



## **Einführung in die Elektricitätslehre**

Vorträge

Dynamische Elektricität

**Kolbe, Bruno**

**Berlin, 1895-**

VI. Vortrag: Faraday's Fundamentalversuch. -  
Demonstrations-Multiplikator; Astatiche Nadel; Aperiodische Schwingung  
der Magnetnadel. - Erzeugung magneto-elektrischer Induktionsströme  
durch Bewegung ...

---

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

## VI. Vortrag.

Faraday's Fundamentalversuch. — Demonstrations-Multiplikator; Astatiche 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 Prinzip. — 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 ließ, 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 Hilfe 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 Hilfe 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 Eingangsthore dieses Gebiets prangt in glänzenden, unverlöschlichen Zügen der Name eines der genialsten Physiker aller Zeiten, des bahnbrechenden Erforschers der Elektricität: „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, umspinnenden 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.

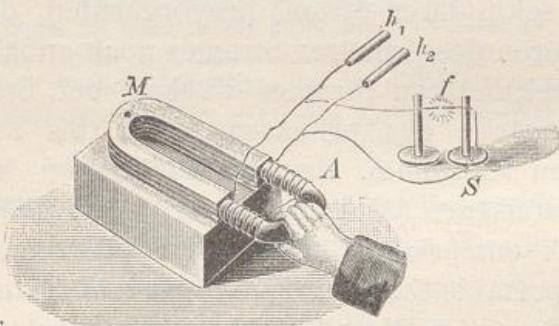


Fig. 61.

Faraday's Fundamentalversuch der magneto-elektrischen Induktion.  $1/10$  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  $1/2$  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

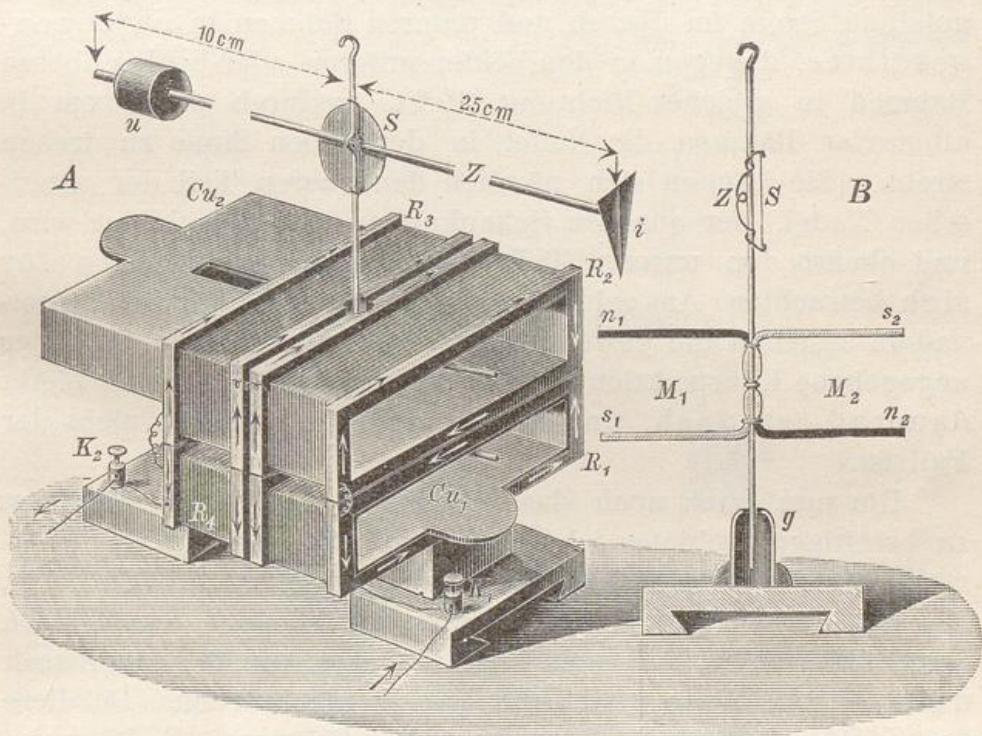


Fig. 62.

A Demonstrations-Multiplikator mit Kupferdämpfung (Cu) und Zeiger (Z).  $\frac{1}{2}$  natürl. Gröfse. B Astatiche Nadel nach Hempel, modifiziert 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, sodafs 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 Glasrörchen (g) mit glattem, etwas verengertem Rande. Oben trägt der Neusilberdraht einen Zeiger (Z), der aus einem Strohhalm 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 astaticischen 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 astaticischen Nadeln. Die hier angegebene Konstruktion ist viel leichter herstellbar und bleibt dauernd astatic, 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 astaticischen Nadel und den Neusilberdraht angebracht. Zur Probe berühre ich die Klemmschrauben ( $K_1 K_2$ ) der Rahmen mit den Poldrähten eines unserer kleinen Zink/Kupfer-Elemente, wobei ich den Kupferpol mit  $k_1$  verbinde (sodass 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 wird 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 Multiplikatordraht nach  $k_2$  fliesst, also bei  $k_2$  austritt!

\* \* \*

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

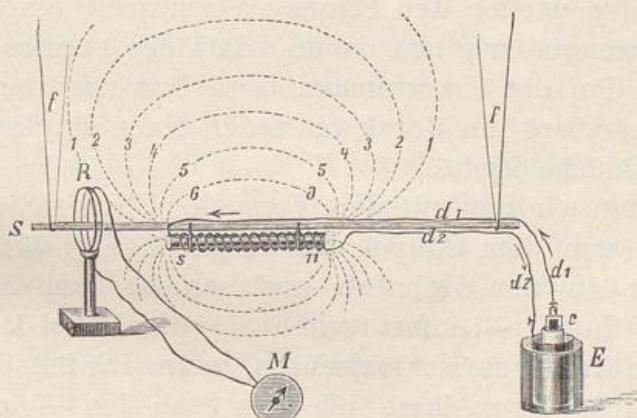


Fig. 63.

Erzeugung magneto-elektrischer Ströme durch Verschiebung des Leiters (R) im magnetischen Felde.  $1/20$  natürl. Grösse.

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 Elektromagneten 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 Magneten um seine Achse, so werden die jetzt sichtbaren Kraftlinien wegen der symmetrischen Form des Magneten sehr ähnlich den vorigen sein, aber doch räumlich einer anderen Schnittebene entsprechen. Wir sehen hieraus jedenfalls, dass der ganze Raum, welcher den Elektromagneten umgibt, 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 Drahtring (R, Fig. 63), der aus etwa 10 Windungen umspinnenden 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 Drahtringes schwebt. Jetzt verbinde ich den Drahtring durch biegsame lange Drähte mit dem weitab auf dem anderen Ende des langen Experimentiertisches aufgestellten Multiplikator (M) und schliesse wieder den Strom. Vermittelst 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 Papiers, das ich auf die Polfläche klebe.

Beginnen wir nun mit dem Versuch. Eben steht der Drahtring nahe vor dem Südpol des Magnets (Fig. 63). Ich lege den Finger an den Holzstab und schiebe den Südpol zum Drahtringe 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 Drahtringe 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 nach einander 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 Drahtringe 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 Drahtring, 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 Nulllage zurück, um aber nach der anderen Seite auszuschlagen, 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

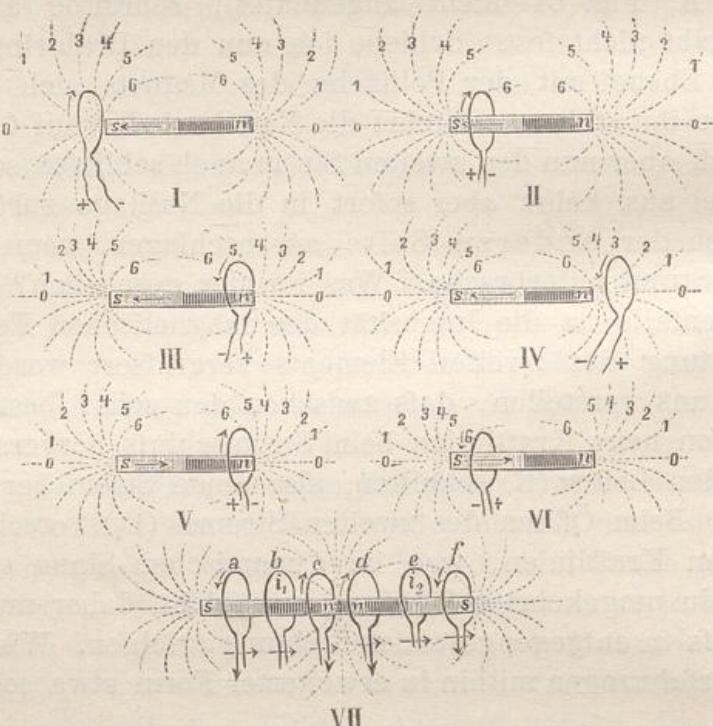


Fig. 64.

Nachweis des Lenz'schen Gesetzes der magneto-elektrischen Induktion.  
[Bei I ist die linke, durch den Pfeil markierte Hälfte des Drahtringes, 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 Drahtringe nur eine Windung angegeben.)

Schiebe ich nun den Südpol des Magnets dem Drahtringe 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 Drahtring fliesst, also in diesem die Richtung hat, die der Pfeil angiebt.

Während die Mitte des Magnets den Drahtring 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 Drahtringe mit der Ihnen (S. 55) bekannten Richtung der hypothetischen Ampère'schen Molekularströme (die hier, wo ein Elektromagnet vorliegt, dem induzierenden galvanischen Stromen 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 innen<sup>20)</sup> vom Leiter geschnitten (I, II, V), so ist der Induktionsstrom der Richtung der magnetischen Molekularströme (resp. dem induzierenden 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 induzierenden 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

<sup>20)</sup> 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 „äuferen“ (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 induzierende 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 Drahtringes (oder umgekehrt) entsteht in diesem ein Induktionsstrom. Die Richtung des Induktionsstromes ist immer eine solche, dass der Induktionsstrom dem induzierenden Strom oder dem Magnet die entgegengesetzte Bewegung erteilen würde. (Lenz'sche Regel.) Wird z. B. ein Nordpol dem Drahtringe genähert, so ist der Induktionsstrom den Molekularströmen entgegengesetzt und sucht also den Magnet zurückzustossen. Wird der Nordpol entfernt, so ist der Induktionsstrom den Molekularströmen gleichgerichtet und sucht den Magnetpol heranzuziehen. Aus der Lenz'schen Regel ergiebt 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 Drahtring; 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

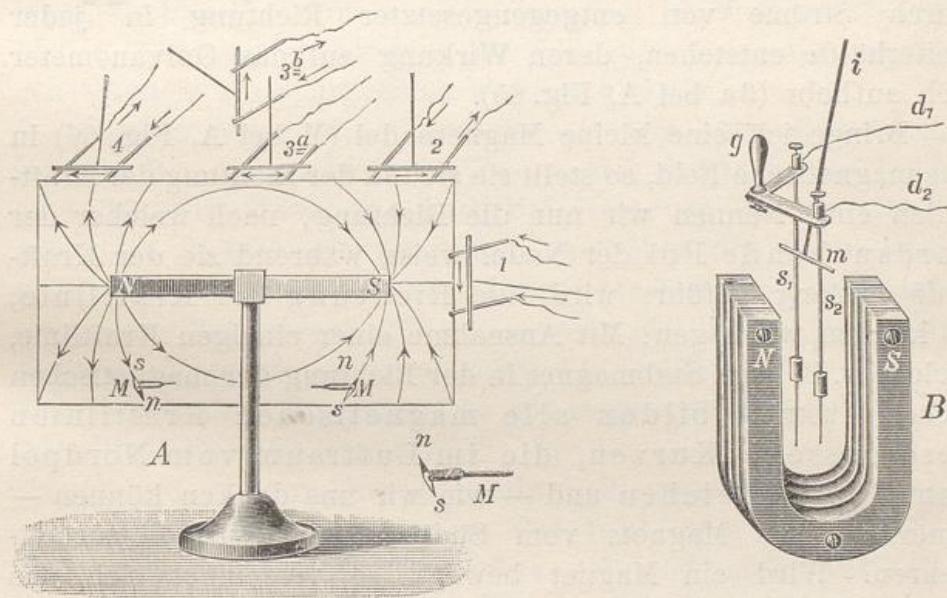


Fig. 65.

A Demonstration der Induktionsströme nach Pfaundler.

B Demonstration der Induktionsströme nach Szymański.  $\frac{1}{10}$  natürl. Grösse.  
[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 Gedächtnissregel 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 (sodass die Fingerspitze dahin weist, wohin der Nordpol einer Magnetnadel 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, dass diese zwischen beiden Polen am dichtesten, an der Außenseite 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, dass 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, dass eine Vergrößerung 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 Induktions-ströme.

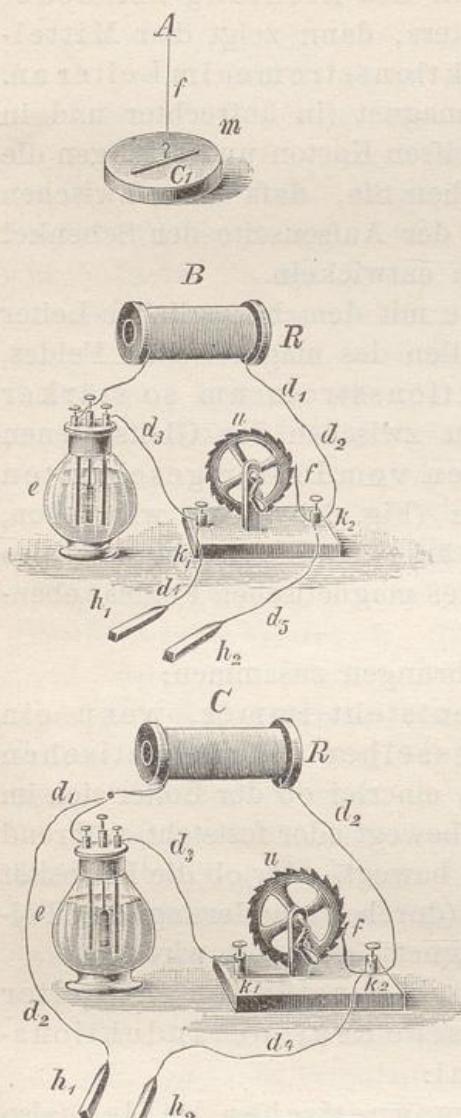


Fig. 66.

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

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

ein elektrischer Strom fließt, eine magnetische Richtkraft hat (S. 46), also ein magnetisches Feld aufweist, so muss bei einer

Drahtspule (Solenoid) jede Windung in dem magnetischen Felde der benachbarten Windungen sich befinden, mithin wird jede Windung einer Drahtspule auf die andere induzierend 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 Holzeylinder gewickelt ist und aus etwa 30 Windungen starken umspinnenden 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 ( $d_4$   $d_5$ ) 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 Stromstöfse auf einander folgen. Noch heftiger, ja schmerhaft 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.

Exaström.

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“ genannt<sup>21)</sup>.

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 umgibt (A, Fig. 67, II), ohne mit ihr in Berührung zu kommen. Diese „sekundäre Spirale“ besteht aus vielen Windungen feinen umspinnenden 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 Drahtringen 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

<sup>21)</sup> 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 umspinnenden 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.

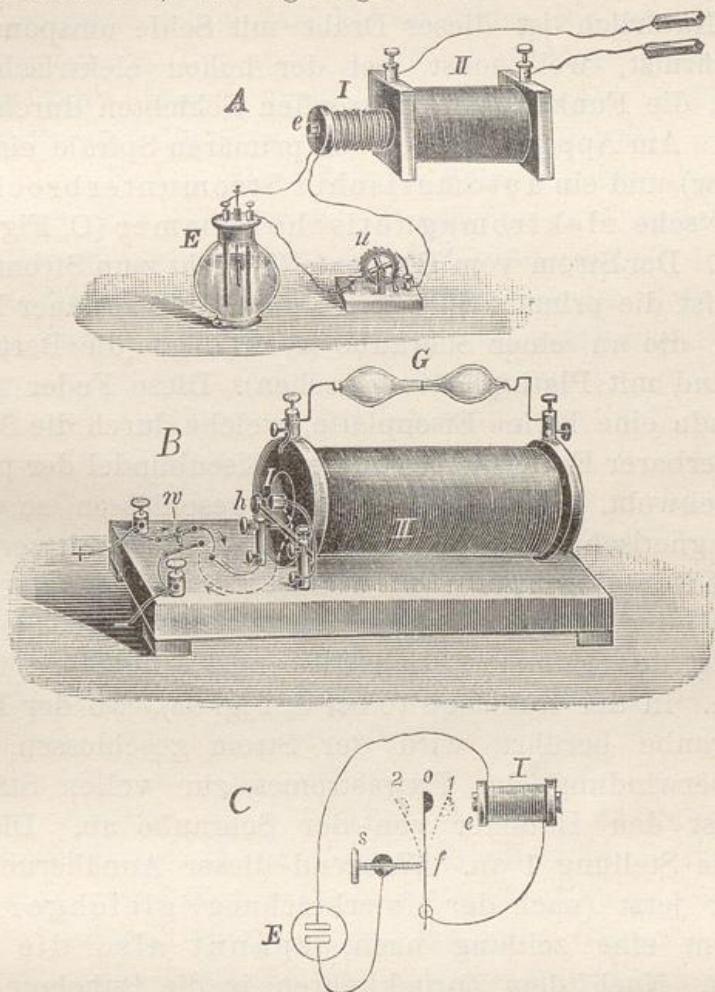


Fig. 67.

- A Induktionsrolle.  $1/10$  natürl. Gröfse.  
 B Röhmkorff'scher Funkeninduktor.  $1/10$  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 gefirnißt, weil sonst, bei der hohen elektrischen Poldifferenz, 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 Kontaktsschraube (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 Öffnungsfunk 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 bestimmbarer Tonhöhe annimmt. Die Schläge, welche dieser Induktionsapparat auszuteilen vermag, sind, wenn auch nicht lebensgefährlich, doch recht unangenehm, selbst schmerhaft. Schraube ich an die Klemmen der sekundären Spirale Drähte, die mit Siegel-lackgriffen versehen sind, und nähre 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 (Geifsler'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 größer ist als die des primären Stroms. Wir sind also imstande, hochgradige Ströme in Ströme von geringerer elektromotorischer Kraft, aber größerer Stromstärke umzuwandeln (zu transformieren). Apparate dieser Art heissen Transformatoren. Dass bei einem solchen Transformator die Isolierung der Windungen besonders gut sein muss, ist ohne weiteres klar. In der Technik haben diese Apparate eine große Bedeutung erlangt.

\* \* \*

Bei den Induktionsapparaten (und Transformatoren) entsteht der Induktionsstrom bei ruhendem Leiter (und ruhendem Elektromagneten) 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 ließ man den Eisenkern mit den Drahtspulen vor dem festen Hufeisen-Magnet rotieren, was — besonders bei größeren 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

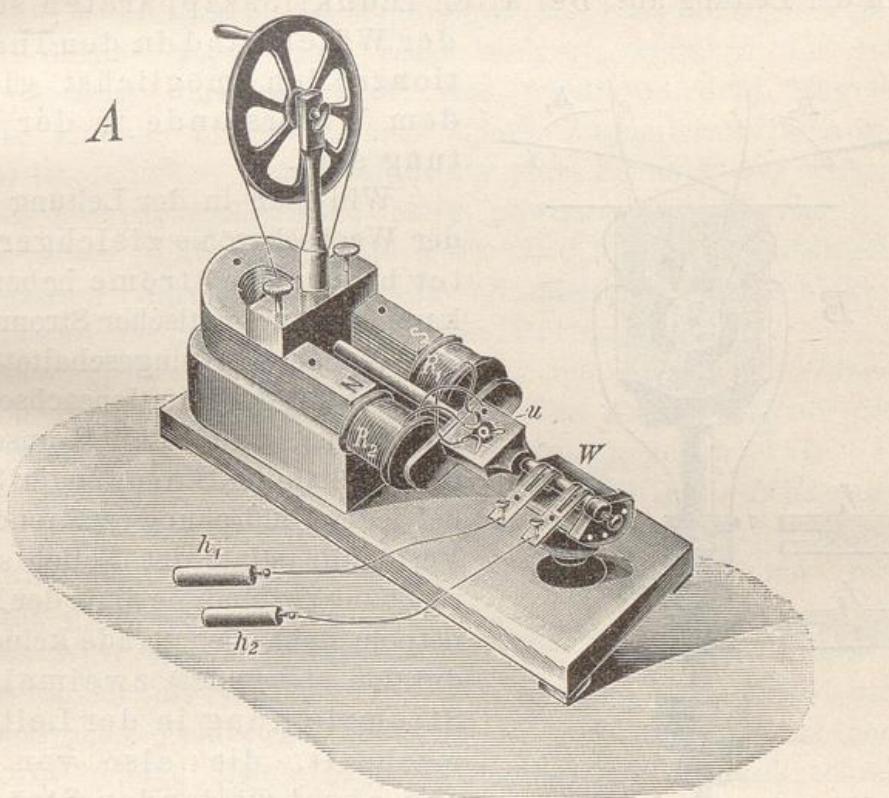


Fig. 68 A.  
Magneto-elektrische Maschine nach Stöhrer.  $1/10$  natürl. Gröfse.

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 Verbindungsleitung der Rollen senkrecht zur Verbindungsleitung der Magnete 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.

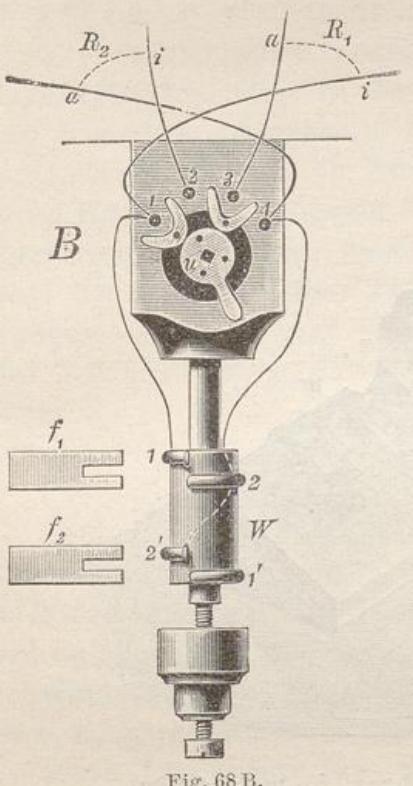


Fig. 68 B.  
Stromwender der Magneto-elektrische  
Maschine nach Stöhrer.  
 $\frac{1}{5}$  natürl. Gröfse.

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 Dynamomaschine<sup>22)</sup> führte, that dann der bekannte gelehrt 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).

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-

Siemens'  
Dynamo-  
elektrisches  
Princip.

<sup>22)</sup> 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 außergewöhnliche Verstärkung der Wirkung einer Induktionsspule durch Einführung eines Eisenkernes; s. o. S. 137 u. 139).

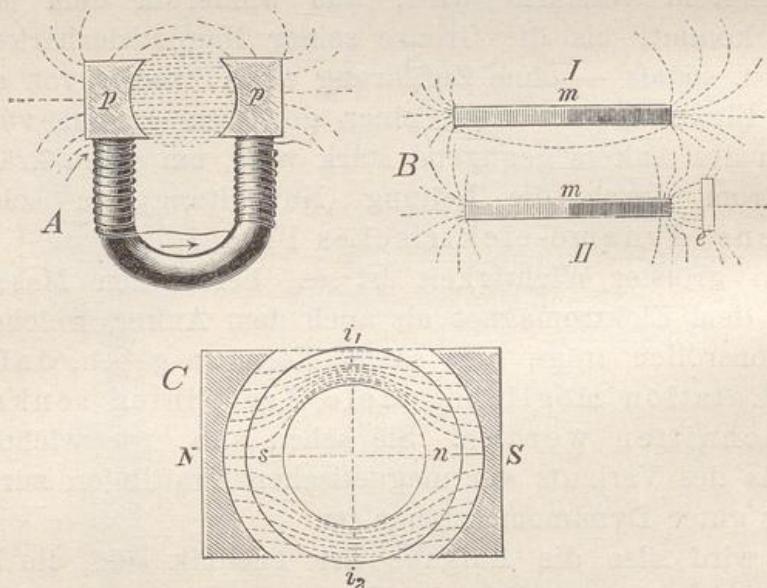


Fig. 69.

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 induzierten 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 ergiebt 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.

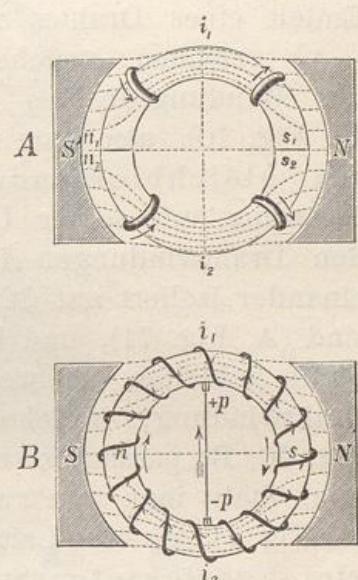


Fig. 70.  
Schematische Skizze des  
Pacinotti'schen Ringes.

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 Umwickelung (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 Elektricität 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 Windungsdrähtes 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 Umwickelung rotiert. Führt man von den Drahtwindungen Drähte zu Kupferstreifen, welche von einander isoliert auf der Drehungssachse 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 Gröfse 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.

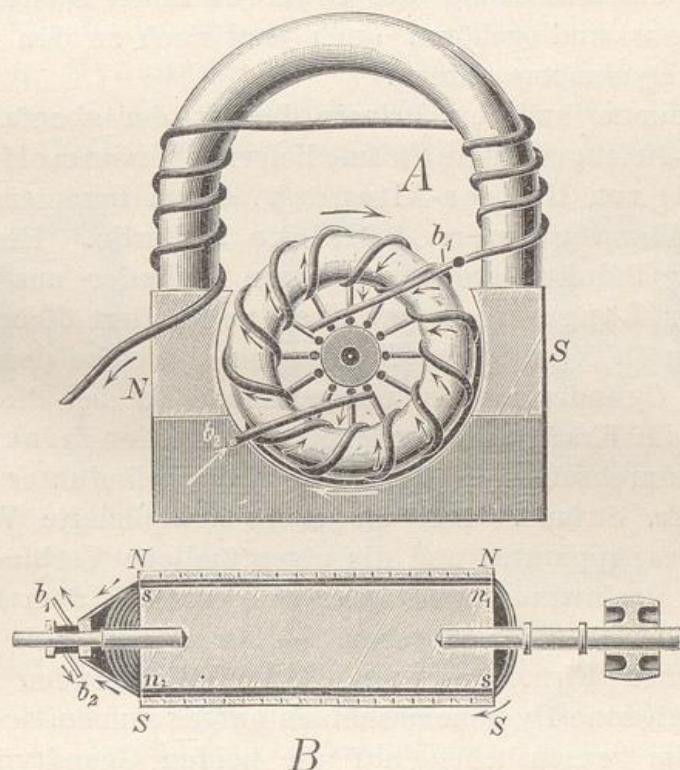


Fig. 71.

A Pacinotti-Gramme'scher Ring (Modell nach Weinhold).  $1/12$  natürl. Gröfse.  
B v. Hefner-Alteneck'scher Trommelinduktor im Querschnitt.

Die erste magneto-elektrische Maschine, welche konti- Geschichtliches  
nuierliche 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

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 wesentliche 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 Prinzip 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 Dynamoprincips, 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 Nebenschlusschaltung (II, Fig. 72), welche Wheatstone (1867) vorschlug, leitet von den Bürsten des Kollektors ( $b_1$   $b_2$ ) einen Zweigstrom als Nutzleitung ab.

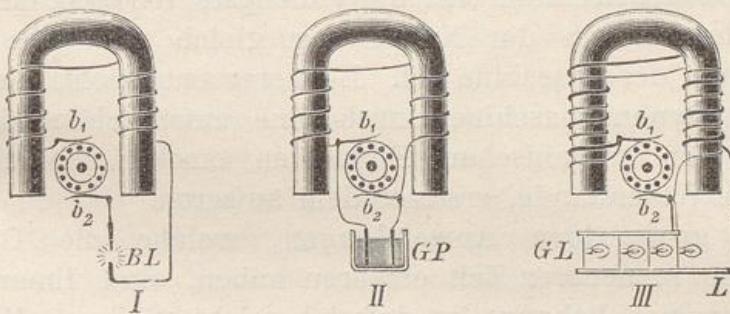


Fig. 72.

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 Komoundschaltung 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 gröfserer Stromteil durch die vielen Windungen des dünnen Drahtes, wodurch das magnetische Feld und damit die gesamte Strom-stärke so bedeutend verstärkt wird, daß eine solche Maschine (mit Komound-Schaltung) bei Schwankungen im Widerstande der Nutzleitung innerhalb weiter Grenzen dennoch eine recht konstante elektrische Poldifferenz<sup>23)</sup> 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 Draht-windungen 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 äufseren.

Die grofsartigen 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 Strafzen und der Leuchttürme geschieht durch Bogenlampen, bei denen zwei harte Kohlenstäbe durch automatische Vorrichtungen beim Strom-schluß 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).

<sup>23)</sup> 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 aufserordentliche 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 zusammen geschweißt und wieder klangfähig gemacht waren. — Auch die hartnäckigsten Sauerstoffverbindungen werden jetzt durch die Hitze des elektrischen Bogens gelöst und man stellt (vermittelst 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 Schwungrad 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 Brändschäden 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 niederm 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 Telefon 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 Pole eines Magnets wird in einer diesen umgebenden Drahtrolle ein Induktionsstrom hervorgerufen; desgleichen während des Entfernens der Eisenplatte, doch ist die Stromrichtung die umgekehrte. Steht die Eisenblechplatte dem Magneten recht nahe,

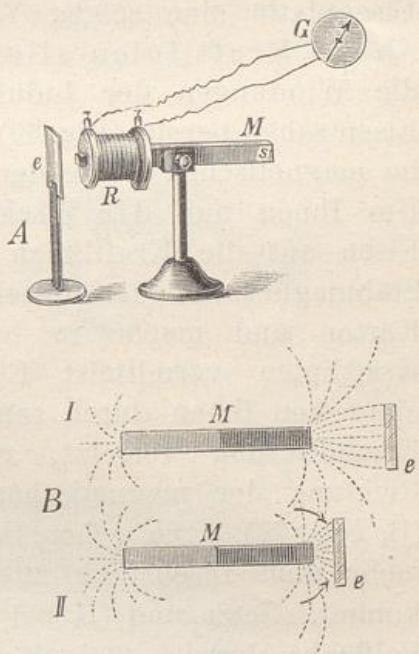


Fig. 73.  
Wirkungsweise des Telephons.  
 $\frac{1}{10}$  natürl. Grösse.

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 gleich bedeutend 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 Telefonmodell (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

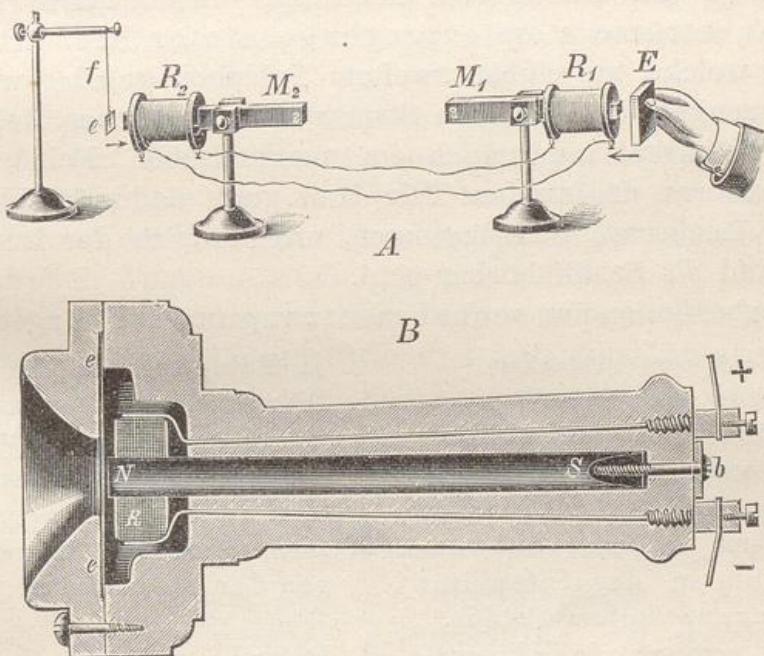


Fig. 74.  
A Einfaches Telephon-Modell nach Bosschard.  $1/10$  natürl. Gröfse.  
B Bell'sches Telephon.  $1/2$  natürl. Gröfse.

Tempo, in welchem die Feder schwingt, die Eisenscheibe E näherte 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 Stahlstäbe, der in einem durch eine Schraube (f) regulierbaren, sehr kleinen Abstande 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 Telefons 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 Intensitätschwankungen des magnetischen Feldes. |
| 2. Hierdurch entstehen Schwingungen 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 Telefons 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 Telephones 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 Absendetelephons. Der Ton wird hierbei so verstärkt, daß z. B. das Kriechen einer Fliege als lautes Kratzen hörbar wird. Vermittelst 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 Übermittelungen 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)

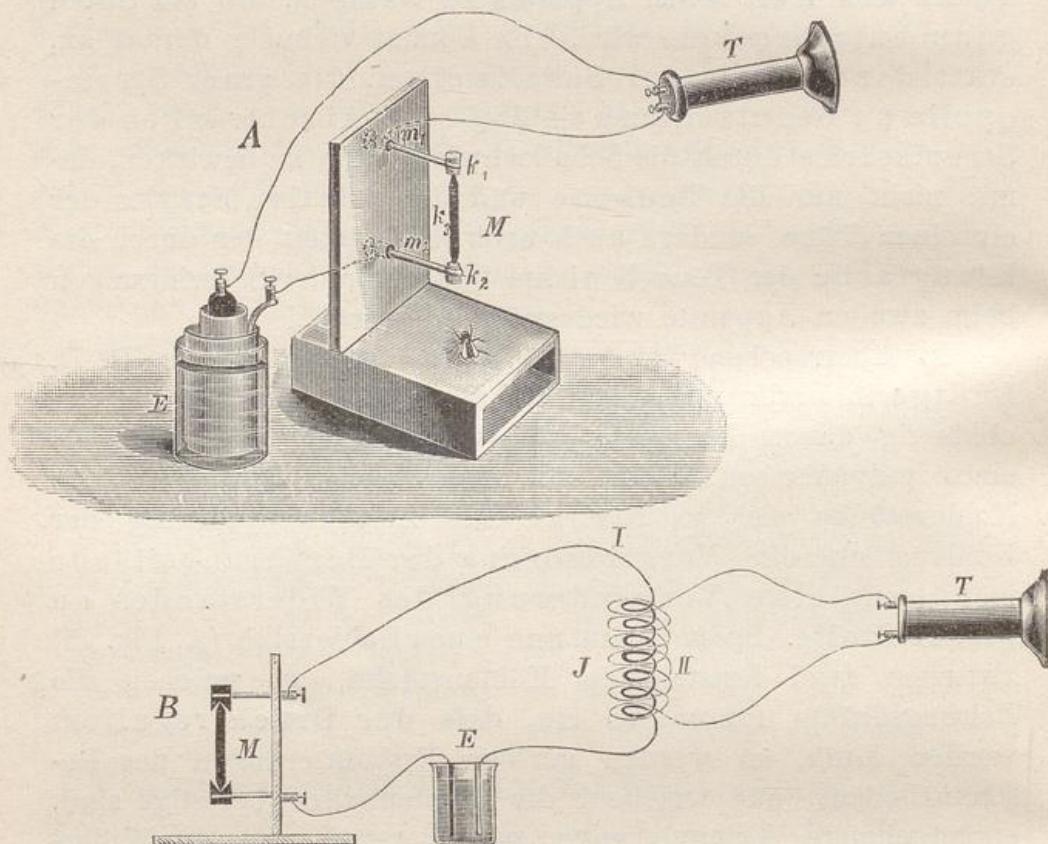


Fig. 75.

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

hochgradige Induktionsströme erzeugt, die noch auf weite Entfernungen energisch auf das mit ihr verbundene Telefon (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, vor trefflich 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.

Mehrfa ch 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 Jetzzeit vorzudringen suchen<sup>24)</sup>.

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 Zusammenhangs ist von bleiben-

<sup>24)</sup> 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 Elektricität 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 Elektricitätsstoff (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 Elektricität zeigten, da fiel die Schranke zwischen beiden und die Annahme eines besonderen imponderablen 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 imponderablen 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, unfafbare 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 jeweils 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-elektrischen 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 Bewegungerscheinungen 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 Schlag 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 fortpflanzen, 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 Raum in senkrechter Richtung zur Schwingungsebene der einzelnen Teilchen erfolgt (transversale Schwingungen). Die Strecke, um welche die Bewegung im Raum fortrückt, 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 ergiebt 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 fortführen 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 Elektricität — 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 Elektricitätslehre 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!