 mm hoch ist, so bleibt über dem Papierstreifen die ganze Gradskala mit den Spitzen der Dreiecke sichtbar; ich kann also bequem auf dem Papierstreifen die betreffenden Punkte der Aichungsskala eintragen (Fig. 40). Da aber das Zeichnen der

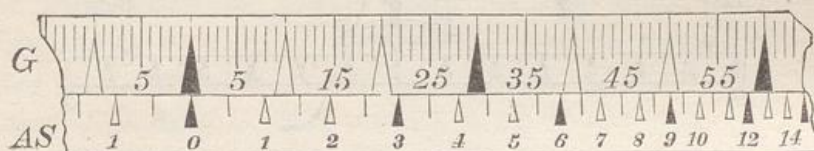


Fig. 40.

Stück der Aichungsskala (AS) des Galvanometers auf der (vertikalen) Gradskala (G) so befestigt, daß diese sichtbar bleibt. $\frac{1}{2}$ natürl. Größe.

Skala zu zeitraubend wäre, weil sie zu beiden Seiten von jedem der beiden Nullpunkte (im ganzen also viermal) entworfen werden muß, so befestige ich lieber eine fertige Aichungsskala, die ich schon früher auf Grund der erwähnten Messungen gezeichnet habe. Bevor ich aber die Enden des Papierstreifens mit etwas Klebwachs befestige, überzeuge ich mich davon, daß die Nullpunkte beider Skalen übereinstimmen.

Wir können nun nach Belieben die Grad- oder die Aichungsskala verwenden, wollen uns aber vorläufig nur der letzteren bedienen. Auf solche Weise ist unser Galvanoskop ein Meßinstrument geworden, das wir Galvanometer nennen wollen, wiewohl wir vor der Hand nur wissen, daß wir vermittelst desselben lediglich eine ablenkende Wirkung des galvanischen Stromes prüfen können.

¹⁰⁾ Durch eine Marke auf der inneren Seite des Ringes und an der Bussole kann der Ring leicht wieder in die richtige Stellung gebracht werden.

In welcher Beziehung steht nun diese Wirkung des Stromes zur Gröfse oder zur Gruppierung (Schaltung) der Elemente? Dieses weiter zu verfolgen, soll nun unsere Aufgabe sein.

* * *

Hier stehen drei Tauchelemente, von denen eines in Fig. 41 wiedergegeben ist. Die beiden Kohlenplatten sind unter sich und mit der Klemmschraube (C) verbunden und tauchen in eine mit Schwefelsäure versetzte Lösung von doppeltchrom-

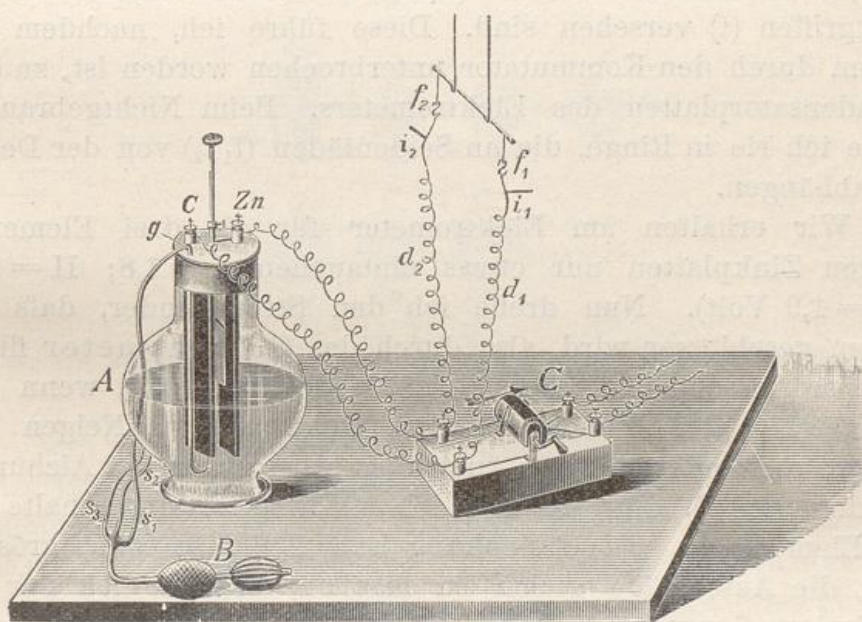


Fig. 41.

Tauchelement A [mit Blasebalg (B) an der Glasrohrgabel, für 3 Elemente gleichzeitig wirkend]. Die Nebendrähte (d_1 d_2) am Stromwender (C) dienen für elektrometrische Messungen (und sind für gewöhnlich isoliert aufgehängt).

saurem Natrium (Anh. 3), während die kleinere Zinkplatte (Zn) mittelst des Messingstabes (m) mehr oder weniger tief eingetaucht, oder ganz aus der Flüssigkeit gehoben werden kann, wodurch der Strom unterbrochen wird.

Das Rohr in der Mitte des Deckels ist mit der anderen Klemmschraube (Zn) leitend verbunden. Durch den Ebonitdeckel ist ein Glasrohr eingeführt, das unterhalb der Kohlenplatten in eine sehr feine Spitze ausläuft und dazu dient, mittelst des Blasebalgs (B) Luft einzublasen, um die Flüssigkeit umzurühren, während der Strom geschlossen ist. Auf solche Weise wird das sonst

ziemlich unbeständige Tauchelement recht konstant, was wir daraus erkennen, daß bei dem in den Stromkreis geschalteten Galvanometer der Ausschlag der Nadel — ohne Anwendung des Gebläses — stetig abnimmt, dagegen während des Blasens lange Zeit unverändert bleibt.

Wir wollen jetzt und später, zur Kontrolle, die elektromotorische Kraft am Elektrometer bestimmen. Zu diesem Behufe befestige ich an den Klemmschrauben des Stromwenders (C, Fig. 41), die mit den Poldrähnen der Elemente verbunden sind, zwei feine Nebendrähne (d_1 d_2), die mit isolierenden Siegel-lackgriffen (i) versehen sind. Diese führe ich, nachdem der Strom durch den Kommutator unterbrochen worden ist, zu den Kondensatorplatten des Elektrometers. Beim Nichtgebrauche hake ich sie in Ringe, die an Seidentäden (f_1 f_2) von der Decke herabhängen.

Wir erhalten am Elektrometer für die drei Elemente, (deren Zinkplatten nur etwas eintauchen) I = 1,8; II = 2,0; III = 1,9 Volt). Nun drehe ich den Stromwender, daß der Strom geschlossen wird, also durch das Galvanometer fließt — der Ausschlag beträgt gegen 3 Aichungsgrade, wenn der Kupferring der Bussole vertikal steht. Durch Neigen des Ringes vermindere ich den Ausschlag, bis er genau = 2 Aichungsgraden wird¹¹⁾. Nun schraube ich den Ring fest und schalte das II. Element ein. Die Ablenkung ist = 2,8; also etwas grösser. Um die Ausschläge gleich zu machen, brauche ich nur die Zinkplatte langsam zu heben — so! Nun ist a_2 ebenfalls = 2. Ebenso verfare ich mit dem III. Element. Jetzt sind alle drei Tauchelemente galvanometrisch gleich stark (dagegen sind die elektromotorischen Kräfte unverändert geblieben).

Nun können wir mit der Messung beginnen.

Das I. Element giebt bei der obigen Kommutator-Stellung 2,0 und bei der anderen 1,8; also im Mittel 1,9. Dasselbe ist beim II. und III. Element der Fall.

Da unsere Klemmen (k, Fig. 42) eine bequeme Form haben, so können wir die Elemente durch Einklemmen von Kupferblechstreifen leicht hintereinander (A) oder parallel (B) schalten.

¹¹⁾ Falls der Ring des Galvanometers nicht drehbar ist, so müssen kleinere Elemente genommen werden, oder man kann eine passende Flüssigkeitssäule einschalten (s. w. u. S. 73).

Ich habe die Ausschläge am Galvanometer absichtlich so reguliert, daß für 1 Element die Angabe beider Apparate möglichst übereinstimmt, wodurch ein unmittelbarer Vergleich möglich ist. Fig. 42 zeigt die Schaltung für alle 3 Elemente.

Zwei hintereinander geschaltete Elemente geben im Galvanometer (im Mittel aus beiden Stromrichtungen) 1,9, d. h. genau dasselbe, wie 1 Element. Dasselbe ist bei 3 Elementen der Fall, wogegen am Elektrometer der Ausschlag mit der Anzahl der Elemente wächst (vergl. S. 34).

Wirkung
kurzer, dicker
Leitungsdrähte.

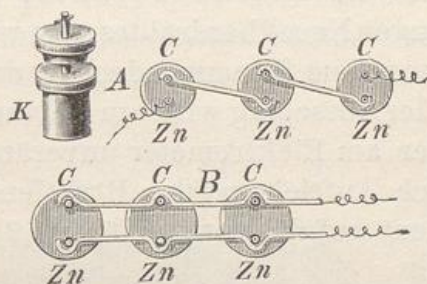


Fig. 42.

A bequeme Schaltung hintereinander, B parallel, K eine Pressschraube von den Tauchelementen. $\frac{1}{2}$ natürl. GröÙe.

Nun schalte ich 2 Elemente parallel. Das Galvanometer zeigt jetzt 3,8, das Elektrometer 1,9. Also haben wir am Galvanometer die doppelte Wirkung, wie bei 1 Element. Für 3 Elemente ist der Ausschlag = 5,75, also fast genau dreimal gröÙer. Eine kleine Tabelle wird die Übersicht erleichtern.

I. Kurze, dicke Leitungsdrähte.

Anzahl der Elemente	A. Galvanometer		B. Elektrometer	
	Schaltung		Schaltung	
	hinter- einander	parallel	hinter- einander	parallel
1	1,9	1,9 = a_1	(1,9)	(1,9)
2	1,9	3,8 = $2 \cdot a_1$	3,8	1,9
3	1,9	5,75 = $3 \cdot a_1$ (fast)	5,6	1,95

Ein Blick auf diese Tabelle lehrt, daß hier die galvanometrische Wirkung des Stromes in einem Gegensatz zu der

elektrometrischen steht. Während hier die elektromotorische Kraft in geradem Verhältnis zur Anzahl der hintereinander geschalteten Elemente steht, ist die galvanometrische Wirkung bei parallel geschalteten Elementen der Anzahl der Elemente proportional, bleibt dagegen bei der „Schaltung hintereinander“ unverändert. Wir haben hierbei kurze, dicke Leitungsdrähte benutzt. Es wäre vorschnell, wollten wir aus dieser einen Beobachtungsreihe schon auf das Gesetz der Stromwirkung schließen; vielmehr müssen wir die Nebenumstände berücksichtigen. Welchen Einfluß haben z. B. die Leitungsdrähte?

Wirkung
feiner, langer
Drähte.

Ein Teil des langen Neusilberdrahtes, den wir schon benutzten (Fig. 19), möge (vor dem Stromwender) in den Stromkreis eingeschaltet sein — der Ausschlag wird am Galvanometer sofort viel kleiner (bleibt aber am Elektrometer unverändert!). Kaum gelingt es mir, durch Aufrichten des Bussolen-Ringes den Ausschlag für 1 Element auf die vorige Höhe (1,9) zu bringen. Wir erhalten

II. Feiner, langer Neusilberdraht eingeschaltet.

Anzahl der Elemente	A. Galvanometer		B. Elektrometer	
	hinter- einander	parallel	hinter- einander	parallel
1	1,9	1,9	1,9	1,9
2	2,2	3,5	3,8	1,9
3	2,7	4,9	5,7	1,85

Wir erkannten sofort, daß die galvanometrische Wirkung des Stromes durch Einschaltung eines feinen und langen Neusilberdrahtes sehr geschwächt wird, gerade so, als hätten wir bei jedem Element die Zinkplatte zum Teil aus der Chromsäure gehoben, also die wirksame Berührungsfläche verkleinert. (Dagegen ist die am Elektrometer gemessene elektromotorische Kraft unverändert geblieben.) Die Tabelle II zeigt uns ferner, daß die für eine kurze Leitung beobachtete Proportionalität zwischen der Anzahl der parallel geschalteten Elemente und der Ablenkung (an der Aichungsskala) nicht mehr besteht,

und daß ferner durch Schaltung hintereinander der Ausschlag wächst!

Es macht den Eindruck, als ob der dünne, lange Draht Widerstand dem Durchfließen der Elektrizität einen Widerstand entgegengesetzt, wodurch die galvanometrische Wirkung des Stromes gedämpft wird. Wir wissen bereits aus der statischen Elektrizität, daß die verschiedenen Körper die Elektrizität verschieden gut leiten, und wir unterscheiden gute Leiter (Metalle), schlechte Leiter (Holz, Hanfschnur u. s. w.) und Nichtleiter oder Isolatoren (Ebonit, Glimmer u. a.). Sollte am Ende die Leitungsfähigkeit der Drähte von ihrer Länge und Dicke abhängen? Diese Frage ist sehr wichtig, doch wollen wir vorher über die Angaben des Galvanometers ins Reine zu kommen suchen.

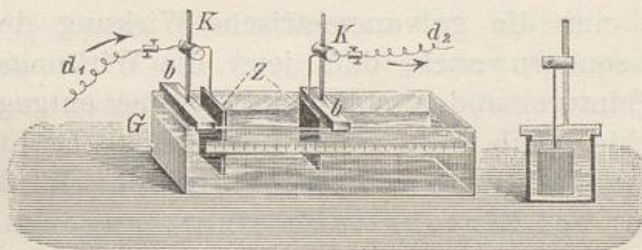


Fig. 43.

Stromdämpfer. $\frac{1}{7}$ natürl. Gröfse. (2 verstellbare, amalgamierte Zinkplatten in Zinkvitriol-Lösung), an der Glaswand eine Papier-Millim.-Skala.

In diesem gläsernen Troge (Fig. 43) sind auf Holzbankchen 2 amalgamierte Zinkplatten verstellbar angebracht und mit Klemmschrauben für die Leitungsdrähte (d_1, d_2) versehen. Ich gieße eine Lösung von Zinkvitriol (ZnSO_4) in Wasser in den Trog und schalte diese Flüssigkeitssäule in den Stromkreis statt des Neusilberdrahtes ein — der Ausschlag wird fast unmerklich klein. Nun schiebe ich langsam das Bänkchen (rechts) näher ... der Ausschlag wächst stetig, um sprungweise noch etwas anzusteigen, wenn die Platten sich berühren. Der Ausschlag ist in diesem Falle genau so groß, wie bei der kurzen Drahtleitung (Tab. I) allein. Wir sind also mit Hilfe dieses Stromdämpfers imstande, den Strom beliebig zu schwächen.

Ich rücke die Zinkplatten des Stromdämpfers soweit auseinander, daß der Ausschlag für 1 Element nur 0,5 Aichungsgrade beträgt. Bei umgekehrter Stromrichtung erhalten wir 0,4, also im Mittel $a_1 = 0,45$. Wir wollen die Versuchsreihe noch-

mals wiederholen und die Resultate gleich tabellarisch niederschreiben.

III. Eine Flüssigkeitssäule eingeschaltet.

Anzahl der Elemente	A. Galvanometer		B. Elektrometer (elektromotor. Kraft)	
	Schaltung		Schaltung	
	hintereinander	parallel	hintereinander	parallel
1	$0,45 = a_1$	0,45	$1,9 = v_1$	1,9
2	$0,9 = 2a_1$	0,45	$3,8 = 2v_1$	1,9
3	$1,34 = 3a_1$	0,46	$5,75 = 3v_1$	1,9

Wir sehen hieraus, daß die Einschaltung der Flüssigkeitssäule nicht nur die galvanometrische Wirkung des Stromes herabsetzt, sondern auch, daß jetzt die Wirkungsweise der Schaltung (hintereinander oder parallel) eine entgegengesetzte ist, wie vorhin (Tab. I), wo nur kurze dicke Drähte die Leitung bildeten, d. h. die galvanometrische Wirkung des Stromes ist bei Einschaltung einer längeren Flüssigkeitssäule in die Leitung proportional der Anzahl hintereinander geschalteter Elemente, während die parallele Schaltung ohne Einfluß ist. Die Stromwirkung hängt nur noch von der elektromotorischen Kraft ab. Würden wir statt der Flüssigkeitssäule einen sehr feinen Draht von entsprechender Länge verwenden, so wäre das Resultat genau dasselbe.

Stromstärke
und
Widerstand.

Nennen wir vorläufig die Ursache der galvanometrischen Wirkung des Stromes die *Stromstärke* und die Ursache der dämpfenden Wirkung, welche der Stromleiter ausübt, den *Widerstand*, so können wir sagen, daß wir zuerst (Tab. I) einen sehr kleinen und jetzt (Tab. III) einen sehr großen Widerstand in dem Stromleiter hatten, und finden:

1. Die Stromstärke ist um so kleiner, je größer der Widerstand im Stromleiter ist.
2. Bei sehr kleinem Widerstande des Leiters ist die Stromstärke proportional der Anzahl parallel geschalteter, bei sehr großem Wider-

stande dagegen der Anzahl hintereinander geschalteter Elemente (in beiden Fällen hat die andere Schaltungsweise keinen Einfluß auf die Stromstärke).

Wie sollen wir uns diesen Widerspruch erklären? Offenbar hat der elektrische Strom, je nach der Schaltungsweise, einen anderen Charakter. Was bedingt nun die Stromstärke, oder die „galvanometrische Wirkung“, wie wir anfangs, in Ermangelung eines zutreffenderen Ausdrucks sagten?

Wir sahen, daß die elektromotorische Kraft (die Potentialdifferenz an den freien Polen der Elemente) ganz unabhängig von der GröÙe der eintauchenden Platten oder dem Widerstande der Leitungsdrähte ist (wenigstens innerhalb der von uns beobachteten Grenzen), und nur von der Natur der betreffenden Metalle und Flüssigkeiten bedingt wird. Denken Sie sich die eintauchenden Zinkplatten an der Oberfläche in \square Millimeter geteilt und — bildlich gesprochen — von jeder dieser Flächeneinheiten einen elektrischen „Strahl“ von gleicher (elektromotorischer) Kraft ausgehend, so wird die Summe dieser „Stromstrahlen“ die ganze in Bewegung gesetzte Elektrizitätsmenge, d. h. den elektrischen Strom selbst darstellen. Hierbei ist es natürlich gleichgültig, wie wir die „Stromstrahlen“ gruppieren, ob wir sie alle von einer einzigen großen Platte oder von mehreren kleineren Platten von gleicher Gesamtfläche ausgehen lassen, d. h. ob wir ein einziges großes Element nehmen, oder mehrere kleinere, deren Zink- und Kohlenpole unter sich verbunden sind. Bei paralleler Schaltung der Elemente werden Stromstrahlen von gleicher Stärke summiert, es wächst daher die Elektrizitätsmenge, dagegen bleibt das Stromgefälle (die elektromotorische Kraft) unverändert. Vielleicht wird das Ihnen einleuchtender, wenn Sie an die leichter zu übersehenden Vorgänge bei einem Wasserstrome denken.

Stellen Sie sich einen horizontalen ringförmigen Kanal vor (vergl. Fig. 5, S. 11), der an einer Stelle durch ein Rohr geschlossen ist, in welchem ein Flügelrad mit gleichbleibender Kraft das Wasser vorwärts treibt, sodaß im Kanal eine konstante Strömung entsteht. Wie wir bereits (S. 12) wissen, muß sich in diesem Falle ein gleichmäßiges Gefälle bilden, d. h.

Hydro-
dynamische
Erscheinungen

die Niveaudifferenz für gleichweit abstehende Punkte der Strombahn ist konstant. Dasselbe beobachteten wir beim elektrischen Strom (S. 14).

Was wollen wir nun unter der Stromstärke verstehen? Auf diese Frage können wir verschiedene Antworten geben, je nach dem Maßstabe, den wir anwenden. Das Einfachste wäre: wir bestimmen die Geschwindigkeit der Strömung, d. h. die von den Wasserteilchen in 1 Sekunde zurückgelegte Strecke, und messen den Querschnitt des Stromes; dann ist die Wassermenge, die in 1 Sekunde durch den Querschnitt fließt, das gesuchte Maß der Stromstärke.

Begriff der
Stromstärke
bei Wasser-
strömen.

$$\text{Stromstärke} = \text{Wassermenge per Sekunde} = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Querschnitt} \dots \dots \dots (1)$$

Diese Wassermenge entspricht nun dem Volumen nach einer Wassersäule, deren Länge die von der Strömung in 1 Sekunde zurückgelegte Strecke, und deren Grundfläche der Querschnitt des Stromes ist. Wir könnten aber ebenso gut statt des Volumens das Gewicht dieser Wassersäule bestimmen, wir hätten:

$$\text{Stromstärke} = \text{Gewicht des Wassers per Sekunde} \dots \dots (2)$$

Das Verhältnis dieser beiden Maße der Stromstärke ist bestimmbar, wird aber keineswegs durch eine einfache, d. i. unbenannte Zahl ausgedrückt¹²⁾.

Wir könnten aber mit demselben Recht den Arbeitswert (die Energie) des Stromes messen, indem wir zunächst die Energie (die Arbeitsfähigkeit) eines Wasserstrahles von gleicher Geschwindigkeit und 1 □ cm Querschnitt zu bestimmen suchen. Dann giebt uns das Produkt der erhaltenen Energie mit dem Querschnitt des Stromes (in □ cm) ein Maß für die Stromstärke.

$$\text{Stromstärke} = \text{Energie des Stromes} = \text{Energie per } \square \text{ cm} \times \\ \times \text{Querschnitt (in } \square \text{ cm)} \dots \dots \dots (3)$$

¹²⁾ Ein Quecksilberstrom werde in Gramm per Sekunde und in Kubikcentimeter per Sekunde gemessen. Erhalten wir im ersten Fall z. B. 1359 Gramm, und im zweiten 100 ccm, so ist das Verhältnis beider Maße 1359 g / 100 ccm = 13,59 g und entspricht dem Gewicht von 1 ccm, d. h. dem spezifischen Gewicht des Quecksilbers. (E. Mach, Leitfaden d. Phys. für Studierende II. Aufl. 1891, S. 222.)

Ich habe Ihnen absichtlich gezeigt, daß bei den verhältnismäßig einfachen Vorgängen, die ein Wasserstrom darbietet, die Stromstärke in verschiedener Weise gemessen werden kann. Es wird Sie daher nicht wundern, wenn wir für den weit komplizierteren elektrischen Strom noch andere Stromstärke-Maße kennen lernen werden als die beobachtete „galvanometrische Wirkung“.

Was geschieht, wenn wir mehrere Kanäle, in denen das Wasser mit gleichem Gefälle (also gleicher Geschwindigkeit) fließt, zu einem Strom vereinigen? Offenbar wird das Gefälle, oder die Geschwindigkeit, unverändert bleiben, dagegen ist der Querschnitt des Stromes größer geworden. Die Wassermenge, welche per Sekunde durch den Hauptkanal fließt, wird gleich der Summe der entsprechenden Wassermengen in den einzelnen Kanälen sein, d. h. die Stromstärke wird mit der Anzahl der vereinigten Kanäle wachsen, genau so, wie wir es bei den galvanischen Elementen bei paralleler Schaltung beobachteten, als wir kurze dicke Leitungsdrähte anwandten, welche dem Durchgange der Elektrizität keinen merklichen Widerstand entgensetzten.

Sehr störend für die weitere Vergleichung der Erscheinungen bei Wasserströmen und bei elektrischen Strömen ist der Umstand, daß eine Bodensenkung bei einem Wasserkanal ein Gefälle hervorruft, das von der „aquamotorischen Kraft“ des Flügelrades in unserem gedachten Beispiel (S. 11 und 19) unabhängig ist, während es für den elektrischen Strom kein Oben und kein Unten giebt, die Lage (und Form) des Stromleiters also völlig gleichgültig ist. Darum betonte ich Ihnen gegenüber mehrfach, daß unsere hypothetischen Wasserkanäle horizontal sein sollten (und daß wir von der Reibung absehen). Lassen wir das Wasser, statt durch offene Kanäle, durch Röhren fließen, so erhalten wir ein ganz anderes Bild. Leiten wir z. B. Wasser aus einem hoch gelegenen Reservoir durch Röhren nach einem tiefer gelegenen Orte, so wird der Druck des ausströmenden Wassers (oder die Stromgeschwindigkeit) von dem Niveau-Unterschiede abhängen, aber — wenn wir von der Reibung absehen — von der Länge der Röhrenleitung unabhängig sein. Sie erinnern sich noch, daß bei geöffnetem Strom die elek-

trische Niveaudifferenz (Potentialdifferenz) der Poldröhte einer Batterie von der Länge der Leitungsdröhte unabhängig war (wenigstens innerhalb der von uns beobachteten Grenzen).

Nennen wir die das Wasser treibende Kraft — einerlei, ob sie durch ein Flügelrad oder durch eine Niveaudifferenz hervorgerufen wird — die „aquamotorische Kraft“, so erhalten wir ein neues Maß für die Stromstärke.

$$\text{Stromstärke} = \text{Wassermenge} = k \times \text{aquamot. Kraft} \times \text{Querschnitt} \quad (4)$$

Hier bedeutet k eine konstante Zahl, die von den angewandten Massen abhängt und die Beziehung zwischen der aquamotorischen Kraft und der Stromgeschwindigkeit angiebt.

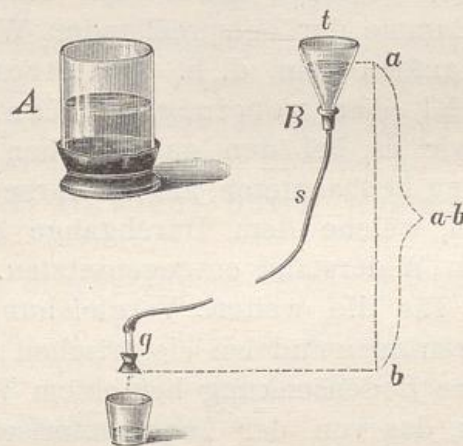


Fig. 44.

Wirkung eines großen Widerstandes auf das Fließen des Wassers. A bei kleiner, B bei großer Niveaudifferenz. $\frac{1}{10}$ natürl. Größe.

Um Ihnen ein wenn auch grobes Bild von dem Falle vorzuführen, wo ein großer Widerstand den Wasserstrom dämpft, benutze ich eine einfache Vorrichtung, die ich Ihnen hier vorlege (Fig. 44). Ein cylindrisches Glasgefäß (A) mit ausgebogenen Rändern, dessen Boden abgesprengt worden, ist mit mehreren Lagen durchnässten Baumwollenzuges überspannt. Ich giesse Wasser in das Gefäß, etwa 8 cm hoch — es fließen nur langsam einzelne Tropfen aus, wiewohl die Wassersäule auf dem Zeugboden einen ziemlich großen Querschnitt hat (etwa 300 \square cm).

Eine andere Versuchsanordnung zeigt B, Fig. 47. Eine Glasröhre (g) ist in gleicher Weise mit Baumwollenzug ge-

geschlossen, aber durch einen langen Schlauch (s) mit einem Trichter (t) verbunden. Ich giefse in diesen Wasser und hebe ihn langsam höher — Sie sehen, wie bei wachsendem Wasserdruck immer öfter Wassertropfen hervorquellen und schliesslich ein kontinuierlicher dünner Wasserstrahl entsteht. Hier ist also die Stromstärke — wenn ich mich so ausdrücken darf — nicht mehr abhängig von dem Querschnitt der Wassersäule, sondern in erster Linie von dem Wasserdrucke, d. h. von der Niveaudifferenz (a—b). Sie haben hier den analogen Fall zur Schaltung der Elemente hintereinander, bei Einschaltung eines sehr grossen Widerstandes.

* * *

Wir nehmen (vergl. S. 75) zum Maß der Stromstärke bei galvanischen Elementen die Elektrizitätsmenge, welche in 1 Sekunde durch einen (beliebigen) Querschnitt der Stromleitung fließt:

Stromstärke = Elektrizitätsmenge per Sekunde.

Wir wollen jetzt untersuchen, welchen Einfluß die elektromotorische Kraft und die Beschaffenheit des Leiters auf die Stromstärke hat.

Bei unserem Versuch mit der eingeschalteten Flüssigkeitssäule (Fig. 43, S. 73) sahen wir, daß eine Flüssigkeitssäule viel stärker den Strom dämpft als ein metallischer Leiter. Wir können daher sagen: Flüssigkeiten sind schlechtere Leiter der Elektrizität, oder sie bieten dem elektrischen Strom einen größeren Widerstand als die Metalle (Drähte). Nun sind aber die Platten der Elemente durch Flüssigkeitsschichten getrennt, die natürlich auch einen gewissen Widerstand bieten, den wir nicht außer Acht lassen dürfen. Ich werde daher ein Tauchelement zusammenstellen, bei welchem wir die Entfernung beider Platten beliebig ändern, also den Einfluß des Plattenabstandes untersuchen können¹³⁾. Wir können dann sowohl den Widerstand in der Leitung, als im Elemente selbst, ändern und die galvanometrische Wirkung beobachten.

¹³⁾ Die folgende Versuchsreihe (Fig. 45—47) ist im wesentlichen Pfaundler entlehnt, wenn auch entsprechend modifiziert. (Müller-Pouillet's Lehrb. d. Phys. IX. Aufl., herausg. von Pfaundler, III. Bd., S. 412—413.)

I. Ein Glastrog (A, Fig. 45) ist bis $\frac{2}{3}$ seiner Höhe mit einer Lösung von Natriumbichromat (mit Zusatz von Schwefelsäure) gefüllt. Da hinein stelle ich eine Kohlen- und eine Zinkplatte, die an Holzbänkchen befestigt sind und beliebig hoch gestellt werden können. Der Abstand beider Platten kann an einer Papier-Millimeterskala abgelesen werden, welche auf die Vorderseite des Glastroges geklebt und mit heißem Paraffin bestrichen ist (zum Schutz gegen zufällig darüberfließende Säure).

Durch 2 Kupferdrähte von je 1 Meter Länge, die ich von derselben Drahtrolle abgeschnitten habe, verbinde ich die Polklemme des Elements mit dem Galvanometer (B, Fig. 48). Der

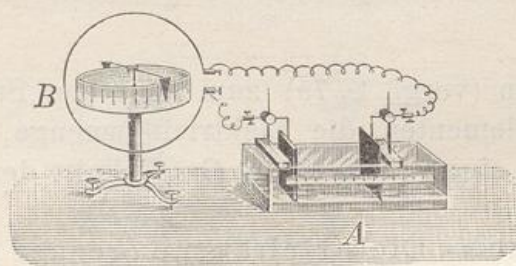


Fig. 45.

Beziehung zwischen dem (äußeren und inneren) Widerstande und der Stromstärke.
 $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse. A Tauchelement. B Galvanometer.

Ausschlag beträgt etwa 4,5 Aichungsgrade. Nun schalte ich 2 längere Drähte von gleicher Beschaffenheit ein — der Ausschlag $a_2 = 3,8$ ist merklich kleiner.

Jetzt rücke ich die Platten des Elements weiter auseinander — Sie sehen, wie der Ausschlag sehr rasch abnimmt. Eine Vermehrung des Widerstandes sowohl in der Leitung, als im Elemente selbst, vermindert die Stromstärke.

Innerer und
äußerer
Widerstand.

Nennen wir den Widerstand im Element den „inneren Widerstand“ (w_i) und den der Leitung den „äußeren Widerstand“ (w_a), so stellt die Summe beider Widerstände den Gesamtwiderstand (W) dar,

$$W = w_i + w_a.$$

Was wird nun geschehen, wenn wir den Gesamtwiderstand verdoppeln?

II. Ich verbinde das Galvanometer (G, Fig. 46) durch zwei Drähte von je 1 Meter Länge mit dem Trog-Element (E) und schiebe die Zinkplatte näher heran, sodaß der Ausschlag

genau = 8 Aichungseinheiten wird. [Diese Stellung der Zinkplatte und des zugehörigen Drahtes ist in Fig. 46 punktiert wiedergegeben.] Der Plattenabstand beträgt 40,4 mm. Den jetzt vorhandenen Gesamtwiderstand (im Element, der Drahtleitung und im Galvanometer) setzen wir $= 1$, und wollen jeden einzelnen Widerstand verdoppeln. Zu diesem Zweck schalte ich zwischen das Galvanometer und die Zinkplatte noch zwei ebensolche Drähte von je 1 Meter Länge ein, die außerdem durch einen Kupferstreifen (R_1) von genau gleicher Länge und Dicke, wie der Ring (R) des Galvanometers, verbunden sind; also ist der äußere Widerstand doppelt so groß als vorhin. Rücke ich nun die Zinkplatte auf die zweifache

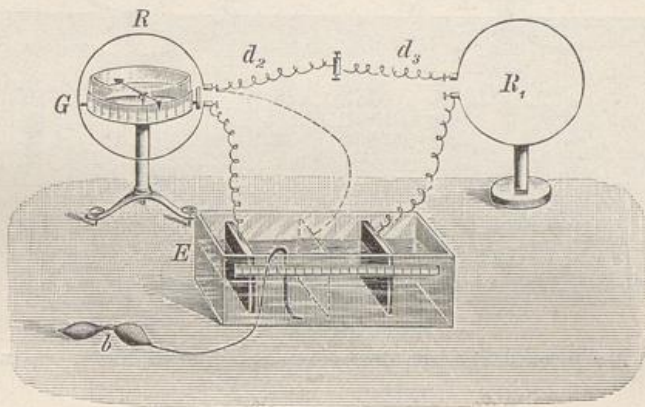


Fig. 46.

Abhängigkeit der Stromstärke vom Gesamtwiderstand. $\frac{1}{10}$ natürl. Größe.

Entfernung ($2 \cdot 40,4 = 80,8$ mm), so ist der Gesamtwiderstand verdoppelt und — der Ausschlag ist $a_2 = 3,95$, also (fast genau) die Hälfte des vorigen. Bei verdoppeltem Gesamtwiderstand ist die Stromstärke halb so groß, oder: *Die Stromstärke steht im umgekehrten Verhältnis zum Gesamtwiderstand.*

III. Nun müssen wir noch den Einfluss der elektromotorischen Kraft untersuchen. Ich stelle in die Mitte des Glastroges ein mit siedendem Paraffin getränktes Holzbrettchen (H, Fig. 47 a. d. f. S.), um dessen Rand ein Gummischlauch (g) gelegt ist, sodass der Trog in zwei getrennte Abteilungen geschieden wird. Eine Zink- und eine Kohlenplatte stelle ich dicht an die Scheidewand und verbinde sie durch einen kurzen Metallstreifen, dessen Widerstand wir vernachlässigen dürfen.

Nun rücke ich die beiden Endplatten der auf diese Weise hintereinander geschalteten Elemente soweit heran, daß die Summe ihrer Abstände (80,8 mm) genau so groß ist, wie der Plattenabstand beim letzten Versuch. Jetzt ist der Gesamtwiderstand unverändert geblieben, dagegen die elektromotorische Kraft verdoppelt — der Ausschlag ($a_3 = 7,9$) ist doppelt so groß als letzthin (3,95), oder ebenso groß, wie bei einem einzigen Element bei halb so großem Gesamtwiderstand. Wir sehen also:

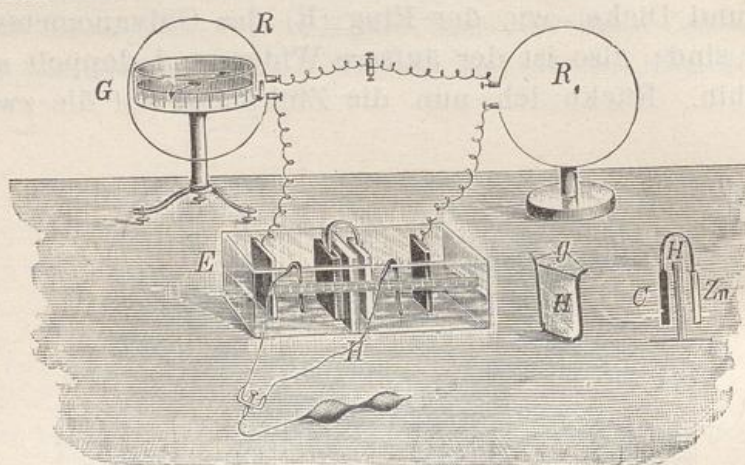


Fig. 47.

Abhängigkeit der Stromstärke von der elektromotorischen Kraft. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt proportional.

Wir können nun leicht das vollständige Gesetz der Stromstärke aufstellen:

Ohm'sches
Gesetz.

Die Stärke des galvanischen Stromes steht in geradem Verhältnis zur elektromotorischen Kraft (der Batterie) und im umgekehrten Verhältnis zum Gesamtwiderstande (Ohm's Gesetz).

Bezeichnen wir die gesuchte Stromstärke mit J , die elektromotorische Kraft mit E und den Gesamtwiderstand mit W , so wird der Bruch E/W der Stromstärke (J) proportional sein. Um den Zahlenwert dieses Bruches gleich dem der Stromstärke zu machen, müssen wir ihn mit einem konstanten Faktor, den wir mit k bezeichnen wollen, multiplizieren, dann haben wir das Maß für die Stromstärke

$$J = k \cdot \frac{E}{W}.$$

Denken wir uns vorläufig als Einheit der Stromstärke (J) einen Strom, der an unserem kalibrierten Galvanometer eine Ablenkung von 1 Aichungsgrad hervorruft, und setzen wir die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elements $= 1$, so wird im allgemeinen der Ausschlag, den 1 Daniell hervorruft — je nach dem eingeschalteten Widerstande — größer oder kleiner als 1 sein. Wenn wir nun den Leitungsdraht so wählen, daß der Ausschlag gerade $= 1$ wird, so können wir den jetzt vorhandenen Gesamtwiderstand $w = 1$ setzen und als Widerstands-Einheit benutzen. Dann giebt der Bruch E/W , wo W ein bekanntes Vielfaches von w ist, direkt die Stromstärke an, d. h. wir können die Einheit des Widerstandes so wählen, daß der obige konstante Faktor $k = 1$ wird, dann ist einfach

$$J = \frac{E}{W} \cdot \dots \dots \dots I$$

Da aber der Gesamtwiderstand (W) sich aus dem im Element selbst vorhandenen inneren Widerstande (w_i) und dem äußeren Widerstande (w_a) der Leitung zusammensetzt, also $W = w_i + w_a$ ist (vergl. S. 80), so haben wir als mathematischen Ausdruck für die Stromstärke

$$J = \frac{E}{w_i + w_a} \cdot \dots \dots \dots II$$

Dieses Gesetz der Stromstärke galvanischer Elemente, das der deutsche Gelehrte Ohm zuerst (1827) gefunden hat, liefert in seiner mathematischen Form den Schlüssel zu dem Rätsel, wie bei sehr kleinem äußeren Widerstande die Stromstärke proportional der Anzahl parallel geschalteter — bei sehr großem äußeren Widerstande dagegen proportional der Anzahl hintereinander geschalteter (gleichwertiger) Elemente sein könne, was uns anfangs in Erstaunen setzte. Wir hatten nämlich damals außer Acht gelassen, daß bei der Schaltung parallel (die gleichbedeutend mit der Anwendung eines Elements von größerer Oberfläche der eintauchenden Platten ist) der innere Widerstand mit der Anzahl der Elemente abnimmt, also die Stromstärke steigen muß; dagegen ist bei der Schaltung hintereinander, wo der Strom der Reihe nach alle inneren Widerstände überwinden

mufs, der innere Widerstand in gleichem Verhältniss gewachsen wie die elektromotorische Kraft, weshalb bei unbedeutendem Leitungswiderstande die Stromstärke sich nicht ändern konnte. Das Stromgefälle ist aber jetzt ein gröfseres und kann einen grofsen äufseren Widerstand besser überwinden, also wird in diesem Falle die Stromstärke im (Vergleich zur parallelen Schaltung) bedeutender sein.

Noch schärfer tritt dies hervor, wenn wir uns das eine Mal n Elemente parallel, das andere Mal hintereinander geschaltet denken, und für einen sehr kleinen und einen sehr grofsen äufseren Widerstand die betreffende Stromstärke berechnen.

I. Äufserer Widerstand verschwindend klein im Vergleich zum inneren Widerstande
(d. h. $w_a = 0$ gesetzt).

Für 1 Element ist die Stromstärke

$$J_1 = \frac{E}{w_i + w_a} = \frac{E}{w_i + 0} = \frac{E}{w_i} \dots \dots (1)$$

a) n Elemente parallel	b) n Elemente hintereinander
Die elektromot. Kraft bleibt $= E$	Die elektromot. Kraft $= n \cdot E$
innerer Widerstand (n mal kleiner) $= w_i/n$	innerer Widerstand (n mal gröfser) $= n \cdot w_i$
äufserer Widerstand verschwindend $w_a = 0$	äufserer Widerstand verschwindend $w_a = 0$

Stromstärke:

$$J_n = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + w_a} = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + 0} = \frac{E}{\frac{w_i}{n}}$$

$$J_n = \frac{n \cdot E}{n \cdot w_i + w_a} = \frac{n \cdot E}{n \cdot w_i + 0} = \frac{n \cdot E}{n \cdot w_i}$$

oder, wenn wir rechts den Zähler und den Nenner des Bruches mit n multiplizieren,

$$J_n = \frac{n \cdot E}{w_i} = n \left(\frac{E}{w_i} \right) = n \cdot J_1 \dots (2a)$$

hier fällt n fort, also ist

$$J_n = \frac{E}{w_i} = J_1 \dots (2b)$$

D. h. Bei verschwindend kleinem äufseren Widerstande wird die Stromstärke durch parallele Schal-

tung der Elemente vergrößert, bei der Schaltung hintereinander dagegen nicht.

II. Äußerer Widerstand sehr groß, so daß der innere Widerstand (selbst bei der Schaltung hintereinander) dagegen verschwindet.

Für 1 Element ist die Stromstärke (bei $w_i = 0$)

$$J_1' = \frac{E}{w_i + w_a} = \frac{E}{0 + w_a} = \frac{E}{w_a} \dots \dots \dots (3)$$

c) n Elemente parallel	d) n Elemente hintereinander
Die elektrom. Kraft = E	elektromot. Kraft = $n \cdot E$
innerer Widerstand = w_i/n (verschwindend gegen w_a)	innerer Widerstand = $n \cdot w_i$ (sehr klein im Verh. zu w_a)
äußerer Widerstand = w_a	äußerer Widerstand = w_a

Stromstärke:

$$J_n' = \frac{E}{\frac{w_i}{n} + w_a} = \frac{E}{0 + w_a} = \frac{E}{w_a} = J_1' \quad \left| \quad J_n' = \frac{n \cdot E}{n \cdot w_i + w_a} = \frac{n \cdot E}{0 + w_a} = \frac{n \cdot E}{w_a} = n \cdot J_1' \right.$$

Bei sehr großem äußeren Widerstande (im Vergleich zum inneren!) wird die Stromstärke durch parallele Schaltung der Elemente nicht verändert, dagegen durch Schaltung hintereinander vergrößert [aber keineswegs proportional der Anzahl Elemente, da bei einer großen Anzahl hintereinander geschalteter Elemente der innere Widerstand ($n \cdot w_i$) nicht mehr gegen w_a vernachlässigt werden kann.]

Wie Sie sehen, stehen diese theoretischen Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetze völlig in Einklang mit unseren Beobachtungen (S. 72—74). Was uns damals unbegreiflich schien, erweist sich als eine notwendige Folge der Abhängigkeit der Stromstärke von dem Gesamtwiderstande, während wir anfangs nur auf den äußeren Widerstand (d. h. den der Leitung) geachtet hatten. Möge dieses eine Beispiel Ihnen einprägen, daß man bei der Ergründung eines Naturgesetzes stets alle Umstände berücksichtigen muß, durch welche die beobachtete Erscheinung beeinflusst werden könnte!

* * *

Da eine vorhandene Anzahl von galvanischen Elementen in verschiedener Weise zu einer Batterie zusammengestellt werden kann (wie Fig. 48 für 6 Elemente zeigt), so ist die Frage naheliegend: Wie sollen wir die gegebenen Elemente schalten, um im vorliegenden Falle die grösste Stromstärke zu erzielen?

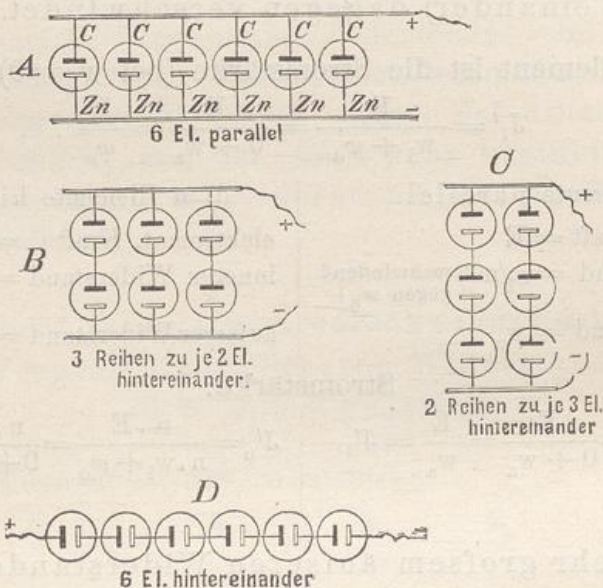


Fig. 48.

Verschiedene Kombination von 6 galvanischen Elementen.

Hierbei müssen wir berücksichtigen, dass die elektromotorische Kraft nur von der Anzahl der hintereinander geschalteten Elemente oder Gruppen (unter sich paralleler Elemente) abhängt, dagegen der innere Widerstand mit der Anzahl hintereinander geschalteter Gruppen zu-, und mit der Anzahl der in jeder Gruppe parallel geschalteten Elemente abnimmt, also die Stromstärke bei jeder Kombination verschieden sein kann.

So haben wir (nach Fig. 48) für 6 Elemente folgende Kombinationen:

	hintereinander	parallel	elektrom. Kraft	innerer Widerstand
A	1	6	E	$\frac{1}{6} w_i$
B	2	3	2 E	$\frac{2}{3} w_i$
C	3	2	3 E	$\frac{3}{2} w_i$
D	6	1	6 E	$6 w_i$

Je nachdem nun im gegebenen Falle die äußere Leitung einen größeren oder kleineren Widerstand (w_a) hat, wird die Stromstärke der Batterie eine verschiedene sein. Wünschenswert ist es natürlich, in jedem Falle die günstigste Kombination zu wählen, wo also die Stromstärke den möglichst hohen Wert (das Maximum) erreicht. Theoretische Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetze ergeben und praktische Versuche bestätigen folgende Regel:

Für einen gegebenen Leitungswiderstand (w_a) ist die vorteilhafteste Kombination von galvanischen Elementen die, wo der gesamte innere Widerstand der Batterie dem ganzen Leitungswiderstande möglichst gleich ist.

Günstigste
Kombination
der Elemente
einer Batterie.

Hieraus erkennen Sie, wie wichtig es ist, die Widerstände messen zu können. Wovon hängt nun aber der Widerstand eines Leiters ab? Wir sahen schon, daß der Widerstand bei Flüssigkeitssäulen oder bei Drähten mit deren Länge stetig wächst, und es wird Ihnen ohne weiteres einleuchten, daß für gleichförmige Leiter der Widerstand proportional der Länge des Leiters sein muß. — Wir haben also nur noch zu untersuchen, welchen Einfluß die Dicke, oder die Fläche des Querschnitts, und die Beschaffenheit, d. h. das Material des Leiters ausübt.

Beginnen wir mit den bequemeren Versuchen an einer Flüssigkeitssäule. Hierzu können wir den schon früher (Fig. 43, S. 73) benutzten Glastrog mit den beiden Zinkplatten verwenden, die ich Ihnen zur näheren Betrachtung in die Hand gebe. Sie bemerken, daß die schmalen Kantenflächen und die Hinterflächen beider Platten mit Lack überzogen und mit 4 parallelen Feilstrichen in 1, 2, 3, 4 cm Abstand vom unteren Rande versehen sind. Diese Striche dienen als Marke beim Eintauchen der Platten.

Ich gieße soviel Lösung von Zinksulphat (ZnSO_4) in den Glastrog, daß beide Platten bis zum ersten Strich eintauchen (A, Fig. 49, wo q die eintauchende Oberfläche bedeutet). — Nun verbinde ich durch kurze, dicke Drähte einen Pol eines Tauchelementes (das mit einem Gummiball zum Einblasen von Luft versehen ist, um den Strom konstant zu erhalten, s. o. S. 70) mit dem Galvanometer, den anderen Pol mit der Klemm-

schraube der einen Zinkplatte und die zweite Platte wieder mit dem Galvanometer.

Den Abstand beider Platten, den ich an der Papierskala ablesen kann, mache ich genau $= 2 \text{ cm}$. Den Ausschlag am Galvanometer markiere ich durch ein spitzes Dreieck aus Papier, das ich so auf die gläserne Schutzhülle der Bussole klebe (vergl. Fig. 37), daß es gerade vor die Spitze des Aluminiumzeigers der abgelenkten Magnetnadel zu stehen kommt. Nun wollen wir durch Zugießen von Flüssigkeit die eintauchende Fläche der Zinkplatten verdoppeln und fragen,

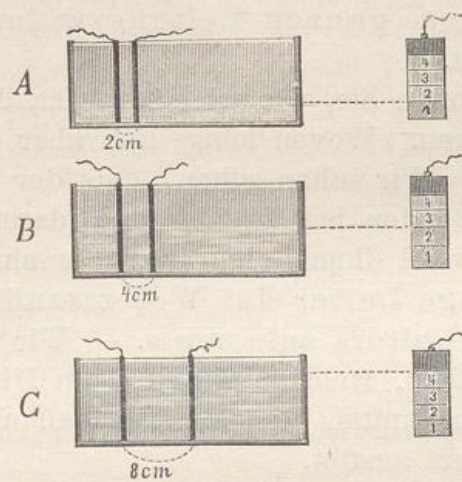


Fig. 49.

Abhängigkeit des Widerstandes von dem Querschnitt der Leitung. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

wie lang die Flüssigkeitsschicht sein muß, um denselben Widerstand zu bieten. Das werden wir daran erkennen, daß das Galvanometer denselben Ausschlag zeigt, wie eben.

So erhalten wir gleichen Widerstand in der Flüssigkeitssäule,

bei dem Querschnitt $q_1 = 1$ und der Länge $l_1 = 2 \text{ cm}$ (A, Fig. 50)

- - - - - $q_2 = 2$ - - - - - $l_2 = 4 \text{ cm} = 2 \cdot l_1$ (B, Fig. 50)

- - - - - $q_3 = 4$ - - - - - $l_3 = 8 \text{ cm} = 4 \cdot l_1$ (C, Fig. 50)

d. h. für gleiche Widerstände sind die Längen der Leiter dem Querschnitt (d. h. der Fläche des Querschnitts) proportional. Wählen wir aber (flüssige) Leiter von gleicher Länge, so wird der Widerstand bei doppeltem Querschnitt nur halb so groß und bei vierfachem Querschnitt nur der vierte

Teil des Leiters vom Querschnitt $= 1$ sein oder mit anderen Worten:

Bei gleicher Länge der Leiter steht der Widerstand im umgekehrten Verhältnis zu der Fläche des Querschnitts. Wir finden also als Regel (vorläufig für Flüssigkeiten):

Der Widerstand eines Leiters ist direkt proportional der Länge und umgekehrt proportional der Querschnittsfläche des Leiters

$$w = l/q \dots \dots \dots (1)$$

Nun brauchen wir uns nur davon zu überzeugen, ob bei metallischen Leitern (Drähten) dasselbe stattfindet. Da hier die Widerstände, wie wir schon wissen, viel kleiner sind, so werden, wenn wir nicht sehr lange Drähte anwenden, die eingeschalteten Drähte nur einen kleinen Teil der äußeren Leitung bilden, ihre Verdoppelung also eine verhältnismäßig kleine Differenz der Ausschläge bewirken. Wir müssen daher die abgelenkte Nadel in die Stellung bringen, wo die Empfindlichkeit des Galvanometers am größten ist, das ist bei einem Ablenkungswinkel von 45° der Fall (Anh. 9).

Um einen solchen bestimmten Ausschlag erzielen zu können, müssen wir den Strom regulieren können, daher lasse ich die Flüssigkeitssäule als Stromdämpfer in der äußeren Leitung und führe die Drähte, wie Fig. 50 zeigt, zu zwei Quecksilberbechern, die durch zwei Ausbohrungen eines dicken Bretchens (B) gebildet sind. Durch den zu untersuchenden Probedraht (m) wird dann der Strom geschlossen. Die beiden eintauchenden Enden des Meßdrahtes können nach Bedarf durch drehbare stählerne Federn (f) gehalten werden.

Ich nehme als Probedraht einen Kupferdraht von 102 cm Länge und biege je 1 cm vom Ende rechtwinklig um, sodaß die Entfernung zwischen beiden Biegungen genau $= 1$ Meter ist. Nun tauche ich die umgebogenen Enden in die Quecksilbernäpfechen (Fig. 53) und reguliere den Plattenabstand des Stromdämpfers (D), bis der Ausschlag genau 45° beträgt.

[Da wir hier den Ablenkungswinkel nicht messen, sondern nur den gleichen Ausschlag hervorrufen wollen, so ist hier wie bei den vorigen Versuchen kein Stromwender erforderlich;

auch könnten wir jedes beliebige ungeaichete Galvanoskop verwenden.]

Nun nehme ich einen Doppeldraht derselben Art von doppelter Länge — der Ausschlag ist wieder $= 45^\circ$; ebenso bei einem vierfachen Draht von vierfacher Länge! Statt zweier Drähte hätte ich ebenso gut einen einzigen Draht von doppeltem Querschnitt nehmen können, oder statt der 4 einzelnen Drähte einen Draht von vierfachem Querschnitt oder doppeltem Durchmesser¹⁴⁾, d. h. doppelter „Dicke“, wie man ge-

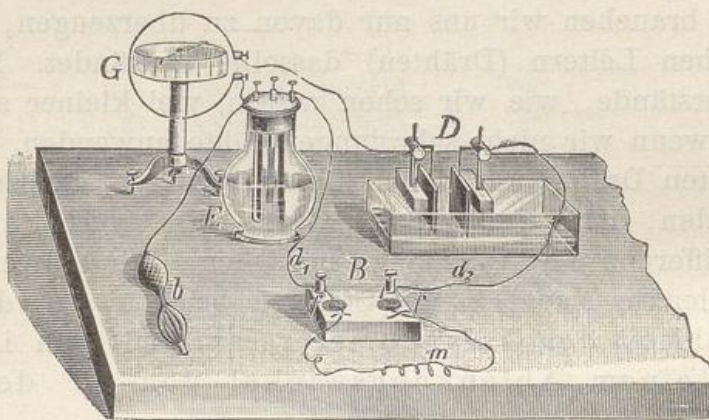


Fig. 50.

Widerstandsvergleich von Drähten. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

wöhnlich sagt. — Diese Messungen an Drähten stimmen also völlig mit denen an Flüssigkeitssäulen überein, d. h. bei allen gleichförmigen Leitern steht der Widerstand im geraden Verhältnis zur Länge und im umgekehrten Verhältnis zur Fläche des Querschnitts.

Dieses Resultat ist insofern auffallend, als hieraus hervorgeht, daß der galvanische Strom — bildlich gesprochen — den Querschnitt des Leiters ausfüllt, d. h. durch den Querschnitt eines Drahtes fließt, nicht aber längs der äußeren

¹⁴⁾ Ist der Durchmesser (die Dicke) eines Drahtes $= d$, so ist sein Halbmesser $r = d/2$ und die Fläche des Querschnitts (als Kreisfläche) $Q = \pi r^2 = \pi d^2/4$. Hat der Draht z. B. eine Dicke $d = 1 \text{ mm}$, so ist sein Querschnitt $Q = \pi/4 \text{ mm}^2$; dagegen bei $d^1 = 2 \text{ mm}$ ist $Q^1 = 2^2 \pi/4 = 4 \pi/4 = \pi \text{ mm}^2$, also ist der Querschnitt eines Drahtes von doppelter Dicke 4 mal größer.

Oberfläche des Drahtes sich bewegt, wie wir aus unserer Beobachtung bei der statischen Elektrizität hätten schließen können, wo der Sitz der Elektrizität, auf einem isolierten Leiter, die äußere Oberfläche des Leiters ist.

Nun wollen wir noch Drähte aus verschiedenem Metall miteinander vergleichen. Durch dieselbe Öffnung eines Zieh-eisens (einer Stahlplatte mit scharfrandigen Löchern von genau abgepaßtem Durchmesser) habe ich einige Drähte aus Kupfer, Silber, Neusilber und Eisen gezogen, die also denselben Querschnitt zeigen. Ich nehme Drähte von gleicher Länge (1 Meter) und benutze sie als Mefsdrähte (m, Fig. 50), wobei ich für den Silberdraht die Ablenkung $= 45^\circ$ einstelle. Ersetze ich den Silberdraht durch den Kupferdraht, so ist der Ausschlag etwas kleiner, noch kleiner beim Eisen und am kleinsten beim Neusilber, d. h. diese Metalle setzen, bei gleicher Länge und Dicke des Drahtes, dem Durchgange des elektrischen Stromes einen verschieden großen Widerstand entgegen. Um denselben Widerstand, wie der 100 cm lange Silberdraht zu haben, hätten der Kupferdraht 93,4 cm, der Eisendraht 15,2 cm und der Neusilberdraht gar nur 7,0 cm lang sein dürfen. In diesen Maßzahlen spiegelt sich das specifische Leitungsvermögen dieser Metalle wieder, das dem specifischen Widerstande umgekehrt proportional ist. Bezeichnen wir diesen specifischen Widerstand eines Drahtes mit s , die Länge mit l und den Querschnitt mit q , so ist der mathematische Ausdruck für den Widerstand eines Drahtes

Specifischer
Widerstand.

$$W = s \cdot \frac{l}{q}.$$

Als praktische Einheit des Widerstandes hat man den einer Quecksilbersäule von 1 □mm Querschnitt und 106,3 cm Länge (bei 0° Celsius) angenommen und dem deutschen Gelehrten Ohm zu Ehren *1 Ohm* genannt¹⁵⁾.

¹⁵⁾ Aus genau abgepaßten Drähten werden Widerstände hergestellt, welche 1, 2, 5, 10, 20 . . . u. s. w. Ohm entsprechen und in passender Weise in einem Kasten („Widerstandskasten“ oder „Widerstandssatz“) so vereinigt, daß man beliebige Widerstände (durch Addition) in den Stromkreis schalten kann. Ein solcher Widerstandssatz kann beim Galvanometer in ähnlicher Weise benutzt werden, wie ein Gewichtssatz bei der Wage.

Damit sind wir in den Stand gesetzt, eine praktische Einheit für die Stromstärke zu definieren, die 1 Ampère heißt:

Das Ampère
als Strom-
Einheit.

Die praktische Einheit der Stromstärke, das Ampère, ist diejenige, wo bei einem Gesamtwiderstande $= 1$ Ohm eine elektro-motorische Kraft $= 1$ Volt wirksam ist.

Mit dieser Definition der Stromstärke haben wir vorläufig nur einen theoretischen Abschluß erreicht, denn unsere Aichungsskala am Galvanometer beruht auf einer willkürlichen Strom-einheit.

Folgende Tabelle zeigt Ihnen den Widerstand und die Leitungsfähigkeit der wichtigsten Metalle und einiger Flüssigkeiten (nach Pfaundler, Lehrb. d. Phys. III S. 421):

Leitungswiderstand bei 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt		Leitungsfähigkeit oder Länge eines Ohms (bei 1 qmm Querschn.)
Material	Ohm	Meter
Quecksilber bei 0°	0,941	1,063
Wismuth	1,26	0,8
Antimon	0,34	2,9
Neusilber	0,20	5,0
Blei	0,188	5,3
Zinn	1,127	7,9
Eisen	0,093	10,8
Platin	0,087	11,5
Zink	0,054	18,5
Messing	0,048	20,9
Gold	0,019	52,6
Kupfer	0,015	66,7
Silber	0,014	71,4
Gaskohle	38 bis 113	0,025 bis 0,008
Schwefelsäure von 30,4 % . . .	14 653	0,00006914
Zinksulphat von 23,7 % . . .	208 850	0,00000452

Die Leitungsfähigkeit und der Leitungswiderstand stehen, wie wir schon sahen, im umgekehrten (reciproken) Verhältnis zu einander. Bezeichnen wir erstere mit λ und letztere mit ω , so ist $\lambda = 1/\omega$, oder $\omega = 1/\lambda$; z. B. für Quecksilber $0,941 = 1/1,063$.

Interessant ist es, daß nur wenige Metalle (Blei, Zinn, Cadmium, Zink) bei ihren Legierungen eine Leitungsfähigkeit zeigen, welche der aus dem Procentgehalt der zusammensetzenden Metalle berechneten Leitungsfähigkeit entspricht. Alle anderen Metalle zeigen, sowohl unter sich, als mit den genannten Metallen legiert, eine unverhältnismäßig geringere Leitungsfähigkeit, so ist z. B.

						Leitungsfähigkeit	
						beob.	berechn.
100 Silber legiert mit	0 Vol.-Procent	Zinn	100			100	100
98 - - -	2 - - -	- - -	23,0			98,2	
10 - - -	90 - - -	- - -	11,5			20,1	
0 - - -	100 - - -	- - -	11,4			11,4	

Es kann sogar (wie z. B. bei einer Legierung von Silber und Gold) die Leitungsfähigkeit der Legierung weit kleiner sein als die jedes der Metalle, aus denen die Legierung besteht. Es ist dieses für die Technik von Wichtigkeit, da man aus solchen Legierungen die zu Messungen dienenden Normalwiderstände herstellen kann, indem man nur verhältnismäßig kurze Drähte braucht. Auch zeigen manche dieser Legierungen, wie z. B. das Manganin die wichtige Eigenschaft, daß ihr Leitungswiderstand weit weniger durch Temperaturschwankungen beeinflusst wird, als es bei den reinen Metallen der Fall ist.

* * *

Um unser Studium der galvanischen Elemente zum Abschluß zu bringen, müssen wir noch die Frage erledigen, wie man den inneren Widerstand eines Elements oder einer Batterie bestimmt.

Nach dem Ohm'schen Gesetz ist die Stromstärke

$$J = E / (w_i + w_a),$$

und zwar ist die günstigste Kombination der Elemente einer Batterie die, wo $w_i = w_a$; also $w_i + w_a = 2 w_i$ wird; dann haben wir z. B. für 1 Element:

$$J' = \frac{E}{2 w_i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{w_i}.$$

Nun ist aber (S. 84) E/w_i die Stromstärke eines Elementes für den Fall, daß der äußere Widerstand = 0 ist. Das giebt uns einen Fingerzeig.

Wir messen zuerst den Ausschlag des (graduierten) Galvanometers bei verschwindend kleinem Widerstande der Leitung, wo kurze, dicke Drähte das Element mit dem starken Kupferringe des Galvanometers verbinden. Darauf fügen wir solange bekannte Widerstände in die äußere Leitung ein, bis der Ausschlag genau halb so groß ist (nach der Eichungsskala!). Dann ist der Gesamtwiderstand verdoppelt, also ist der gesuchte innere Widerstand gleich dem Widerstande, den wir in der Leitung zufügen mußten¹⁶⁾.

Nun interessiert uns noch die Frage: Wie wird die Stromstärke sich verteilen, wenn der Leitungsdraht sich in mehrere Zweige spaltet, die sich später wieder vereinigen, wie Fig. 51 zeigt.

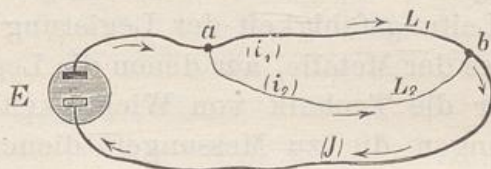


Fig. 51.

Stromstärke in Leiterzweigen (L_1 und L_2).

Sie erinnern sich noch dessen, daß in einem Stromkreise durch jeden Querschnitt des Leiters in derselben Zeit dieselbe Elektrizitätsmenge fließen muß, wenn der Strom konstant sein soll.

Denken Sie sich nun die beiden Leiterzweige L_1 und L_2 als einen einzigen Leiter, so fließt durch den Querschnitt beider per Sekunde dieselbe Elektrizitätsmenge, wie durch jeden anderen Querschnitt; also ist die Stromstärke beider Leiterzweige (i_1 und i_2) zusammen gleich der gesamten Stromstärke (J); d. h. $i_1 + i_2 = J$. Zwischen den Punkten a und b herrscht eine bestimmte Potentialdifferenz ($v_a - v_b$), d. h. in beiden Leiterzweigen ist die elektromotorische Kraft (E) gleich. Dann ist, nach dem Ohm'schen Gesetz, die Stromstärke (i) nur noch abhängig von dem Widerstande (w_1 und w_2):

¹⁶⁾ Falls das benutzte Instrument eine Tangensbussole ist (s. w. u. im nächsten Vortrage), so kann man den Ausschlag (in Graden) berechnen, welcher der halben Stromstärke entspricht und die Widerstände darnach bestimmen.

$$i_1 = (v_a - v_b) / w_1 = E / w_1$$

$$i_2 = (v_a - v_b) / w_2 = E / w_2$$

also

$$i_1 : i_2 = 1/w_1 : 1/w_2 \text{ (oder } i_1 : i_2 = w_2 : w_1 \text{)}.$$

Dieses gilt auch für eine beliebige Anzahl von Leitungszweigen (Ohm, Kirchhoff).

Eine wichtige Anwendung kann hiervon gemacht werden, wenn es gilt, große Stromstärken zu messen, für welche die Empfindlichkeit der vorhandenen Galvanometer zu bedeutend ist. Gibt man den beiden Leiterzweigen einen Widerstand von einem bestimmten Verhältnis, z. B. 99:1, so ist ihr Gesamtwiderstand $99 + 1 = 100$. Der Strom teilt sich demnach so, daß durch die Leitung von größerm Widerstande ein 99 mal schwächerer Strom als durch die andere Leitung, oder $1/100$ des Gesamtstromes fließt (s. o.). Ist die im längeren Zweige gemessene Stromstärke $= i$, so ist die gesuchte Gesamtstromstärke $J = 100 \cdot i$.

Damit haben wir unsere heutige lange Wanderung beendet und wollen nächstens neue dynamische Wirkungen und technische Anwendungen des galvanischen Stromes kennen lernen.

V. Vortrag.

Wärmewirkung des galvanischen Stromes; Glühlampen; Elektrolyse des Wassers; Knallgas- und Wasserstoff-Voltameter; Das Kupfer-Voltameter; Das Volt, das Ohm und das Ampère als Einheiten der elektromotorischen Kraft, des Widerstandes und der Stromstärke; Elektrochemische Äquivalente; Aichung des Elektrometers nach Volt; Vergleichung der Aichungsskala des Galvanometers mit der Gradskala; Die Tangens-Busssole; Reduktionsfaktor der Busssole. — Galvanoplastik und Galvanotypie; Der Telegraph (Lesage, Sömmering, Schilling, Gaufs und Weber, Steinheil, Morse); Polarisationsströme; Sekundäre Elemente; Akkumulatoren; Thermo-elektrische Ströme.

Wir haben das vorige Mal die ablenkende Wirkung des galvanischen Stromes auf die Magnetnadel als vorläufiges Maß der Stromstärke angenommen und fanden, nachdem wir durch Graduierung unser Galvanoskop zu einem Galvanometer erhoben hatten, folgendes:

Rückblick.

1. Fließt ein galvanischer Strom durch eine Leitung, so wird die galvanometrische Wirkung um so schwächer, je länger (bei sonst gleicher Beschaffenheit) der Leiter oder je enger sein Querschnitt ist. Die Ursache der Schwächung der Stromenergie (im Leiter) nennen wir seinen *Widerstand*. Bei gleichförmigen Leitern steht der Widerstand im geraden Verhältnis zur Länge und im umgekehrten Verhältnis zur Fläche des Querschnitts. — Der Widerstand (w) und das Leitungsvermögen (l) eines Leiters stehen im reziproken Verhältnis zu einander ($w = 1/l$). Als praktische Einheit des Widerstandes (1 Ohm) gilt der eines gleichförmigen Quecksilberfadens von 1 □mm Querschnitt und 106,3 cm Länge bei 0° C.
2. Die *Stromstärke* (J) ist von den anderen Größen abhängig. Sie steht im geraden Verhältnis zur elektromotorischen Kraft (E) der Elemente und im umgekehrten Verhältnis zum Gesamtwiderstande (W)

d. h. dem inneren Widerstande (w_i) innerhalb der Elemente selbst + dem äusseren Widerstande (w_a) in der Leitung. Also ist die Stromstärke

$$J = E/W = E/(w_i + w_a).$$

Aus diesem Ohm'schen Gesetz folgt, daß die Stromstärke vergrößert wird: bei verschwindend kleinem äusseren Widerstande durch die Schaltung parallel, dagegen bei sehr grossem äusseren Widerstande durch die Schaltung hintereinander. — Die günstigste Gruppierung der Elemente zu einer Batterie ist die, wo der innere Widerstand dem äusseren (dem der Leitung) gleich ist.

3. Wird der Stromleiter zwischen zwei Punkten der Bahn verzweigt, so verhalten sich die Stromstärken der einzelnen Leiterzweige umgekehrt wie die betreffenden Widerstände der Zweige ($i_1 : i_2 \dots = 1/w_1 : 1/w_2 \dots$). Durch dieses Kirchhoff'sche Gesetz sind wir in den Stand gesetzt, die stärksten Ströme zu messen, indem wir die Widerstände zweier Leiterzweige so wählen, daß durch das Leiterstück, in welchem wir die Stromstärke messen, ein genau bestimmter Bruchteil des Gesamtstromes fließt.

* * *

Wir haben letzthin wohl erkannt, von welchen Umständen die Stromstärke (d. i. vorläufig nur die galvanometrische Wirkung) abhängt, aber einen Anhaltspunkt für die Definition derjenigen Stromstärke, welche wir als Einheit annehmen könnten, boten unsere Versuche am Galvanometer nicht. (Beim Graduieren des Galvanometers war von uns willkürlich ein konstanter Strom = 1 gesetzt worden.) Der Ausdruck „Elektritätsmenge per Sekunde“, die durch den Querschnitt des Leiters fließt, ist der Analogie mit dem Wasserstrom entlehnt, also nur als bildliche Redeweise aufzufassen. — Wir besitzen kein Sinnesorgan zur Wahrnehmung der Elektrizität und können daher ihre „Menge“ nicht direkt messen. — Es läßt sich aber erwarten, daß der elektrische Strom, der die Magnetnadel aus ihrer Ruhelage schleudert

und dem Eisen beim Elektromagnet gewaltige Anziehungskräfte verleiht, auch Wirkungen anderer Art hervorzubringen vermag. Vielleicht finden wir unter diesen, was wir brauchen: einen praktischen Maßstab für die Stromstärke!

I. Hier stehen drei große Bunsen'sche Chromsäure-Elemente (vergl. B, Fig. 14, S. 31). Ich schalte sie hintereinander zu einer Batterie. An dem einen freien Pol befestige ich einen feinen Metallfaden (Lametta, welche zum Christbaumschmuck verwandt wird) — wollen Sie vielleicht das andere Ende des Lamettafadens an dem freien Pol des dritten Elements festklemmen? — Sie lassen den Metallfaden bastig fallen, weil er — zu heiß geworden sei! Sie haben Recht, er ist stark erwärmt worden.

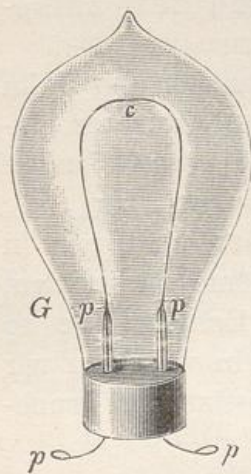


Fig. 52.
Elektrische Glühlampe.
Natürl. Gröfse.

Nun schraube ich statt des Lamettafadens einen Neusilberdraht ein, an welchen ich vorhin eine Menge Wachskügelchen in kurzen Abständen von einander angedrückt habe. Sehen Sie — da beginnen schon einige Kugeln längs dem etwas schräg stehenden Draht herabzurutschen und fallen bald ab, da das Wachs geschmolzen ist. Wir sehen also, daß auch stärkere Drähte durch den Strom erwärmt werden, wenn auch schwächer, als der feine Metallfaden, der dem Strom einen weit größeren Widerstand entgegensetzt. Diese Wärmewirkung

des elektrischen Stromes wird in der Technik u. a. zur Entzündung von Minen beim Sprengen von Felsen u. s. w. benutzt.

Hier lege ich ein elektrisches Lämpchen vor (Fig. 52), das aus einem fast luftleer gemachten Glasgefäß (G) von birnförmiger Gestalt besteht, worin zwei durch einen haarfeinen Kohlenbügel (c) verbundene Platindrähte eingeschmolzen sind. Lasse ich den Strom der drei Elemente durch den Kohlenbügel gehen, indem ich die herausragenden Platin-Ösen der Lampe mit den Poldrähten verbinde, so erstrahlt der Kohlenfaden in hellem, goldgelbem Licht. Sie haben diese elektrischen Glühlampen gewiß schon oft an den Schaufenstern oder auch in Privatwohnungen gesehen, doch ist die gebräuchliche Stromquelle eine andere. Wir werden sie erst später kennen lernen (Anh. 8).

Durch den elektrischen Strom wird der Leiter erwärmt und zwar um so stärker, je schlechter er leitet oder je größer sein Widerstand ist. Sie erraten nun wohl, wo beim „Dämpfen des Stromes“ durch eingeschaltete Widerstände die scheinbar verloren gegangene Energie geblieben ist. *Die elektrische Energie hat sich in Wärmeenergie verwandelt!* Wir könnten nun versuchen, die durch einen Strom erzeugte Wärmemenge zu bestimmen und als Maß der Stromstärke zu benutzen, doch ergaben die sehr umständlichen und schwierigen Versuche (von Lenz und Joule), daß die im Stromleiter erzeugte Wärmemenge zwar im geraden Verhältnis zum Widerstande des Leiters steht, aber nicht der Stromstärke selbst, sondern dem Quadrat der Stromstärke proportional ist (Joule'sches Gesetz), mithin für unseren Zweck sich nicht recht eignet.

II. Jetzt wollen wir eine chemisch-dynamische Wirkung des galvanischen Stromes studieren, die sogenannte Wasserzersetzung oder Elektrolyse des Wassers.

Hier sehen Sie (A, Fig. 53) eine am oberen Ende geschlossene Glasröhre (G), welche nach Fünftel-Kubikcentimetern kalibriert ist. Unten ist ein Gummipfropf hineingeschoben, durch den drei Glasröhrchen wasserdicht geführt sind. Das mittlere Röhrchen (r) ist beiderseits offen, in die beiden anderen sind Platindrähte eingeschmolzen, welche in Platinbleche (p), die „Elektroden“, endigen. Außen sind die Platindrähte mit kleinen Klemmschrauben versehen, zur Aufnahme der Poldrähte der Batterie.

Ich nehme die Röhre aus der Federklemme (f), kehre sie um, ziehe den Pfropf heraus und fülle die Röhre mit stark verdünnter Schwefelsäure. Nach Einsetzen des Pfropfes setze ich die Röhre wieder an ihren Platz und stelle ein Glasgefäß darunter. — Verbinde ich nun die Poldrähte der 3 Bunsen'schen Chromsäure-Elemente, die, wie vorhin, hintereinander geschaltet sind, mit den Klemmschrauben, so bemerken Sie sofort eine lebhafte Gasentwicklung, während aus dem mittleren Röhrchen das verdrängte Wasser herauströpfelt. In wenigen Minuten sind mehrere Kubikcentimeter des Gases erzeugt. Die hierbei innerhalb der Flüssigkeit sich abspielenden Vorgänge sind recht komplizierter Natur; das Endresultat ist dasselbe, als ob die zugefügte Schwefelsäure unverändert geblieben und nur das Wasser in seine Elementarbestandteile

zerlegt worden wäre. Das nahm man auch anfangs an und nannte den Vorgang fälschlich eine „Wasserzersetzung“. Die Gasblasen, welche Sie in der Röhre (A, Fig. 53) aufsteigen sehen, bestehen aus einem Gemisch von Sauerstoff- und Wasserstoffgas, welches sich beim Entzünden (z. B. durch den Entladungsfunken einer Leydener Flasche) unter einer mit einem starken Knall verbundenen Explosion wieder zu Wasser (Dampf) verbindet und daher Knallgas genannt wird. Der Apparat heißt Knallgas-Voltameter (s. w. u.).

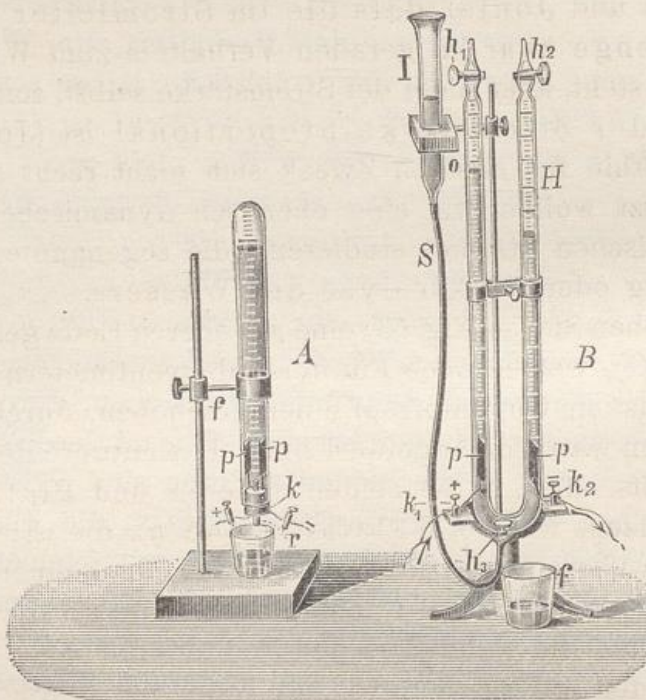


Fig. 53.

Elektrolyse des Wassers. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse. A Knallgas-Voltameter, vereinfacht;
B Wasserstoff-Voltameter nach Hofmann, modificiert.

Um beide Gase getrennt zu erhalten, benutze ich einen anderen Apparat (B, Fig. 53). Ein hohes U-förmiges Glasrohr ist an beiden Schenkeln nach Zehntel-Kubikeentimetern kalibriert und mit drei Hähnen (h_1, h_2, h_3) versehen. Zum Füllen dient ein cylindrisches, oben trichterförmig erweitertes, unten in eine dünne Röhre verlaufendes Glasrohr (I), welches mit seinem Halter oder in dem Korken, durch den es geführt ist, verstellbar ist. Durch einen Gummischlauch (S) ist der Trichter mit dem Abflußrohr verbunden. Die Platin-

Elektroden (p) sind nahe der Biegung seitlich eingeschmolzen und durch Platindrähte mit den isolierten Klemmschrauben (k_1 und k_2) verbunden. Jetzt fülle ich den Trichter mit verdünnter Schwefelsäure und öffne die drei Hähne, bis beide Schenkel gefüllt sind und schliesse darauf die oberen (h_1, h_2). — Bald nach dem Durchleiten des Stromes sehen Sie in beiden Röhren Gas aufsteigen, doch an der positiven Elektrode (der Anode) weniger als an der negativen (der Kathode).

Jetzt, wo die Flüssigkeit in beiden Schenkeln mit den betreffenden Gasen gesättigt ist, giefse ich in den Trichter Flüssigkeit nach, öffne behutsam die oberen Hähne, bis die Röhren wieder gefüllt sind, und schliesse den Strom der Batterie. Nach einigen Minuten, wenn an der negativen Elektrode (der Kathode) gerade 20 Kubikcentimeter Gas entwickelt sind, unterbreche ich den Strom. An der Anode haben sich nur 10 Kubikcentimeter, d. h. halb soviel Gas gebildet! Die grössere Gasmenge erweist sich bei der Untersuchung als Wasserstoff, die kleinere als Sauerstoff. Das Wasser besteht, also — dem Volumen nach — aus 2 Teilen Wasserstoff und 1 Teil Sauerstoff.

Die Menge Knallgas, welche beim ersten Versuch, oder die Menge Wasserstoff, welche beim zweiten in einer bestimmten Zeit, z. B. in 1 Minute entwickelt wird, kann als Maß der Stromstärke dienen und wird auch vielfach dazu benutzt (Jacobi's Stromeinheit liefert 1 ccm Knallgas per Minute). Doch ist dieses Verfahren für genauere Bestimmungen weniger geeignet als das w. u. beschriebene. Um vergleichbare Resultate zu erhalten, müssen die Gase völlig trocken sein und bei einer Temperatur von 0°C . bei 760 mm Barometerdruck gemessen, oder durch Rechnung auf diese Temperatur und diesen Druck reduciert werden.

Diese, wie die folgenden Apparate müßten chemische Strommesser heißen. Der gebräuchliche Name „Voltmeter“ ist sehr unglücklich gewählt, da Volta mit ihrer Erfindung nichts zu thun hat. Auch liegt eine Verwechselung nahe mit den Voltmetern, d. h. Apparaten zur Bestimmung des „Volt“, oder der praktischen Einheit der elektromotorischen Kraft.

III. Ich ersetze nun den Wasserzersetzungssapparat durch Kupfer-Volta-
meter.

ein Gefäß (A, Fig. 54) mit konzentrierter Lösung von Kupfervitriol, in welche zwei blanke Scheiben aus Kupferblech tauchen. In den Stromkreis schalte ich noch den Stromwender (C) und das Galvanometer (D) ein, wie Fig. 53 zeigt.

Dieser Apparat (A) wird Kupfer-Voltameter genannt.

Die beschriebene Versuchsanordnung gestattet uns, den Strom im Galvanometer umzukehren, während er im Kupfer-Voltameter (B) seine Richtung unverändert beibehält. Durch das Zusammenrücken der Kupferplatten im Voltameter kann ich den Widerstand desselben verkleinern, also die Stromstärke erhöhen, bis das Galvanometer seinen empfindlichsten Ausschlag (45° , d. h. etwa 8 Aichungseinheiten) zeigt. Nach einigen

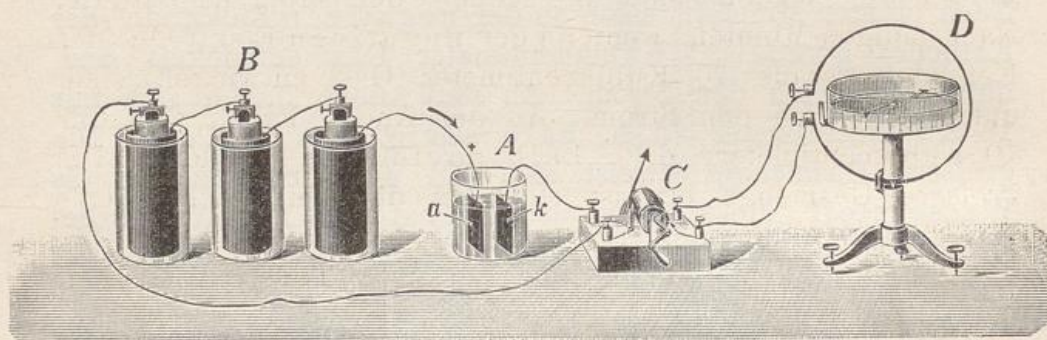


Fig. 54.

Kupfer-Voltameter (A) und Galvanometer (D) durch den Stromwender (C) so mit der Batterie (B) verbunden, daß der Strom nur im Galvanometer die Richtung wechselt. $\frac{1}{10}$ natürl. GröÙe.

Minuten hebe ich beide Platten heraus, spüle sie ab und trockne sie durch Betupfen mit Filtrierpapier und Erwärmen über einer Spiritusflamme. Nun gebe ich Ihnen die Platten herum, bitte aber, beide, besonders die durch matten Kupferglanz ausgezeichnete negative Elektrode (die Kathode), nur am angelöteten, mit Siegellack überzogenen Leitungsdrahte zu fassen! Sie bemerken wohl, wie die Kathode mit einer frischen Kupferhaut bedeckt ist, während die Anode aussieht, als wäre sie von Säure zerfressen. — An der Platte, wo der (positive) Strom eintrat, hat sich Kupfer aufgelöst und an der anderen Platte niedergeschlagen, während die Kupferlösung scheinbar unverändert geblieben ist. [Metall geht mit dem Strom.]

Jetzt wollen wir die Gewichtszunahme der Kathode (der negativen Platte) bestimmen. Auf jenem Seitentisch steht eine empfindliche Wage schon bereit. Ich lege die Platte auf die

eine Wagschale und auf die andere Schrot oder Sand, bis das Gleichgewicht erzielt ist. Nun stelle ich jede Platte an ihren Platz und reguliere ihren Abstand nochmals, bis der Ausschlag am Galvanometer 7,5 Aichungseinheiten ($44,6^\circ$) beträgt. Nach dem Wechseln der Stromrichtung haben wir 7,6; also im Mittel 7,55. Nun wollen wir 5 Minuten lang den Strom durchgehen lassen und jede Minute das Galvanometer beobachten.

	I. Strom- richtung	II. Strom- richtung	Mittel
zu Anfang . . .	7,5	7,6	7,55
nach 1 Min. . . .	7,4	7,58	7,49
- 2 -	7,45	7,5	7,48
- 3 -	7,4	7,5	7,45
- 4 -	7,4	7,5	7,45
- 5 -	7,35	7,45	7,40
Der Strom wird unterbrochen.			Mittel 7,47

Die wieder abgespülte und in gleicher Weise getrocknete Kathodenplatte wiegt jetzt um 0,565 g oder 565 mg mehr als vorher. Soviel Kupfer hat sich in 5 Min. abgesetzt also ist die in 1 Minute abgeschiedene Menge des Kupfers $= 0,113 \text{ g} = 113 \text{ mg}$, oder per Sekunde $113/60 = 1,88 \text{ mg}$.

Noch viel merklicher wäre die Gewichtszunahme der negativen Elektrode gewesen, wenn wir zwei Silberplatten in einer verdünnten Lösung von salpetersaurem Silber (Höllenstein) angewandt hätten. Für genaue Strommessungen wird daher das Poggendorf'sche Silbervoltameter verwandt.

Wie wir neulich sahen, hängt die Stromstärke von der elektromotorischen Kraft und dem Gesamtwiderstande ab ($J = E/W$). Wir können nun für zwei dieser Größen willkürliche Einheiten wählen, dann ist die dritte Größe dadurch schon bestimmt. Wählen wir z. B. für die elektromotorische Kraft als Einheit 1 Daniell'sches Element und als Widerstandseinheit den eines Quecksilberfadens von 1 qmm Querschnitt und 106,3 cm Länge (1 Ohm), so könnten wir bei einem bekannten Gesamtwiderstande und einer (z. B. am Elektrometer) bestimmten elektromotorischen Kraft der benutzten Batterie für jeden einzelnen Fall die Stromstärke (natürlich nach der angenommenen willkürlichen Einheit) berechnen. Da jedoch die Widerstandsmessungen umständlich sind und besondere Hilfsapparate er-

fordern, so ist es oft wünschenswert, einen Weg einzuschlagen, welcher direkt die Stromstärke einer Batterie bei der gerade eingeschalteten Leitung zu messen gestattet. Die von uns als „galvanometrische Wirkung“ bezeichnete Ablenkung der Magnetnadel des Galvanometers wäre sehr bequem, giebt uns aber vorläufig nur ein willkürliches Maß, sodaß die an verschiedenen Instrumenten angestellten Messungen unter sich nicht vergleichbar sind. Wir müssen uns daher nach vergleichbaren Mäßen umsehen!

Das Volt als
praktische
Einheit der
elektromoto-
rischen Kraft.

Wir wissen schon, daß die praktische Einheit der elektromotorischen Kraft (oder der Potentialdifferenz an den freien Polen der Batterie) das „Volt“ genannt wird, doch fehlte uns in der statischen Elektrizität jede Möglichkeit, eine Elektrizitätsquelle von konstantem, stets wieder herstellbarem elektrischem Niveau zu beschaffen. Eine solche bieten aber in vortrefflicher Weise die konstanten Elemente, besonders — für unseren Zweck — das von Daniell. Wir könnten einfach die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elements zur praktischen Einheit nehmen, und es sind lediglich Gründe theoretischer Natur, welche eine etwas kleinere elektromotorische Kraft als praktische Einheit, d. h. als Volt, geeigneter erscheinen lassen.

$$1 \text{ Volt} = 1/1,07 = 0,934 \text{ Normal-Daniell.}$$

Nun ergab unser Aluminium-Elektrometer beim Aichen mit dem Normalkondensator für 1 Daniell den Ausschlag $\alpha_1' = 15^\circ$; hieraus berechnet sich der Ausschlag für 1 Volt $\alpha_1 = 15^\circ/1,07 = 14,02^\circ$ oder rund 14° . Dieser Ausschlag wurde nun bei der Aichung (I. Bd. S. 67) zugrundegelegt, also ist unsere Projektions-Aichungsskala am Elektrometer zugleich eine Voltskala (d. h. bei Anwendung des Normalkondensators). Die von uns früher (S. 37) für verschiedene galvanische Elemente beobachteten Ausschläge am Elektrometer entsprechen demnach (annähernd) der elektromotorischen Kraft der Elemente nach Volt.

Einheit
der
Stromstärke.

Als *Einheit der Stromstärke* können wir uns die Stromstärke denken, welche durch ein konstantes Element von der elektromotorischen Kraft = 1 Volt bei einem Gesamtwiderstand = 1 Ohm hervorgebracht wird. Sie heißt, dem französischen Gelehrten Ampère zu Ehren, *1 Ampère*.

Durch Versuche, die ich Ihnen hier nicht beschreiben kann, hat man gefunden, daß ein Strom von der Stärke = 1 Ampère während jeder Minute 67,08 Milligramm Silber oder 19,68 mg Kupfer ausscheidet oder 10,44 ccm Knallgas bildet. Also

In 1 Sekunde liefert ein Strom von 1 Ampère:

Silber	Kupfer	Knallgas; d. h. Wasser zersetzt:	Elektrochem. Äquivalente.
1,118 mg	0,328 mg	0,174 ccm	0,0933 mg.

Diese Zahlen heißen die elektrochemischen Äquivalente des Silbers, Kupfers und Wassers, und mit ihrer Hülfe lassen sich die Stromstärken der benutzten Elemente berechnen, wie wir bald sehen werden.

So haben wir denn endlich für die uns wichtigen Größen die betreffenden (praktischen) Einheiten oder Maße gefunden. — Bezeichnen wir noch die Elektrizitätsmenge, welche bei 1 Ampère per Sekunde durch den Querschnitt der Leitung fließt, mit 1 *Coulomb*, so ist die Stromstärke = der Anzahl Coulomb per Sekunde!

Die Einheit der elektromotorischen Kraft = 1 *Volt* (etwa 0,9 Daniell)

- - des Widerstandes	= 1 <i>Ohm</i>
- - der Stromstärke	= 1 <i>Ampère</i> .

Nun ist (I. Bd., S. 128) 1 Coulomb = 3000 Millionen elektrostatischer Einheiten der Elektrizitätsmenge. Um sich eine Vorstellung von dieser gewaltigen Elektrizitätsmenge zu machen, denken Sie sich zwei Coulomb gleichnamiger Elektrizität in 1 Kilometer Abstand. Diese würden dann auf einander eine Abstößungskraft ausüben, die ausreicht, um 900 kg zu heben!

Unsere Batterie hatte beim letzten Versuch in 5 Minuten, d. h. 300 Sekunden 565 Milligramm Kupfer, also per Sekunde 1,88 Milligramm niedergeschlagen. Die Stromstärke betrug (durchschnittlich) also $1,88/0,328 = 5,7$ Ampère, d. h. es flossen in jeder Sekunde 5,7 Coulomb durch den Querschnitt des Leiters.

Jetzt werden Sie einsehen, welch' eine reiche Elektrizitätsquelle das unscheinbare galvanische Element ist, und Sie werden sich nicht mehr über die riesige Tragkraft der Elektromagnete wundern.

Ich erinnere Sie nochmals daran, daß — selbst bei Anwendung konstanter Elemente — die Stromstärke keinen

konstanten Wert hat, noch haben kann (wie die elektromotorische Kraft), da mit jeder Änderung in der Leitung auch eine Änderung des Leitungswiderstandes und mithin auch der Stromstärke verbunden ist.

* * *

Konstante
der
Aichungs-
Skala.

Wenden wir jetzt unsere Aufmerksamkeit wieder dem Galvanometer zu. — Während ein Strom von 5,7 Ampère durch die Leitung floß, zeigte unser Galvanometer im Durchschnitt 7,47 Aichungseinheiten; also ist eine Aichungseinheit $= 5,7/7,47 = 0,763$ Ampère. Diese Zahl könnten wir als Konstante der Aichungsskala verwenden, um die Angaben des Instruments auf Ampère zu reducirern.

Unser Galvanometer hat eine solche Konstruktion, daß die Bussole samt dem Kupferringe in horizontaler Richtung gedreht werden kann, wobei wir mit Hilfe des festen Visiers (vgl. Fig. 37, S. 64) leicht den Drehungswinkel ablesen können; außerdem kann der Ring selbst geneigt werden, um die Ausschläge zu vermindern, ohne den Leitungswiderstand zu ändern. Hierdurch wurde das Graduieren sehr erleichtert. Da nun nicht alle Galvanometer diese Einrichtung haben, so wird es Ihnen gewiß von Interesse sein, zu erfahren: in welcher Beziehung die Ablenkungswinkel (in Graden abgelesen) zur Stromstärke stehen.

Ich entwerfe (Fig. 55) auf der Wandtafel einen Viertelkreis mit Graden von 0 bis 90 und trage an der Peripherie die bei der Graduierung (S. 68) gefundenen Skalenwerte auf. Dann ziehe ich eine Linie (AB) senkrecht zu dem Halbmesser (r), der durch den Nullpunkt geht, und ziehe von dem Mittelpunkt (M) Strahlen durch die Skalenpunkte bis zur Linie AB. Die Punkte, wo diese geschnitten wird, bezeichne ich mit den der Aichungsskala entsprechenden Ziffern 1, 2, 3 . . . u. s. w.

Sie erkennen leicht, daß auf der Linie AB (fast genau) gleiche Stücke abgeschnitten werden, d. h.: Die Abschnitte auf der Linie AB (gezählt von dem Anfangspunkte A) sind proportional den Aichungsgraden, also proportional der Stromstärke. Einem nach Graden beobachteten Ausschlag des Galvanometers $= \alpha^0$ entspricht auf AB eine Strecke $= t$. Nun ist aber der Zahlenwert des

Bruches t/r die sogenannte trigonometrische Tangente des Winkels α ($t/r = \tan \alpha$).

Bewirkt nun ein Strom von der Stärke J eine Ablenkung $= \alpha^0$, so ist die zugehörige Strecke auf $AB = t$ und ist der Stromstärke proportional; desgleichen auch der Bruch t/r (da der Halbmesser r einen unveränderlichen Wert hat). Also ist die (trigonometrische) Tangente des Winkels α^0 ($\tan \alpha = t/r$) ein Maß für die Stromstärke.

$$\text{Stromstärke } J = k \cdot \tan \alpha^0,$$

wo k ein konstanter Faktor ist, der u. a. von den Dimensionen des Apparates abhängt und der Reduktionsfaktor¹⁷⁾ der Bussole genannt wird. Diese selbst können wir daher Tangentenbussole (oder Tangensbussole) nennen. (Pouillet 1837.)

Reduktions-
faktor der
Tangenten-
bussole.

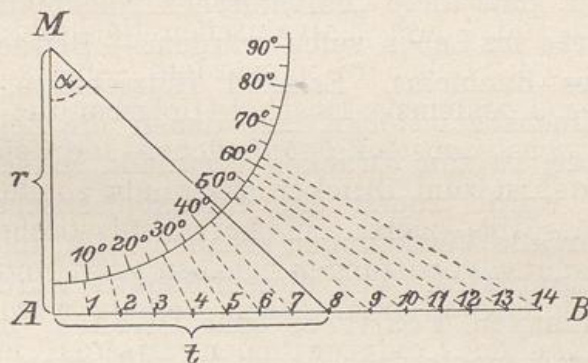


Fig. 55.

Beziehung zwischen der Gradskala und der Aichungsskala bei der Tangens-Busssole.

Genauere Messungen zeigen nun, daß für Galvanometer dieser Art thatsächlich die (trigonometrischen) Tangenten der Ausschlagswinkel den betreffenden Stromstärken proportional sind, aber nur dann, wenn die Magnetnadel sehr klein ist im Vergleich zum Durchmesser des Leitungsrings. Das ist nun bei unserem Apparat in einer für unsere Zwecke genügenden Weise der Fall, indem die Länge der Magnetnadel kaum den 10. Teil des Ringdurchmessers beträgt — daher die gute Übereinstimmung in der Länge der einzelnen Abschnitte auf AB , Fig. 53 (vergl. Anh. 9).

* * *

¹⁷⁾ Für $\alpha = 45^0$ wird $\tan \alpha = 1$, also $J = k$, d. h. der Zahlenwert des Faktors k giebt die Stromstärke an, welche an dem betreffenden Galvanometer die Ablenkung von 45^0 hervorruft.

IV. Da liegt unsere Kupferplatte noch auf der Wage! Ich Galvanoplastik. nehme sie und biege sie hin und her; bald hören Sie ein leises Knistern und — siehe da! eine feine Kupferhaut löst sich ab, d. h. die eben niedergeschlagene Kupferschicht läßt sich stellenweise abziehen und zeigt mit photographischer Treue einen Abdruck der massiven Kupferplatte; nur sind alle Erhabenheiten auf der Kupferhaut vertieft und alle Vertiefungen erhaben.

Diese Beobachtung, welche zuerst von de la Rive (1836) bekannt gemacht wurde, brachte fast gleichzeitig Jacobi in Rußland und Spencer in England auf den Gedanken: auf galvanischem Wege metallische Abdrücke von verschiedenen Gegenständen, wie Medaillen u. a., herzustellen, was auch gelang. Jacobi nannte dieses Verfahren Galvanoplastik (1838), ahnend, daß diese „galvanischen Nachbildungen“ eine neue Industrie ins Leben rufen würden! — Betrachten Sie die Figuren dieses Büchleins. Es sind Holzschnitte, aber kein einziger der Buchsbaumstöcke, auf denen die Zeichnung geschnitten wurde, ist zum Drucken verwandt, sondern von den Holzschnitten wurde zuerst ein galvanoplastischer Abdruck hergestellt, der alle Vertiefungen erhaben zeigt und daher das Negativ genannt wird. Von diesem Negativ wurden die zum Drucken bestimmten Positive, oder Clichés, in mehreren Exemplaren galvanoplastisch erzeugt, und zwar aus Kupfer (oder, nach einem besonderen Verfahren, aus Zink). — Da nun eine Metallplatte ungleich mehr Abdrücke zu machen gestattet als ein Stück Holz und von dem Negativ jederzeit beliebig viele Positive von genau gleicher Güte hergestellt werden können, so wird Ihnen der Vorteil dieser Erfindung einleuchten. — Die Kupferplatten, vermittelt welcher früher die geographischen Karten gedruckt wurden, erforderten sehr viel Kosten und Zeit und lieferten doch nur eine geringe Anzahl guter Abdrücke. Jede neue Platte verursachte dieselben Kosten, wobei die genau gleiche Wiedergabe unmöglich war. Jetzt wird eine einzige Platte, wenn auch mit doppelten Kosten und doppeltem Zeitaufwand, in dem definitiven Charakter der Karte, möglichst scharf und genau, entworfen und dann ein Negativ hergestellt, von welchem die zum Druck Galvanotypie. bestimmten positiven Abzüge (Clichés oder Galvanotypen) in beliebiger Zahl und in völlig gleicher Güte gemacht wer-

den. Daher bekommen wir jetzt auch Schulatlasse von vorzüglicher Güte bei unglaublich niedrigem Preise. — Auch läßt man — um ein drittes Beispiel anzuführen — solche Bücher, deren Inhalt keine Änderung erleidet, wie z. B. die Logarithmentafeln, einmal setzen, revidiert den Satz auf das Sorgfältigste und stellt dann galvanotypische Abdrücke des Satzes her. So ist für weitere Auflagen ein fehlerfreier Druck gesichert (Stereotypen-Druck) und die teuren Lettern können sofort auseinandergenommen und wieder verwandt werden, wodurch auch Zeit erspart wird. — Bekannt ist Ihnen, daß man jetzt die verschiedensten Gebrauchsgegenstände galvanisch versilbert, vergoldet oder vernickelt, teils um ihnen ein gefälligeres Aussehen zu geben, teils um sie vor dem Verrosten zu schützen.

* * *

V. Da wir gerade bei der technischen Anwendung der elektrischen Ströme sind, so möge hier eine der interessantesten und wichtigsten Erfindungen des 19. Jahrhunderts gleich mit erwähnt werden: der Fernschreiber oder Telegraph.

Das Bedürfnis, wichtige Nachrichten möglichst schnell von einem Orte zum anderen gelangen zu lassen, hatte zur Konstruktion der optischen Telegraphen geführt, die bis zum Jahre 1837 im Gebrauche blieben und noch jetzt im Kriegsdienst oder bei wissenschaftlichen Expeditionen Verwendung finden. Die Langsamkeit der Zeichengebung, sowie die Unsicherheit des Betriebes, der z. B. durch dichten Nebel ganz unterbrochen wird, ließen es wünschenswert erscheinen, die elektrischen Wirkungen zum Telegraphieren zu verwenden; und so sehen wir denn auch, nach jeder auffallenderen Entdeckung auf dem Gebiete der Elektrizität, die praktischen Versuche eine neue Richtung einschlagen.

Der Genfer Lesage stellte (1774?) ein Telegraphenmodell Geschichtliches. zusammen, das aus 24 Drähten bestand, die (an beiden Enden) mit je einem Buchstaben bezeichnet und mit Hollundermark-Pendelchen versehen waren. Das Telegraphieren geschah, indem die betreffenden Drähte mit dem Konduktor einer Reibungs-Elektrisiermaschine in Verbindung gebracht wurden, wodurch die Pendelchen an den Enden divergierten.

Dieser Versuch erscheint mehr als eine interessante Spielerei und fand keine praktische Verwendung. Ebenso wenig glücklich waren Andere, die den Entladungsfunken der Leydener Flasche zur Zeichengebung benutzen wollten. Der hohe Elektrisierungsgrad dieser Elektrizitätsquellen erfordert eine so vorzügliche Isolierung der Leitungsdrähte, wie sie für Versuche im großen gar nicht erreichbar ist, daher sind auch alle diese Experimente mit der statischen Elektrizität bald der Vergessenheit anheimgefallen.

Sömmering's
elektro-chem.
Telegraph.

Da anfangs (bis 1820) nur die chemischen Wirkungen des galvanischen Stromes (die Wasserzersetzung) bekannt waren, so kann es uns nicht wundernehmen, daß der erste elektrische Telegraph auf diesem Princip begründet war. Sömmering in München stellte (1809) den ersten wirksamen elektrischen Telegraphen her, indem er beide Stationen durch 35 Leitungsdrähte verband, deren Enden (Platin-Elektroden) in einen mit angesäuertem Wasser gefüllten Glaskasten (von unten) geführt waren. Sobald nun — vermittelt einer Klaviatur, die mit Buchstaben und Ziffern versehen war — durch je 2 dieser Drähte ein elektrischer Strom geleitet wurde, stiegen in den entsprechenden Drahtenden kleine Blasen von Knallgas auf und markierten so die betreffenden Zeichen. — Aus dem Gesagten wird Ihnen einleuchten, daß dieser elektro-chemische Telegraph an Schnelligkeit der Zeichengebung hinter dem optischen Telegraphen zurückstehen mußte, und in der That hat er keine praktische Verwendung gefunden.

Kaum hatte Oersted (1820) seine im Jahre vorher gemachte Entdeckung der Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom bekannt gemacht, so schlug Ampère vor, die Platin-Elektroden am Sömmering'schen Apparat durch Magnetnadeln zu ersetzen, stellte aber selbst keine praktischen Versuche an. Die vielen Leitungsdrähte hätten auch bei einer Ausführung im großen die Kosten sehr bedeuend gemacht.

Erster elektro-
magnetischer
(Nadel-)
Telegraph.

Den ersten brauchbaren elektro-magnetischen Telegraphen konstruierte (1832 oder zu Anfang des Jahres 1833) Baron Paul Schilling von Cannstadt in St. Petersburg, ein Estländer von Geburt, der mit Sömmering befreundet war, und durch dessen Apparat angeregt wurde (Anh. 10). Fast gleichzeitig, und

völlig unabhängig davon, stellten (1833) Gauß und Weber in Göttingen einen elektro-magnetischen Telegraphen zwischen der Sternwarte und dem physikalischen Kabinett, also den ersten Telegraphen im großen, her. Sie benutzten übrigens nicht den galvanischen Strom, sondern den magnet-elektrischen Induktionsstrom (s. d. nächsten Vortrag).

Fig. 56 giebt eine Gesamtansicht des ersten Schilling'schen Telegraphen, der noch jetzt in dem Museum des Haupt-

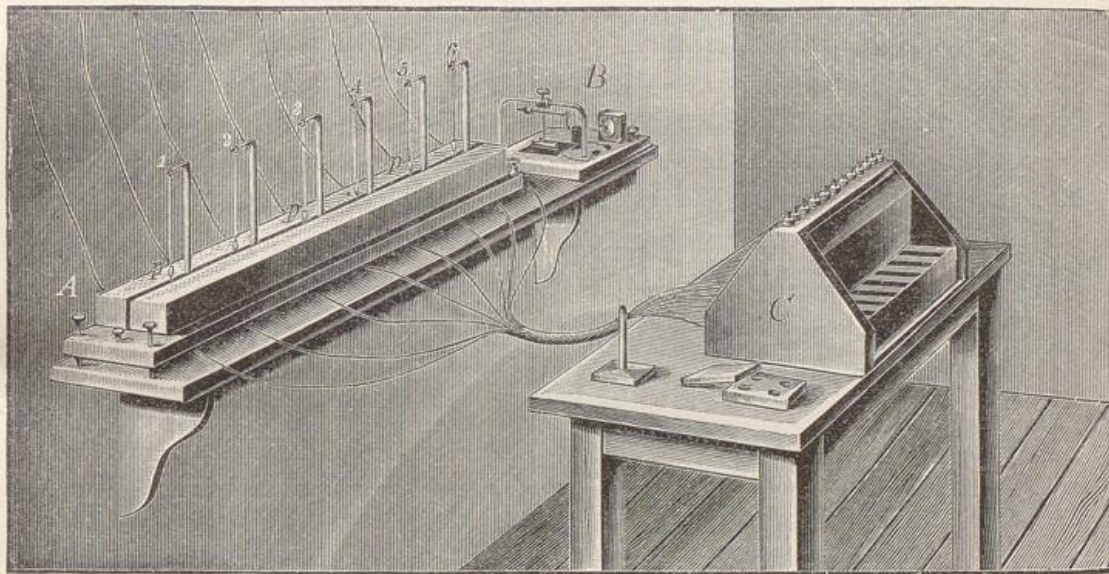


Fig. 56.

Erster elektro-magnetischer Nadel-Telegraph; konstruiert von Schilling 1832/33. B² der Anruf-Apparat. [Aus O. Chwolson, Popul. Vorlesungen über Elektr. (russ.) S. 200.]

Telegraphenamts zu St. Petersburg aufbewahrt wird. Sechs an Seidenfäden hängende Magnetnadeln waren mit Multiplikatorwindungen versehen. Diese und ein Anruf-Apparat (B) wurden durch 8 Drähte, von denen einer für die Rückleitung bestimmt war, verbunden. Eine Klaviatur (C) diente zum Schließen des betreffenden Stromkreises. Markiert wurde die Bewegung der Nadeln durch kleine Kartonscheiben (p). Diese waren an den Haken befestigt, an welchen die Nadeln hingen. Im Ruhezustande kehrten diese Kartonscheiben dem Zuschauer die scharfe Kante zu, bei der Ablenkung dagegen die eine (weiße) oder die andere (schwarze) Seite. — In der Folge (1835 oder 1836) konstruierte Schilling einen Telegraphen mit nur einer Nadel. Aus der Ablenkung nach Ost oder

West sollten Zeichen für die Buchstaben vereinbart werden, doch war es dem Erfinder nicht vergönnt, diese Idee praktisch zu verwerten, da er bald darauf starb (1837).

Wichtig für die praktische Ausführung der Telegraphen war die Entdeckung v. Steinheil's in München (1838), daß man bei Telegraphenleitungen den zweiten Draht ersparen könne, wenn man die Erde selbst als Rückleitung¹⁸⁾ benutzt, indem man an die Enden der Drähte starke Kupferplatten lötet und diese in feuchtes Erdreich (oder in Wasser) versenkt.

Wheatstone suchte (1840) bei seinem Zeigertelegraphen die Unbequemlichkeit besonderer, vereinbarter Zeichen zu vermeiden. Der durch einen Elektromagnet bewegte Zeiger markierte durch seine Stellung die am Rande der Scheibe befindlichen Buchstaben und Ziffern. Dieser Apparat wirkte langsam und unsicher.

Morse's
Schreib-
telegraph.

Die elektro-magnetischen Telegraphen fanden bald Eingang, wurden aber, mit Ausnahme der unterseeischen Telegraphen (s. w. u.), in kurzer Zeit durch den elektro-magnetischen Schreibtelegraphen verdrängt, den der Amerikaner Morse (1835) erfand und dem Robinson im wesentlichen die noch jetzt gebräuchliche Form gab.

Von dem Morse'schen Telegraphen zeige ich Ihnen hier (Fig. 57) ein Modell, bei welchem alle Nebenteile fortgelassen sind. Wird durch den Elektromagnet (M) durch Herabdrücken des Kontaktschlüssels (S) ein Strom geleitet, so zieht er den

¹⁸⁾ Dies ist nicht in dem Sinne zu verstehen, als ob der Strom tatsächlich in der Erde von der einen Station zur anderen fließt, sondern die Erde wirkt hier wie ein (für die von uns erzeugten Elektrizitätsmengen) unendlich großes Reservoir, wohin aller Überschufs abfließen, oder von wo jeder Mangel ersetzt werden kann, ohne daß sein elektrisches Niveau merklich geändert wird. Um sich das klar zu machen, denken Sie sich am Meeresufer eine Pumpstation, die das Meerwasser in eine Röhrenleitung befördert, von der es an einer anderen Stelle sich wieder ins Meer ergießt. Hierbei ist es nun durchaus nicht erforderlich, daß dieselben Wasserteilchen, welche ins Meer flossen, nach der Pumpstation zurückkehren, also im Meere einen Strom hervorrufen. Besonders einleuchtend wird Ihnen das erscheinen, wenn Sie in Gedanken die Pumpstation auf die Landenge von Panama versetzen, wo sie aus dem Großen Ocean das Wasser in eine Röhrenleitung befördert, durch welche das Wasser bis in den Atlantischen Ocean geleitet wird. Hier kann von einer „Rückströmung“ des Wassers keine Rede sein.

Eisenanker(a), der an einem Hebel(h) befestigt ist an. Hierdurch drückt das am anderen Ende befindliche Rädchen (r), welches in der Ruhelage in eine geeignete Farblösung taucht, gegen den Papierstreifen (p), während dieser über eine [bei den gebräuchlichen Telegraphen durch ein Uhrwerk getriebene] Walze sich bewegt. Der Abstand der beiden Rollen (w w) ist in Fig. 57 der Deutlichkeit wegen zu groß gezeichnet. Sie berühren sich. Schließt man den Strom nur auf einen Moment, so drückt der Farbschreiber einen sehr kurzen Strich („Punkt“) auf das Papier, während bei etwas längerem Stromschluss ein „Strich“ entsteht. Aus Punkten und Strichen setzt sich das Morse'sche Alphabet, sowie alle Zeichen für Ziffern, Inter-

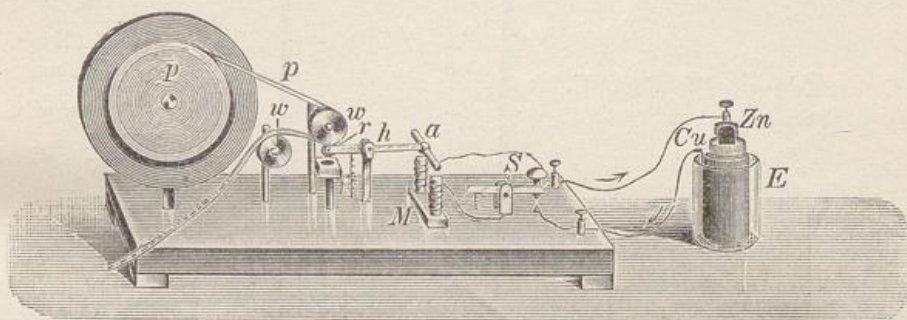


Fig. 57.

Modell des Morse'schen Schreibtelegraphen. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse. M Elektromagnet; h Hebel mit dem Anker (a) und der kleinen Schreibrolle (r), die in der Ruhelage in die Farbschale (f) taucht; p Papierrolle, von der der Papierstreifen über die Walzen (w w) geführt ist; S der Kontaktschlüssel.

punktionen u. a. zusammen. Hierbei sind diejenigen Buchstaben, welche am häufigsten vorkommen, durch die kürzesten Zeichen wiedergegeben, z. B. *e* durch 1 Punkt, *i* durch 2 Punkte, *t* durch 1 Strich u. s. w.

In der folgenden Skizze (Fig. 58) sehen Sie eine Telegraphenanlage schematisch dargestellt. Bei A ist die Abgangsstation, von welcher nach B telegraphiert wird. Durch Niederdrücken des Schlüssels (S_1) wird die Lokalbatterie (B_1) geschlossen und umkreist den Elektromagnet der Empfangsstation, deren Batterie (B_2) bei der Ruhestellung des Schlüssels (S_2) außer Thätigkeit gesetzt ist. Zur Kontrolle des Vorhandenseins des Stromes dienen die Galvanoskope ($G_1 G_2$).

So sehr der Morse'sche Schreibtelegraph den Nadeltelegraphen an Schnelligkeit und Sicherheit der Zeichengebung

noch übertrifft — ganz verdrängen konnte er ihn nicht, denn die Kraft, welche erforderlich ist, um einen Hebel in Bewegung zu setzen, ist natürlich viel größer, als die zur Ablenkung der Magnetnadel eines Multiplikators nötige Kraft. Daher werden in solchen Fällen, wo nur schwache Ströme angewendet werden können, oder wo der Strom durch den sehr großen Widerstand des Leiters zu sehr geschwächt wird, die Nadeltelegraphen vorzuziehen sein. Das ist z. B. bei den unterseeischen Telegraphenleitungen, den Kabeln, der Fall. Da

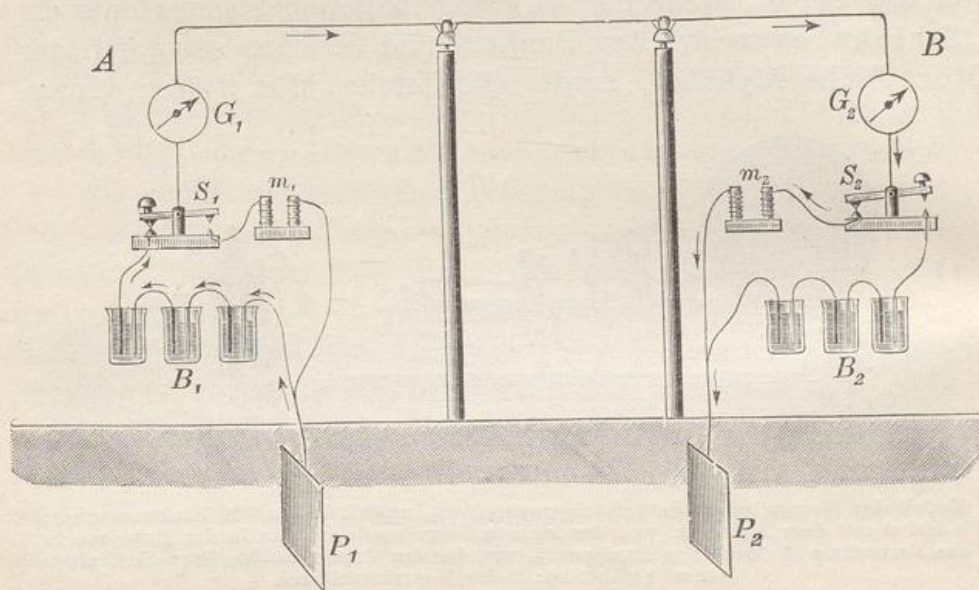


Fig. 58.

Schematische Darstellung einer Telegraphenanlage. A Abgangs-, B Endstation; Schlüssel bei A Stromschluss, bei B Ruheschluss; B Batterie (in A geschlossen, in B ausgeschaltet) G Galvanometer zum Nachweis des Stroms; $P_1 P_2$ Kupferplatten der Erdleitung.

die hier auftretenden Erscheinungen und die verwendeten Apparate sehr kompliziert sind, so können wir nicht näher darauf eingehen, ohne die Grenzen dieses Büchleins zu überschreiten.

* * *

Nachdem wir die Anwendung des elektrischen Stromes in der Telegraphie etwas ausführlicher besprochen haben, wollen wir unsere Aufmerksamkeit wieder auf Wirkungen des Stromes richten und zwar auf die Erscheinungen, welche außer der Erwärmung des Leiters oder der sogenannten „Wasserzersetzung“ in einem flüssigen Leiter auftreten können.

VI. Den positiven Pol eines großen Chromsäure-Elements (E, Fig. 59) verbinde ich durch einen Draht (d_1) mit der einen Platinelektrode eines Knallgas-Voltameters (vergl. S. 100) und zugleich durch einen abgezweigten Draht (d'_1) mit dem Galvanometer. Von hier führt ein Draht (d_2) zu einer Klemmschraube des Quecksilbernäpfchens. Ein Stahl-draht ist hakenförmig gebogen und so auf dem Holzklötzchen des Näpfchens befestigt, daß er nahe über der Quecksilberfläche schwebt, aber durch einen leichten Druck zum Eintauchen gebracht werden kann. In gleicher Weise ist der von dem zweiten Pole des Elements kommende Draht (d_3) angebracht, während der Verbindungsdraht der zweiten Platinelektrode des Voltameters (d_4) beständig eintaucht.

Nun lege ich den Zeigefinger auf den Haken des Drahtes d_3 (A, Fig. 59) und drücke ihn nach unten, wodurch der Strom geschlossen wird und durch d_1 , das Voltameter (von links nach rechts), d_4 und d_3 fließt, während das Galvanometer ausgeschaltet ist (die unterbrochene Leitung ist in Fig. 59 punktiert angegeben).

Wenn ich nun den Drahtaken d_3 emporschnellen lasse und sofort mit dem Mittelfinger den Haken von d_2 eintauche, so ist das Element ausgeschaltet, dagegen ein geschlossener Kreis zwischen dem Voltameter und dem Galvanometer hergestellt (B, Fig. 59). — So! Sehen Sie — das Galvanometer giebt einen Ausschlag, ohne mit dem Element verbunden zu sein! Ein Blick auf die Magnetnadel zeigt Ihnen, daß der nordsuchende Pol nach Westen ausschlug, also der (positive) Strom über der Nadel nach Norden, *mithin im Voltameter von rechts nach links, d. h. in umgekehrter Richtung fließt*, wie während der Verbindung mit dem Element.

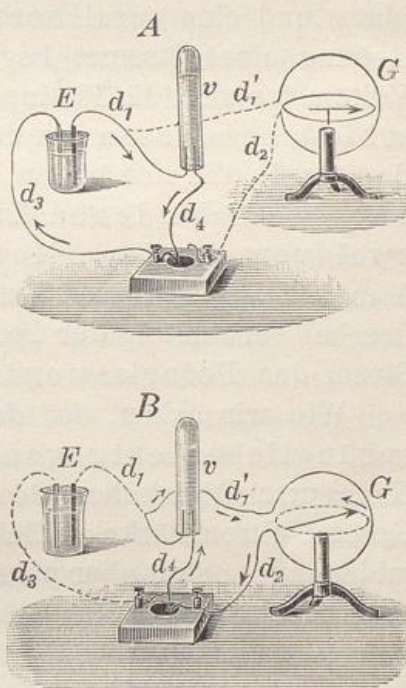


Fig. 59.

Galvanische Polarisation. $\frac{1}{15}$ natürl. Gr.
A Element (E) und Voltameter (v) verbunden. B Voltameter und Galvano (G) verbunden. (Die nicht geschlossene Stromleitung ist punktiert angeführt.)

Dieselbe Erscheinung beobachten wir, wenn wir statt des Voltameters ein Glasgefäß nehmen, wo die Platin-Elektroden in eine Lösung von salpetersaurem Silber tauchen. Hier wird an der einen Platte Silber niedergeschlagen; es stehen also nicht mehr zwei gleiche Platinplatten, sondern eine reine Platinplatte und eine versilberte in der Flüssigkeit. Da ist die Entstehung eines Stromes begreiflich. Aber auch beim Knallgas-Voltameter sind die Platinplatten durch die Berührung mit verschiedenen Gasen (an der einen Wasserstoff, an der anderen Sauerstoff), die sich bilden, in einen äußerlich nicht wahrnehmbaren verschiedenen Zustand versetzt, sodaß sie wie zwei verschiedene Metalle elektromotorisch wirken. Man bezeichnet diesen Zustand als Polarisation und nennt den bei Verbindung der „polarisierten“ Elektroden auftretenden Strom den Polarisationsstrom (Ritter 1803).

Wie wir sahen, ist der Polarisationsstrom dem ursprünglichen entgegengesetzt, muß ihn also schwächen. Nach dem Ohm'schen Gesetz hatten wir für feste Leiter das Gesetz: Stromstärke = Elektromotor. Kraft des Elem./Gesamtwiderstand. Sind aber polarisierbare Leiter in einer Flüssigkeit eingeschaltet, so lautet das Gesetz:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Elektrom. Kraft d. Elem.} - \text{Elektrom. Kraft d. Polarisation}}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Unter der galvanischen Polarisation haben wir also eine solche Veränderung der Oberfläche von Leitern (die in eine geeignete Flüssigkeit tauchen) zu verstehen, durch welche ein dem ursprünglichen Strome entgegengesetzter Strom, der „Polarisationsstrom“ oder „sekundäre Strom“, erzeugt wird, welcher den primären Strom schwächt. Wie die Versuche zeigen, hängt die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes von der chemischen Natur der eintauchenden Metallplatten und der betreffenden Flüssigkeit ab, sowie teilweise auch von der elektromotorischen Kraft des primären Stromes. Es zeigt sich nämlich, daß bei einer allmählichen Steigerung der elektromotorischen Kraft des primären Stromes die des Polarisationsstromes anfangs der ersteren gleich ist, bis ein gewisser Wert erreicht ist, von

dann ab bleibt die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes konstant. So liegt das Maximum für Platinelektroden in destilliertem Wasser etwa bei 2,03 Daniell (2,17 Volt), dagegen bei angesäuertem Wasser bedeutend niedriger, etwa bei 1,6 Daniell (1,8 Volt). Wird der primäre Strom weiter verstärkt, so tritt die sichtbare Wasserzersetzung ein¹⁹⁾. Kupferplatten in Lösung von Kupfervitriol zeigen nur eine schwache, und amalgamierte Zinkplatten in Zinkvitriollösung gar keine Polarisation. Daher benutzten wir diese bei unserem Stromdämpfer (S. 73).

Die „sekundären Elemente“, wie man die zur Stromerzeugung dienenden Polarisationsapparate auch nennt, haben natürlich ein Maximum von elektromotorischer Kraft, das nicht überschritten werden kann. In neuerer Zeit haben sie in der Technik Verwendung gefunden. Nach einem Vorschlage von Sinsteden (1854) stellte Planté (1859) sekundäre Batterien aus Bleiplatten her, die — von einander isoliert — in verdünnter Schwefelsäure standen. Wird eine solche Batterie „geladen“, d. h. mit einer Stromquelle verbunden, so wird an der Platte, wo der (positive) Strom eintritt, eine chemische Verbindung von Blei und Sauerstoff (Bleisuperoxyd) gebildet, während die andere Platte sich mit Wasserstoffbläschen bedeckt oder, wenn sie oxydiert war, eine Schicht von schwammigem, metallischem Blei ansetzt, indem das Oxyd reduziert wird.

Wird der primäre Strom unterbrochen und eine leitende Verbindung zwischen den Bleiplatten hergestellt, so fließt durch den Leiter ein Strom von nahezu konstanter elektromotorischer Kraft (etwa 2 Volt) und anfangs hoher, aber rasch und stetig abnehmender Stromstärke. Die Richtung des sekundären Stromes ist natürlich die entgegengesetzte, wie die des ladenden primären, d. h. die mit Bleisuperoxyd bedeckte Platte bildet den positiven Pol.

¹⁹⁾ Da die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elements 1,1 Volt beträgt, so hätten wir die sogen. Wasserzersetzung mit einem solchen nicht erreicht. Ebenso hätte die Parallelschaltung Daniell'scher Elemente zu einer Batterie nicht geholfen, da dadurch wohl die Stromstärke (d. i. die Elektrizitätsmenge) vergrößert, die elektromotorische Kraft aber unverändert geblieben wäre.

Eine wesentliche Verbesserung erfuhren die sekundären Elemente durch Faure (1881) u. a. dadurch, daß statt der schweren Bleiplatten Gitter aus Blei angewandt wurden, deren Oberfläche mit einer Schicht Mennige (einer Sauerstoffverbindung des Bleis) bedeckt war. Diese wird am positiven Pol direkt in Bleisuperoxyd übergeführt und am anderen Pol in sehr lockeres metallisches Blei reduziert, wodurch das Laden wesentlich erleichtert und beschleunigt wird. Die Menge des gebildeten Bleisuperoxyds ist ein Maßstab für die Menge der aufgespeicherten elektrischen Energie. Daß diese nie größer sein kann als die zum Laden verwandte, braucht wohl kaum besonders betont zu werden. In Wirklichkeit tritt ein Verlust von 30—40 % an elektrischer Energie auf, der in Zukunft durch bessere Konstruktion dieser Apparate, die Akkumulatoren (Ansammler) genannt werden, wohl vermindert, aber nicht ganz aufgehoben werden kann. Ein Übelstand der Akkumulatoren liegt darin, daß das Bleisuperoxyd beim Stehen aus der Schwefelsäure Wasserstoff aufnimmt und sich zu Bleioxyd reduziert, womit ein Verlust an der aufgespeicherten elektrischen Energie verbunden ist.

Da der Akkumulatoren-Strom von kürzerer Dauer ist als (bei Anwendung von galvanischen Elementen) der Ladungsstrom, so ist die Stromstärke, wenigstens anfangs, größer. Wurden die Akkumulatoren bei paralleler Schaltung geladen, so kann durch Schaltung hintereinander ein (schwächerer) Strom von großer elektromotorischer Kraft erhalten und nach Bedarf (z. B. zur elektrischen Beleuchtung etc.) verwandt werden. Die Akkumulatoren bilden so ein transportables Magazin elektrischer Energie.

* * *

Wir haben bisher ausschließlich galvanische Elemente zur Erzeugung des elektrischen Stromes benutzt. Jetzt wollen wir uns nach anderen Elektrizitätsquellen umsehen.

Wie wir sahen, ist die Ursache des elektrischen Stromes die Erzeugung einer elektrischen Niveaudifferenz an einer beliebigen Stelle eines (geschlossenen) Leiters. Wird diese Niveaudifferenz (wie es durch die chemische Wirkung bei galvanischen

Elementen der Fall ist) dauernd erhalten, so ist auch der elektrische Strom ein dauernder.

Hier sehen Sie (A, Fig. 60) einen Bügel aus Kupferblech (Cu) auf einem flachen Wismuthstabe (Bi) festgelötet und innerhalb dieses geschlossenen Metallrahmens eine Magnetnadel auf einer Stahlspitze schwebend angebracht. Ich bringe den Bügel in den magnetischen Meridian und erwärme die nördliche Lötstelle an einer Spiritusflamme — sofort sehen Sie das Ihnen zugekehrte Nordende der Nadel nach Osten ausschlagen, mithin ist ein elektrischer Strom aufgetreten, der über der Nadel nach Süden, also an der erwärmten Lötstelle

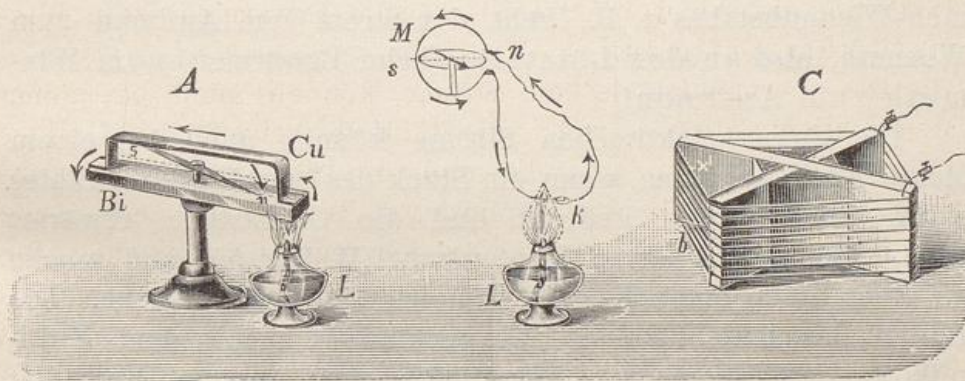


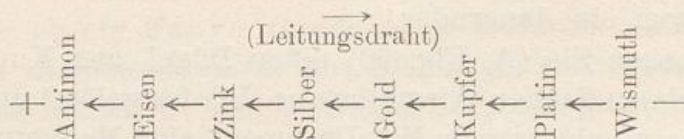
Fig. 60.

- A Thermo-Element nach Seebeck. $\frac{1}{5}$ natürl. Gröfse.
 B Thermo-elektrischer Strom bei gerecktem und erwärmtem Draht. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.
 C Thermosäule nach Magnus aus hartem, stellenweis geglühtem Messingdraht.
 $\frac{1}{3}$ natürl. Gröfse.

vom Wismuth zum Kupfer geht. Das Umgekehrte ist der Fall, wenn ich dieselbe Lötstelle durch Anlegen eines Stückes Eis abkühle. Diese durch Erwärmung hervorgerufenen elektrischen Ströme wurden von Seebeck (1823) entdeckt und thermo-elektrische Ströme genannt. Den kleinen Apparat (A, Fig. 60) können wir als thermo-elektrisches Element, oder kurz als Thermoelement bezeichnen.

Versuche, die man mit den verschiedensten Metallen anstellte, ergaben, dafs man sie so in eine Reihe ordnen kann, dafs bei Erwärmung der Lötstelle der Strom immer von dem in der Reihe tieferstehenden zu dem höherstehenden fließt. In Analogie zu der uns bekannten elektrischen Spannungsreihe (I. Bd. S. 13) nannte man diese Reihenfolge der Metalle die

Thermo-elektrische Reihe:



Auch hier kann man beobachten, daß zwei Glieder der Reihe eine um so größere elektrische Niveaudifferenz zeigen, je weiter sie in der Reihe auseinanderstehen. Von obigen Metallen wird also ein Antimon-Wismuth-Element am wirksamsten sein. [Das Zeichen + und — giebt die Art der Elektrizität an den freien Polen an. In dem Verbindungsdraht, eines Antimon-Wismuthstabes z. B., geht der Strom vom Antimon zum Wismuth, also an der Lötstelle (beim Erwärmen) vom Wismuth zum Antimon!]

Die thermo-elektrischen Ströme können auch bei einem Metall allein auftreten, wenn ein Stück des betreffenden Drahtes stark gereckt oder gedreht und die Grenzstelle erwärmt wird. Ich nehme einen Kupferdraht (B, Fig. 60) und mache an einer Stelle einen Knoten, den ich recht fest anziehe. Die Enden des Kupferdrahtes (d) verbinde ich mit dem Multiplikator (M), der mehrere Windungen aus starkem Draht hat (vergl. Fig. 62, S. 125). Sobald ich in der Nähe des gereckten Drahtstückes eine Spiritusflamme halte, zeigt die Magnetnadel einen Strom an.

Auch das stellenweise Ausglühen eines Drahtes stört seine Homogenität. Ich nehme einen langen harten Messingdraht, wickele ihn vorläufig auf ein Holzkreuzchen (C, Fig. 60) und bezeichne die Mitten der kurzen Seiten mit schwarzem Lack (Schellacklösung mit Kienrufs). Darauf wickele ich den Draht wieder ab, glühe die Zwischenräume abwechselnd aus und wickele den Draht wieder auf. Jetzt stehen die Grenzstellen übereinander. Verbinde ich die Enden wieder mit dem Multiplikator, so genügt schon die Annäherung der Hand an die eine Grenzstelle ($x'b$), um eine Ablenkung zu erhalten. Da hier die Wirkung mit der Anzahl der Grenzstellen wächst, so kann man einen solchen Apparat eine Thermo-Säule nennen.

Mittelst einer geeigneten Thermo-Säule und einem ent-

sprechenden Multiplikator lassen sich sehr geringe Temperaturdifferenzen nachweisen, sodaß ein solches Instrument als ein höchst empfindliches Differential-Thermometer verwandt werden kann. Ebenso können stärkere, hartgelötete Thermo-säulen, die eine längere Erhitzung an einer Flamme vertragen, benutzt werden, um konstante Ströme zu erzeugen, die sich statt der galvanischen verwenden lassen. Eine nähere Beschreibung derselben würde uns jedoch zu weit führen.

Damit wollen wir für heute schließen. Das nächste Mal, wo wir unseren Kursus beenden, werden Sie die mächtigste Elektrizitätsquelle kennen lernen — die magneto-elektrische Induktion!

VI. Vortrag.

Faraday's Fundamentalversuch. — Demonstrations-Multiplikator; Astatische Nadel; Aperiodische Schwingung der Magnetnadel. — Erzeugung magneto-elektrischer Induktionsströme durch Bewegung eines Leiters im magnetischen Felde; Richtung der Induktionsströme (Regeln von Lenz und Faraday). — Induktionswirkung einer schwingenden Magnetnadel auf eine Kupferscheibe (Dämpfung der Schwingungen bei Galvanometernadeln). — Selbstinduktion einer Drahtspule (Extrastrom); Induktionsrolle (Wirkung des Wechselstromes auf Geissler'sche und Puluj'sche Röhren). Magneto-elektrische Maschinen. — Siemens' dynamo-elektrisches Princip. — Einfluß der Anwesenheit von weichem Eisen im magnetischen Felde auf den Verlauf der magnetischen Kraftlinien; der Pacinotti'sche und der Gramme'sche Ring; v. Hefner-Alteneck's Trommelinduktor. — Verschiedene Schaltungsweise bei der Dynamomaschine. — Verwendung dynamo-elektrischer Ströme; elektrische Arbeitsübertragung. — Das Telephon; das Mikrophon. — Schluß.

Die wichtigsten Erscheinungen und Verwendungen des galvanischen Stromes haben wir auf unseren Wanderungen kennen gelernt. Ein Blick auf den zurückgelegten Weg zeigt Ihnen, daß wir oft von der geraden Richtung abgewichen sind. Zürnen Sie darum Ihrem Führer nicht! Wenn er Sie Seitenpfade einschlagen liefs, so geschah es, um Ihnen neue Aussichtspunkte zu eröffnen, oder weil dieser Umweg gangbarer war, und wenn Sie eine Stelle zum zweiten Mal betraten, so geschah es von einer anderen Seite, sodaß Sie ein vollständigeres Bild der Örtlichkeit erhielten. Wir sahen das letzte Mal:

Rückblick.

1. Die dynamischen Wirkungen des galvanischen Stromes äußern sich u. a. als thermische und als chemische Wirkungen. Erstere zeigen sich in der Erwärmung des Leiters, die bei genügender Stromstärke und größerem Widerstande eines Leiterstückes ein lebhaftes Erglühen desselben bewirkt. Bei geeigneten flüssigen Leitern bewirkt der Strom eine Zerreißung der chemischen Verbindungen, und läßt gewisse Grundstoffe sich rein ausscheiden (Elektrolyse). Durch geeignete Vorrichtungen können die sich absetzenden Metallteile als Abdruck verwandt (Galvanoplastik)

- oder als schützender Überzug belassen werden (galvanische Vernickelung, Vergoldung u. s. w.).
2. Die durch den galvanischen Strom niedergeschlagene Menge eines Metalls (Kupfer oder Silber) oder die Menge des ausgeschiedenen Knallgases ist der Stromstärke proportional. (Das Metall geht mit dem Strom). So war man in den Stand gesetzt, durch Versuche die elektrochemischen Äquivalente der Stromstärke zu bestimmen (1 Ampère scheidet per Sekunde 1,118 mg Silber, oder 0,328 mg Kupfer aus und zersetzt 0,0933 mg Wasser oder bildet 0,174 ccm Knallgas).
 3. In gewissen flüssigen Leitern wird durch den elektrischen Strom ein Gegenstrom (Polarisationsstrom oder sekundärer Strom) hervorgerufen, der nach dem Aufhören des primären Stromes noch anhält. Die Stärke des sekundären Stromes wächst, bei Steigerung der Stromstärke des primären, rasch bis zu einem konstanten Maximum, das bei Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure (Akkumulatoren) einer Poldifferenz von 2 Volt entspricht. Diese Akkumulatoren können als transportable Strom-Ansammlungsapparate dienen. Verschiedenartige Metalle zeigen, wenn sie an der Lötstelle erhitzt werden, an den freien Enden eine elektrische Poldifferenz und liefern bei leitender Verbindung der Enden einen elektrischen Strom (Thermostrom). Mit Hülfe geeigneter Apparate dieser Art lassen sich sonst unmerklich kleine Temperaturdifferenzen nachweisen.

* * *

Wenden wir jetzt unsere Aufmerksamkeit wieder den Magneten zu. Wir haben die Wechselwirkung zwischen Magneten und beweglichen Stromleitern beobachtet und erfahren, daß die galvanischen Ströme Elektromagnete von riesiger Tragkraft hervorzubringen vermögen. Sollten wir nicht auch mit Hülfe von Magneten elektrische Ströme erzeugen können? Diese Frage lag schon damals nahe, aber ich wollte Ihnen zuerst die Eigenschaften des galvanischen Stromes zeigen, ehe ich dieses neue Gebiet betrete, dessen eigentümliche Schön-

heit Ihnen den Genuß der anderen elektro-dynamischen Erscheinungen verkümmert hätte. Über dem Eingangsthor dieses Gebiets prangt in glänzenden, unverlöschlichen Zügen der Name eines der genialsten Physiker aller Zeiten, des bahnbrechenden Erforschers der Elektrizität: „*Michael Faraday*“.

Ein starker hufeisenförmiger Stahlmagnet (M, Fig. 61), der aus mehreren flachen Stahlplatten (Lamellen) zusammengesetzt ist, hat einen ebenfalls hufeisenförmigen Anker aus weichem Eisen (A), dessen Schenkel von einem starken, umsponnenen Kupferdraht in entgegengesetzter Richtung umwickelt sind. Die an diesen Draht gelöteten Leitungsdrähte ($d_1 d_2$) sind an Stücke Messingrohr befestigt, die Sie als Handhaben ($h_1 h_2$) benutzen können, wenn Sie als Stromprüfer dienen wollen.

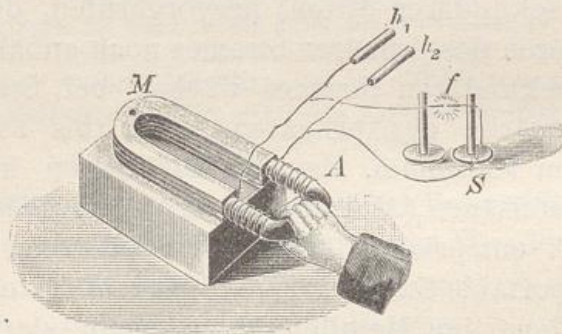


Fig. 61.

Faraday's Fundamentalversuch der magneto-elektrischen Induktion. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

Ich fasse den Anker in der Mitte, lege ihn an die Pole des Magnets und halte diesen mit der linken Hand fest. Haben Sie die Handhaben gefaßt? Ja! Nun werde ich den Anker rasch abreißen, so — — Sie fahren zusammen, als ob ein elektrischer Schlag Sie durchzuckt hätte, und das ist in der That geschehen. Ich führe die Ableitungsdrähte zu zwei Glasständern (S) und nähere ihre ösenförmig gebogenen Enden bis auf $\frac{1}{2}$ mm etwa, und verdunkle das Zimmer für einige Minuten. Sobald ich jetzt den wieder angelegten Anker abreiße, springt bei der Drahtlücke ein Fünkchen über — ein Beweis dafür, daß hier ein zwar nur momentaner Strom, ein sogenannter „Stromstoß“, aber von bedeutender elektromotorischer Kraft entstanden ist. In diesem Fundamentalversuch Faraday's (1831) ist, wie in einem Keime, die ganze Reihe der modernen dynamo-elektrischen Maschinen im Princip enthalten.

Unsere Aufgabe ist es nun, die Ursache dieses „magneto-elektrischen Stromes“ aufzufinden. Bevor wir an die nötigen Versuche gehen, wollen wir bei unserem Multiplikator (Fig. 35, S. 58) einige Umänderungen vornehmen, wodurch seine Empfindlichkeit vergrößert und das lästige und zeitraubende Hin- und Herschwingen der Magnetnadel beseitigt wird. Die Erhöhung der Empfindlichkeit erreichen wir leicht durch eine eigentümliche Kombination zweier Magnete

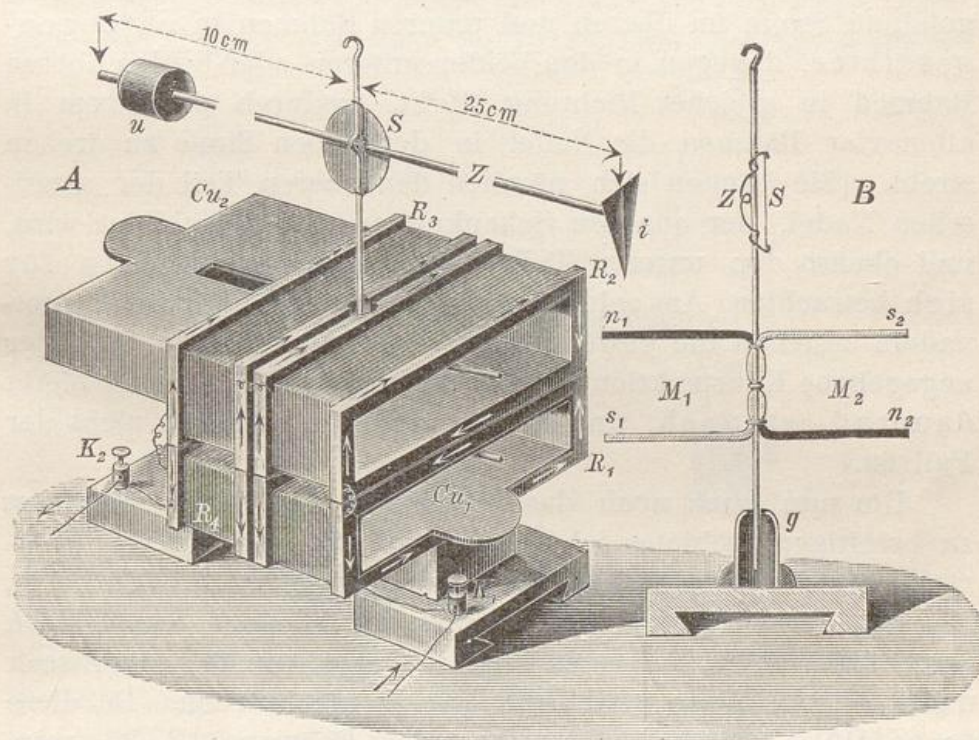


Fig. 62.

A Demonstrations-Multiplikator mit Kupferdämpfung (Cu) und Zeiger (Z). $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse. B Astatiche Nadel nach Hempel, modificiert und vereinfacht; mit einstellbarem Spiegel (s) aus einem versilbertem Deckgläschen. $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse.

(B, Fig. 62). Jeder der beiden hufeisenförmigen Magnete ($M_1 M_2$) besteht aus einem Stahldraht (von 0,5 mm Dicke; s. Anh. 11), der nach dem Ausglühen im mittleren Teil vierkantig gehämmert und an drei Stellen mit einer eingefeilten Rinne versehen ist. Nach dem Härten und Magnetisieren wurden die Magnetstäbchen an den hier auch vierkantigen Neusilberdraht mit feinem Kupferdraht festgeschnürt, sodaß ihre ungleichnamigen Pole ($n_1 s_2$ und $n_2 s_1$) in eine Gerade fallen. Das untere Ende des Neusilberdrahtes

Astatiche
Nadel.

taucht in ein leeres Glasröhrchen (g) mit glattem, etwas verengertem Rande. Oben trägt der Neusilberdraht einen Zeiger (Z), der aus einem Strohalm besteht und am kurzen Ende mit einem entsprechenden Übergewichtchen (u) aus Kork versehen ist, um das Gleichgewicht herzustellen.

Durch diese Kombination der Magnete ist die Richtkraft der Erde fast völlig aufgehoben (astatische Nadel). Die Drähte des Multiplikators auf je zwei Doppelrahmen ($R_1 R_2$ und $R_3 R_4$) so gewickelt, daß der durch die Klemmschrauben ($K_1 K_2$) geleitete Strom im oberen und unteren Rahmen in entgegengesetzter, dagegen in den beiden unteren oder beiden oberen Rahmen in gleicher Richtung fließt, wodurch der Strom in allen vier Rahmen die Nadel in demselben Sinne zu drehen strebt. [Sie können sich nämlich den oberen Teil der astatischen Nadel, der aus den Schenkeln n_1 und s_2 gebildet wird, und ebenso den unteren Teil ($n_2 s_1$) als Magnetnadeln für sich betrachten. Aus solchen übereinander befestigten Magnetnadeln bestehen die gewöhnlichen astatischen Nadeln. Die hier angegebene Konstruktion ist viel leichter herstellbar und bleibt dauernd astatisch, was bei den anderen durchaus nicht der Fall ist.]

Um nun auch noch das Schwingen der Nadel möglichst zu beseitigen, schiebe ich in den oberen und unteren Hohlraum der Doppelrahmen je einen Kupfer-Dämpfer (Cu bei A, Fig. 62), der aus einer flachen Hülse aus starkem Kupferblech besteht, dessen kurze Kanten verlötet sind (s. Anh. 11). Der Zweck dieser Kupferhülsen wird Ihnen gleich klar werden. Da diese flache Hülse durch beide Seiten des Rahmens ($R_1 R_4$) resp. $R_2 R_3$) reichen muß, ist ein schmaler Ausschnitt für den mittleren Teil der astatischen Nadel und den Neusilberdraht angebracht. Zur Probe berühre ich die Klemmschrauben ($K_1 K_2$) der Rahmen mit den Poldrähften eines unserer kleinen Zink/Kupfer-Elemente, wobei ich den Kupferpol mit k_1 verbinde (sodafs die +E hier eintritt) — die Nadel schlägt heftig aus und bleibt, fast ohne zu schwingen, nahezu rechtwinklig zum Rahmen stehen; ebenso kehrt sie, nach Unterbrechung des Stromes, unmittelbar in ihre Ruhelage zurück. Den Grund dafür werden wir bald kennen lernen. Eine solche Bewegung der Nadel nennen wir *aperiodisch*. Merken Sie sich aber, daß,

wenn der Zeiger der Nadel — wie in diesem Falle — von dem Nullstrich der Skala (s. Fig. 35, S. 58) nach rechts abgelenkt wird, der zugeführte Strom von der Klemmschraube k_1 (die mit dem Zeichen + markiert ist) durch den Multiplikator-draht nach k_2 fließt, also bei k_2 austritt!

* * *

Da, wie wir bereits wissen, die Elektromagnete weit kräftiger sind als die Stahlmagnete, so umwickele ich einen Eisenstab mit dickem isolierten Draht (Fig. 63) und binde ihn an

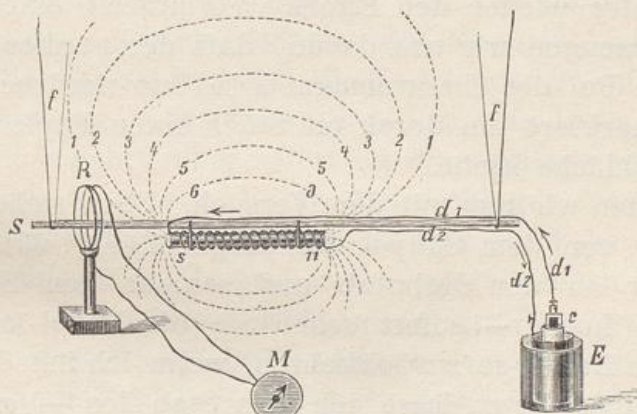


Fig. 63.

Erzeugung magneto-elektrischer Ströme durch Verschiebung des Leiters (R) im magnetischen Felde. $\frac{1}{20}$ natürl. Gröfse.

einen dünnen Stab aus Kiefernholz (S), wobei ich die Drähte eine Strecke längs dem Holzstabe und dann zu einem grossen Bunsen'schen Chromsäureelement (E) führe. Nun bedecke ich den Elektromagnet mit einem weissen Karton, bestreue diesen mit Eisenfeilspähnen und klopfe mit dem Finger daran — sofort sehen Sie die Feilspähne sich in eigentümlichen Kurven, den magnetischen Kraftlinien, anordnen, von denen einige in Fig. 63 angedeutet sind. Halte ich den Karton fest und drehe den Magnet um seine Achse, so werden die jetzt sichtbaren Kraftlinien wegen der symmetrischen Form des Magnets sehr ähnlich den vorigen sein, aber doch räumlich einer anderen Schnittebene entsprechen. Wir sehen hieraus jedenfalls, dafs der ganze Raum, welcher den Elektromagnet umgiebt, von magnetischen Kraftlinien durchsetzt ist.

Dieses gesamte Wirkungsgebiet des Magnets nennen wir das *magnetische Feld*.

Nun unterbreche ich den Strom des Elektromagnets (Fig. 63, a. d. v. S.), schiebe den Holzstab (S) durch einen an einem Ständer befestigten Drahttring (R, Fig. 63), der aus etwa 10 Windungen umspinnenen Kupferdrahtes gebildet ist, und hänge den Holzstab mit dem Elektromagnet so an zwei von der Decke herabhängende Doppelfäden (f) auf, daß der Stab in der Mitte des Drahttringes schwebt. Jetzt verbinde ich den Drahttring durch biegsame lange Drähte mit dem weitab auf dem anderen Ende des langen Experimentiertisches aufgestellten Multiplikator (M) und schliesse wieder den Strom. Vermittelt einer Kompaßnadel überzeugen wir uns davon, daß der rechts von Ihnen befindliche Pol des Elektromagnets (n) ein nordsuchender Pol ist. Ich markiere ihn durch ein Stück roten Papiere, das ich auf die Polfläche klebe.

Beginnen wir nun mit dem Versuch. Eben steht der Drahttring nahe vor dem Südpol des Magnets (Fig. 63). Ich lege den Finger an den Holzstab und schiebe den Südpol zum Drahttringe heran — sofort sehen Sie die Nadel ausschlagen, aber in die Ruhelage zurückkehren, wenn ich mit dem Magnet stehen bleibe. Jetzt lasse ich den Stab los — er schwingt zurück, und die Magnetnadel des Multiplikators schlägt nach der entgegengesetzten Seite aus! Während nun der Magnet hin- und herpendelt (wobei sein Südpol dem Ringe sich bald nähert, bald von ihm entfernt) schwingt die Nadel in gleichem Tempo nach rechts und links, also wird der Multiplikator von Stromstößen mit wechselnder Richtung durchströmt.

Jetzt halte ich den Magnet an und nähere den Ständer mit dem Drahttringe dem Südpol — es erfolgt der gleiche Ausschlag, wie bei der Annäherung des Magnets (d. h. des Südpols). Schiebe ich den Drahtrahmen zurück, so erfolgt wieder ein Ausschlag, aber in entgegengesetzter Richtung.

Wenn Sie nun auf den Verlauf der Kraftlinien (Fig. 63), die mit fortlaufenden Ziffern (1, 2 . . . 6) versehen sind, achten, so werden Sie leicht erkennen, daß bei der Annäherung nacheinander die Kraftlinien 1, 2, 3, 4, 5, 6, dagegen bei der umgekehrten Bewegung dieselben Kraftlinien in umgekehrter Reihenfolge (6, 5, 4, 3, 2, 1) von dem Drahttringe geschnitten

wurden. Wir können mithin vorläufig sagen: Wenn die Kraftlinien von einem Leiterstück geschnitten werden (einerlei, ob der Leiter oder der Magnet mit den Kraftlinien sich dabei bewegt), so entsteht in dem Leiter (wenn er geschlossen ist) ein elektrischer Strom, dessen Richtung wechselt, wenn die Bewegung in entgegengesetztem Sinne erfolgt. Dieser lediglich durch Bewegung eines Leiters im magnetischen Felde erzeugte zeitweilige Strom wird nun der *magneto-elektrische Induktionsstrom* genannt.

Nun schalte ich ein zweites Element dem ersten parallel ein (in A, Fig. 64 nicht angedeutet), schraube aber den einen Draht nicht fest. Schiebe ich nun den Drahttring, bis er in einer Ebene mit der Polfläche des Magnets sich befindet, und lasse ihn stehen, so kehrt die Nadel wieder auf 0 zurück. Wenn ich aber nun den zweiten Strom auch schliesse, so schlägt die Nadel aus, kehrt aber sofort in die Nullage zurück, um aber nach der anderen Seite auszuschielen, wenn ich den zweiten Strom unterbreche. Was ist hier geschehen?

Jedenfalls ist die Intensität des magnetischen Feldes bei Einschaltung des zweiten Elements vergrößert worden; wir können uns vorstellen, daß zwischen den schon bestehenden Kraftlinien neue Kraftlinien beim Stromschluß hervorschoßen, welche den Leiter (R) schnitten, also einen Strom hervorrufen mußten. Beim Öffnen des zweiten Stromes (E_2) verschwanden die neuen Kraftlinien, was im dynamischen Sinne einer Bewegung in umgekehrter Richtung entspricht, daher mußte ein Stromstoß in entgegengesetzter Richtung erfolgen. Wir können unsere Erfahrungen mithin in erweiterter Form etwa so wiedergeben:

Wenn ein Leiterstück die magnetischen Kraftlinien durchschneidet, so wird im Leiter eine elektromotorische Kraft hervorgerufen, so lange seine Bewegung dauert. Die Richtung des magneto-elektrischen Induktionsstromes hängt von der Reihenfolge ab, in welcher die Kraftlinien geschnitten werden.

Hierbei können wir nun drei Fälle unterscheiden:

- I. Das magnetische Feld bewegt sich, während der Leiter feststeht;
- II. der Leiter bewegt sich im feststehenden magnetischen Felde;

III. die Intensität des magnetischen Feldes ändert sich, während Leiter und Magnet feststehen.

Alle drei Fälle können, wie wir sehen werden, zur Herstellung von magneto-elektrischen Induktions-Apparaten verwandt werden.

* * *

Wollen wir den Vorgang an unserem stabförmigen (Elektro-) Magnet nochmals prüfen und zugleich auf die Richtung des Induktionsstromes genauer achten. Der südsuchende Pol

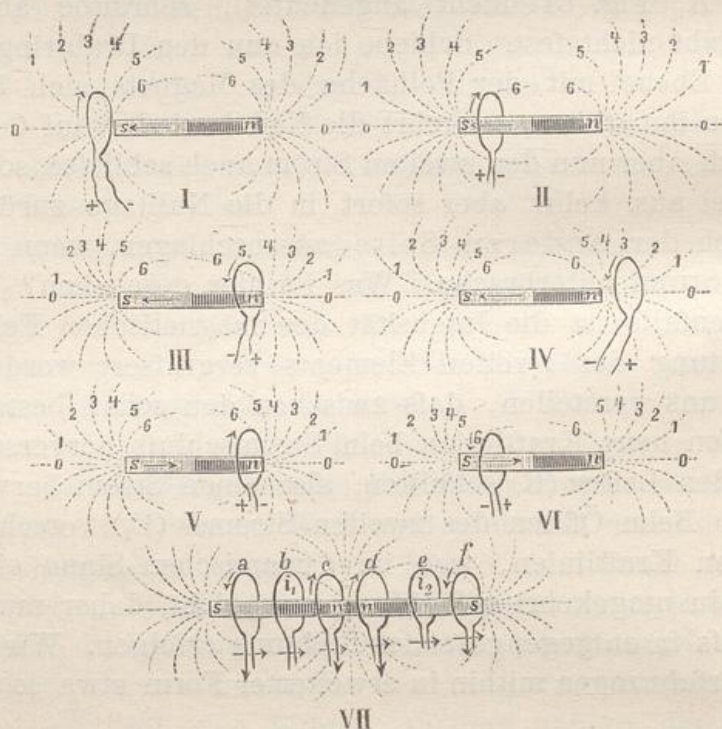


Fig. 64.

Nachweis des Lenz'schen Gesetzes der magneto-elektrischen Induktion.
[Bei I ist die linke, durch den Pfeil markierte Hälfte des Drahttringes, nach vorne gerichtet.]

ist links von Ihnen. (In der Fig. 64 ist der Einfachheit und besseren Übersicht wegen der Elektromagnet ohne Umwicklung und Leitungsdrähte gezeichnet, ebenso beim Drahttringe nur eine Windung angegeben.)

Schiebe ich nun den Südpol des Magnets dem Drahttringe näher (I, Fig. 64, s. d. u. stehende Klammer) oder durch ihn hindurch (II), so zeigt der Ausschlag der Magnetnadel (nach rechts), daß der

Strom aus der Klemmschraube K_2 (vergl. Fig. 62) in den Drahttring fließt, also in diesem die Richtung hat, die der Pfeil anzeigt.

Während die Mitte des Magnets den Drahttring passiert, kehrt die Nadel auf Null zurück und schlägt bei weiterem Verschieben des Magnets (III und IV) nach der anderen Seite aus, während der Ring die Kraftlinien in umgekehrter Reihenfolge schneidet.

Lasse ich jetzt den Magnet zurückgehen (also von links nach rechts, V und VI), so wechselt der Induktionsstrom die Richtung.

Vergleichen Sie (Fig. 64, I—VI) die durch einen kurzen Pfeil angegebene Richtung des Induktionsstromes im Drahttringe mit der Ihnen (S. 55) bekannten Richtung der hypothetischen Ampère'schen Molekularströme (die hier, wo ein Elektromagnet vorliegt, dem inducierenden galvanischen Strom in dem herumgewickelten Draht gleichgerichtet sind), so bemerken Sie leicht:

Nähert der ringförmige Leiter sich einer Polfläche (I), oder werden die Kraftlinien in der Reihenfolge von außen nach innen²⁰⁾ vom Leiter geschnitten (I, II, V), so ist der Induktionsstrom der Richtung der magnetischen Molekularströme (resp. dem inducierenden galvanischen Strom) entgegengesetzt; entfernt sich dagegen der Leiter von der Polfläche, oder schneidet der Leiter die Kraftlinien von innen nach außen, so ist der Induktionsstrom den Molekularströmen (oder dem inducierenden galvanischen Strom) gleichgerichtet.

Verwendete ich statt des Elektromagnets einen stählernen Stabmagnet, so wäre die Wirkung bedeutend schwächer — die Richtung der Induktionsströme aber dieselbe. — Ersetze ich den einzelnen (Elektro-) Magnet durch zwei Stahlmagnete (VII, Fig. 64), die mit den gleichnamigen Polen (z. B. den

²⁰⁾ Hier, bei einem stabförmigen (Elektro-) Magnet, krümmen sich die Kraftlinien von dem einen Pol zum anderen, und der Magnet wird von den Kraftlinien gewissermaßen eingehüllt. Denken wir uns einen Schnitt durch die Mitte des Magnets (senkrecht zur Achse) geführt, so sind die weiter von der Achse abstehenden Kraftlinien die „äußeren“ (beim Blick auf die Polfläche erscheinen sie natürlich als die in der Mitte auftretenden).

Nordpolen) aneinanderstoßen, so liegen die Indifferenzpunkte bei i_1 und i_2 . Schiebe ich die Drahtrolle entlang diesem Doppelmagnet hin und her, so sehen Sie, daß der Induktionsstrom $= 0$ wird und die Richtung wechselt, wenn ein *Indifferenzpunkt* passiert wird. Diese Erfahrung wird uns später von Nutzen sein.

Ich stelle wieder den Elektromagnet ein. Ziehe ich nun vorsichtig den Eisenstab aus der Drahtlocke und schiebe ein dünnwandiges Glasrohr hinein (damit die Windungen sich nicht senken), so haben wir ein Solenoid, in welchem der inducierende galvanische Strom in derselben Richtung fließt, wie vorhin. Der nordsuchende Pol bleibt also links von Ihnen (Fig. 65). Wiederhole ich nun die Versuche, so ist der Ausschlag viel schwächer, als mit dem Eisenkern, und ich muß drei Chromsäure-Elemente vorspannen, um eine recht deutliche Wirkung zu erzielen, dann aber sehen wir, daß die Richtung des Induktionsstromes die entsprechend gleiche ist, wie vorhin. — Wir können also unsere Erfahrungen auch kürzer formulieren, wenn wir uns dessen erinnern, daß gleichgerichtete elektrische Ströme sich anziehen, entgegengesetzt gerichtete Ströme sich abstoßen.

Lenz'sche
Regel der
Induktions-
ströme.

Bei jeder Bewegung eines Stromes oder eines Magnets in der Nähe eines Drahttringes (oder umgekehrt) entsteht in diesem ein Induktionsstrom. Die Richtung des Induktionsstromes ist immer eine solche, daß der Induktionsstrom dem inducierenden Strom oder dem Magnet die entgegengesetzte Bewegung erteilen würde. (Lenz'sche Regel.) Wird z. B. ein Nordpol dem Drahttringe genähert, so ist der Induktionsstrom den Molekularströmen entgegengesetzt und sucht also den Magnet zurückzustößen. Wird der Nordpol entfernt, so ist der Induktionsstrom den Molekularströmen gleichgerichtet und sucht den Magnetpol heranzuziehen. Aus der Lenz'schen Regel ergibt sich: Bei der Bewegung (des Leiters im magnetischen Felde) muß ein Widerstand überwunden werden. Die hierbei geleistete Arbeit ist die Ursache der elektrischen Energie.

* * *

Wir haben bisher den einfachen Fall betrachtet, wo der Magnet stabförmig ist, also die Kraftlinien sich räum-

lich nach allen Seiten symmetrisch verteilen oder, mit anderen Worten, die Kraftlinien den Magnet regelmäßig umspinnen. Ferner benutzten wir als Leiterstück, in welchem die Induktionswirkung stattfindet, einen Drahring; und die Bewegung erfolgte parallel der Achse des Magnets, deren Verlängerung stets (nahezu) durch die Ringmitte ging.

Hier sehen Sie einen starken, aus mehreren flachen Stahlplatten (Lamellen) gebildeten Stabmagnet (A, Fig. 65) auf einem

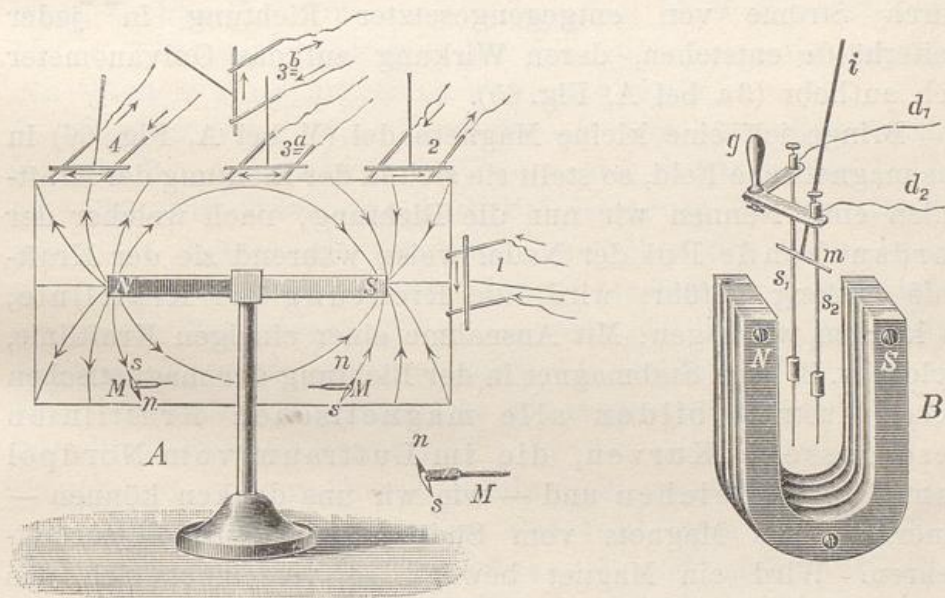


Fig. 65.

A Demonstration der Induktionsströme nach Pfaundler.

B Demonstration der Induktionsströme nach Szymański. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

[Das Leiterstück (bei A) wird nach dem freien Ende der Gleitdrähte (also nach vorn) bewegt.]

Ständer befestigt und mit einem weissen Karton versehen, auf welchen einige Kraftlinien gezeichnet sind.

Ein zweiter Magnet (B, Fig. 65) besteht ebenfalls aus Lamellen, hat aber Hufeisenform.

Als Stromleiterstück, auf welches die Induktion wirkt, dient ein Stück Messingdraht (m bei B, Fig. 65), welches an einem langen isolierenden Griff (i) befestigt ist und längs den messingnen Gleitschienen ($s_1 s_2$) bewegt wird, welche an einem einfachen Holzgestell (g) so eingesetzt sind, daß ihre gegenseitige Entfernung verändert werden kann. Von ihnen führen Drähte zum Galvanometer (Anh. 11).

Halte ich nun die Gleitschienen (wie Fig. 65, A u. B zeigt)

im magnetischen Felde und führe das Leiterstück (m) mit passender Geschwindigkeit so den Schienen entlang, daß ein guter Kontakt stattfindet, so sehen wir am Galvanometer einen Ausschlag, der umso größer ist, je mehr Kraftlinien geschnitten werden und ganz ausbleibt, wenn das bewegliche Leiterstück den Kraftlinien entlang geführt wird, also sie nicht durchschneidet oder wenn die beiden Hälften des Leiterstückes die Kraftlinien in umgekehrter Reihenfolge schneiden, wodurch Ströme von entgegengesetzter Richtung in jeder Leiterhälfte entstehen, deren Wirkung auf das Galvanometer sich aufhebt (3a bei A, Fig. 65).

Bringe ich eine kleine Magnetnadel (M bei A, Fig. 66) in das magnetische Feld, so stellt sie sich in der Richtung der Kraftlinien ein. Nennen wir nun die Richtung, nach welcher der nordsuchende Pol der Nadel weist, während sie der Kraftlinie entlang geführt wird, die Richtung der Kraftlinie, so können wir sagen: Mit Ausnahme einer einzigen Kraftlinie, welche z. B. beim Stabmagnet in der Richtung der magnetischen Achse Austritt, bilden alle magnetischen Kraftlinien geschlossene Kurven, die im Luftraum vom Nordpol zum Südpol reichen und — wie wir uns denken können — innerhalb des Magnets vom Südpol zum Nordpol zurückkehren. Wird ein Magnet bewegt, so verschiebt sich das ganze Kraftliniensystem, d. h. *das ganze magnetische Feld macht die Fortbewegung des Magnets mit!* In diesem Falle muß also auch in einem festen Leiter, welcher sich im magnetischen Felde befindet und die Kraftlinien durchschneidet, ein Induktionsstrom entstehen. Für die geradlinige Bewegung des Magnets haben wir dieses bereits gesehen (S. 129).

Faraday'sche
Regel.

Für die Richtung des Induktionsstroms im inducirten Leiter hat man folgende Gedächtnisregel aufgestellt: Man denke sich selbst schwimmend in der Richtung der Kraftlinie (s. o.), mit dem Gesicht nach der Bewegung des Leiters gewandt, dann ist der Induktionsstrom nach **rechts** gerichtet (Faraday). In Analogie zu der modifizierten Ampère'schen Schwimmregel für die Ablenkung der Magnetnadel (s. o. S. 55), ist auch für den Induktionsstrom eine andere Fassung der Regel (von A. Fleming) gegeben worden: Man halte den Zeigefinger, Mittelfinger und Daumen der

rechten Hand nahezu senkrecht zu einander und bringe den Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinie (sodafs die Fingerspitze dahin weist, wohin der Nordpol einer Magnethadel zeigen würde), den Daumen in die Richtung der beabsichtigten Bewegung des Leiters, dann zeigt der Mittelfinger die Richtung des Induktionsstromes im Leiter an.

Bedecken wir den Hufeisenmagnet (in aufrechter und in liegender Stellung) mit einem weissen Karton und erzeugen die magnetischen Kraftlinien, so sehen Sie, dafs diese zwischen beiden Polen am dichtesten, an der Aufsen- und der Innen- seite der Schenkel des Magnets am spärlichsten sich entwickeln.

Machen wir nun die Versuche mit dem beweglichen Leiter (Fig. 65 B) an verschiedenen Stellen des magnetischen Feldes, so finden wir, dafs der Induktionsstrom um so stärker wird, je dichter die Kraftlinien zwischen den Gleitschienen liegen, d. h. je mehr Kraftlinien vom Leiter geschnitten werden. Bei unserem Versuch (Fig. 64) sahen wir schon, dafs eine Vergröfserung der Polstärke des Elektromagnets, also eine Verstärkung der Intensität des magnetischen Feldes, ebenfalls die Induktion verstärkt.

Fassen wir nun unsere Erfahrungen zusammen:

Rückblick.

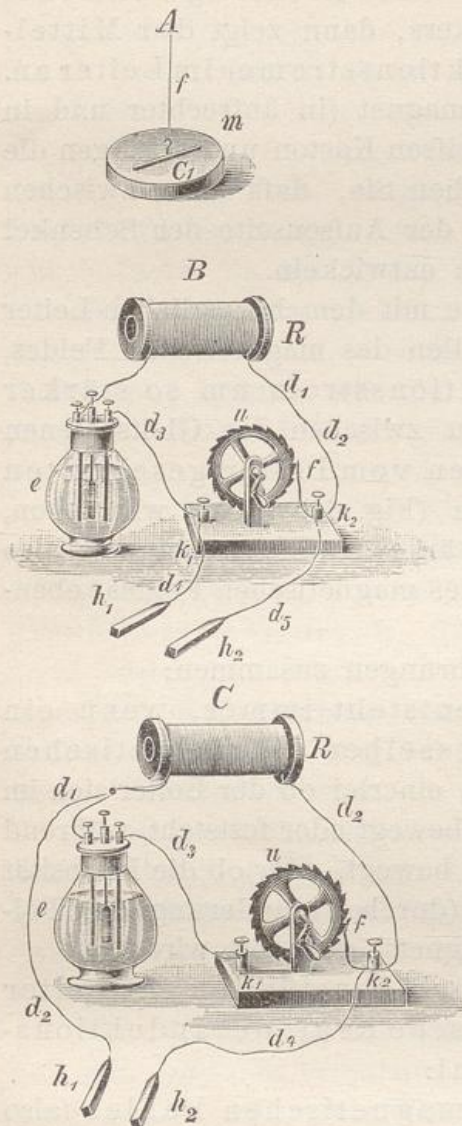
1. Ein Induktionsstrom entsteht immer, wenn ein Leiter oder ein Teil desselben die magnetischen Kraftlinien *durchschneidet*, einerlei ob der Leiter sich im festen magnetischen Felde bewegt oder feststeht, während das magnetische Feld sich bewegt, oder ob die Intensität des magnetischen Feldes (durch Veränderung der Polstärke z. B. des Elektromagnets) geändert wird.
2. Die unter sonst gleichen Umständen im Leiter erzeugte elektromotorische Kraft des Induktionsstromes ist proportional:
 - a) der Intensität des magnetischen Feldes (also der Polstärke),
 - b) der Länge des Leiters, auf den die Induktion wirkt (da mehr Kraftlinien geschnitten werden),
 - c) der Geschwindigkeit der Bewegung des Leiters (oder des magnetischen Feldes), weil dann in derselben Zeit ebenfalls mehr Kraftlinien geschnitten werden.

* * *

Nachdem wir nun die Grundzüge der magneto-elektrischen Induktion kennen gelernt haben, können wir daran gehen, uns mit den praktischen Anwendungen bekannt zu machen.

I. Eine Magnetnadel, die an einem feinen Faden hängt, schwingt lange hin und her, nachdem ich ihr einen kleinen Stoß gegeben. Nun halte ich sie aber dicht über einer dicken Kupferplatte, die vor Ihnen auf dem Tisch liegt (A, Fig. 66) und Sie sehen, wie die Nadel nach wenigen Schwingungen zur Ruhe kommt. Durch die Bewegung der Nadel, also des magnetischen Feldes, werden in der Kupferscheibe Induktionsströme hervorgerufen, welche (nach der Lenz'schen Regel S. 132) dem Magnet eine entgegengesetzte Bewegung zu geben suchen, also seine Schwingungen dämpfen. Jetzt werden Sie die Bedeutung der Kupferhülsen beim Multiplikator (Fig. 62) verstehen. Da dort sowohl der obere, als auch der untere Teil der astatischen Nadel von der Kupferhülse fast ganz umgeben ist, so ist die dämpfende Wirkung der Induktion so groß, daß die Nadel (fast) ohne zu schwingen sich einstellt (die Bewegung also nahezu aperiodisch wird).

II. Da schon eine einzelne Drahtwindung, durch welche ein elektrischer Strom fließt, eine magnetische Richtkraft hat (S. 46), also ein magnetisches Feld aufweist, so muß bei einer



Dämpfung der Galvanometer-nadel durch Induktionsströme.

Fig. 66.

A Induktion in einer Kupferscheibe.
 $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

B C Selbstinduktion in einer Drahtspirale
(Extrastrom). $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

Drahtspule (Solenoid) jede Windung in dem magnetischen Felde der benachbarten Windungen sich befinden, mithin wird jede Windung einer Drahtspule auf die andere inducierend wirken, während die Stromstärke sich ändert, z. B. beim Schließen und beim Öffnen des durchgehenden Stromes. — Eine Drahtrolle (B, Fig. 66), die über einen hohlen Holzcyylinder gewickelt ist und aus etwa 30 Windungen starken umspannten Kupferdrahtes besteht, ist mit einem Tauchelement (e) und einem Stromunterbrecher (u) verbunden. Dieser besteht aus einem kupfernen Zahnrade, dessen Zähne an einer Feder (f) schleifen. Durch eine an der Achse befindliche Kurbel kann das Zahnrad gedreht werden. Außerdem führen Drähte (d_1 d_2) zu zwei Handhaben aus Messingrohr, die ich in die Hand zu nehmen bitte. Sobald ich nun das Zahnrad drehe, erzittern Ihre Hände und zwar fühlen Sie um so empfindlichere Zuckungen, je schneller ich drehe, d. h. je rascher die Stromstöße auf einander folgen. Noch heftiger, ja schmerzhaft wird die Empfindung, wenn ich in den Hohlraum der Drahtspule (R) ein Bündel weicher Eisendrähte einschiebe. — Jetzt werde ich das Zahnrad ganz langsam drehen — —. Nun wird der Strom geschlossen! Sie spüren kaum etwas, und während der Strom des Elements durch Ihren Körper fließt, gar nichts; aber jetzt gleitet der Zahn von der Feder ab und der Strom wird geöffnet — Sie zucken zusammen! Da beim Stromschluß gewissermaßen ein Strom von Kraftlinien das magnetische Feld der Spule durchdringt und die Drahtwindungen schneidet [was gleichbedeutend mit einer Annäherung des Leiters an den Magnet ist (s. o. S. 129)], so muß nach dem Lenz'schen Gesetz ein Induktionsstrom entstehen, der dem galvanischen Strom entgegengesetzt gerichtet ist. Bei der Untersuchung des Stromes zucken — bildlich gesprochen — die Kraftlinien zurück (was einem Entfernen des Leiters entspricht); daher muß der Induktionsstrom (beim Öffnen) mit dem Hauptstrome die gleiche Richtung haben und seine physiologische Wirkung verstärken.

Extrastrom.

Wir können auch den Induktionsstrom für sich beobachten, wenn wir die Drähte so führen, daß beim Unterbrechen des Hauptstromes das Element ausgeschaltet ist. Eine solche Versuchsanordnung zeigt Ihnen C Fig. 66. Wenn Sie jetzt die

Handhaben fassen, so geht beim Öffnen nur der Induktionsstrom durch Ihren Körper. Die Wirkung ist kaum schwächer als vorhin. — Dieser Strom, welcher nur durch Selbstinduktion der Windungen eines Leiters auf einander entsteht, wurde von Faraday der „Extrastrom“ genannt²¹⁾.

Beim Schließen des Hauptstromes ist ihm der Extrastrom entgegengerichtet, beide schwächen sich gegenseitig, mithin kann der Hauptstrom immer nur allmählich zu seiner vollen Stärke anschwellen. Bei Unterbrechung des Hauptstromes tritt der Extrastrom in voller Stärke auf.

III. Noch kräftiger als der Extrastrom ist der Induktionsstrom in einer zweiten Drahtspule, welche die primäre umgiebt (A, Fig. 67, II), ohne mit ihr in Berührung zu kommen. Diese „sekundäre Spirale“ besteht aus vielen Windungen feinen umsponnenen Kupferdrahtes. Da dieselben Kraftlinien die einzelnen Windungen der sekundären Spirale durchsetzen, so kann im ganzen, d. h. in allen Windungen zusammen nur ein Induktionsstrom von bestimmter Stromstärke auftreten. In jeder Windung wird aber eine gewisse elektromotorische Kraft erzeugt. Da nun die Windungen hintereinander geschalteten einzelnen Drahttringen entsprechen, so wird der Induktionsstrom gewissermaßen in viele kleine Stromfäden zerlegt, die hintereinander geschaltet sind (wobei natürlich der Widerstand wächst). Bei einer sekundären Spirale von vielen Windungen findet also eine Umwandlung (Transformation) des galvanischen Stromes von verhältnismäßig großer Stromstärke und kleiner elektromotorischer

²¹⁾ Jede Drahtlocke, durch welche ein galvanischer Strom geschickt wird, zeigt magnetische Wirkungen und Selbstinduktion, wodurch störende Nebenwirkungen z. B. auf Galvanometer, oder in Bezug auf den Widerstand des betr. Drahtes entstehen können. Um diese Induktionswirkung (fast ganz) aufzuheben, werden bei Galvanometern die hin- und zurücklaufenden umsponnenen Drähte umeinander gewickelt (vergl. Fig. 37 S. 64) oder bei den Widerstandsdrähten (S. 91 Fußnote) die Drähte in der Mitte geknickt und mit der Mitte beginnend doppelt auf eine Spule gewickelt, wodurch der Strom in zwei dicht nebeneinander liegenden Leiterstücken eine entgegengesetzte Richtung hat, die Selbstinduktion also (fast ganz) aufgehoben wird.

Kraft in einen Induktionsstrom von geringer Stromstärke, aber sehr großer elektromotorischer Kraft statt, welcher bei größeren Induktions-Apparaten (B, Fig. 67) den Charakter des Funkenstromes einer Influenzmaschine annimmt, nur ergiebiger ist.

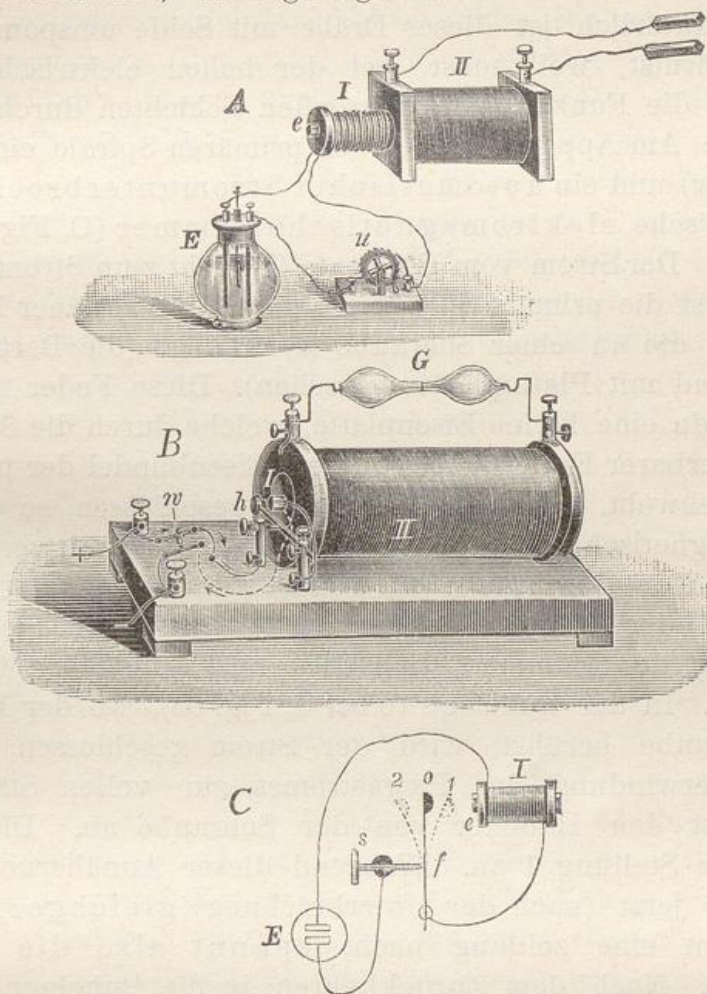


Fig. 67.

A Induktionsrolle. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.
 B Ruhmkorff'scher Funkeninduktor. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.
 C Wagner'scher Hammer.

Die Induktionsrolle (II bei A, Fig. 67) giebt schmerzhafte Schläge, wenn man die Handhaben gefaßt hält, während der Hauptstrom in der primären Spule (I) rasch geschlossen und geöffnet wird, besonders wenn sich im Hohlraume der letzteren ein Bündel weicher Eisendrähte befindet, wodurch die Intensität des magnetischen Feldes sehr verstärkt wird.

Rühmkorff's
Funken-
induktor.

Noch kräftiger ist die Wirkung beim Rühmkorff'schen Funkeninduktor (B, Fig. 67), dessen primäre Spirale aus etwa 60 Windungen starken Kupferdrahtes besteht, während der Draht der sekundären Spirale haarfein ist und eine Länge von etwa 10 Kilometern hat, also Tausende von Windungen bildet. Natürlich ist dieser Draht mit Seide umspunnen und noch gefirnist, weil sonst, bei der hohen elektrischen Potentialdifferenz, die Funken die isolierenden Schichten durchbrechen könnten. Am Apparat ist bei der primären Spirale ein Stromwender (w) und ein automatischer Stromunterbrecher, der Wagner'sche elektromagnetische Hammer (C, Fig. 67) angebracht. Der Strom vom Elemente (E) geht zum Stromwender, durchfließt die primäre Spirale (I), geht dann zu einer Messingfeder (f), die an einer Schraube (s) anliegt (die Berührungsstellen sind mit Platinplatten versehen). Diese Feder trägt am freien Ende eine kleine Eisenplatte, welche durch die Schraube in regulierbarer Entfernung von dem Eisenbündel der primären Spirale schwebt. Wird nun der Strom geschlossen, so wird das Eisen magnetisch, zieht die Eisenplatte an; dadurch verläßt die Feder die Kontaktschraube (s), wodurch der Strom unterbrochen wird und der Hammer wieder zurückfällt. Daß hierbei die Bewegung des Hammers sich dauernd erhält, hat folgende Ursachen. In der Ruhelage (o bei C, Fig. 68), wo der Hammer die Schraube berührt, wird der Strom geschlossen, wächst nach Überwindung des Extrastromes zur vollen Stärke an und reißt den Hammer von der Schraube ab. Die Feder nimmt die Stellung 1 an. Während dieser Annäherung wirkt noch der jetzt (nach der Unterbrechung) gleichgerichtete Extrastrom eine zeitlang nach, spannt also die Feder mehr an. Nach dem Zurückkehren in die Ruhelage (o), wo der Strom wieder geschlossen ist, wirkt der Extrastrom wieder dem primären entgegen, wodurch die Schwingung der Feder (in die Lage 2) weniger verlangsamt wird, als wenn der primäre Strom gleich in voller Stärke auftreten würde. Die Feder erhält dadurch einen kleinen Zuwachs an Kraft, der die Schwingungen erhält, ebenso wie der Anstoß des Zahnrades bei der Uhr den Reibungsverlust des Pendels ersetzt. [Solche elektromagnetische Stromunterbrecher werden u. a. bei den elektrischen Läutewerken (Klingeln) verwandt.]

Da der Extrastrom (der primären Spirale) beim Stromschluß den Hauptstrom schwächt und beim Unterbrechen des Stromes gewissermaßen nachklingt, so schwächt oder verzögert er den Induktionsstrom in der sekundären Spirale. Um nun den Extrastrom möglichst zu beseitigen, ist bei den größeren Induktionsapparaten in dem hohlen Fußgestell ein Kondensator angebracht, der aus Stanniolstreifen besteht, die durch Wachstaft oder besser durch Glimmerscheiben isoliert sind. Die paarigen und die unpaarigen Stanniolblätter sind unter sich und mit den Enden der primären Spirale verbunden. Beim Unterbrechen des Stromes ist also die primäre Spirale durch den Kondensator geschlossen, der den größten Teil des Extrastromes aufnimmt, was u. a. daraus hervorgeht, daß bei Anwendung eines Kondensators der Öffnungsfunke zwischen Kontaktschraube und Feder viel kleiner wird und die Feder bisweilen erst angestoßen werden muß, um in Vibration zu geraten.

Vermittelst dieses Wagner'schen Hammers können die Stromunterbrechungen so oft in der Sekunde erfolgen, daß das summende Geräusch des Hammers eine bestimmbare Tonhöhe annimmt. Die Schläge, welche dieser Induktionsapparat auszuteilen vermag, sind, wenn auch nicht lebensgefährlich, doch recht unangenehm, selbst schmerzhaft. Schraube ich an die Klemmen der sekundären Spirale Drähte, die mit Siegelackgriffen versehen sind, und nähere die Enden, so sehen Sie, wenn der Apparat in Thätigkeit gesetzt ist, Funken von mehreren Centimetern Länge (bei großen Rühmkorff'schen Induktionsapparaten hat man Funken von 40—50 cm Länge erhalten). Nun verbinde ich die Drähte mit einem Glasrohr, welches an den Enden mit eingeschmolzenen Platindrähten versehen und mit sehr stark verdünntem Gase gefüllt ist (Geißler'sche Röhre, G Fig. 68, B). Verdunkeln wir das Zimmer, so leuchtet die Röhre in einem milden Glanze und zeigt verschiedene Farben, die von der Natur des verdünnten Gases abhängen. Einige Teile der Röhre bestehen aus dem gelblichen Uranglas, welches in lebhaftem Grün erstrahlt. Noch prachtvoller erscheint eine Puluj'sche Röhre, wo die Verdünnung der Luft noch weiter getrieben ist, und eingeschmolzene Edelsteine in lebhaften Farben erglühen. Die Rubine (auch

unscheinbare Exemplare) strahlen ein herrliches rotes Licht aus, Diamanten meist grünes, Schwefelcalcium blauweisses u. s. w.

Transformator.

Wir hatten bei den Induktions-Apparaten den Hauptstrom durch die Spirale geschickt, welche wenige Windungen starken Kupferdrahtes hatte, sodaß wir in der sekundären Rolle hochgradige Induktionsströme von geringer Stromstärke erhielten. *Vertauschen wir beide Spiralen*, d. h. schicken wir den primären Strom durch die Rolle mit den vielen Windungen, so entsteht in der Rolle mit wenig Windungen ebenfalls ein Induktionsstrom, dessen elektromotorische Kraft entsprechend kleiner, dessen Stromstärke aber in demselben Verhältnis gröfser ist als die des primären Stroms. Wir sind also imstande, hochgradige Ströme in Ströme von geringerer elektromotorischer Kraft, aber gröfserer Stromstärke umzuwandeln (zu transformieren). Apparate dieser Art heissen Transformatoren. Dafs bei einem solchen Transformator die Isolierung der Windungen besonders gut sein mufs, ist ohne weiteres klar. In der Technik haben diese Apparate eine grofse Bedeutung erlangt.

* * *

Bei den Induktionsapparaten (und Transformatoren) entsteht der Induktionsstrom bei ruhendem Leiter (und ruhendem Elektromagnet) durch Intensitätsänderung des magnetischen Feldes, indem die Kraftlinien auftreten und verschwinden. Nun können wir aber auch durch Bewegung des magnetischen Feldes oder durch Bewegung des Leiters im ruhenden magnetischen Felde Induktionsströme erhalten (s. o. S. 129).

IV. Kaum ein Jahr nach Faraday's Entdeckung der magneto-elektrischen Induktion stellte Pixii (1832) die erste „magneto-elektrische Maschine“ her, bei welcher ein Hufeisen-Magnet vor den Schenkeln eines hufeisenförmigen Ankers rotierte, dessen Schenkel mit Drahtwindungen bewickelt waren. Bei allen späteren Apparaten liefs man den Eisenkern mit den Drahtspulen vor dem festen Hufeisen-Magnet rotieren, was — besonders bei gröfseren Magneten — weit bequemer ist.

Hier sehen Sie (Fig. 68, A) eine magneto-elektrische Maschine, wie sie von Stöhrer gebaut wurde.

Vor den Polflächen eines starken Hufeisen-Magnets, der aus 5 Stahllamellen besteht, rotiert ein hufeisenförmiger Anker aus Schmiedeeisen, dessen Schenkel mit Drahtrollen (R_1, R_2) versehen sind. Nähern sich die beiden Rollen den Polen des Magnets, so wird ein Induktionsstrom in jeder Rolle

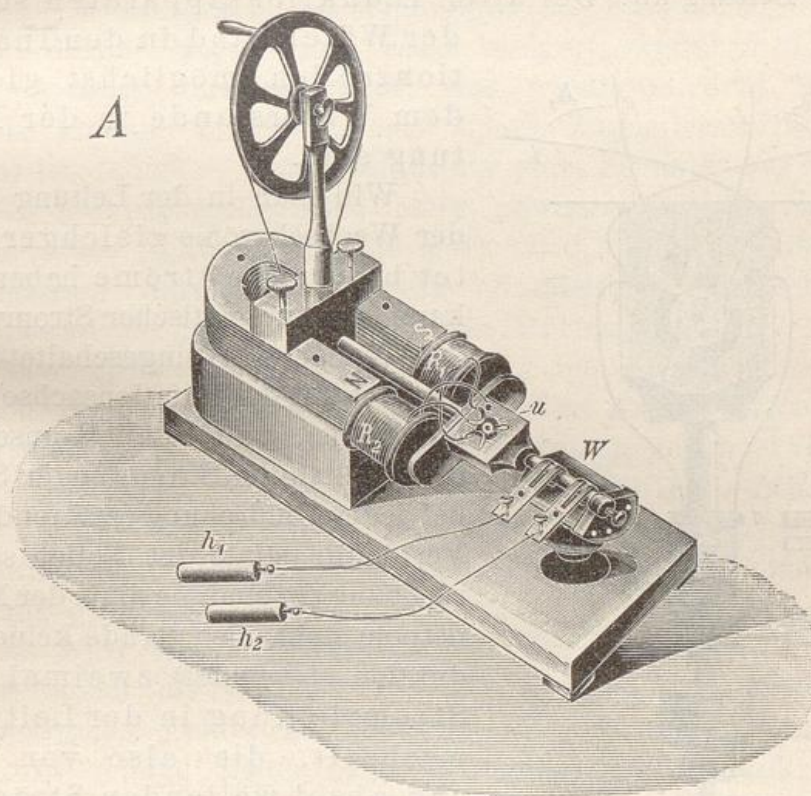


Fig. 68 A.

Magneto-elektrische Maschine nach Stöhrer. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

erzeugt, der natürlich die Richtung wechselt, wenn die Rollen die Indifferenzzone (d. h. die Ebene senkrecht zur Mitte der Verbindungslinie der Pole) passiert. Bei jeder Rotation des Ankers wechselt der Strom in beiden Rollen die Richtung zweimal. *Die magneto-elektrische Maschine liefert also einen Wechselstrom*, dessen Stärke mit der Rotationsgeschwindigkeit wächst (da in derselben Zeit mehr Kraftlinien geschnitten werden). Durch einen besonderen Umschalter (u) können die Induktionsströme beider Rollen entweder parallel oder hinter-

einander geschaltet werden. Nach dem Ohm'schen Gesetz ist im ersten Fall die elektromotorische Kraft dieselbe, der Widerstand halb so groß als bei einer einzigen Rolle, also die Stromstärke verdoppelt. Dagegen bei der Schaltung hintereinander ist die elektromotorische Kraft verdoppelt, ebenso der Widerstand (also viermal größer als bei paralleler Schaltung). Die Wahl der Schaltung hängt von dem Widerstande in der Leitung ab: Bei allen Induktionsapparaten sollte

der Widerstand in den Induktionsrollen möglichst gleich dem Widerstande in der Leitung sein.

Will man in der Leitung statt der Wechselströme gleichgerichtet bleibende Ströme haben, so kann ein automatischer Stromwender (*W*, nebenan) eingeschaltet werden, der mit der Rotationsachse verbunden ist, und ähnlich unserem schon bekannten Stromwender (S. 42) bei jeder Umdrehung (während die Verbindungslinie der Rollen senkrecht zur Verbindungslinie der Magnetpole steht, also gerade keine Induktion stattfindet) zweimal die Stromrichtung in der Leitung wechselt, die also von an- und abschwellenden Strömen von beständiger Richtung durchflossen wird, während die Maschine selbst nach wie vor Wechselströme liefert.

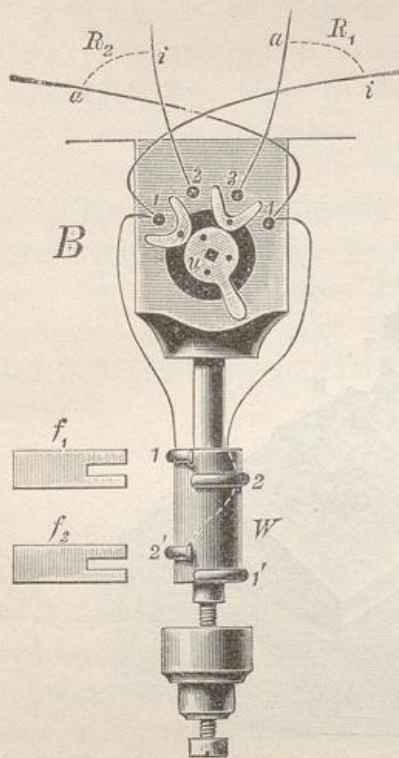


Fig. 68 B.

Stromwender der Magneto-elektrische
Maschine nach Stöhrer.
 $\frac{1}{5}$ natürl. Gröfse.

Wir wollen uns nicht weiter bei der magneto-elektrischen Maschine aufhalten, da sie von ihrer jüngeren Schwester, der dynamo-elektrischen Maschine (oft kurz Dynamomaschine genannt) längst überholt worden ist.

Die gewaltige Kraft der Elektromagnete legte den Gedanken nahe, sich ihrer statt der Stahlmagnete bei den elektromagnetischen Maschinen zu bedienen (Wilde in Manchester

1866). Den letzten entscheidenden Schritt, der zur Konstruktion der Dynamomaschine²²⁾ führte, that dann der bekannte gelehrte Elektriker Werner Siemens (1866), indem er zeigte, daß der in einem Elektromagnet nachbleibende (remanente) oder der durch den Erdmagnetismus inducierte Magnetismus des Elektromagnets genügt, um in den Windungen des rotierenden Ankers einen Induktionsstrom hervorzurufen, der in geeigneter Weise durch die Windungen des Elektromagnets geleitet, dessen Magnetismus rasch steigert, wodurch der Induktionsstrom verstärkt wird, was wiederum dem Magnet zugute kommt, bis die Grenze seiner Magnetisierbarkeit erreicht ist, sodaß — ohne Zuführung eines Stromes von außen — der Elektromagnet nach einer gewissen Anzahl von Rotationen des Ankers genügend stark wird, um einen kräftigen Zweigstrom durch die Leitung (Nutzleitung) zu schicken (Siemens' dynamo-elektrisches Princip).

Siemens'
Dynamo-
elektrisches
Princip.

Von größter Wichtigkeit ist es, bei diesen Maschinen sowohl dem Elektromagnet als auch dem Anker, welcher die Induktionsrollen trägt, eine solche Form zu geben, daß bei jeder Rotation möglichst viele Kraftlinien senkrecht durchschnitten werden. Sie sehen also, wie wichtig die Kenntnis des Verlaufs der magnetischen Kraftlinien zur Herstellung guter Dynamomaschinen ist.

Es wird also die Aufgabe der Technik sein, die Kraftlinien soviel als möglich in dem ausgenutzten Teile des magnetischen Feldes zu konzentrieren und andererseits von dem rotierenden Leiter möglichst vollständig (in senkrechter Richtung) schneiden zu lassen. Ersteres wird durch die sogenannten Polschuhe erreicht. Das sind passend geformte Stücke aus weichem Eisen, welche auf die Pole des Elektromagnets gesetzt werden (oder mit ihm aus einem Stück bestehen). Diese haben die Eigenschaft, an den einander zuge-

²²⁾ Hier soll das Wort „dynamo“ (dynamis = Kraft) eine Maschine bezeichnen, bei welcher lediglich durch die mechanische Kraft, welche zur Drehung der Induktionsrollen verwandt wird, ein Strom erzeugt wird. Das ist aber in gleicher Weise bei den magneto-elektrischen Maschinen der Fall. Die Unterscheidung von magneto-elektrischen und Dynamo-Maschinen ist also konventionell und hat nur eine praktische Bedeutung.

kehrten Seiten ein nahezu gleichförmiges magnetisches Feld mit dichter gelagerten Kraftlinien zu erzeugen (A, Fig. 69).

Ein Stück weiches Eisen, das wir in ein magnetisches Feld bringen (B Fig. 69) hat (wie Ihnen ein Vergleich von I und II zeigt) wiederum die Eigenschaft, die Kraftlinien auf sich zu konzentrieren, gewissermaßen aufzusaugen (daher die außerordentliche Verstärkung der Wirkung einer Induktionsspule durch Einführung eines Eisenkernes; s. o. S. 137 u. 139).

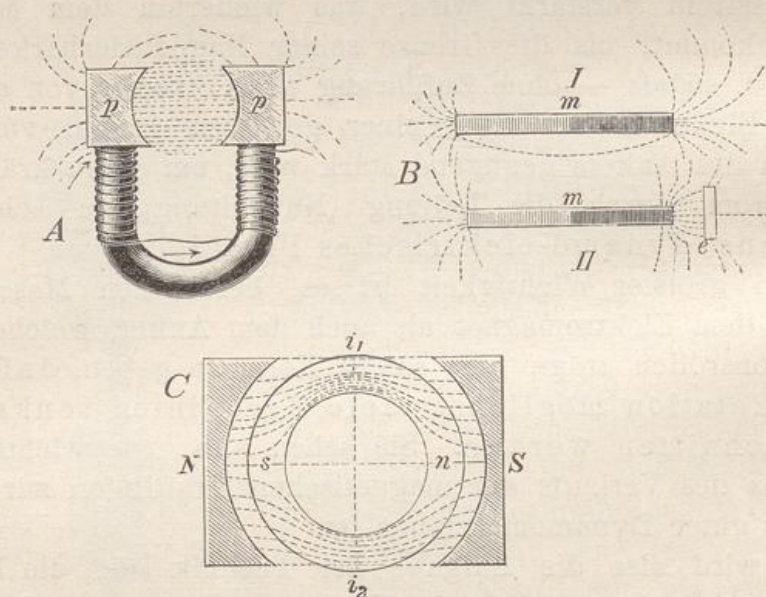


Fig. 69.

Verlauf der Kraftlinien (schematisch) A bei Polschuhen; B I bei einem freien Stabmagnet; B II bei Anwesenheit von weichem Eisen im magnetischen Felde; C Bei einem Ringe (Cylinder) aus weichem Eisen zwischen den Polschuhen, nach Stefan.

Ringanker.

Von besonderem Interesse ist nun der Fall, wo ein Ring aus weichem Eisen (oder ein Hohleylinder, dessen senkrechter Querschnitt also auch ein Ring ist) sich in dem magnetischen Felde zwischen den Polschuhen befindet (C, Fig. 69). Wie die Rechnungen (Stefan 1882) ergeben und die Versuche bestätigt haben, treten die Kraftlinien in den Eisenring (oder Cylinder) ein, aber — bei genügender Wandstärke — mit Ausnahme der mittelsten, senkrecht auffallenden, nicht in den Innenraum, sondern gehen durch die Eisenmasse des Ringes und treten an der gegenüberliegenden Seite wieder aus. Wird ein solcher Ring gedreht (um eine Achse, die in Fig. 69, C, durch die

Ringmitte geht und senkrecht zur Ringebene steht), so bleiben trotz der Rotation die inducierten magnetischen Pole des Ringes (n und s) räumlich in ihrer Lage, aber sie verschieben sich auf dem rotierenden Ringe.

Umwickeln wir nun den Eisenring lose mit einigen Windungen isolierten Kupferdrahtes, dessen Enden verlötet sind (A, Fig. 70), so können wir den Ring mit der Drahtrolle (um eine zur Papierfläche senkrechte Achse) drehen oder — was in Bezug auf die Induktionswirkung dasselbe ist — die Drahtrolle dem Ringe entlang verschieben. Denken Sie sich den Eisenring an den Polen zerschnitten, so würde das an der Wirkung nichts ändern, wir hätten dann aber, wie bei einem früheren Versuche (VII, Fig. 64), zwei (hier halbkreisförmige) Magnete, die mit den gleichnamigen Polen zusammenstoßen und deren Indifferenzpunkte bei i_1 und i_2 liegen. Nun wissen wir, daß in einem solchen Falle, wo eine Drahtrolle entlang einem Magnet mit mehreren Folgepunkten geführt wird (S. 132), der Induktionsstrom in dem Leiter $= 0$ wird und seine Richtung wechselt, sobald ein Indifferenzpunkt passiert wird.

Wenden wir das auf den gegebenen Fall an, so ergibt sich ohne weiteres, daß während die Drahtrolle von i_1 über s nach i_2 verschoben wird, ein an Intensität rasch anwachsender und (nach Passieren des Poles) wieder abnehmender Induktionsstrom entsteht, der bei i_2 (wie bei i_1) $= 0$ ist und seine Richtung wechselt, an Intensität zu- und wieder bis 0 (bei i_1) abnimmt. Das Maximum der Stromstärke liegt bei den Polen, weil die hier dicht eintretenden magnetischen Kraftlinien von dem Leiter senkrecht geschnitten werden, während bei den Indifferenzpunkten der Leiter parallel den Kraftlinien verschoben wird.

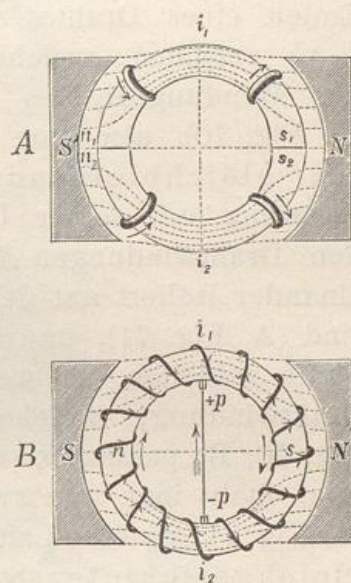


Fig. 70.
Schematische Skizze des
Pacinotti'schen Ringe.

Umwickeln wir jetzt den Eisenring mit isoliertem Kupferdraht, so daß ein geschlossener Drahtleiter gebildet wird (B, Fig. 70), und lassen wir jetzt den Eisenring mit seiner Umwicklung (in umgekehrter Richtung wie vorhin die Drahtrolle allein) rotieren, so werden in den Windungen Induktionsströme von der durch die kleinen Pfeilspitzen markierten Richtung erregt.

Von dem Punkte i_1 findet in beiden Ringhälften ein Fortströmen der Elektrizität bis zu dem gegenüberstehenden Punkte i_2 statt. Verbinden wir diese Punkte i_1 und i_2 , indem wir die Enden eines Drahtes mit Pinseln aus Kupferdraht (+ p und - p) versehen, welche an den hier blank gemachten Stellen des Windungsdrahtes schleifen, so wird von i_2 nach i_1 (B, Fig. 70), also von + p nach - p, ein elektrischer Strom von gleichbleibender Richtung erzeugt, solange der Eisenring mit seiner Umwicklung rotiert. Führt man von den Drahtwindungen Drähte zu Kupferstreifen, welche von einander isoliert auf der Drehungsachse des Ringes angebracht sind (A, Fig. 71), und läßt hier die Drahtbürsten an richtiger Stelle schleifen, so werden in jedem Augenblick Teile der Drahtwindung, welche gerade die Indifferenzzone (i_1 i_2 , Fig. 70, B) passieren, mit den Kontaktbürsten in Verbindung sein. Stellt man nun zwischen beiden Kontaktbürsten (b_1 und b_2 , Fig. 71, A) eine Leitung her, so wird diese *kontinuierlich* von gleichgerichteten Strömen durchflossen. Bei den wirklichen Gramme'schen Maschinen (s. w. u.) ist statt jeder einzelnen Windung des Ringankers eine Drahtspule zu denken. Die Wirkungsweise ist aber dieselbe.

Wir haben hierbei die Wirkung der inducierenden Magnetpole, der sogenannten Feldmagnete, auf die Drahtwindungen und die des erregten Ankerstromes (in den Windungen) selbst nicht weiter in Betracht gezogen. In Wirklichkeit ist die dem Feldmagnetpol gegenüberstehende äußere Seite des Eisenringes stark ungleichnamig, die abgewandte innere Ringseite aber schwach gleichnamig magnetisch, wodurch die Vorgänge komplizierter werden. Die Gesamtwirkung entspricht aber doch im wesentlichen unserer Darstellung. Da aber auch das weichste Eisen nicht momentan seinen Magnetismus verliert, so werden bei der Rotation die Pole des Eisenringes und

damit die Indifferenzpunkte in dem Sinne der Rotation verschoben. Die Größe dieser Verschiebung hängt von der Beschaffenheit des Eisens und von der Rotationsgeschwindigkeit ab, muß also in jedem Falle erst ermittelt werden. Daher ist für jede solche Maschine die Stellung der Kontaktbürsten auf den isolierten Metallstreifen der Achse, welche die Induktionsströme sammeln und daher Kollektor oder (hier fälschlich) Kommutator heißen, auszuprobieren.

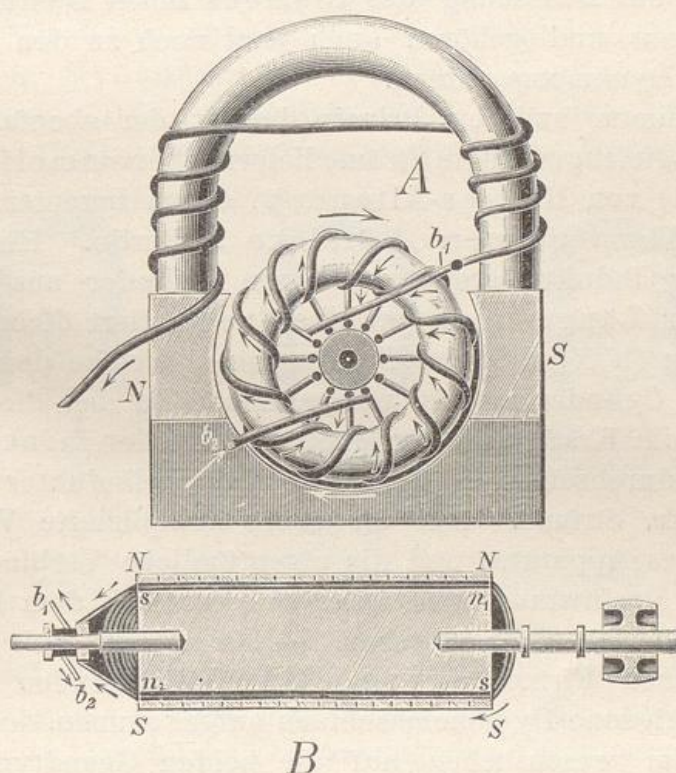


Fig. 71.

A Pacinotti-Gramme'scher Ring (Modell nach Weinhold). $\frac{1}{12}$ natürl. Größe.
 B v. Hefner-Alteneck'scher Trommelinduktor im Querschnitt.

Die erste magneto-elektrische Maschine, welche kontinuierliche und gleichgerichtete Induktionsströme lieferte, erfand Prof. Pacinotti in Pisa (1860), doch blieb dieser Apparat unbeachtet und geriet in Vergessenheit, bis der Belgier Gramme sie (1871) von neuem erfand und zugleich so verbesserte, daß sie leistungsfähig wurde und alle bis dahin konstruierten magneto-elektrischen Maschinen aus dem Felde schlug. Auch wandte er beim rotierenden Ringe statt eines

Geschichtliches

massiven eisernen Kernes ein Bündel dünner, von einander isolierter Eisendrähte an, da ein solches rascher magnetisiert und entmagnetisiert wird als ein massives Stück Eisen. Zugleich werden störende Induktionsströme innerhalb des Kernes der Induktionsrolle vermieden. Erst später wurde die Priorität Pacinotti's anerkannt, weshalb der wesentlichste Teil dieser Maschine, der rotierende umwickelte Eisenring, allgemein der Gramme'sche Ring genannt wird. Diese Maschinen wurden bald mit Benutzung des Siemens'schen Dynamoprincips gebaut und gehören auch jetzt noch zu den leistungsfähigsten Dynamomaschinen.

Auf einem anderen Princip beruht der ebenfalls kontinuierliche gleichgerichtete Ströme liefernde Trommelinduktor (B, Fig. 71) von Hefner-Alteneck, einem Ingenieur der bekannten Firma Siemens & Halske in Berlin. Hier ist der Draht der Induktionsrolle um einen Cylinder aus weichem Eisen der Länge nach gewickelt und rotiert dicht vor den Polschuhen (N N, S S) der Feldmagnete, welche den größten Teil des Cylindermantels umspannen. Da bei dieser Konstruktion die Kraftlinien den größten Teil der Induktionsrolle senkrecht durchsetzen, so liefert der Trommelinduktor ebenfalls sehr starke Ströme. Auf die recht komplizierte Wirkungsweise dieses Apparates und die eigentümliche Verbindung der einzelnen Drahtwindungen unter sich und mit dem Kollektor können wir hier nicht eingehen. — In neuerer Zeit sind von verschiedenen Firmen, je nach dem vorliegenden Zwecke, sehr verschiedene Dynamomaschinen aufgekommen, doch lassen sie sich im wesentlichen auf die beiden Grundtypen: den Gramme'schen Ring oder die Hefner-Alteneck'sche Trommel zurückführen.

Noch müssen wir die praktische Verwertung des Dynamo-princips, d. h. die Art und Weise, wie der Induktionsstrom durch die Umwickelungen der Feldmagnete geleitet wird, etwas beleuchten, da der Nutzeffekt der Maschine wesentlich davon abhängt.

I. Die Normal- oder Serienschaltung (I, Fig. 72), welche zuerst von Siemens (1866) angewandt wurde, leitet den Induktionsstrom durch die Drahtwindungen des Feldmagnets und weiter durch die Nutzleitung (BL), welche

also hintereinander geschaltet sind. Die Induktionsströme können hier überhaupt nur entstehen, wenn der Stromkreis durch die Nutzleitung geschlossen ist. Diese Schaltungsweise, welche bei geringem Widerstande der Leitung (BL) sehr starke Ströme liefert, hat den Übelstand, daß bei Vergrößerung des Widerstandes der Leitung die Stromstärke und damit die Kraft der Feldmagnete abnimmt, was wiederum eine weitere Schwächung des Induktionsstromes zur Folge hat. Außerdem tritt leicht ein Polwechsel ein, was bei gewissen Arbeiten, wie Galvanoplastik, höchst störend ist.

II. Die Nebenschlußschaltung (II, Fig. 72), welche Wheatstone (1867) vorschlug, leitet von den Bürsten des Kollektors (b_1 b_2) einen Zweigstrom als Nutzleitung ab.

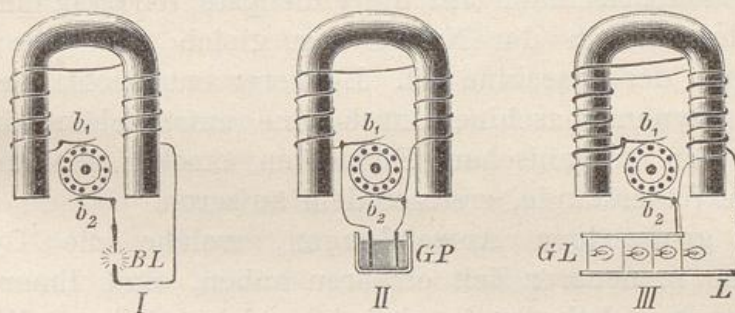


Fig. 72.

Verschiedene Schaltungsweise an der Dynamomaschine.
(I Normalschaltung; II Nebenschluß-Schaltung; III Schaltung mit gemischter Bewickelung.)

Wird dieser jetzt unterbrochen, so fließt der Gesamtstrom um die Feldmagnete. Auch bei Vermehrung des Leitungswiderstandes wird durch die Verstärkung des Feldmagnets (dessen Rollen-Widerstand unverändert geblieben, also im Verhältnis zu dem der Nutzleitung kleiner geworden ist, mithin einen größeren Stromteil erhält) die gesamte Stromstärke doch etwas größer, als es nach dem Ohm'schen Gesetz bei konstantem Strom, wie z. B. bei einer magnetelektrischen Maschine, sein würde. Diese Schaltungsweise ist, gegenüber der Normalschaltung, besonders dann vorteilhaft, wenn die Nutzleitung keinen konstanten Widerstand hat.

III. Die Compoundschaltung oder Schaltung mit gemischter Bewickelung, welche von Brush (1879) angewandt wurde. Der Feldmagnet hat hier eine doppelte Bewickelung.

Die eine, aus starkem Draht, steht — wie bei der Normal-schaltung — durch den Kollektor mit der Nutzleitung (L) in Verbindung, während die andere (aus feinem Draht) den Strom nur um den Elektromagnet führt. Bei Vergrößerung des Widerstandes der Nutzleitung fließt ein entsprechend größerer Stromteil durch die vielen Windungen des dünnen Drahtes, wodurch das magnetische Feld und damit die gesamte Stromstärke so bedeutend verstärkt wird, daß eine solche Maschine (mit Compound-Schaltung) bei Schwankungen im Widerstande der Nutzleitung innerhalb weiter Grenzen dennoch eine recht konstante elektrische Poldifferenz ²³⁾ aufweist, weshalb sie besonders geeignet für elektrische Beleuchtung mit Glühlampen ist, die nicht gleichzeitig in Thätigkeit gesetzt werden. — Bei allen Dynamomaschinen tritt die günstigste Wirkung ein, wenn der Widerstand in der Nutzleitung gleich dem der Drahtwindungen der Maschine ist. Letzterer entspricht, wenn wir uns die Dynamomaschine durch eine entsprechend kräftige Batterie von galvanischen Elementen ersetzt denken, dem inneren Widerstande, ersterer dem äußeren.

Die großartigen Anwendungen, welche die Dynamomaschinen in neuerer Zeit erfahren haben, sind Ihnen schon im allgemeinen bekannt, so daß ich mich auf kurze Hinweise beschränken kann.

Die elektrische Beleuchtung der Straßen und der Leuchttürme geschieht durch Bogenlampen, bei denen zwei harte Kohlenstäbe durch automatische Vorrichtungen beim Stromschluß in Berührung gebracht und nach dem Erglühen der Enden auseinander gezogen und in passender Entfernung gehalten werden. Da bei gleichgerichtetem Strom der positive Kohlenstab stärker verbraucht wird, so benutzt man hierzu eine härtere Kohle oder man verwendet besonders konstruierte Dynamomaschinen mit Wechselstrom. (Anh. 12).

²³⁾ In vielen Büchern wird statt des von uns benutzten Ausdrucks „elektrische Poldifferenz“ die kürzere Bezeichnung: „Polspannung“ (oder Klemmenspannung) gebraucht. Wir haben diese Bezeichnung vermieden, da sie zu Mißverständnissen führen kann, indem die elektrische „Spannung“ nicht gleichbedeutend mit „Potentialdifferenz“ der Pole ist, worauf es hier ankommt.

Für die durch elektrisches Bogenlicht erreichbare Lichtstärke ist keine obere Grenze angebbar, da in neuester Zeit immer mächtigere Lichtmassen erzeugt werden, welche (für eine bestimmte Entfernung der Lampe!) eine grössere Helligkeit entwickeln als das Sonnenlicht. Das Bogenlicht ist besonders reich an den chemisch wirksamen blauen und violetten Strahlen und kann daher zu photographischen Zwecken verwandt werden. — Zur Zimmerbeleuchtung werden die Glühlampen (s. o. S. 98) bevorzugt, da ihr Licht, wenn auch von gold-oranger Farbe, milder und dem Auge wohlthuender ist als das schneidend grelle Bogenlicht.

Die außerordentliche Hitze, welche im elektrischen Bogenlicht herrscht, ist die höchste, welche wir erzielen können. Man kann durch geeignete Vorrichtungen aneinandergelegte Metallstücke an der Berührungsstelle schmelzen und so elektrisch zusammenschweißen. Benardos in St. Petersburg wandte dieses Verfahren zuerst an. Auf den letzten elektrischen Ausstellungen in St. Petersburg waren u. a. große gesprungene Kirchenglocken ausgestellt, die auf diese Weise zusammengeschweißt und wieder klangfähig gemacht waren. — Auch die hartnäckigsten Sauerstoffverbindungen werden jetzt durch die Hitze des elektrischen Bogens gelöst und man stellt (vermitteltst des Siemens'schen elektrischen Ofens) aus vielverbreiteten Mineralien, wie Thonerde, gewisse Leichtmetalle her, die — wie z. B. das Aluminium — rein oder in Legierungen, als Bronze, vielfach Verwendung finden.

Verbindet man eine Dynamomaschine passend mit einer zweiten, dem „Induktor“, so wird — wenn die erste in Thätigkeit gesetzt wird — die „verkuppelte“ rotieren, wie wir es auch bei den Influenzmaschinen sahen (I. Bd. S. 103). Ist die Achse des Induktors mit einem Schwungrade versehen, so kann dieser „elektrische Motor“ mechanische Arbeit leisten, als wäre er von einer Dampfmaschine getrieben. Da hier die treibende Maschine mit dem Motor nicht unmittelbar verkuppelt zu sein braucht, sondern durch lange Leitungsdrähte verbunden sein kann, so ist die Möglichkeit gegeben, Naturkräfte, die sonst nutzlos verloren gehen, vorteilhaft auszunutzen. Stellt man z. B. an Wasserfällen Turbinen auf und lässt durch sie Dynamomaschinen treiben, so kann der Strom hunderte von

Elektrischer
Motor.

Kilometern weit nach Orten fortgeleitet werden, wo die Betriebskraft nötig ist. Bei dieser „elektrischen Arbeitsübertragung“ (in deutschen Werken oft ungenauer Weise „Kraftübertragung“ genannt) sind nun die Transformatoren (s. o. S. 142) von größter Wichtigkeit. Wie Sie schon (S. 84) wissen, wird der Widerstand einer langen Leitung umso leichter überwunden, je größer die elektromotorische Kraft des Stromes ist. Andererseits sind bei der praktischen Verwendung zu hochgradige Ströme sehr schwierig zu isolieren, so daß leicht Energieverluste eintreten und sogar Brandschäden verursacht werden; außerdem können bei zufälligen Berührungen der Leitungsdrähte lebensgefährliche elektrische Schläge erhalten werden (s. Anh. 12). Man erzeugt daher hochgradige Induktionsströme (von 30 bis 40000 Volt), welche man am Bestimmungsorte durch Transformatoren in Ströme von niederem Grade (200 bis 300 Volt), aber entsprechend größerer Stromstärke umwandelt, ehe man sie in die Nutzleitung überführt. — Nachdem auf der Ausstellung in Frankfurt a. M. (1891) zuerst im großen die elektrische Arbeitsübertragung (175 Kilometer, von Laufen am Neckar) sich als praktisch ausführbar gezeigt hat, werden schon jetzt in der Schweiz Fabriken auf diese Weise getrieben und in Nord-Amerika ganze Städte elektrisch beleuchtet. Da unsere Wälder immer mehr verschwinden und auch für unerschöpflich gehaltene Steinkohlengruben zu versiegen drohen, so ist die elektrische Arbeitsübertragung das Problem der Zukunft und wird bereits dem nahenden zwanzigsten Jahrhundert seinen Stempel aufdrücken.

* * *

Das Telephon.

Ehe wir das Kapitel über die Induktionsströme schließen, muß ich noch eine ihrer praktischen Verwendungen erwähnen, welche — obgleich eine der jüngsten Errungenschaften unserer Zeit — für das Verkehrswesen von kaum geringerer Bedeutung geworden ist, als der Telegraph — ich meine: das Telephon (Fernsprecher).

Bereits 1860 hatte Reis ein Telephon konstruiert, von der Thatsache ausgehend, daß eine stählerne Stricknadel, welche mit isoliertem Kupferdraht umwickelt ist, durch den in rhyth-

mischer Folge Stromstöße geschickt werden, einen klingenden Ton giebt, dessen Tonhöhe von der Anzahl der Stromstöße pro Sekunde abhängt. Da bei der Reis'schen Vorrichtung der elektrische Strom geschlossen und ganz geöffnet wurde, so konnte bei der Übertragung eines Klanges wohl die Tonhöhe, aber nicht die Klangfarbe wiedergegeben werden. Dieses, sowie knarrende, sehr störende Nebengeräusche, welche dieser Apparat hervorbrachte, ließen ihn als ein Kuriosum der physikalischen Kabinette erscheinen, das hin und wieder zur Belustigung der Zuhörer verwandt wurde.

Von genialer Einfachheit der Konstruktion und dabei viel besserer Wirkung ist das Telephon von Bell (1877), das die meisten von Ihnen, wenn auch in veränderter Form, durch eigene Anschauung kennen.

Um die Wirkungsweise dieses Apparates Ihnen leichter verständlich zu machen, habe ich einen Stabmagnet (M bei A, Fig. 74) mit einer Induktionsrolle versehen, deren Enden zu unserem Multiplikator (G) führen, dessen Nadel aperiodisch schwingt (Fig. 62, S. 125). An einem Stativ ist eine dünne Eisenplatte (e) befestigt. Während ich die Eisenplatte dem Magnet nähere, zeigt die Multiplikatornadel einen Ausschlag, geht aber sofort auf Null zurück, sobald die Eisenplatte stille steht. Beim Entfernen der Platte schlägt die Nadel nach der entgegengesetzten Seite aus, d. h. während der Annäherung einer Eisenplatte an den Pol eines Magnets wird in einer diesen umgebenden Drahtrolle ein Induktionsstrom hervorgerufen; desgleichen während des Entfernen der Eisenplatte, doch ist die Stromrichtung die umgekehrte. Steht die Eisenblechplatte dem Magnetpol recht nahe,

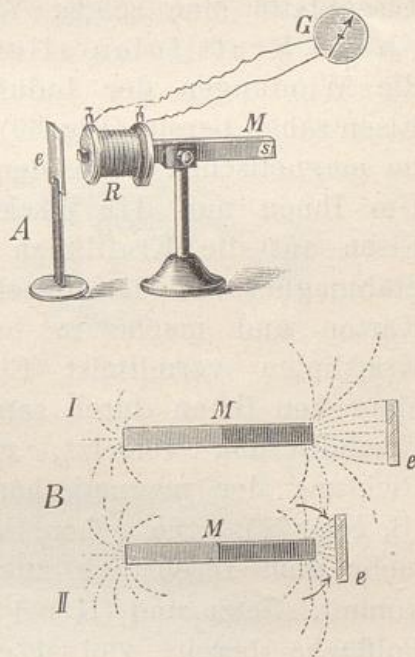


Fig. 73.

Wirkungsweise des Telephons.

 $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.

- A Entstehung von Induktionsströmen durch Annäherung einer Eisenplatte an den Kern einer Induktionsrolle.
B Verlauf der Kraftlinien eines Stabmagnets beim Näherrücken einer Eisenplatte.

so genügt schon eine leichte Verschiebung, um einen Induktionsstrom zu erzeugen.

Da, wie wir wissen, ein Induktionsstrom nur dann entsteht, wenn ein Leiter die magnetischen Kraftlinien (quer) durchschneidet, hier aber die Induktionsrolle und der Magnet feststehen, so muß die Annäherung (oder das Entfernen) der Eisenplatte eine solche Wirkung hervorgebracht haben, als ob die Kraftlinien allein sich verschoben und dadurch die Windungen der Induktionsrolle geschnitten hätten. Wir Eisen sahen bereits (Fig. 69), daß die Anwesenheit eines Stückes im magnetischen Felde den Verlauf der Kraftlinien beeinflusst. Um Ihnen nun die Wirkung der Bewegung des Stückes Eisen auf die Kraftlinien zu zeigen, lege ich einen starken Stabmagnet auf den Tisch, bedecke ihn mit einem Stück Karton und mache in bekannter Weise die magnetischen Kraftlinien vermittelst Eisenfeilspänen sichtbar. Während einer von Ihnen durch sanftes Klopfen den Karton in leichte Erschütterung versetzt, rücke ich ein Eisenstück in der Richtung der magnetischen Achse an den einen Pol heran (B, Fig. 73). Sie sehen, wie die Kraftlinien sich mehr und mehr dem Eisenstück zuwenden, je näher dieses dem Pole kommt. Jetzt sind (II bei B, Fig. 73) die Kraftlinien an der Polfläche bereits viel dichter beieinander als vorhin; das Umgekehrte ist beim Entfernen des Eisenstückes der Fall. Die Annäherung einer Eisenplatte an die Magnetpole ist also in der Wirkung gleichbedeutend mit einer Vergrößerung der Intensität des magnetischen Feldes (vor den Polflächen), oder — wie wir uns, der Anschaulichkeit halber, vorstellen können — einer Verschiebung der Kraftlinien nach der Polfläche zu (also in der Richtung der Pfeile bei II in B, Fig. 73). Damit ist die Bedingung für die Entstehung von Induktionsströmen gegeben (s. o. S. 129).

Um Ihnen die Wirkungsweise des Bell'schen Telephons anschaulich zu machen, benutze ich ein einfaches Telephonmodell (A, Fig. 74). Zwei auf Ständern befestigte starke Stabmagnete sind mit Drahtrollen versehen, die ich durch Drähte miteinander so verbinde, daß der in R_1 erzeugte Induktionsstrom in R_2 in gleichem Sinne fließt. Vor dem Pole des einen Magnets (M_2) schwebt an einer feinen elastischen Uhrfeder

eine kleine Scheibe aus dünnem Eisenblech (e), deren eine dem Pole zugekehrte Fläche mit Papier beklebt ist. Ich reguliere die Entfernung so, daß durch die magnetische Anziehung auf die Eisenscheibe die Feder etwas gespannt wird, ohne daß die Scheibe den Pol berührt. Nähere ich nun rasch eine weiche Eisenplatte (E) dem Magnet M_1 , so wird die Eisenscheibe e vom Magnet M_2 ebenfalls angezogen, doch ist die Bewegung fast unmerklich. Wenn ich aber in demselben

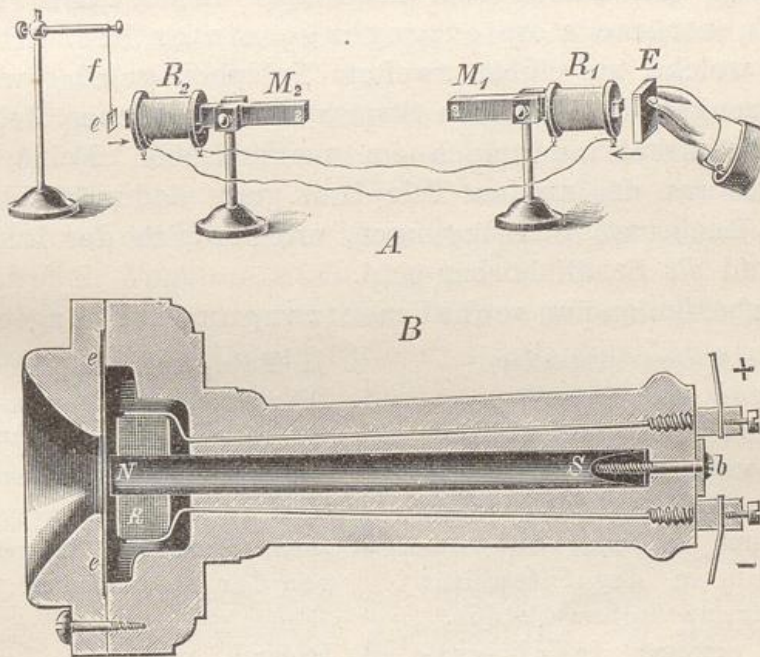


Fig. 74.

A Einfaches Telephon-Modell nach Bossehard. $\frac{1}{10}$ natürl. Gröfse.
B Bell'sches Telephon. $\frac{1}{2}$ natürl. Gröfse.

Tempo, in welchem die Feder schwingt, die Eisenscheibe E nähere und entferne, so gerät die Scheibe e bald in sichtbare Schwingungen. [Hätte ich die Verbindungsdrähte gekreuzt, oder bei M_2 den anderen Pol mit der Drahtrolle versehen, so wären die Schwingungen von e ebenfalls erfolgt, nur würde der Induktionsstrom die Intensität des magnetischen Feldes bei M_2 in entgegengesetztem Sinne beeinflussen, daher würde eine Annäherung von E an M_1 ein Entfernen der Scheibe e von M_2 bewirken. Bei Telephonen ist das nicht weiter störend.]

Bell's Telephon (B, Fig. 74) besteht nun aus einem

stark magnetisierten Stahlstabe, der in einem durch eine Schraube (f) regulierbaren, sehr kleinen Abstände vor einer runden vernickelten Platte aus dünnem Eisenblech (e) sich befindet. Diese am Rande festgeklemmte Platte wird vom Magnet angezogen und ist daher fortwährend in gespanntem Zustande. Wird nun — etwa durch Schallwellen — diese Eisenmembran in Schwingungen versetzt, so werden bei der Annäherung, sowie bei der darauf folgenden Entfernung der Platte vom Magnetpol in der Rolle (R) Induktionsströme von entgegengesetzter Richtung erzeugt, welche zu einem zweiten Telephon geleitet werden. Hier erzeugen die einzelnen Stromstöße in gleichen Zeitintervallen Intensitätsänderungen im magnetischen Felde. Die Eisenmembran des zweiten Telephons gerät dadurch in gleichzeitige (isochrone) Schwingungen, welche sich der Luft mitteilen und als Schall hörbar sind.

Hierbei finden nun sechs Umsetzungen der Energie statt:

- | | |
|--|---|
| I. Telephon (Absender). | II. Telephon (Empfänger). |
| 1. Die vor dem Telephon erzeugten Schallschwingungen versetzen die Eisenplatte in Mitschwingungen. | 4. Die ankommenden Stromstöße erzeugen Intensitätsschwankungen des magnetischen Feldes. |
| 2. Hierdurch entstehen Schwankungen in der Intensität des magnetischen Feldes. | 5. Diese veranlassen Schwingungen der Eisenplatte. |
| 3. Diese erzeugen Induktionsströme. | 6. Dadurch wird die Luft in Schwingungen versetzt. |

Vermittelst des Bell'schen Telephons können wir also ohne Anwendung einer Stromquelle den Schall nach einem anderen Orte übertragen oder, richtiger gesagt, dort wieder hervorrufen. Da nun hierbei die Induktionsströme erst durch die Schwingungen der Eisenmembran hervorgerufen werden müssen und noch Umsetzungen mechanischer Energie in magnetische und elektrische (und umgekehrt) stattfinden, wobei Energieverluste unvermeidlich sind, so können diese Telephone nur auf verhältnismäßig kurze Strecken die menschliche Stimme deutlich übertragen, doch genügen gut gebaute Apparate dieser Art (besonders die von Siemens in Berlin und Ader in Paris, welche hufeisenförmige Magnete mit Pol-

schuhen verwenden, die gleichzeitig auf die Platte wirken, wodurch diese in stärkere Schwingungen versetzt wird) noch für Entfernungen von 30–40 Kilometern, finden daher beim Telephonnetz von Städten vielfach Anwendung.

Um nun auf weitere Strecken telephonieren zu können, muß man suchen, die Intensitätsschwankungen des magnetischen Feldes zu vergrößern, ohne dabei in den Fehler des Reis'schen Apparats zu verfallen, wo ein Strom ganz unterbrochen wird. Es kommt vielmehr darauf an, statt der Energie der Schallwellen, die einer Stromquelle zu benutzen und ein Auf- und Abschwanken der Stromstärke durch die Schallschwingungen zu bewirken, damit nicht nur die Tonhöhe und die relative Stärke der einzelnen Töne, sondern auch nach Möglichkeit der durch die Klangfarbe der Töne bewirkte Charakter der Schwingungen beim zweiten Apparate wiedergegeben werde.

In überraschend einfacher Weise gelang dieses R. D. Das Mikrophon. Lüdtge in Berlin (Januar 1878) und fast gleichzeitig und unabhängig davon Hughes. Schaltet man in den Stromkreis eines galvanischen Elementes einige sich lose berührende Kohlenstücke ein, so bewirkt eine Zusammenpressung der Kohlenstücke eine Vergrößerung der Berührungsfläche und damit eine Verminderung des Widerstandes an dieser Stelle. Spannt man nun einen Kohlenstab (A, Fig. 75) zwischen zwei feststehende Kohlenstücke, zu welchen die Leitungsdrähte führen, so ein, daß der Druck reguliert werden kann, so werden geringe Erschütterungen des Resonanzbodens, auf welchem die Kohlenhalter befestigt sind, entsprechende Verminderungen oder Verstärkungen des Widerstandes bewirken, wodurch gleichzeitige Stromschwankungen erzeugt werden. Diese bewirken in dem eingeschalteten Telephon weit größere Intensitätsänderungen des magnetischen Feldes als die schwachen Induktionsströme eines Absende-Telephons. Der Ton wird hierbei so verstärkt, daß z. B. das Kriechen einer Fliege als lautes Kratzen hörbar wird. Vermittelt eines solchen Apparates können die leisesten Geräusche hörbar gemacht werden, deshalb nannte ihn Hughes — nach Analogie zum Mikroskop, das die Welt des Kleinen sichtbar macht — ein Mikrophon (Feinhörer).

Noch wirksamer wird, besonders bei Übermittlungen des Schalles auf weitere Entfernungen, die gleichzeitige Verwendung eines Induktionsapparates (vgl. Fig. 67 A, S. 139). Leitet man den Strom vom Mikrophon (M bei B, Fig. 75) zu der primären Rolle (I) von dort zum Element (E) zurück, so werden die durch das Mikrophon bewirkten Stromschwankungen in der aus vielen Windungen bestehenden sekundären Rolle (II) aus vielen Windungen bestehenden sekundären Rolle (II)

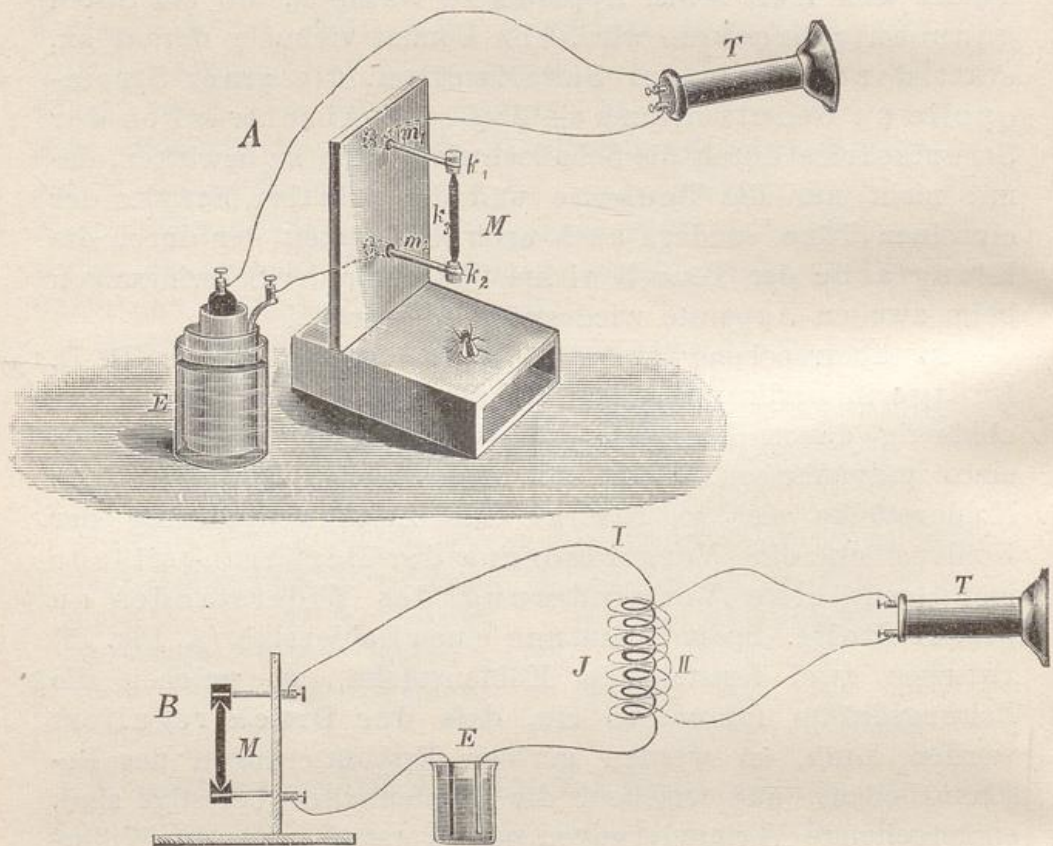


Fig. 75.

A Mikrophon. $\frac{1}{8}$ natürl. Gröfse.
B Telephon (T) mit Mikrophon (M) und Induktionsrolle (J).

hochgradige Induktionsströme erzeugt, die noch auf weite Entfernungen energisch auf das mit ihr verbundene Telephon (T) wirken. Auf diese Weise ist es möglich geworden, entlegene Orte, wie New-York und Chicago, telephonisch zu verbinden; selbst das Meer bietet keine unüberwindliche Schranke mehr. Täglich zieht sich das Telephonnetz enger, das die Nachbarstädte, ja Nachbarstaaten verbindet und so ist

das Telephon ein wichtiger Faktor für das Verkehrsleben geworden, da es seinen älteren Bruder, den Telegraphen, vortrefflich ergänzt, indem es die Stimme des Sprechenden zu erkennen gestattet!

* * *

Schluß.

Gar lange habe ich heute Ihre Aufmerksamkeit in Anspruch genommen, und dennoch konnte ich nur das Wichtigste kurz berühren, da ein näheres Eingehen die uns gesteckten Grenzen überschritten hätte.

Mehrfach haben wir auf unseren Wanderungen unsere Zuflucht zu Hypothesen nehmen müssen, um Zusammenhang in die beobachteten Erscheinungen zu bringen. Es wird vielleicht nicht uninteressant sein, jetzt, am Schluß, einen Rückblick auf die Wandlungen der physikalischen Hypothesen zu werfen und dann einen Blick in die Richtung zu thun, wohin die Forscher der Jetztzeit vorzudringen suchen²⁴⁾.

Oft kann man, auch in Büchern, der Behauptung begegnen, Aufgabe der Physik als Wissenschaft sei: die beobachteten Erscheinungen zu erklären! Was heißt aber überhaupt physikalische Vorgänge erklären? Offenbar nichts anderes, als uns noch unbekannte Vorgänge auf bekannte zurückführen. Welches aber die „bekannten“ sind, hängt von dem zufälligen historischen Entwicklungsgange der Physik ab. Alle Erklärungsversuche physikalischer Vorgänge tragen daher den Stempel des Zufälligen an sich und sind mit der Zeit Umwandlungen unterworfen. Nicht die Erklärung der physikalischen Erscheinungen, sondern der Nachweis ihres Zusammenhanges ist von bleiben-

²⁴⁾ Hierbei folgt der Verfasser im wesentlichen dem Gedankengange, den Prof. Dr. O. Chwolson in einer kleinen, fesselnd geschriebenen (russischen) Schrift „Die Hertz'schen Versuche“ eingeschlagen hat. (Sonder-Abdruck aus der Zeitschrift „Elektricität“ 1890.)

dem Wert und fördert unsere Naturerkenntnis. Die Aufgabe der Physik ist es demnach: den Zusammenhang der beobachteten Erscheinungen aufzudecken.

Noch zu Anfang dieses Jahrhunderts nahm man allgemein für die Wärme, das Licht, den Magnetismus und die Elektrizität unter sich verschiedene Stoffe (Fluida) an, die den Gesetzen der Schwere nicht unterworfen wären und daher gewichtslose Stoffe (Imponderabilien) hießen. Die Physik zerfiel demnach in die Lehre von den Ponderabilien (Mechanik fester, flüssiger und gasförmiger Körper) und in die Lehre von den Imponderabilien, deren vier (oder sechs) angenommen wurden, nämlich der Wärmestoff, Lichtstoff, magnetischer Stoff und Elektrizitätsstoff (wobei die beiden letzteren von den Dualisten noch in je zwei Stoffe mit entgegengesetzten Eigenschaften geschieden wurden). Dabei fand keinerlei Zusammenhang zwischen den einzelnen Gebieten statt. Als nun z. B. die Wirkungen des galvanischen Stromes auf die Magnetnadel einen unerwarteten Zusammenhang zwischen den bis dahin streng geschiedenen Gebieten des Magnetismus und der Elektrizität zeigten, da fiel die Schranke zwischen beiden und die Annahme eines besonderen imponderabilen Stoffes für den Magnetismus erschien überflüssig und wurde aufgegeben.

Das war ein wichtiger Moment in der Entwicklungsgeschichte der Physik, denn mit ihm trat die Naturerkenntnis in eine neue Phase. Ähnlich, wenn auch nicht so hervortretend, weil allmählich vorbereitet, wirkte die spektralanalytische Forschung, indem sie nachwies, daß die Wärmestrahlen und die Lichtstrahlen (so wie die gleichfalls angenommenen „chemisch wirksamen“ Strahlen) nicht an sich verschieden seien, sondern daß es von der Natur der Körper, welche getroffen werden, abhängt, ob der Strahl eine Wärme-, Licht- oder chemische Wirkung äußert. Man nahm nun an, daß Licht- und Wärmestrahlen Schwingungsbewegungen eines einzigen, das Weltall durchdringenden imponderabilen Stoffes, des Lichtäthers sei; damit war auch der „Wärmestoff“ beseitigt. So blieben denn bis in die neueste Zeit noch zwei von einander verschiedene Imponderabilien übrig: der Lichtäther als Träger der Licht- und Wärmeerscheinungen

und der gänzlich mysteriöse, unfafsbare Träger der magnetischen und elektrischen Erscheinungen.

Die Gelehrten nahmen bisher an, daß die Erscheinungen der Influenz und Induktion unmittelbare Fernwirkungen seien, bei denen das zwischenliegende „isolierende“ Medium (Dielektrikum) eine passive Rolle spiele, sodaß alle elektrischen Vorgänge sich auf die in (oder auf) dem Leiter abspielenden beschränken. Nur Faraday konnte keine unmittelbare Fernwirkung anerkennen und hielt das einen elektrischen Leiter umgebende Dielektrikum für den Hauptträger der dynamischen (kinetischen) Wirkungen. Nach seiner Annahme hätten die magnetischen und elektrischen Kraftlinien (welche die Richtung der jeweilig wirkenden Kräfte markieren) eine reale Existenz. Er wies am Kondensator nach, daß die Natur des Dielektrikums die Kapazität des Kondensators wesentlich beeinflusst, daß z. B. der luftleere Raum ebenfalls als Dielektrikum wirkt, und daß der Ersatz der Luft durch ein anderes Dielektrikum z. B. Schwefel oder Glas u. a. die Kapazität des Kondensators in einem bestimmten Verhältnis vergrößert (I. Bd. S. 79). Hieraus schloß er, daß die magnetischen und elektrischen dynamischen Wirkungen sich in dem umgebenden Dielektrikum selbst abspielen, und daß also in diesem und nicht im Leiter sich diejenigen Zustandsänderungen vollzögen, welche wir als elektrische Fernwirkungen bezeichnen. Auch nahm Faraday an, daß diese Zustandsänderungen sich mittelbar, also von Punkt zu Punkt im Dielektrikum fortpflanzen. Hieraus folgt, daß der eigentliche Träger der magneto-electrischen Wirkungen ein den ganzen Weltenraum durchdringendes Medium sein müsse, und daß die Wirkungen selbst im Dielektrikum Zeit brauchen, um sich von einem Punkte des Raumes zu dem anderen auszubreiten. Ja, es ist denkbar, daß diese elektrischen Wirkungen im Raume noch nachdauern, wenn die erregende Kraft am Ausgangspunkt schon verschwunden, wie ein Fixstern schon erloschen sein kann, während wir ihn noch am Himmel sehen, weil sein Licht schon Jahre lang unterwegs gewesen ist, ehe es unser Auge trifft. — Es ergab sich dann mit fast zwingender Notwendigkeit die Annahme, daß der Weltäther oder Lichtäther zugleich

Träger der magnetischen und elektrischen Erscheinungen sei. Neuere Forschungen haben dieses nun im hohen Grade wahrscheinlich gemacht. Faraday, wohl der größte Experimentator aller Zeiten, besaß nicht das Rüstzeug der höheren Mathematik. Dagegen hat sein Schüler Clark Maxwell auf mathematischer Grundlage eine elektro-magnetische Theorie des Lichtes aufgestellt, welche die magnetischen, elektrischen und optischen Erscheinungen als gemeinsame Bewegungserscheinungen des Weltäthers auffaßt. Ist diese Theorie richtig, so müssen magneto-elektrische „Schwingungen“ herstellbar sein, welche den Gesetzen der Optik: der Reflexion und der Brechung, gehorchen! Der experimentelle Nachweis gelang weder Faraday noch Maxwell und wurde erst in den letzten Jahren von einem jungen, kürzlich (am 1. Januar 1894) verstorbenen deutschen Gelehrten, Prof. Heinrich Hertz, geführt, dessen „Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft“ (1887—1893) die Physiker aller Länder auf das lebhafteste interessierten und den Entdecker mit einem Schlage in die erste Reihe der Forscher aller Zeiten stellten.

Es kann nicht meine Aufgabe sein, Ihnen die komplizierten Versuche dieses genialen Gelehrten, der die Experimentierkunst eines Faraday mit der mathematischen Ausbildung Maxwell's vereinigte, zu beschreiben, besonders da die Untersuchungen noch lange nicht abgeschlossen sind. Nur auf eine der Schwierigkeiten will ich noch hinweisen, welche zu überwinden war, und kurz einiger Resultate erwähnen.

Der Lichtäther hat, wie jedes vollkommen elastische Medium, die Eigenschaft: die durch periodische Stöße an einer Stelle erfolgenden Erschütterungen (Perturbationen) mit einer konstanten Geschwindigkeit fortzupflanzen, welche ganz unabhängig von der Anzahl der in der Zeiteinheit erfolgenden Stöße ist. Bei der Wellenbewegung des Lichtes haben die einzelnen Ätherteilchen eine pendelartig schwingende Bewegung, während die Fortpflanzung im Raume in senkrechter Richtung zur Schwingungsebene der einzelnen Teilchen erfolgt (transversale Schwingungen). Die Strecke, um welche die Bewegung im Raum vorrückt, während ein Teilchen seine Schwingung hin und her (um seine Ruhelage) vollendet, heißt eine Wellenlänge. Da, wie erwähnt, die Fortpflanzungs-

geschwindigkeit der Wellen eine konstante ist, so werden die Wellen um so länger sein, je langsamer die periodischen Stöße, welche sie erregten, auf einander folgen. — Welcher Art nun die Perturbationen des Äthers sind, welche (nach der Maxwell'schen Theorie) die magneto-elektrischen Erscheinungen bedingen (ob transversale Wellen, wie die des Lichtes, ob wirbelartige — —), wissen wir nicht, nur ergibt die Rechnung, daß die „elektrischen Perturbationen“ des Äthers etwa dieselbe Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben müssen, wie die Lichtstrahlen, d. h. etwa 300 000 Kilometer oder 300 Millionen Meter in der Sekunde. Unter dieser Voraussetzung müßten elektrische Wellen von 10 Meter Länge, falls sie existieren, (längere lassen sich in geschlossenen Räumen kaum beobachten) immerhin $300\,000\,000 / 10 = 30$ Millionen Schwingungen in der Sekunde vollführen. Um aber bequemere, in jedem physikalischen Kabinett zu beobachtende Wellen von 3 Meter Länge zu erzeugen, müßten die erzeugenden Stöße 100 Millionen mal in 1 Sekunde auf einander folgen.

Nach vielen vergeblichen Versuchen gelang es Hertz, durch eine sinnreiche Vorrichtung, die er an dem Rühmkorff'schen Funkeninduktor anbrachte, elektrische Entladungen von genügend schneller Aufeinanderfolge zu erhalten, um mit ihrer Hilfe stehende „elektrische Wellen“ in der Luft zu erzeugen, deren Wellenlänge gemessen werden konnte. Es ergab sich auch, daß die „elektrischen Wellen“ (wie wir die ihrer Natur nach unbekannten Perturbationen nennen wollen) sich in einem gleichförmigen Dielektrikum geradlinig fortpflanzen, dagegen wenn sie ein anderes Dielektrikum treffen, gebrochen werden und zwar nach den gleichen Gesetzen, wie die Lichtstrahlen. Überraschend für den ersten Augenblick, aber ebenfalls der Maxwell'schen Theorie entsprechend, war die Beobachtung, daß die Leiter (Metalle) die elektrischen Schwingungen nicht fortzuleiten vermögen, sondern reflektieren.

So wurden denn durch die Hertz'schen Versuche die Voraussetzungen der auf Faraday's Anschauung begründeten Maxwell'schen elektromagnetischen Lichttheorie bestätigt. Jetzt — etwa ein Jahrhundert nach Entdeckung der galvanischen Elektrizität. — fällt vor unseren Augen die Schranke, welche die optischen Erscheinungen von den magnetisch-

elektrischen schied. Noch ist hierbei vieles zu erforschen übrig, aber durch die grundlegenden Arbeiten von Faraday, Maxwell und Hertz ist die Physik in eine neue Phase ihrer Entwicklung getreten.

* * *

So haben wir denn unsere Wanderungen beendet. Nur einführen in die Elektrizitätslehre konnte ich Sie. Wenn Sie aber durch das, was Sie jetzt gesehen und erfahren haben, angeregt würden, sich weiter auf diesem Gebiete umzusehen, so wäre mir das der schönste Lohn!

A n h a n g.

(Ergänzungen und praktische Winke.)

1. Durch Anwendung sehr starker Elektromagnete gelang s. 1.
es Faraday (1845) nachzuweisen, daß alle Körper magnetische
Eigenschaften zeigen, aber nicht in gleicher Weise. Während
nämlich Eisen, Nickel, Kobalt u. e. a. von beiden Magnetpolen
angezogen werden, ist bei anderen Körpern, wie Antimon,
Wismuth, Zink und den meisten übrigen, das Umgekehrte der
Fall, d. h. sie werden von beiden Magnetpolen abgestoßen.
Die erste Gruppe von Körpern, deren typischer Vertreter das
Eisen ist, nannte Faraday paramagnetisch, die andere
diamagnetisch. Die Verbindungslinie der Pole eines Magnets
heißt die magnetische Achse, eine in ihrer Mitte senkrecht
gezogene Ebene der Aequator. Hängt man nun ein para-
magnetisches Stäbchen zwischen die Polschuhe eines starken
Elektromagnets, so stellt es sich in Richtung der magnetischen
Achse (axial), d. h. den magnetischen Kraftlinien parallel. Ein
diamagnetisches Stäbchen dagegen stellt sich zur magnetischen
Achse senkrecht (äquatorial), d. h. senkrecht zu den Kraft-
linien. Weber erklärte dieses durch die Annahme, daß in
den diamagnetischen Körpern durch die Einwirkung der Mag-
nete molekulare Ströme von entgegengesetzter Richtung
induciert würden, was auch bei dielektrischen Körpern statt-
finden könne; und in der That erweisen sich Glas und andere
Nichtleiter als stark diamagnetisch.

2. Der sogenannte „Volta'sche Fundamentalversuch“ s. 30.
besteht in dem Nachweise, daß zwei Platten aus verschie-
denen Metallen, die an isolierenden Handgriffen mit den frisch
gereinigten Flächen zur Berührung gebracht und (in möglichst
paralleler Haltung) wieder von einander entfernt werden, eine

elektrische Niveaudifferenz (Potentialdifferenz) zeigen, welche nur von der Natur der verwandten Metalle, aber nicht von der Gröfse der Berührungsfläche abhängig ist. Die Ursache dieser „durch blofse Berührung“ entstandenen Elektrisierung der beiden verschiedenen Metallplatten nannte Volta die elektromotorische Kraft (Kontakttheorie). Bei Anwendung einer Zink- und einer Kupferplatte zeigt das Zink + E, das Kupfer — E (also umgekehrt, wie beim gleichzeitigen Eintauchen in angesäuertes Wasser, an den herausragenden Enden, oder direkt so wie die Metallteile innerhalb der Flüssigkeit). Ähnlich, wie die festen Körper in Bezug auf ihr elektrisches Verhalten beim Reiben (I. Bd. S. 13), lassen sich auch die Metalle und Kohle so in eine Spannungsreihe ordnen, dafs jedes Metall durch Berührung mit dem Folgenden elektropositiv geladen wird.

Volta's Spannungsreihe:

+	Zink	Blei	Zinn	Eisen	Kupfer	Silber	Gold	Kohle	Graphit	Braunstein	—
---	------	------	------	-------	--------	--------	------	-------	---------	------------	---

Hierbei findet folgendes von Volta gefundene Gesetz statt: Die elektromotorische Kraft zwischen zwei beliebigen Gliedern der Reihe ist gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte der zwischenliegenden Kombinationen, z. B. Zink / Kupfer = Zink / Zinn + Zinn / Eisen + Eisen / Kupfer, oder auch: Zink / Kohle + Kohle / Kupfer = Zink / Kupfer u. s. w. Da sich die flüssigen Leiter dem Gesetz der Spannungsreihe nicht fügen, so nannte Volta die Metalle (und die Kohle) „Elektromotoren erster Klasse“, und die flüssigen Leiter „Elektromotoren zweiter Klasse“. Diese Unterscheidung ist umso mehr berechtigt, als die Metalle vom elektrischen Strom nur erwärmt werden, während bei den Elektromotoren der zweiten Klasse stets zugleich eine chemische Zersetzung (die wir für die Ursache der elektromotorischen Kraft annahmen, s. o. S. 29) stattfindet. Flüssigkeiten, welche nicht durch den elektrischen Strom zersetzt werden, wie Vaselineöl, Alkohol und sogar chemisch reines Wasser, leiten den Strom nicht!

3. Bei den Chromsäure-Elementen wird meist eine Lösung s. 31.
von doppeltchromsaurem Kali benutzt, welche durch das Aus-
scheiden von Chromalaun sehr lästig ist. Weit zweckmäßiger
ist die Anwendung von doppeltchromsaurem Natrium, da
die Alaunabscheidung fast ganz fortfällt. Folgende Mischung, die
Sie sich am besten vom Apotheker herstellen lassen, hat sich
gut bewährt: 100 Gewichtsteile Wasser, 25 Teile rohe Schwefel-
säure, 12 Teile Natriumbichromat. Der fertigen Lösung kann
man etwas schwefelsaures Quecksilber (oder Quecksilberoxyd)
zusetzen (3—4 Gramm auf 1 Liter Flüssigkeit), wodurch die
Zinkplatte stets amalgamiert und blank erhalten wird.

4. Lametta heißen die flachen, aus gewalztem Metall s. 43, 51, 98.
gepressten Fäden, welche u. a. zur Verzierung der Weihnachts-
bäume verwandt werden. Die gewellte Sorte ist vorzuziehen. Zu
dem sehr anschaulichen Versuch (Fig. 34, S. 57) kann man auch
je 2 oder 3 Lamettafäden zugleich einspannen. In Ermange-
lung solcher ist ein schmaler Streifen aus recht dünner Zinn-
folie (Stanniol) von 2—3 mm Breite und 50 cm Länge recht
gut brauchbar.

5. In dem Werke: „Essay théorique et expérimentale sur s. 54.
le galvanisme“, par Jean Aldini, Paris An XII.—MDCCCIV
(1804) [mit der Widmung: A Bonaparte, citoyen, premier
consul et président], findet sich S. 340 die Bemerkung: „*M. Roma-
guesi*, physicien de Trente, qui a reconnu, que le gal-
vanisme faisait décliner l'aiguille aimantée.“ — [Diese
litterarische Notiz verdanke ich dem Herrn Prof. Dr. O. Chwol-
son in St. Petersburg.]

6. Beim Fleeming'schen Normal-Element, [welches auch s. 65.
durch das kleine Element (Fig. 17, S. 35) ersetzt werden kann]
taucht der Zinkstab in eine Lösung von 55,5 Teilen Zinksulfat
in 44,5 Teilen Wasser (spec. Gew. = 1,2 bei 20°C.) und der Kupfer-
stab in eine Lösung von 16,5 Teilen Kupfersulfat in 83,5 Teilen
Wasser (spec. Gew. = 1,1 bei 20°C.). Der Zinkstab muß, wenn
er nicht chemisch rein ist, gut amalgamiert sein. Das Glas-
gestell (Fig. 38) kann aus einem Stück bestehen. Da aber die
eingeschliffenen Glas-Hähne teuer sind, kann man den Ap-
parat auch aus einzelnen Teilen zusammensetzen, die durch
Gummischläuche mit Ebonit-Hähnen (oder Quetsch-Hähnen)
verbunden sind. — Zu allen messenden Versuchen können nur

konstante Elemente benutzt werden. Damit sie während des Gebrauches möglichst gleichmäÙig wirken, läÙt man sie nach dem Zusammenstellen etwa 10 Minuten unter „Kurzschluss“ arbeiten, d. h. man verbindet die Polklemmen durch einen kurzen, dicken Kupferdraht, damit sich im Inneren des Elementes ein gewisser Gleichgewichtszustand herstellt.

- s. 67. 7. Bei unserer Versuchsanordnung (Fig. 39) steht die Galvanometernadel unter dem EinfluÙ zweier Richtkräfte: der des Erdmagnetismus und der beiden Stabmagnete. Ersterer sucht der Magnetnadel eine nord-südliche Richtung zu geben, letztere eine ost-westliche; daher nimmt die Nadel eine gewisse mittlere Richtung ein (Resultante). Je näher die beiden Magnete zur Bussole geschoben werden, umso mehr überwiegt ihre Richtkraft die des Erdmagnetismus, d. h. der Winkel, den die Galvanometernadel mit dem magnetischen Meridian bildet, wird immer gröÙer. Da nun die Magnetstäbe stark magnetisiert und genügend lang sind (40 cm), so ist ihr magnetisches Feld im mittleren Teile, welcher von der (kurzen!) Galvanometernadel eingenommen wird, homogen, d. h. die Intensität ist (fast) konstant und die Kraftlinien sind hier parallel. Hierauf beruht (für eine nicht zu lange Magnetnadel) die Zulässigkeit der von uns benutzten Graduierungsmethode.

Beim Graduieren (Aichen) des Galvanoskopes wurde die Stromstärke, welche eine Ablenkung $\alpha_1 = 14^\circ$ ergab, als (willkürliche) Einheit der Stromstärke angenommen. Zur Herstellung der bleibenden Aichungsskala empfiehlt es sich, die Resultate der Graduierung graphisch darzustellen, indem man auf quadriertem Millimeter-Papier als Abscissen (horizontal) in 1 cm Abstand die Stromstärken (0, 1, 2, 3 . . .) und als Ordinaten (vertikal) die beobachtete Anzahl der (Bogen-) Grade, die auf Zehntel genau abzulesen sind, aufträgt und die erhaltenen Punkte zu einer Kurve verbindet. Diese Kurve kann bei genaueren Messungen als Hilfsmittel zur Reduktion der Gradskala in Aichungsgrade dienen und benutzt werden, um die nicht beobachteten Bruchteile der Aichungsskala (Halbe oder Zehntel) einzutragen, auch giebt ihr Verlauf ein gutes Merkmal ab für die Güte der Messung.

Näheres über das Graduieren in der „Zeitschrift für den

phys. u. chem. Unt.“ (in Bezug auf das Elektrometer IV, 1891, S. 293, das Galvanometer VII, 1894, S. 122).

8. Die Glühlampe ist von Heinrich Göbel, einem nach S. 98. New-York ausgewanderten Hannoveraner, bereits 1855 erfunden. Göbel wurde von der Gesellschaft zur Ausbeutung der Edison'schen Erfindungen 1881 engagiert und seit der Zeit erschienen die sogenannten Edison'schen Glühlampen auf dem Markt. [Elektrotechn. Zeitschr. 1892, H. 7, nach El. Eng. vom 25. Jan. 1892.]

9. Wird bei unserem Demonstrations-Galvanometer S. 107. (vergl. Fig. 37, S. 64), bei vertikaler Stellung des Ringes (R), durch diesen ein konstanter Strom von genügender Stärke geleitet, um einen Ausschlag von etwas über 45° hervorzurufen, so läßt sich — durch Neigen des Ringes — immer ein Ausschlag $= 45^{\circ}$ erzielen! — In diesem Falle hat der Apparat seine größte Empfindlichkeit. [Bei einer gewöhnlichen Busssole kann man einen Winkel höchstens auf $\frac{1}{5}$ Grad genau ablesen (bei der unsrigen, die einen großen Teilkreis hat, höchstens auf $\frac{1}{10}$ Grad). Für kleinere Winkel macht das einen merklichen Bruchteil des Ablenkungswinkels aus, wodurch (bei 25° , resp. 5°) der Fehler in der Stromstärke 1, resp. 4% betragen kann. Andererseits ändern sich bei größeren Winkeln (über 60°) die Tangenten sehr rasch (die Aichungsgrade werden bedeutend kleiner), weshalb der Ablesungsfehler das Resultat wieder stark beeinflusst. Daher sucht man eine Ablenkung $= 45^{\circ}$ zu erzielen, da hier der Einfluß des Fehlers am wenigsten wirksam ist]. — Unser Galvanometer ist in seinem Fußgestell drehbar. Man kann also, wenn durch einen Strom eine gewisse Ablenkung bewirkt ist, die Busssole der Nadel nachdrehen, bis diese wieder auf *Null* einsteht! In diesem Falle ist die Stromstärke proportional dem *Sinus* des Drehungswinkels (δ) der Busssole ($J = k' \cdot \sin \delta$, wo k' einen konstanten Faktor bedeutet). Für eine solche Messung wird das Instrument zuerst so aufgestellt, daß die Zeiger der Magnetnadel in der Ruhelage und das Visier (v, Fig. 37) genau auf *Null* eintreten. Da das Visier die Drehung der Busssole nicht mitmacht, kann man durch es an der Gradskala den Drehungswinkel ablesen. Dieses Galvanometer ist daher zugleich eine Sinus-Busssole.

Die Handhabung einer solchen ist, des Nachdrehens wegen, zeitraubender als die der Tangens-Busssole, dafür hat die Länge der Nadel keinen fehlerhaften Einfluß auf das Resultat, weil die Nadel bei der Ablesung wieder in der Ringebene liegt. Daher wird die Sinus-Busssole (erfunden von Pouillet 1837) vorzugsweise zur genaueren Messung schwacher Ströme verwandt. Wir haben uns, um rasch experimentieren zu können und nicht durch Rechnungen aufgehalten zu werden, des graduierten Galvanometers bedient, dessen Angaben der Stromstärke direkt proportional sind ($J = k' \cdot A$, wo A die Anzahl der Grade an der Aichungsskala bedeutet). Daß die erreichbare Genauigkeit der Messungen von der Zuverlässigkeit der Aichungsskala abhängt, ist wohl selbstverständlich.

S. 110.

10. Schilling's Priorität in Bezug auf die Erfindung des magneto-elektrischen Telegraphen wurde schon von Munke (in Gehler's Wörterbuch 1838, IX, S. 111—115) anerkannt. In neuerer Zeit auch von Zetzsche (Geschichte der Telegraphie, Berlin 1877, S. 66) und Netoliczka (Illustrierte Gesch. der Elektrizität, Wien 1886, S. 174—176). — Auffallender Weise haben die deutschen Lehrbücher davon keine Notiz genommen.

S. 125.

11. Das leicht herstellbare Universalgestell, welches wir als Ampère'sches Gestell (Fig. 23) und als Modell eines Multiplikators (Fig. 35, 36) kennen lernten, kann — wenn man auf die Benutzung eines besonderen, graduierten Galvanometers verzichtet — zu sämtlichen in der Schulphysik erforderlichen Versuchen mit galvanischen Strömen dienen. [Die Herstellung ist beschrieben in d. Zeitschr. f. d. phys. u. chem. Unt. VIII, S. 155]. Um es als brauchbares Modell einer Tangensbussole zu verwenden, benutzt man zweckmäßig eine kurze Magnetnadel (z. B. eine von der Form Fig. 35, B, deren Länge von einer Biegung zur anderen 3 cm beträgt). Dann genügt ein darüber geschobener Ring aus starkem Draht von 20 cm Durchmesser vollständig. — Stellt man den Ring in einem Abstände von 5 cm (d. h. $\frac{1}{4}$ des Ringdurchmessers) vom Mittelpunkt der Magnetnadel auf, so sind die Tangenten der Ausschlagswinkel den Stromstärken direkt proportional (unabhängig von der Nadellänge). Diese Form der Tangentenbussole wurde von Helmholtz und Gaugain angegeben. — Für thermo-elektrische Ströme oder zum Nachweis der magnet-elektrischen

Induktion werden zwei Doppelrahmen und eine astatische Nadel (Fig. 62) angewandt, wodurch der Apparat zu einem sehr empfindlichen Galvanometer wird, dessen Nadel, durch die Kupferdämpfung, fast momentan sich einstellt, wodurch viel Zeit erspart wird. Noch wirksamer, als bei Anwendung der angegebenen Kupferhülsen von 4 mm Dicke (Cu, Fig. 62) ist die Dämpfung, wenn man — nach einem Vorschlage des Mechanikers G. Lorenz (O. Haase) in Chemnitz — die 4 Rahmen, auf welche die mit Seide umsponnenen Kupferdrähte gewickelt werden, aus dicken Platten von elektrolytischem Kupfer ausfräst und die Seitenränder aus Ebonit herstellt. Zur Anfertigung der Magnetnadeln eignen sich dicke Klaviersaiten oder dünne Tangenten-Speichen der Fahrräder sehr gut, da sie zäh sind und sich kalt biegen lassen, was die Selbstanfertigung der astatischen Nadel wesentlich erleichtert. Das Härten der bis auf das Magnetisieren fertig hergerichteten Nadeln geschieht, indem man sie auf einem Stück Blech über einer Spiritusflamme erhitzt, bis sie blau anlaufen; dann läßt man sie in ein Gefäß mit Vaselineöl fallen. Die Hälfte der Nadel, welche den Südpol erhalten soll, wird nachher mit feinem Schmirgelpapier abgeschliffen.

Jede Einzelrolle ($R_1 R_2 R_3 R_4$, Fig. 62) hat 50 Windungen von 1 mm dickem Kupferdraht. Bei Anwendung der astatischen Nadel muß die Verbindung der Drähte eine solche sein, daß der Strom in den beiden oberen Drahtrollen in umgekehrter Richtung kreist, wie in den beiden unteren Rollen! Oft ist es wünschenswert, den Rollenwiderstand dem Widerstand der Stromquelle (Thermo-Element oder Induktionsrolle) möglichst anzupassen; das kann in einem gewissen Grade durch eine verschiedene Schaltung der Rollen erreicht werden. Zur leichteren Orientierung sind die Drahtenden jeder Rolle, durch welche der Strom eintreten soll, mit *roter* Seide bewickelt, während die anderen grün sind. Alle 8 Drahtenden sind an vernickelte Blechstücke mit Ausschnitten gelötet (vergl. Fig. 42, S. 71). Durch einige kleine Prefsklemmen werden die Drähte nach Bedarf unter sich verbunden. Die freien Enden werden zu den an den Schlitten befindlichen Doppelprefsklemmen $K_1 K_2$ geführt (in Fig. 62 sind K_1 u. K_2 leider als gewöhnliche Schraubenklemmen gezeichnet).

Ist der Widerstand jeder einzelnen Rolle $= W$, so können wir den Rollenwiderstand in folgender Weise modificieren: 1) Alle 4 Rollen hintereinander geschaltet (in Fig. 62 angedeutet); der Widerstand $= 4W$. 2) Die oberen und die unteren Rollen parallel geschaltet (d. h. man verbindet K_1 mit den beiden roten Drähten seiner Rollen, K_2 in gleicher Weise mit den grünen Drähten der zugehörigen Rollen, dann die oberen und die unteren Rollen unter sich); der Widerstand $= 2W/2 = W$, also nur $1/4$ des vorigen. 3) Alle 4 Rollen parallel geschaltet (d. h. K_1 wird mit allen 4 roten, K_2 mit allen 4 grünen Drähten verbunden); der Widerstand $= W/4$, also 16mal kleiner als bei der Schaltung hintereinander!

Sind die Rollen so geschaltet, daß der Strom in allen in gleicher Richtung kreist, so darf die astatische Nadel — wenn der Widerstand und die Windungszahl der Einzelrollen gleich ist — keinen Ausschlag zeigen! Schaltet man nun z. B. in den Stromkreis der oberen Rollen einen Draht, dessen Widerstand geprüft werden soll, und in den Stromkreis der unteren Rolle bekannte Widerstände, bis der Ausschlag $= 0$ wird, so läßt sich, auch bei Verwendung eines wenig konstanten Elementes, die Widerstandsbestimmung sehr genau ausführen (da beide Leiterzweige gleichzeitig von demselben Strom durchflossen werden). In ähnlicher Weise kann man auch die Stromstärke zweier galvanischer Elemente mit einander vergleichen, doch würde ein näheres Eingehen darauf hier zu weit führen.

Wendet man statt der astatischen Nadel eine solche an, die aus zwei gleichgerichtet parallelen Magnetstäbchen besteht, so erhält man bei Anwendung der Doppelrollen einen empfindlichen gewöhnlichen Multiplikator, aber mit Kupferdämpfung. Natürlich muß in diesem Falle der Strom in allen 4 Rollen gleiche Richtung haben. Diese Nadel hat vor der astatischen den Vorzug, daß sie sich sehr energisch in den magnetischen Meridian einstellt. Die oben erwähnten Widerstandsvergleichen können mit diesem Apparat ebenfalls (wenn auch weniger genau) angestellt werden; zum Nachweis der thermo-elektrischen Ströme oder der Induktionsströme (Fig. 63—65) reicht die Empfindlichkeit aber nicht aus.

Zum Nachweis sehr schwacher Ströme kann an der asta-

tischen Nadel statt des Zeigers ein Spiegel (S, Fig. 62) eingesetzt werden, der das durch einen Spalt fallende und von einer Cylinderlinse von großer Brennweite (etwa 100 cm) konzentrierte Licht auf einen horizontalen Stab wirft, der mit Millimeterpapier beklebt ist, sodaß ein scharfes Bild des Spaltes auf der Skala entsteht. Hierdurch werden die kleinsten Schwankungen der Magnetnadel sichtbar. Hierbei muß das Galvanometer durch einen Schutzkasten vor Luftzug geschützt werden. (Da diese Versuchsanordnung ein gut verdunkeltes Zimmer erfordert, so haben wir sie nicht benutzt.)

12. Die Wechselströme zeigen Eigenschaften, welche sie von den gewöhnlichen oder den intermittierenden gleichgerichteten Strömen wesentlich unterscheiden. Sie können weder am Galvanometer noch am Voltameter gemessen werden, da die in rascher Folge und entgegengesetzter Richtung erfolgenden Stromstöße sich in ihrer Wirkung aufheben, und es sind zu ihrer Messung besondere Apparate erforderlich, auf die wir nicht eingehen können. Auch die Selbstinduktion im Leiter, besonders wenn dieser lockenförmig gebogen ist, ist so bedeutend, daß der Widerstand einer Drahtspule größer sein kann als der einer kurzen Luftstrecke in einem geraden Leiter. Der Widerstand eines Leiters für Wechselströme wird also wesentlich durch seine Form beeinflusst (das war bei den gleichgerichteten Strömen nicht der Fall). Daher gilt das Ohm'sche Gesetz auch *nicht* für Wechselströme! Bei gleichgerichteten Strömen ist die Leistungsfähigkeit gleichlanger Drähte aus demselben Material der Fläche des Querschnitts proportional (vergl. S. 90). Das ist nun bei den Wechselströmen von hoher Wechselzahl nicht mehr der Fall; es scheint vielmehr, als ob sie — bildlich gesprochen — nicht das Innere des Drahtes durchsetzen, sondern nur längs der Oberfläche dahingleiten! — Die Wechselströme der magnet-elektrischen Maschinen oder gar der für Wechselstrom eingerichteten dynamo-elektrischen Maschinen zeichnen sich durch ihre intensive physiologische Wirkung aus und können, durch den menschlichen Körper geleitet, den Tod zur Folge haben. Im Widerspruch hierzu scheinen die Versuche von Tesla zu stehen, wonach Ströme von sehr hoher Wechselzahl (bis 300 000 in der Sekunde) und großer elektromotorischer Kraft

S. 143, 152.

(60 000 Volt und darüber) durch den menschlichen Körper geleitet werden können, ohne daß die betreffende Person ein Unbehagen verspürt. (Im Jahre 1893 wurden diese Versuche von Prof. Jegorow im phys. Kab. der militär-med. Akademie in St. Petersburg vor einem großen Zuschauerkreise wiederholt und bestätigt.) — Wie Sie wissen, strahlt ein glühender Körper Licht von sehr verschiedener Wellenlänge aus. Unser Auge nimmt davon nur diejenigen wahr, welche 400—800 Billionen Schwingungen in der Sekunde haben. Für die übrigen ist unser Auge gänzlich unempfindlich. Wir können uns nun denken, daß unsere Nerven ebenfalls nur für gewisse, verhältnismäßig langsame Schwingungen abgestimmt sind und daher von den zu schnell erfolgenden Schwingungen der Tesla'schen Ströme nicht mehr erregt werden können.

Denjenigen Lesern, welche sich eingehender mit der Elektrizitätslehre beschäftigen wollen, seien aus der großen Zahl der vorhandenen, zum Teil trefflichen Werke, folgende empfohlen.

- L. Graetz: Die Elektrizität und ihre Anwendung. Stuttgart 1883. Engelhorn.
— (Sehr klar geschrieben.)
- Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik und Meteorologie. IX. Aufl. Herausgegeben von Pfaundler. III. Bd. Braunschweig 1888—1890. Vieweg & Sohn. (Sehr eingehend, besonders auch die Theorie der Instrumente behandelnd.)
- Eugen Netoliczka: Illustrierte Geschichte der Elektrizität von den ältesten Zeiten bis auf unsere Tage. Wien 1886. Pichler's Wittwe & Sohn. (Mit zahlreichen litterarischen Hinweisen.)
- Arthur Wilke: Die Elektrizität, ihre Erzeugung und Anwendung in Industrie und Gewerbe. Leipzig 1893. Otto Spamer. (Aus der Theorie nur das Nötigste, aber eine Fülle von Material in Bezug auf die technische Anwendung der Apparate bietend.)
- E. von Lommel: Lehrbuch der Experimentalphysik. Leipzig (II. Aufl. 1894). Johann Ambrosius Barth. (Recht kurz, aber das Wichtige plastisch hervorhebend.)
- Balfour Stewart und Haldane Gee (Deutsch von Karl Noack): Praktische Physik für Schulen und jüngere Studirende. I. Teil. Elektrizität und Magnetismus. Berlin 1889. Julius Springer. (In den Erläuterungen etwas knapp, giebt dieses Büchlein eine vortreffliche Anleitung zur Herstellung einfacher Apparate und zur Anstellung von messenden Versuchen.)
- Adolf Weinhold: Vorschule der Experimentalphysik. Leipzig (III. Aufl. 1883). Quandt & Händel. [Eine der vorzüglichsten Anleitungen zur Herstellung von Apparaten und zum Experimentieren; dabei mit den nötigen elementaren Erläuterungen versehen. Dieses Buch behandelt die ganze elementare Physik. Von gleicher Vortrefflichkeit sind die für eine höhere Stufe (Studierende und Lehrer) bestimmten „Physikal. Demonstrationen“ desselben Verfassers.]
- Paul Reis: Lehrbuch der Physik. Leipzig (VIII. Aufl. 1893) Quandt & Händel. [Wegen der deduktiven Darstellungsweise für den Anfänger etwas schwierig; dafür aber als vorzügliches Nachschlagebuch sehr zu empfehlen. Enthält auch eine große Zahl physikalischer Aufgaben (mit Angabe des Resultats)].

Die zu den beschriebenen Versuchen benutzten neuen Apparate werden von den Mechanikern Ferdinand Ernecke in Berlin (S.W. Königgrätzer Str. 112), sowie von G. Lorenz (O. Haase) in Chemnitz, und von Max Kohl in Chemnitz zu nachstehenden Preisen geliefert:

Name des Apparates	Mark
1 Aluminium-Elektrometer (Fig. 9, 16, 18); Seitenwände innen mit Drahtnetz versehen, 2 Kondensatorplatten, 1 Glimmerscheibe, 1 Gradskala auf Spiegelglas . . .	50
Extra: { 1 einsetzbare Projektionsskala (1 Eichungsskala oder 1 Gradskala) . . .	5
1 Ebonitpfropf mit Leitungsstab und Papierblättchen (zum Versuch Fig. 6)	5
1 aufschraubbare Hohlkugel (50 mm Durchm.) nebst 2 isolierten Probekugeln, zum Graduieren (I. Bd., S. 26 und 77)	5
1 Projektionstischchen (Fig. 13) mit 1 Lampe, 2 Linsen und 2 Blendschirmen (für alle Versuche mit dem Elektrometer), je nach der Größe der Linsen	40—50
1 Papier-Elektroskop (Fig. 8)	12
2 Aluminium-Elektroskope nebst Zubehör (für qualitative Versuche)	25
1 Universalgestell (Fig. 23, 35, 62), vollständig (vergl. Anh. 11)	135
a) Das Gestell allein (A, Fig. 23 oder 35)	25
b) Teile, um es als Ampère'sches Gestell zu benutzen (Fig. 23—26); die beweglichen Leiter aus Aluminium mit Silberspitzen; alle Stromleiter mit stellbaren Stromrichtungs-Zeigern	30
c) Teile zum Modell eines Multiplikators und einer Tangensbussole (Fig. 35, 36)	32
d) Teile zum empfindlichen Galvanometer (Fig. 62) mit astatischer Nadel und Kupferdämpfung, sowie einem einsetzbaren Spiegel; zum Nachweis der thermo-elektrischen Ströme (Fig. 60) und der magnet-elektrischen Induktion (Fig. 63—65, 73)	36
e) 1 Schutzkasten aus Pappe mit 2 Glaswänden, für feinere Versuche (mit dem Spiegel)	7

Name des Apparates	Mark
f) 1 Aufbewahrungskasten für die Solenoide, Nadeln u. s. w.	5
Extra: { 1 genau planparallel geschliffener Spiegel .	12
{ 1 Doppelnadel mit 2 gleichgerichteten Mag- neten (Anh. 11)	8
1 modificierter Rühmkorff'scher Stromwender (Fig. 20) mit automatischem Stromrichtungs-Zeiger, Prefsschrauben, sichtbarer Stromleitung (zu den Versuchen Fig. 21, 24, 41 besonders geeignet)	25
1 handlicher Stromleiter (Fig. 30) zum Nachweis der Ampère'schen Gesetze	7,50
1 kleines Tauchelement (Fig. 10)	2
1 Batterie von 5 kleinen Tauchelementen (Fig. 15)	12
1 kleines konstantes Element (Fig. 17) zum Gra- duieren des Galvanometers	3,50
1 Batterie von 5 konstanten Elementen (A, Fig. 18) . . .	15
1 Batterie von 50 konstanten Elementen auf 1 Brett, zum Nachweis des Stromgefälles (Fig. 19)	130
1 Demonstrations-Galvanometer (zu Versuchen Fig. 43 bis 51, 54, 59):	
a) Sinus-Tangensbussole (Fig. 37) } bei Ernecke mit drehbarem Metallständer und } und bei Obach'schem Ring; Durchmesser } Lorenz	145
des Skalenringes = 230 mm (1° } bei = 2 mm) mit Visier } Max Kohl	100
b) Tangensbussole mit festem Ring, Gröfse dieselbe .	90
c) Tangensbussole, kleiner (Durchmesser des Skalen- ringes = 180 mm, $1^\circ = 1,56$ mm). Mit festem Holz- ständer, Papierskala	65
1 Glaskasten aus Spiegelglas, $18 \times 8 \times 7$ cm, (zu Versuchen Fig. 43, 45—47, 50) von E. Leybold's Nachfolger in Cöln .	1,50—2

Alphabetisches Sachregister.

[Die Zahlen beziehen sich auf die Seiten; Anh. = Anhang; *EK* = elektromot. Kraft.]

- A**brücke, galvanische 108.
 Abhängigkeit des Stromgefälles von der Länge des Leiters 15; von der Leitungsfähigkeit 19; vom Querschnitt 18;
 — der Stromstärke von der *EK* 82; vom Gesamtwiderstande 81; von der Länge des Leiters 88, 90; vom Querschnitt 87, 90; vom Widerstande 80.
 Ablenkung der Magnetnadel durch den Strom 53, 67—68; Gesetz der — 54.
 Abstossung der Magnetpole 4; der Stromleiter 44.
 Achse der Magnetnadel 66.
 Aichung des Elektrometers nach Volt 104; des Galvanometers 67.
 Aichungsskala: des Elektrometers 13, 37, 104; des Galvanometers 67, 106, 170; Herstellung 68; Konstante 106.
 Akkumulator 118.
 Aluminium-Elektrometer 21; Voltskala 104.
 Amalgamierung der Zinkplatten 27.
 Ampère das, als Einheit der Stromstärke 92, 104.
 Ampère's Gesetze 45—47, 54; Gestell 43 (Fig. 23); Hypothese 5, 55; Schwimmregel 54.
 Analogie zwischen hydrodynamischen und elektrodynamischen Erscheinungen 13, 77;
 — zwischen magnetischen und elektrostatischen Erscheinungen 7.
 Anker zum Hufeisenmagnet 51; zur Dynamomaschine 147.
 Anode 101.
 Antimon 119.
 Anziehung der Magnetpole 4; der Stromleiter 44—46.
 Aperiodische Schwingung der Magnetnadel 128; Erklärung 136.
 Arbeitsübertragung, elektrische 154.
 Astatistische Nadel 126.
 Atome 5 (Fußnote 2).
 Automatischer Stromwender 144.
 Automatischer Stromrichtungs-Zeiger 42.
 Äusserer Widerstand 80.
 Aquamotorische Kraft 11, 15, 19, 78.
 Äquivalente, elektrochemische 105.
Batterie kleiner Tauchelemente 32; — konstantes Element 40; innerer Widerstand 93; Schaltungsweise 33; günstigste 87.
 Becher, Volta'scher 23.
 Bedeutung des Magnetisierens 5, 55.
 Begriff der aquamotorischen Kraft 11; der *EK* 15; der Stromstärke bei elektrischen Strömen 75, 79; bei Wasserströmen 76.
 Bell's Telephone 157.
 Bequeme Klemmen für Elemente 71.
 Bestimmung der *EK* am Elektrometer 34, 37;
 — am Galvanometer 74.
 Bestimmung des inneren Widerstandes einer Batterie 94.
 Bewegliche Stromleiter 43, 45, 48, 53, 57, 127, 133.
 Bewegung eines Leiterstückes im magnetischen Felde 133;

- Bewegung eines Stromleiters um einen Magnet 57.
 Bildliche Darstellung der Strombildung im Elemente 75.
 Blasebalg für Tauchelemente 69.
 Bleisuperoxyd 117.
 Bogenlampe, elektrische 152.
 Bosschard's Telephonmodell 157.
 Brechung der elektrischen Wellen 165.
 Buff's Kontaktversuch 21 (Fig. 29).
 Bunsen's Element 31, 37.
 Bussole 64 (Fig. 37); Sinus- — 171 (Anh. 9); Tangenten- — 107, 172 (Anh. 11); Graduierung 66—68; Konstante der Eichungsskala 106; Reduktionsfaktor 107.
 Centrierung des Stahlstifts der Bussole 65 (Fußnote 1).
 Chemische Strommesser 101.
 Chemische Theorie des galvanischen Stromes 29.
 Chemische Vorgänge im Element 28.
 Chemische Wechselwirkung zwischen Metallen und Flüssigkeiten 29.
 Chromsäure-Element 31.
 Chromsäure-Lösung 31, 169 (Anh. 3).
 Clarke's Normal-Element 37.
 Cliché, galvanoplastisches 108.
 Coldani's Entdeckung 29.
 Coulomb, Einheit der Elektrizitätsmenge 105.
 Dämpfung des elektrischen Stromes 73; — der Magnetnadel 126, 136.
 Daniell'sches Element 31; *EK* des — 35, 117.
 Deklination der Magnetnadel 3 (Fußnote 1).
 De la Rive, Chemische Theorie des galvanischen Stromes 29.
 Demonstrations-Galvanometer 64 (Fig. 37), 104.
 Demonstrations-Multiplikator 125 (Fig. 62); 173 (Anh. 11).
 Diamagnetismus 167 (Anh. 1).
 Drahtspule, magnetische Wirkung 49.
 Draht-Widerstandsvergleichung 89.
 Dynamische Elektrizität 8; Unterschied mit der elektrostatischen 16.
 Dynamo-electrisches Princip 145.
 Dynamomaschine 144—152; Schaltungsweise 150.
 Edison's Glühlampe 171 (Anh. 8).
 Eigenschaften der Wechselströme 175 (Anh. 12).
 Eisenfeilspäne 1, 127.
 Einfluß der Windungszahl auf die Ablenkung der Multiplikator-Nadel 60; — einer Röhrenleitung auf den Wasserstrom 77.
 Einheit, praktische der *EK* 104; der Stromstärke 92, 104; (Jacobi's 101); — des Widerstandes 91, 105.
 Einzelablesung 66.
 Elektrizität, Erscheinungen der statischen 7.
 Elektrizitätsmenge 75, 105; als Maß der Stromstärke 79.
 Elektrische Arbeitsübertragung 154.
 Elektrische Beleuchtung 152.
 Elektrische Glühlampe 98, 153, 171 (Anh. 8).
 Elektrischer Strom 17.
 Elektrisches Gefälle im Stromleiter 13, 14, 18, 41.
 Elektrisches Schweißen 153.
 Elektrisierung der Metalle durch Berührung mit Flüssigkeiten 21, 24.
 Elektro-chemische Äquivalente 105.
 Elektro-chemischer Telegraph 110.
 Elektrolyse 99.
 Elektromagnet 51; Joule'scher 52; hufeisenförmiger — 52.
 Elektromagnetismus 50.
 Elektromagnetischer Telegraph von Gauss und Weber 111; Morse 112; Schilling 110; Wheatstone 112.
 Elektrometer, Aluminium- — 21, 104; Papier- — 14.
 Elektrometrische Wirkung 70.
 Elektromotorische Kraft (*EK*) 15, 33; — einer Kette bei verschiedener Schaltung 34; — von verschiedenen Elementen 37; — bei verschiedener Gruppierung der Elemente einer Batterie 86; — der Polarisierung 117; Maß der *EK* 15, 16, 104.
 Elektroskop 9, 18.
 Entwicklung der Formel für die Stromstärke 82.
 Entzündung, elektrische 98.
 Erdelektrische Ströme 56.
 Erdleitung 22 (Fußnote 4); Steinheil's 112.

- Erdmagnetismus, Richtkraft auf bewegliche Stromleiter 47.
 Erwärmung durch den Strom 98, 153.
 Erzeugung von magnetischen Kraftlinien 127, 135, 146, 156.
 Extrastrom 137, 138.
- F**araday, Chemische Theorie des galvanischen Stromes 29; Fundamentalversuch (Funkenmagnet) 124 (Fig. 61); Regel für die magneto-elektrische Induktion 134.
 Faure, Akkumulator 118.
 Feld, magnetisches 57, 128.
 Feldmagnet 148.
 Fleming's Normaldaniell 85 (Fig. 38).
 Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetz 84, 85.
 Formel für die Stromstärke 83.
 Füllungsgrad 12; — -differenz 13.
 Fundamentalversuch Faraday's 124; Volta's 30, 167 (Anh. 2).
 Funkeninduktor (Induktionsrolle) 139.
- G**alvani's Beobachtung 29.
 Galvanische Elektrizität 30.
 Galvanische Elemente 31.
 Galvanische Polarisierung 115.
 Galvanismus 30.
 Galvanometer 64 (Fig. 37); Graduierung 66—68; Konstante der Eichungsskala 106.
 Galvanometrische Wirkung 70, 71.
 Galvanoplastik 108.
 Galvanoskop 58.
 Galvanotypie 108.
 Gaskohle (Koks) 36.
 Gauss'sche Tangenten-Bussole 172 (Anh. 11).
 Gauss und Weber, elektromagnetischer Telegraph 111.
 Gegensaltung von Elementen 36.
 Geissler'sche Röhren 141.
 Geschichtliches, Ablenkung der Magnetnadel 54, 169 (Anh. 5); Akkumulatoren 117; Diamagnetismus 167 (Anh. 1); Galvanismus 30; Kontaktelektrizität 29, 167 (Anh. 2); Magneto-elektrische Maschine 142; Ringmaschine 149; Telegraphie 109, 172.
 Gesetz, Ampère's 45—47; Faraday's 133—135; Jacobi's 101; Joule's 99; Lenz' 132: — der magnetischen Anziehung und Abstossung 4; — der Anziehung von Stromleitern 44, 47; — der Stromrichtung 55; — der Induktionsströme 132, 134; der Spannungsreihe 168.
 Gleitschienen (Drähte) 133, 134.
 Gleichgerichtete Induktionsströme 148.
 Gleichnamige Pole 4.
 Glimmerscheiben als Isolatoren 21, 141.
 Glühlampen, elektrische 98, 153, 171.
 Göbel, Erfinder der Glühlampe 171 (Anh. 8).
 Graduierung eines Galvanoskops 66—68.
 Gramme'sche magnet-elektrische Maschine 149.
 Gramme'scher Ring 150.
 Größte Empfindlichkeit des Galvanometers 89, 103, 171 (Anh. 9).
 Grove's Element 30.
 Günstigste Gruppierung der Elemente einer Batterie 87.
- H**albleiter 9.
 Hefner-Altenack, v., Trommelinduktor 150.
 Helmholtz, v., Tangentenbussole 172 (Anh. 11).
 Hempel, astatische Nadel 121 (Fig. 62, B).
 Hertz, elektrische Wellen 165.
 Hofmann, Wasserstoff-Voltameter 100.
 Holz, Isolierfähigkeit für galvanische Ströme 32.
 Horizontale Abweichung der Magnetnadel 3 (Fußnote 1).
 Hufeisenmagnet 52.
 Hughes, Mikrophon 159.
 Hydrodynamische Erscheinungen 11 bis 13; 75—79.
 Hypothesen: Ampère's 5, 55; Volta's 29, 167 (Anh. 2).
- J**acobi, Einheit der Stromstärke 101; Galvanoplastik 109.
- I**ndifferenzpunkt 132, 147, 149.
 Indifferenzzone 1, 143.
 Inducierender Strom 131.
 Inducierter Strom (in der sekundären Rolle) 138.
 Induktion, magnetelektrische 128.
 Induktionsapparat 138.
 Induktionsregel 132, 134.

- Induktionsrolle (Spirale) 138, 139.
 Induktionsstrom 129; Gesetz 135.
 Induktor 153.
 Influenz, magnetische 2, 6.
 Influenz-Elektrisiemaschine als Elek-
 tricitätsquelle 9, 14.
 Innerer Widerstand 80; Messung 93.
 Isolierende Griffe 21, 23, 33, 35, 69.
 Isolierfähigkeit des Holzes für galva-
 nische Ströme 32.
 Joule's Elektromagnet 52; — Gesetz
 der Wärmeentwicklung 99.
Kaliumbichromat 169 (Anh. 3).
 Kathode 101.
 Kathodenplatte 103.
 Kette (Batterie) 34; *EK* 55, 56; kon-
 stante *K*. 33—36.
 Kirchhoff'sches Gesetz 94.
 Klemmenspannung 152 (Fußnote 23).
 Klemmschrauben 31, 42, 66.
 Knallgas 100.
 Knallgas-Voltmeter 100 (Fig. 54), 115.
 Kohlenstäbe 32, 36; Verlötung 32
 (Fußnote 5).
 Kollektor an Dynamomaschinen 149.
 Kombination der Elemente einer Bat-
 terie 86; günstigste 87.
 Kommutator (Stromwender) 42 (Fig. 20),
 144.
 Compoundschaltung 151.
 Kondensator 24, 104, 141.
 Konstante der Eichungsskala 106.
 Konstante Elemente 33, 35, 36; ihre
EK 37.
 Konstanter Faktor 93.
 Kontakt 23, 30.
 Kontaktschlüssel 40, 49, 113.
 Kontakttheorie 29.
 Kontaktversuch; Buff's 21; Volta's
 30, 167 (Anh. 2).
 Kontinuierliche Induktionsströme 148.
 Kraftlinien, magnetische 27, 135.
 Kraftübertragung, s. Arbeitsübertra-
 gung 154.
 Kupferdämpfung 126, 136.
 Kupferniederschlag 31, 108.
 Kupfervitriol 31.
 Kupfer-Voltmeter 102.
Lametta 57, 98, 169 (Anh. 4).
 Latimer Clarke's Normalelement 37.
 Leclanché's Element 36.
 Legierungen, Leitungsfähigkeit der —
 93.
 Leiter der Elektrizität (Tabelle) 92.
 Leitung, telegraphische 110.
 Leitungsfähigkeit, von Drähten 91;
 Flüssigkeiten 88; Legierungen 93;
 verschiedener Stoffe 92; spezifische
 — 91; Änderung mit der Tempe-
 ratur 93.
 Lenz'sches Gesetz 99, 132.
 Lesage, elektrostatischer Telegraph
 109.
 Licht, elektrisches 152.
 Lodge's Versuch 57.
 Lokalbatterie 113.
 Lötung von Drähten und Kohlenstäben
 32 (Fußnote 5).
 Lüttge, Erfinder des Mikrophons
 159.
Magnet, Elektro- — 50, 52; Stahl- —
 2, 47, 57, 131, 133; natürlicher 1.
 Magneteisenerz 1.
 Magnetische Achse 66; — Anziehung
 und Abstossung 2; — Kraftlinien
 127, 135; — Wirkung eines Strom-
 leiters 47—49.
 Magnetisches Feld 57, 128, 146, 156.
 Magnetisierung 3; Bedeutung der —
 5, 55; — durch Influenz 6; — durch
 Streichen 3; — durch den Strom
 49—52.
 Magnetisierungsspirale 49.
 Magnetrudel 3, 59, 64; astatische 126;
 Doppelnadel 174 (Anh. 11).
 Magneto-elektrische Induktion 127
 und folgende.
 Magnetpole 1, 3, 5, 6, 49, 128.
 Mathematischer Ausdruck für die
 Stromstärke 83.
 Manganin 93.
 Maß, der *EK* 15, 16, 104; der Strom-
 stärke 82, 92, 101, 104, 105; —
 bei Wasserströmen 76.
 Maschine, dynamo-elektrische 145 bis
 152; magnet-elektrische 142—144;
 — für gleichgerichtete Ströme 144,
 148; — für Wechselströme 143, 152.
 Maximum der Stromstärke 87.
 Maxwell's elektro-magnetische Licht-
 theorie 164.
 Messung, kleiner Temperatur-Diffe-
 renzen 121; — starker Ströme 95.

Metallfäden siehe Lametta.
 Mikrophon 149.
 Molekül 5 (Fußnote 2).
 Molekularmagnet 5, 55.
 Molekularströme 55.
 Morse's Schreibtelegraph 112.
 Multiplikator 60—61, 120, 125 (Fig. 62).
 Mühlenbein's Apparat 43.

Nachweis: der Ampère'schen Gesetze 53—54; des Lenz'schen Gesetzes 130;
 — der Ohm'schen Gesetze 80—82.
 Nadel, astatische 125 (Fig. 62, B).
 Nadeltelegraph 110, 114.
 Natriumbichromat-Lösung 31, 80, 169 (Anh. 3).
 Nebenschaltung der Elemente 33.
 Nebenschluß-Schaltung der Dynamomaschine 151.
 Negativ, galvanoplastisches 108.
 Neusilberdraht 40, 72.
 Nickel 2.
 Niveaudifferenz 11; 25, 77; elektrische — 15, 18, 25, 41.
 Nordpol (nordsuchender Pol) 3.
 Normalelement, von Clarke 37; von Fleeming 65.
 Normalschaltung beim Dynamo 150.
 Nullniveau 12; elektrisches 10.
 Nutzleitung 145.

Öffnungsstrom 137.
 Oersted, Ablenkung der Magnetnadel 54.
 Ohm, das — als Widerstandseinheit 91.
 Ohm'sches Gesetz 82, 85; Nachweis des 80—82.
 Ost-Westlage der Magnete 67.
 Optischer Telegraph 109.
 Oxydation des Zinks im Element 28.

Pacinotti'scher Ring 147.
 Paraffin als Isolator 13.
 Papier-Elektrometer 14.
 Papier-Elektroskop 18.
 Paramagnetismus 167 (Anh. 1).
 Physiologische Wirkungen des Extrastromes 137, 138.
 Pixii, erste magnetoelektrische Maschine 142.
 Planté, sekundäre Batterie 117.
 Polarisation, galvanische 115.
 Polarisations-Batterie 117; *EK* 117;

Polarisations-Strom 116.
 Pole: galvanische 25; magnetische 1, 4.
 Poldifferenz 25, 152.
 Poldrähte 23, 25.
 Polfläche 1, 51, 143.
 Polschuhe 145.
 Polspannung 152 (Fußnote 23).
 Potentialdifferenz 10 (siehe Fußnote 3); als Einheit der aquamotorischen Kraft 12; — der *EK* 15.
 Potentialgefälle 16.
 Praktische Einheit: der *EK* 104; der Stromstärke 92, 101, 104; des Widerstandes 91, 105.
 Preßklemmen 71.
 Primäre Rolle (Spirale) 138, 160.
 Primärer Strom 116.
 Probier-Elektroskop 9.
 Projektions-Element 27 (Fig. 12), 28.
 Projektion der Elektrometerskala 22.
 Puluj'sche Röhre 141.

Quecksilber-Einheit des Widerstandes 91.
 Quecksilber-Kontaktbecher 45 (B Fig. 23), 49, 115.

Reduktionsfaktor der Tangentenbussole 107.
 Reflexion elektrischer Wellen 165.
 Reis, Telephon 154.
 Reihenfolge der Kraftlinien 131 (Fußnote 20).
 Remanenter Magnetismus 145.
 Richtkraft beweglicher Stromleiter 45—48; — der Magnete 3, 7.
 Richtung der Ampère'schen Molekularströme 55.
 — des elektrischen Stromes 17, 55;
 — des erdelektrischen Stromes 56;
 — des Induktionsstromes 129, 131;
 — der magnetischen Kraftlinien 134.
 Ringanker 146.
 Ringmaschine 149.
 Robinson, Verbesserung des Schreibtelegraphen 117.
 Romagnesi, Entdecker der Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom 54, 169 (Anh. 5).
 Rühmkorff's Funkeninduktor 139 (Fig. 67, B), 140.
 — Stromwender 42.
 Rückblick 20, 38, 62, 97, 122, 135.

- Salpetersaures Silber** 116.
 Schaltung: hintereinander (successive) 33, 36.
 — parallel (nebeneinander) 33, 34.
 Schaltungsweise der Elemente 33, 36;
 — der Dynamomaschine 150—152;
 — der Induktionsrollen 143; — der Multiplikatorrollen 174 (Anh. 11).
 Schilling's elektro-magnetischer Telegraph 110.
 Schnur als Stromleiter 9, 14.
 Schreibtelegraph 112.
 Schweigger's Multiplikator 61.
 Schweissen, elektrisches 153.
 Schwingungen, elektrische 164.
 Schwimmregel Ampère's 54.
 Sekundäres Element (Batterie) 117.
 Sekundäre Rolle 138, 160; — Ströme 116.
 Selbstinduktion eines Leiters 137, 138 (s. Fußnote 21).
 Serienschaltung bei der Dynamomaschine 150.
 Siemens' dynamo-elektrisches Prinzip 145.
 Silbervoltmeter 103.
 Sinusbusssole (64, Fig. 37), 171 (Anh. 10).
 Solenoid 48 (Fig. 26).
 Sömmering's elektro-chemischer Telegraph 110.
 Spannungsreihe Volta's 168 (Anh. 2).
 Spezifische Leitungsfähigkeit 91.
 Spezifischer Widerstand 91.
 Spiegel-Galvanometer 175 (Anh. 11).
 Sprengen durch den galvanischen Strom 98.
 Stabmagnet (4), 47, 66, 133.
 Stahlmagnet 47, 50, 57, 131.
 Stanniol als beweglicher Leiter 43.
 Steinheil, Erdleitung 112.
 Stereotypendruck 109.
 Stöhrer's magnet-elektrische Maschine 143.
 Stromdämpfer 73, 117.
 Stromeinheit 92, 101, 104.
 Strömende Elektrizität 8.
 Stromgefälle 12; elektrisches 13, 14, 18, 44; Abhängigkeit des — von der Länge des Leiters 15; von der Leitungsfähigkeit 19; Konstanz des — 14, 144.
 Stromleiter für die Ampère'schen Versuche 53; Neusilberdraht als — 40, 72; Schnur als — 9, 14.
 Strommessung 103, 108.
 Stromstärke 74, 77, 79, 105, 107; bei Wasserströmen 76.
 Stromprüfer 58.
 Stromregel 47, 55.
 Stromrichtung 17; Gesetz der — 55.
 Stromrichtungs-Zeiger 44; automatischer 42.
 Stromstrahlen 75.
 Stromunterbrecher (Stromschlüssel) 49, 115, 136.
 Stromverzweigung 94.
 Stromwender 42, 144.
 Südpol, magnetischer 4.
Tabelle der Widerstände und der Leitungsfähigkeit einiger Stoffe 92.
 Tangentenbussole (Tangensbussole) 107 (s. Fig. 37, S. 64); Graduierung der — 67, 106; Konstante der Aichungsskala 106; Nadellänge 107; Reduktionsfaktor 107.
 Tauchbatterie, kleine 32 (Fig. 15), 40 (Fig. 18).
 Tauchelement 69; kleines 23, 32, 35 (Fig. 17).
 Telegraph, elektro-chemischer 110; elektro-magnetischer 110; elektro-statischer 109; Schreib- — 112; Zeiger- — 112.
 Telegraphenanlage 114.
 Telegraphenmodell 113.
 Telephon 154—158; — Modell 156.
 Theorie der Dynamomaschine 145 bis 159; — des galvanischen Stromes 110.
 Theoretische Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetz 84, 95.
 Thermo-elektrische Reihe 120.
 Thermo-elektrische Ströme 119; Richtung der — 119, 120.
 Thermo-Element 117, 118 (Fig. 60).
 Thermo-Säule 120.
 Thonzellen bei galvanischen Elementen 31.
 Tierische Elektrizität (Volta's) 29.
 Tragkraft eines Joule'schen Elektromagnets 52.
 Transformation galvanischer Ströme in hochgradige 138;
 — hochgradiger Ströme in niedere von großer Stromstärke 142, 154.
 Transformator 142, 154.

- Umsetzung der elektrischen Energie beim Telephon 158.
 Unbeständigkeit des Volta'schen Elements 26; Ursache 27, 28.
 Universalgestell 172—175 (Anh. 11).
 Ungleichnamige Magnetpole 4.
 Unterbrechungsrad 137.
 Unterbrechungsstrom (Öffnungsstrom) 137.
 Unterschied: zwischen magnetischen und elektrostatischen Erscheinungen 6—8;
 — der statischen und der dynamischen Elektrizität 16;
 — der unitaristischen und der dualistischen Hypothese 7, 10;
 — der Wirkung eines Elements und der Influenzmaschine 26, 61.
 Ursache: des elektrischen Stromes 17; des galvanischen Stromes 28—30; des Induktionsstromes 132.
 Vergoldung (galvanische) 109.
 Verschiedene Gruppierung der Elemente einer Batterie 86.
 Vergleich: des Daniell'schen und des Chromsäure-Elements 35; — einiger konstanter Elemente 37; — der Grad- und der Aichungsskala des Galvanometers 106; — der magnetischen und der elektro-statischen Erscheinungen 7.
 Verhinderung der Wasserstoffbildung im Elemente 31.
 Verhalten des Eisens und des Stahls beim Magnetisieren 2, 6, 56.
 Verhältnis zweier Mafse der Stromstärke 76.
 Verkupferung, galvanische 109; — der Kupferstäbe 32 (Fußnote 5).
 Verlauf des Elektrisierungsgrades (Potentials) im Stromleiter 9, 10, 41;
 — der magnetischen Kraftlinien 146, 155;
 — Stromgefälles 13—15, 41.
 Verwandlung galvanischer Ströme in hochgradige 138; — hochgradiger Ströme in niedere 142, 154.
 Volt, das als praktische Einheit der *EK* 16 (Fußnote 3), 104.
 Volta's Element (Becher) 23; — Entdeckung 29; — Fundamentalversuch 30, 167 (Anh. 2); Kontakttheorie 29, 167 (Anh. 2); Spannungsreihe 168 (Anh. 2).
 Voltameter 100.
 Voltmeter 101.
 Voltskala des Elektrometers 104; Herstellung 104.
 Vorgang der elektrischen Entladung 8.
 Wagner'scher Hammer 140.
 Wahre Ablenkung der Galvanometer-Nadel 67.
 Wandlungen der Hypothesen 162.
 Wärmewirkung des elektrischen Stromes 98, 153.
 Wasserstoffbildung im Volta'schen Element 28.
 Wasserstoff-Voltameter 100.
 Wasserzersetzung 99, 100.
 Weber und Gauss, elektro-magnetischer Telegraph 111.
 Wechselströme 143, 152.
 Wechselwirkung: zwischen Magneten 4; zwischen Magneten und Stromleitern 47; zwischen Stromleitern 44.
 Wellen, stehende elektrische 165.
 Wheatstone, Nebenschluß-Schaltung der Dynamomaschine 151; Zeigertelegraph 96.
 Widerstand 73; elektrischer — 74, 89 (äußerer 80; innerer 80; spezifischer 91).
 Widerstand: bei verschiedener Gruppierung der Elemente 86; — der Galvanometer-Rollen 174 (Anh. 11); der Induktions-Rollen 144.
 Widerstandseinheit 83.
 Widerstandsmessung 93; des inneren Widerstandes 93.
 Widerstandssatz 91 (Fußnote 15); 138.
 Widerstandsvergleichung von Drähten 89.
 Wirkung: eines großen Widerstandes auf das Fließen des Wassers 78;
 — eines Magnets auf einen anderen 44.
 — eines Magnets auf einen beweglichen Stromleiter 47.
 — eines Stromleiters auf einen Magnet 53.
 — kurzer, dicker Leitungsdrähte 71;
 — langer 72;
 — einer eingeschalteten Flüssigkeitssäule 73, 74.

Wirkung weichen Eisens im magnetischen Felde 146, 155, 156.

Wirkungsweise der Schaltung: auf die *EK* 34, 36;

— auf die Stromstärke 71, 74, 84, 86.

Wirkungsweise des Telephons 155—158.

Windungszahl, Einfluß auf die Ablenkung 60.

Widerspruch in den Angaben des Elektrometers und des Galvanometers 60, 75.

Wismuth 119.

Zink, Amalgamieren des — 27.

Zinkdraht 22.

Zinkstäbe 31; — -platten 21, 73.

Zinkvitriol (Zinksulphat) 28, 31.

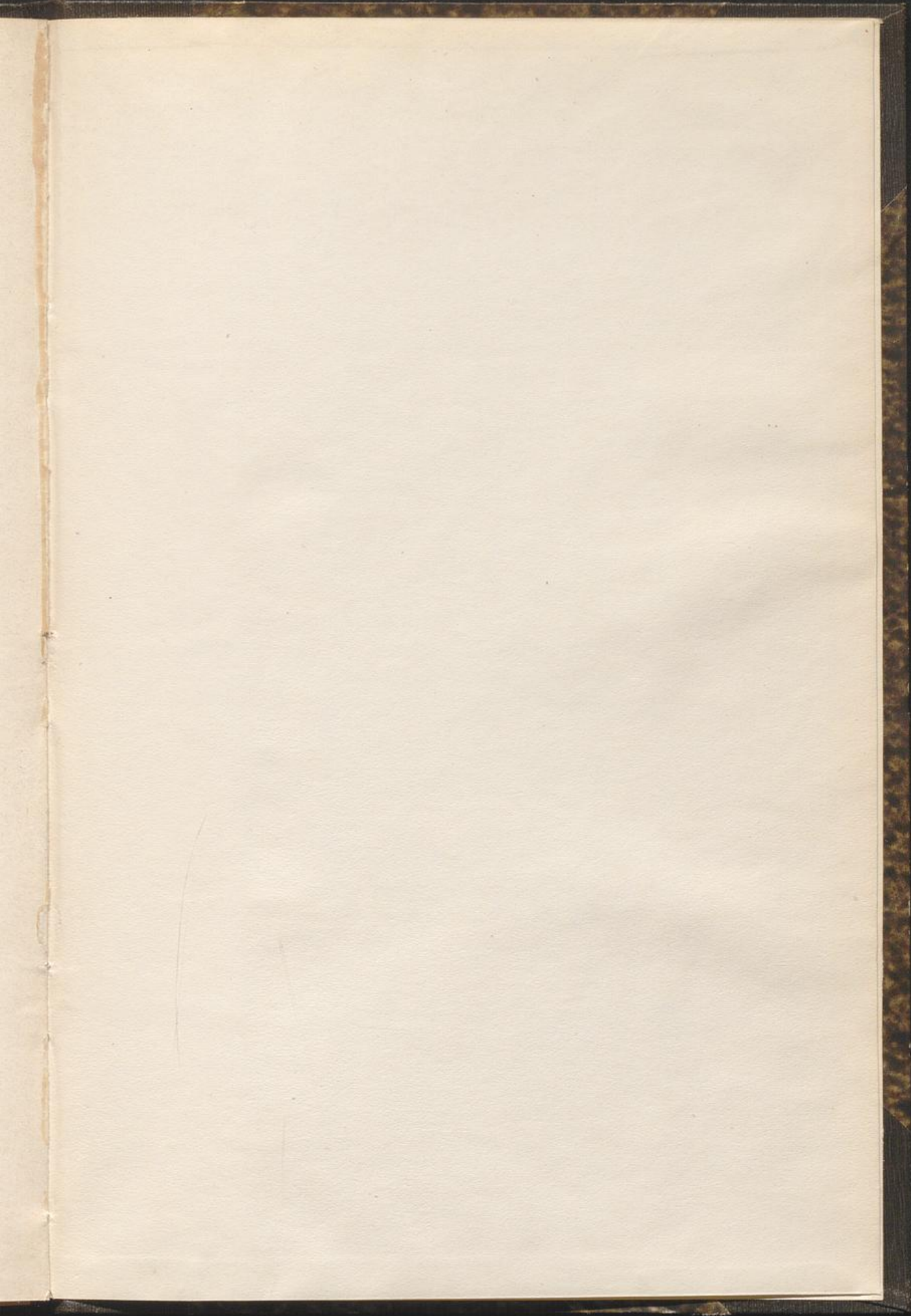
Zinnfolie (Stanniol) 43, 141.

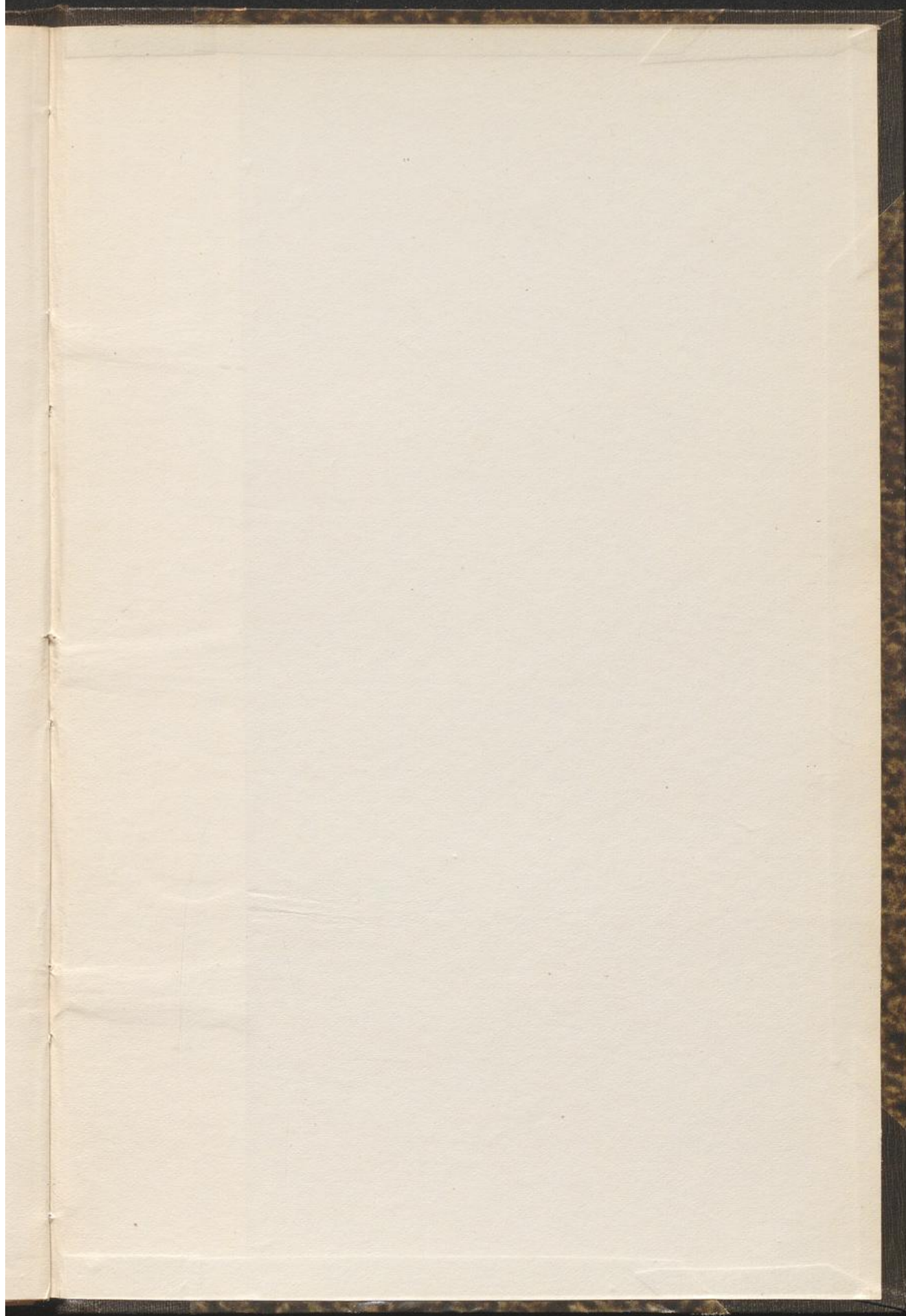
Zuleitungsdrähte, gedrehte 66 (Fussnote 9).

Zweigstrom 151.



Buchdruckerei von Gustav Schade (Otto Francke) Berlin N.







03M35101

P
03

M
35101