

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Neueste Anschauungen über Elektrizität

Lodge, Oliver

Leipzig, 1896

Theil III. Magnetismus

THEIL III
MAGNETISMUS

KAPITEL VII

BEZIEHUNGEN ZWISCHEN MAGNETISMUS UND ELEKTRICITÄT

68. Wir kommen nun zur *rotirenden* Elektrizität. Was geschieht, wenn man die Elektrizität in wirbelnde Bewegung versetzt? Man wickele einen stromdurchflossenen Draht zu einer Spule zusammen und prüfe. Man wird finden, dass die Spule sich verhält wie ein Magnet. Magnetnadeln, die man in ihre Nähe bringt, werden abgelenkt, Stahl wird magnetisirt, und eiserne Nägel oder Eisenfeilspäne werden angezogen, ja, wenn der Strom stark genug ist, in sie hineingesogen. Kurz, *sie wird zum Magneten*; natürlich nicht dauernd, sondern nur so lange der Strom anhält. Die Annahme liegt nahe, dass Magnetismus möglicherweise einfach rotirende Elektrizität sein könnte. Verfolgen wir diesen Gedanken weiter.

Vor allen Dingen ist zu bemerken, dass eine Drahtspule, durch die ein Strom geleitet wird, sämtliche

Eigenschaften eines wirklichen Magneten besitzt. (Die umgekehrte Behauptung würde nicht ganz zutreffen.) Lässt man eine mit einer Batterie verbundene Drahtspule auf dem Wasser schwimmen, so erhält man eine Magnetnadel; ihre Achse stellt sich ganz von selbst in der Richtung von Norden nach Süden ein. Wenn man zwei Drahtspulen frei aufhängt, so tritt Anziehung, Abstossung oder Drehung ein, genau wie bei zwei Magneten.

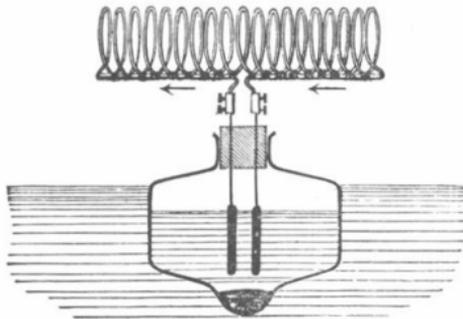


Fig. 16. — Schwimmende Batterie mit Spirale, die sich wie eine Magnetnadel verhält.

69. Solange es sich um die Wirkung der Drahtspule auf entfernte Gegenstände handelt, ist die Gestalt des Magneten, den sie ersetzt, unwesentlich; sobald man sich aber mit ihrer Wirkung auf Dinge in ihrer unmittelbaren Nähe beschäftigt, muss die Gestalt der entsprechenden Magneten näher angegeben werden.

Ist die Drahtspule eine lange, cylindrische Spirale, wie ein enggewundener Korkzieher (Fig. 16), so verhält sie sich wie ein cylindrischer Magnet von gleichem

Umfang. Bildet sie dagegen einen kurzen, breiten Ring, so verhält sie sich wie ein cylindrischer Magnet, der unendlich kurz, mit einem Wort eine Scheibe ist. Eine Stahlscheibe, die so magnetisirt ist, dass die eine Oberfläche ein Nordpol, die andere ein Südpol ist, kann man jedem dünnen stromdurchflossenen Draht ring entsprechend gestalten. Je nach der Form des Ringes wird sie rund, viereckig oder unsymmetrisch sein.

Der Ring braucht nicht aus mehreren Windungen zu bestehen; die Zahl der Windungen erhöht nur seine Leistungsfähigkeit; eine einzige genügt, auch darf sie von jeder beliebigen Form und Grösse sein. Da, wie erinnerlich, jeder Strom in einem geschlossenen Kreise fliesst, so ist also *jeder Strom eigentlich eine Spule von mehr oder weniger willkürlicher Gestalt*, entspricht mithin irgend einem Magneten, dessen Form bestimmbar ist. Hieraus geht hervor, dass jeder elektrische Strom magnetische Eigenschaften besitzen muss; beide Erscheinungen sind unzertrennlich — eine Thatsache von grosser Wichtigkeit. Siehe Anhang (a).

In einem Punkt unterscheidet sich die Drahtspule, und zwar zu ihren Gunsten, von der magnetisirten Scheibe; sie besitzt nämlich eine Eigenschaft, die dem gewöhnlichen Magneten abgeht; ihr Inneres ist zugänglich. Die Wirkungen auf den äusseren Raum sind die gleichen; die Wirkungen auf den Innenraum sind aber verschieden. Die Drahtspule besitzt sämtliche Eigenschaften des Magneten, der Magnet aber vermag

die Drahtspule nicht in jeder Beziehung zu ersetzen; das Perpetuum mobile würde sonst eine Alltagserscheinung sein.

70. Ich möchte nun recht anschaulich und eindringlich auf die Thatsache hinweisen, dass der Magnetismus in gewisser Weise mit Rotationserscheinungen verknüpft ist. Es liegt etwas in seinem Wesen, das, wenn man zweckmässig verfährt, leicht und naturgemäss zu einer drehenden Bewegung führt. Dies lässt sich an zwei Magneten nicht nachweisen, vielmehr muss man dazu einen Strom und einen Magneten haben und ihr gegenseitiges Verhalten beobachten.

Ein Magnet enthält bekanntlich zwei Pole — einen Nordpol und einen Südpol —, die entgegengesetzte Eigenschaften besitzen. Für viele Zwecke kann man ihn sich einfach als aus diesen beiden Polen bestehend denken und die Wirkung, die ein Strom auf einen Magneten ausübt, kann gedacht werden als zusammengesetzt aus seiner Wirkung auf jeden dieser Pole. Wie wirkt nun ein Strom auf einen magnetischen Pol? Zwei Ströme ziehen einander an oder stossen einander ab; zwei Pole desgleichen; aber ein Pol und ein Strom thun weder das eine noch das andere; sie üben eine drehende Kraft auf einander aus. Sie streben weder danach sich zu nähern, noch sich zu entfernen, sondern sie streben danach sich um einander zu drehen. Diese Wirkung ist seltsam und scheint auf den ersten Blick einzig in ihrer Art zu sein. Alle gewöhnlichen Wir-

kungen und Gegenwirkungen zwischen zwei Körpern vollziehen sich in der geraden Linie, welche beide verbindet; die Kraft zwischen einem Strom und einem Pol wirkt im rechten Winkel zu dieser Linie.

Helmholtz hat schon vor längerer Zeit (1847) nachgewiesen, dass das Princip von der Erhaltung der Kraft nur dann richtig sein kann, wenn die Kräfte zwischen zwei Körpern irgend eine Funktion der Entfernung zwischen den Körpern sind und in ihrer Verbindungslinie wirken. Hier haben wir nun einen Fall, wo die Kraft nicht in der Verbindungslinie wirkt; mithin erscheint die Erhaltung der Kraft widerlegt; die beiden Gegenstände können sich ewig um einander drehen. Dieser Umstand eröffnete den Verfechtern des Perpetuum mobile ein fruchtbares Feld; und wenn der Strom ohne fortgesetzte Arbeitsleistung erhalten werden könnte, so würde in der That das Perpetuum mobile verwirklicht sein. Allein hierin liegt schliesslich nichts Ungewöhnliches, denn dasselbe gilt von der Nähmaschine oder irgend einem anderen Mechanismus; wenn er ohne fortgesetzte Arbeitsleistung im Gange bliebe, so würde er ein Perpetuum mobile sein. Beschränkt man seine Aufmerksamkeit auf den Pol und den Strom, so wird die Kraft allerdings *nicht* erhalten, sondern vielmehr dauernd verschwendet; schliesst man aber die Batterie als einen wesentlichen Bestandtheil des ganzen Systems mit ein, so verschwindet alles Räthselhafte und der Vorgang erscheint vollkommen gesetzmässig.

71. Am einfachsten zeigt man vielleicht die Rotation eines Leiters, der einen elektrischen Strom um einen magnetischen Pol befördert, auf folgende Weise. Man hängt einen ungefähr 2 m langen Goldfaden, wie er

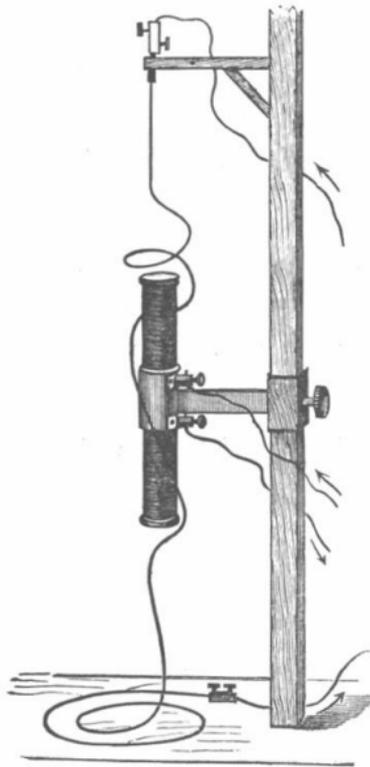


Fig. 17. — Langer, biegsamer Leiter, der sich als Spirale um einen kräftigen in seiner Nähe angebrachten Stabmagneten schlingt.

zum Besticken von Uniformen verwendet wird, senkrecht auf und sendet einen möglichst starken Strom hindurch. Alsdann nähert man einen Stabmagneten in verticaler Richtung. Sofort dreht sich der Faden in

eine Spirale, deren eine Hälfte sich um das nördliche Ende des Magneten schlingt, während die andere Hälfte als ein Theil derselben Spirale das südliche Ende umwindet. (Fig. 17.)

Wäre umgekehrt der Magnet biegsam und der

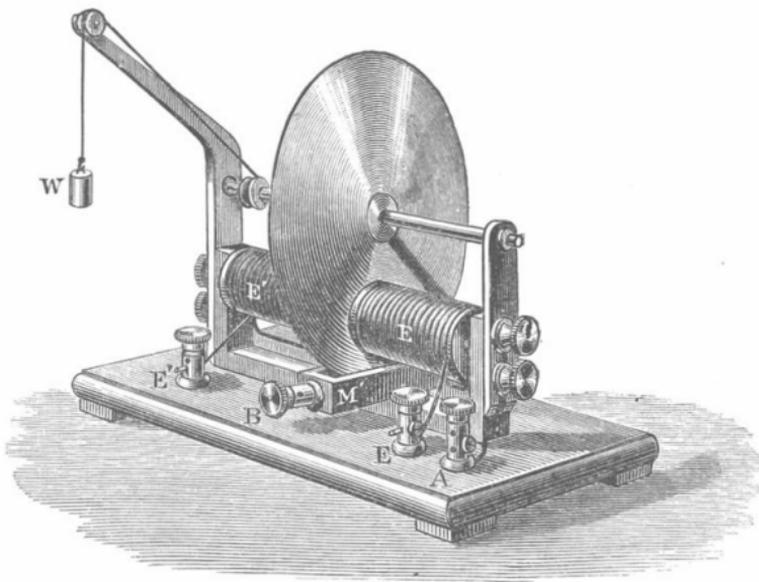


Fig. 18. — Drehbare Scheibe mit radialem Strom, die in einem magnetischen Felde rotirt und ein Gewicht hochwindet. Der Strom wird der Achse durch die Schraube *A* zugeführt und verlässt den Rand durch den Quecksilbertrog *M*. Derselbe Apparat eignet sich auch, um den durch Bewegung inducirten Strom zu zeigen, die direkte sowohl, wie die abschwächende Wirkung.

Leiter starr, so würde sich der Magnet in derselben Weise als Spirale um den Strom schlingen; die Erscheinung ist umkehrbar. Ein starrer Magnet, den man in die Nähe eines starren Leiters bringt, zeigt nur die letzten Spuren dieser Wirkung; er stellt sich im rechten

Winkel zu dem Draht ein und nähert sich seiner Mitte, um ihn zu berühren; mehr kann er nicht thun.

Der Versuch mit dem biegsamen Goldfaden ist einfach, überzeugend und wirkungsvoll. Aber die dem Magnetismus eigenthümlichen drehenden Eigenschaften können noch auf zahllose andere Arten anschaulich gemacht werden. Man mache z. B. eine Scheibe um ihren Mittelpunkt drehbar und stelle rings um den Rand oder auch nur an einem Punkt desselben einen

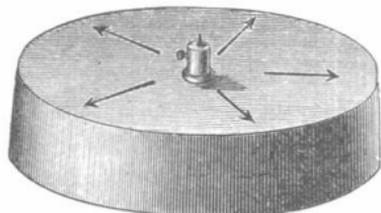


Fig. 19. — Anderes Modell einer drehbaren Scheibe mit Spurkranz, der in Flüssigkeit eintaucht und rings um den Rand den Contact herstellt. Sie rotirt bei der Annäherung eines Magneten von oben oder unten; oder sogar im Erdfeld.

leichten Contact her. Alsdann leite man einen Strom von der Mitte aus nach dem Rande der Scheibe und nähere der Contactstelle parallel zur Drehungsachse einen Stabmagneten, oder besser noch zwei Stabmagneten mit entgegengesetzten Polen, auf beiden Seiten der Scheibe. Die Scheibe wird sofort anfangen sich zu drehen. (Fig. 18 u. 19.)

Statt der Scheibe kann man auch einen einzelnen Radius derselben nehmen, d. h. einen drehbaren Arm

(Fig. 20), der in einen kreisförmigen Quecksilbertrog eintaucht; oder man nehme eine leichte Kugel, die auf zwei concentrischen Schienen läuft (Anordnung von Gore, Fig. 21).¹⁾ Die Rotation beginnt jedesmal, sobald man den Magneten nähert.

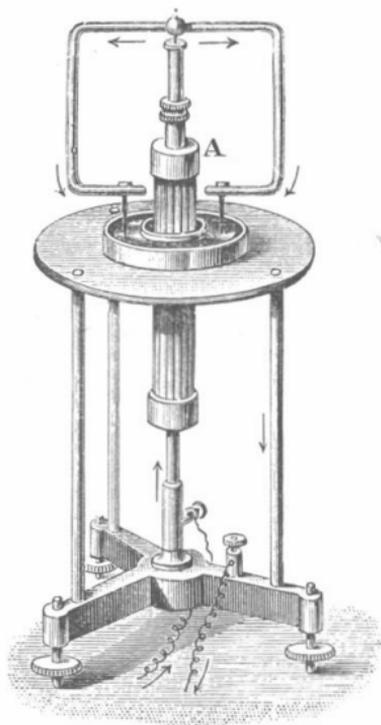


Fig. 20. — Zwei Radien der obigen Scheibe, mit Stiften versehen, die in das Quecksilber eintauchen. Die Scheibe rotirt beständig unter der Einwirkung des Stahlmagneten *A*, oder eines Stroms, der durch eine um den kreisförmigen Trog gewundene Drahtspule fließt.

¹⁾ Dies ist nicht die gewöhnliche Anwendung der Gore'schen Eisenbahn; auch ist die Ursache der Bewegung nicht dieselbe, die der Erfinder beobachtete und die in Tyndall's *Wärme* beschrieben ist. Gewöhnlich bewegt sich die Kugel infolge von Störungen, die durch Wärmeentwicklung an der Berührungsstelle zwischen Kugel und

72. Auch beschränkt sich die drehende Wirkung nicht bloß auf Leiter und wirkliche Leitung. Flüssigkeiten und Gase sind ihr in genau derselben Weise unterworfen, obgleich diese die Elektrizität eher übertragen als leiten.

Um das Rotiren flüssiger Leiter unter der Einwirkung eines Magneten zu zeigen, nehme man einen

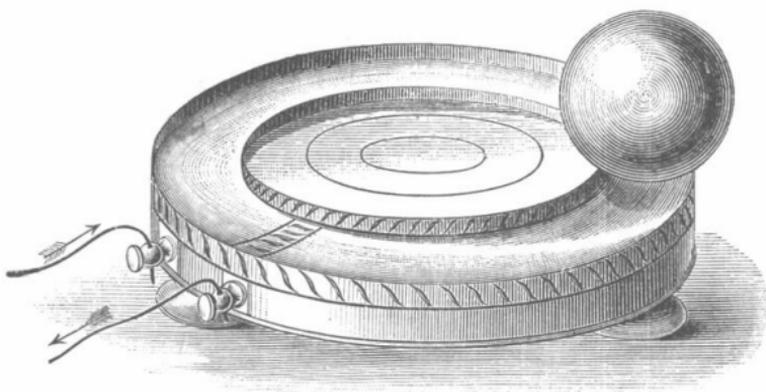


Fig. 21. — Kreisförmige Eisenbahn von Gore. Die leichte Metallkugel kreist auf zwei concentrischen Metallschienen, wenn sie in verticalem, magnetischem Felde einen Strom von der einen zur anderen leitet.

runden, flachen Trog mit Flüssigkeit, versehe ihn in der Mitte und am Rande mit starken Elektroden aus

Schienen entstehen; es ist dann ein reiner Zufall, in welcher Richtung sie rollt. Wenn aber das magnetische Feld der Erde stark genug wäre, so müsste sie eine bestimmte Richtung allen anderen vorziehen; und verstärkt man das Feld, indem man den Südpol eines Stabmagneten unter den Apparat bringt, so tritt echte magnetische Rotation ein. Es sei jedoch bemerkt, dass die eigenen Kraftlinien des Stroms in diesem Fall nicht im Stande sind, eine anhaltende Bewegung zu erzeugen. Ein äusseres Feld ist nothwendig.

Kupferblech und bringe den Pol eines Magneten unter den Apparat. Die Flüssigkeit geräth sofort in's Drehen und kann, wenn Strom und Magnet stark genug sind, in eine so heftige Wirbelbewegung versetzt werden, dass sie über den Rand des Troges wegspritzt (Fig. 22).¹⁾ Der Versuch ist derselbe wie auf Fig. 19, mit dem Unterschiede, dass die Scheibe nicht fest, sondern flüssig

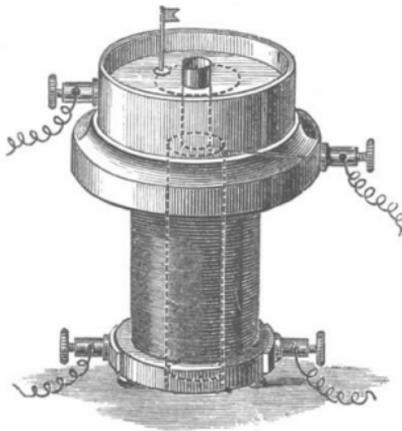


Fig. 22. — Rotiren einer Flüssigkeitsscheibe, die in verticalem magnetischem Felde einen radialen Strom leitet.

ist. Oder man kann ihn auch als gleichbedeutend mit Fig. 21 betrachten. Kehrt man den Strom um,

¹⁾ Bei der Ausführung dieses Versuchs theilt man am Besten den Strom zwischen dem Magneten und der Flüssigkeit, d. h. man schaltet sie besser parallel, als hintereinander. Auch empfiehlt es sich, die kleinere Elektrode zur Kathode zu machen, weil sich bei intensiven Strömen (z. B. 3 Ampère auf den qcm) auf der Anode eine Kruste von Oxyd bildet, deren Widerstand den Strom beinahe gänzlich unterbricht.

so findet die Drehung sofort in der umgekehrten Richtung statt.

Ein anderer Versuch ist der, einen Strom in der

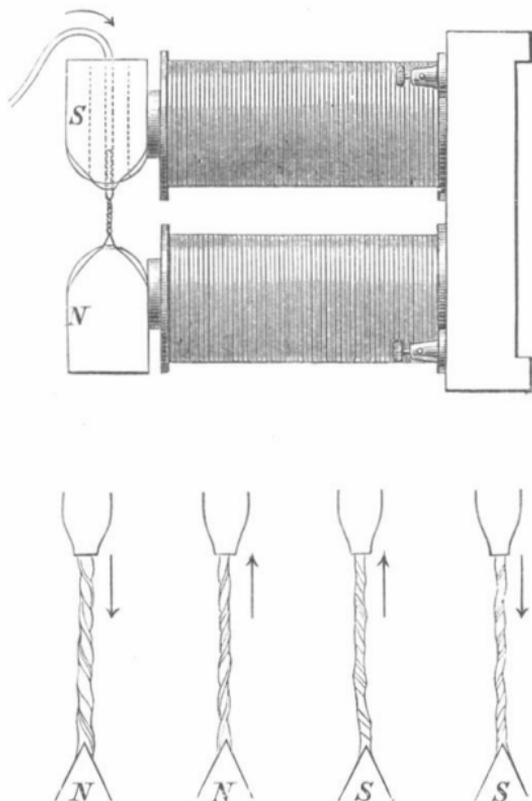


Fig. 23. — Flüssigkeitsstrahl, der einen Strom zwischen zwei magnetischen Polen leitet und dadurch in eine Spirale gedreht wird. (Die Abbildung ist einem Artikel von Herrn Silvanus Thomson im Phil. Mag. entlehnt.)

Nähe eines Magneten an einem Quecksilberstrahl entlang zu leiten. Der Strahl dreht sich sofort in eine flache Spirale wie auf Fig. 23.

Das Rotiren einer Entladung in Gas wird gewöhnlich durch folgenden Versuch veranschaulicht (Fig. 24). Man führt die Enden einer Induktionsspule in das verdünnte Gas ein und zwar oberhalb des einen Pols eines Magnetstabes und um seine Mitte. Wenn es gelingt, die

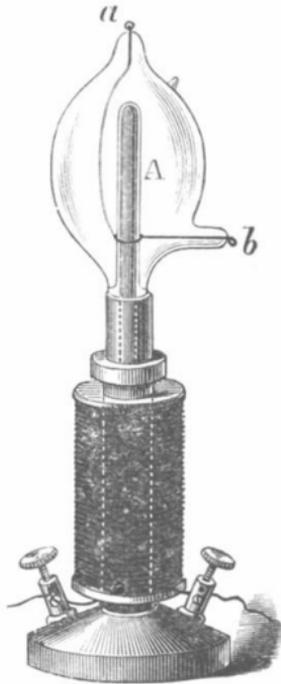


Fig. 24. — Entladung einer Induktionsspule von *a* nach *b* durch verdünntes Gas und deren Rotation um einen mit Glas geschützten magnetisirten Eisenstab.

Entladung hauptsächlich auf eine Seite zu concentriren, was nicht immer ganz leicht ist (es scheint vom Vorhandensein von Spuren eines fremden Dampfes, z. B. des CS_2 Dampfes im Vacuum abzuhängen), so sieht man, wie die leuchtende Bahn sich dreht.

Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einer fortbewegten elektrischen Ladung

73. Erinuert man sich dieser Thatsachen, sowie des Umstandes, dass eine fortbewegte Ladung ein Strom ist, so unterliegt es keinem Zweifel, dass ein geladenes Markkugelchen, das sich in der Nähe eines Magneten bewegt, dieselbe drehende Bewegung erleidet. Auf einen *ruhenden*, geladenen Körper übt der Magnet keine bekannte Wirkung aus. Sobald aber einer der beiden Körper sich bewegt, entsteht eine Kraft, die danach strebt, sie um einander zu drehen. Allerdings ist diese Kraft für gewöhnliche Geschwindigkeiten ausserordentlich klein; es ist jedoch ganz unzweifelhaft, dass, wenn man eine Anzahl geladener Markkugelchen oder Bär-lappsamen auf einen Magnetpol streut, sie nicht in einer geraden Linie fallen, sondern in schwach spiralförmigen Windungen.

Ebenso würden die Bahnen einer Anzahl geladener Theilchen, die von der Spitze eines Magneten horizontal oder radial ausgesandt würden, sich drehen wie die Strahlen eines Blickfeuers. Und wenn man sie auf irgend eine Art gerade erhielte oder in der entgegengesetzten Richtung ablenkte, so würden die Theilchen auf den Magneten ein unendlich kleines Drehungsmoment ausüben, unter dessen Einwirkung er danach streben würde, sich um seine eigene Achse zu drehen.

Würde umgekehrt ein Magnet mechanisch rasch um seine Achse gedreht, so ist anzunehmen, dass er auf geladene, in seiner Nähe befindliche Körper eine Wirkung ausüben müsste, die sie veranlasst, sich in radialer Richtung entweder zu nähern oder zu entfernen. Dies könnte am besten geschehen, indem man eine Art Elektrometernadel, die an einem Ende positiv, am anderen negativ elektrisirt wäre, in der Nähe des rotirenden Magneten aufhängte und nach den Spuren einer Ablenkung suchte, die bei umgekehrter Rotation im umgekehrten Sinne erfolgen müsste. Ein Magnet von veränderlicher Stärke wäre vielleicht noch zweckmässiger als ein rotirender Magnet.¹⁾ (Siehe §§ 114—116.)

Rotiren eines Magneten unter der Einwirkung eines Stroms

74. Am einfachsten lässt sich das wirkliche Rotiren eines Magneten nachweisen, indem man einen Strom bis zur Mitte hindurchleitet und dann ausserhalb wieder zurückführt. Man nehme einen kleinen, runden, polirten, stählernen Stabmagneten mit spitzen Enden, spanne ihn in senkrechter Richtung drehbar ein und versehe ihn an einem der Pole, sowie in der Mitte mit je einem Con-

¹⁾ Ueber Versuche, welche diese Wirkung nachweisen sollen und in der That eine sehr geringe Spur davon zeigen, siehe Phil. Mag. Juni 1889, p. 469.

tactstück aus Staniol. Vermittelt dieser Contactstücke theile man dem Magneten einen Strom mit und er wird sich mit grosser Geschwindigkeit drehen. Kehrt man den Strom um, so rotirt der Magnet in umgekehrter Richtung. Wenn man andererseits den Magneten

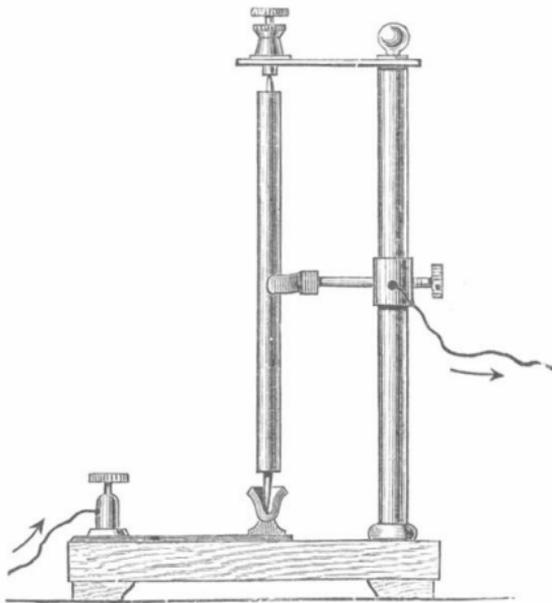


Fig. 25. — Cylindrischer, blanker Stahlmagnet, an beiden Enden drehbar eingespannt. Der Magnet dreht sich rasch um seine Achse unter der Einwirkung eines Stroms, der ihm vom oberen oder unteren Ende zugeführt und nahe der Mitte vermittelst eines Contactstückes aus Staniol wieder entzogen wird.

mechanisch rotiren lässt, so entsteht ein Strom in dem Draht, der die beiden Contactstücke verbindet. (Fig. 25, 26 und 27.)

Die Contactstücke können überall an dem Magneten angebracht werden, ausgenommen in symmetrischer An-

ordnung. Wenn sie gleich weit von der Mitte entfernt sind, bleibt die Wirkung aus. Diese ist um so stärker, je näher das eine Contactstück der Mitte und das andere

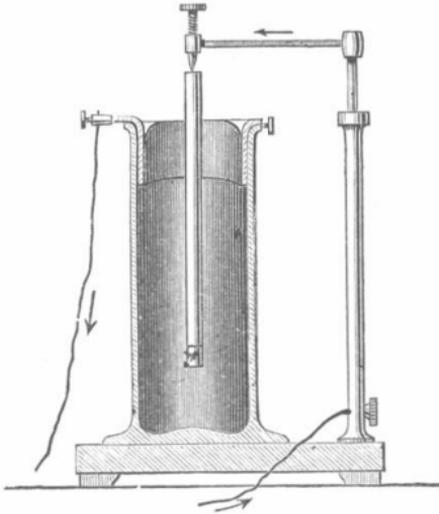


Fig. 26. — Andere Anordnung desselben Versuchs. Der Magnet schwimmt in Quecksilber.

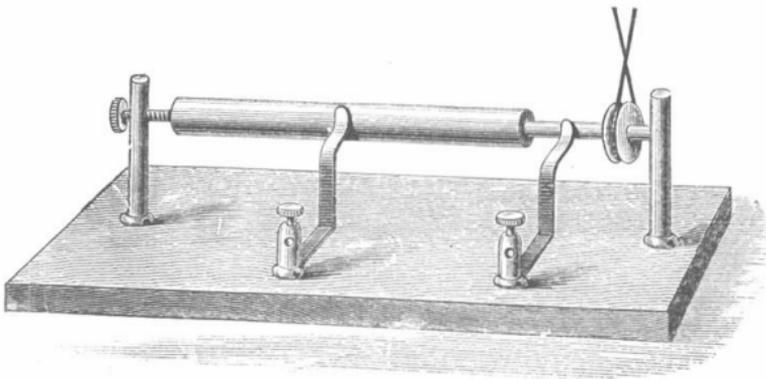


Fig. 27. — Umkehrung des auf Fig. 25 abgebildeten Versuchs. Der Magnet rotirt mechanisch und erzeugt dadurch einen Strom zwischen zwei Federn, von denen die eine ihn nahe der Mitte, die andere am einen Ende berührt.

dem Ende ist; am stärksten ist sie, wenn sich der eine Contact am äussersten Ende oder darüber hinaus befindet, wie bei Fig. 25.

75. Die hergebrachte, zuerst von Faraday angewandte Versuchsanordnung, bei der ein von dem Magneten getragener Draht in einen kreisförmigen, den Magneten umschliessenden Quecksilbertrog eintaucht, ist weniger einfach und anschaulich als das auf Fig. 25 dargestellte Verfahren; auch ist sie weniger wirkungsvoll, es sei denn, das der cylindrische Trog den Magneten sehr eng umschliesst. Die Anordnung auf Fig. 25, bei der der Contact auf der Oberfläche des Magneten selbst hergestellt wird, ist theoretisch die wirksamste.

Es giebt noch zahlreiche andere Methoden diesen Versuch auszuführen; die oben genannten sind jedoch typisch und genügen. Sie weisen sämtlich darauf hin, dass der Magnetismus, elektrisch betrachtet, eine Rotationserscheinung ist.

KAPITEL VIII

WESEN DES MAGNETISMUS

Ampère'sche Theorie

76. Der Gedanke, den Magnetismus auf eine Wirbelbewegung der Elektrizität zurückzuführen, ist keineswegs neu; er schreibt sich schon von Ampère her. Von der Beobachtung ausgehend, dass ein Magnet durch einen elektrischen Wirbel ersetzt werden kann, gelangte er zu der Hypothese, dass jeder Magnet einen elektrischen Wirbel enthalte, der Ursache seiner Eigenschaften sei. Selbstverständlich dachte er sich nicht, dass der Stahlmagnet von einem elektrischen Strom umkreist werde, wie der Elektromagnet. Nichts steht fester als der Umstand, dass ein Magnet nicht im Ganzen, sondern in seinen einzelnen Theilchen magnetisirt ist und dass er eigentlich nur aus einer Ansammlung polarisirter Theilchen besteht. Als Beweis hierfür dient der altbekannte Versuch einen Magneten in Stücke zu zerbrechen.

Vielmehr muss jedes Theilchen oder jede Molekel des Stabes einen eigenen elektrischen Kreisstrom besitzen; alsdann sind die Eigenschaften des Ganzen erklärt.

Nur eine Kleinigkeit bleibt gegen die Ampère'sche Theorie einzuwenden. Wodurch werden diese Molekularströme erhalten? Eine ähnliche Schwierigkeit bereitete vor langer Zeit in der Astronomie die Frage, wie man sich die fortgesetzte Bewegung der Planeten zu erklären habe? Man erfand beseelte Wesen, Wirbel und andere Vorrichtungen, um diese Frage zu beantworten, bis Galilei's Theorie der Mechanik diese Schwierigkeit endgültig hinwegräumte. Jeder Körper bewegt sich weiter, bis er aufgehalten wird. Wenn kein Widerstand vorhanden ist, so ist die Bewegung continuirlich.

Freilich, der gewöhnliche Strom wird durch Widerstand aufgehalten. Erzeugt man auf beliebige Art einen Strom in einem Metallring und überlässt ihn sich selbst, so setzt er binnen etwa einer halben Sekunde seine Energie in Wärme um. Vorausgesetzt aber, dass das Metall unendlich gut leitet, so würde keine Energie verbraucht werden und der Strom würde permanent sein.

In einem Metallstab muss sich die Elektrizität von Atom zu Atom bewegen und hat dabei einen Widerstand zu überwinden; wer weiss aber, ob nicht die Atome selbst vollkommen leitend sind? Besitzen sie doch verschiedene andere unendliche Eigenschaften; so sind sie z. B. unendlich elastisch. Man bewahre einen

in Watte gewickelten Behälter mit Gas hundert Jahre lang auf und sehe zu, ob das Gas sich inzwischen abgekühlt hat. Dieser Versuch müsste, wenn er praktisch ausführbar wäre, gemacht werden; inzwischen berechtigt uns jedoch die Erfahrung anzunehmen, dass beim Zusammenstoss der Atome kein Verlust an Bewegung stattfindet, bis das Gegentheil entscheidend nachgewiesen wird. Da nun Atome *zweifellos* unendlich elastisch sind, warum sollten sie nicht auch unendlich leitend sein? Warum sollte ein ausschliesslich innerhalb eines Atoms kreisender Strom seine Energie verbrauchen? Kein bekannter Grund spricht dafür, und viele Analogien dagegen.

Was ist der Ursprung dieser Ströme? Ebenso gut könnte man fragen: Was ist der Ursprung irgend einer ihrer Eigenschaften? Auf diese Fragen giebt es keine Antwort, wir müssen uns mit der Thatsache begnügen. Die Atome einer bestimmten Substanz, des Eisens z. B., oder des Zink besitzen nun einmal die spezifische physikalische Eigenschaft, dass in ihnen ein elektrischer Wirbel von einer gewissen Stärke kreist.

Soviel ist sicher, dass das Magnetisieren die Ampère'schen Ströme nicht erst hervorruft. Wenn man ein Stück Stahl oder Eisen magnetisirt, so erregt man damit nicht in jeder Molekel einen Ampère'schen Strom, man magnetisirt keineswegs jede einzelne Molekel. Vielmehr sind die Molekeln bereits von Anfang an vollständig magnetisch; das Magnetisiren bewirkt nur,

dass sie sich sämtlich nach ein und derselben Richtung einstellen, d. h. polarisiren. Diese Thatsache wurde vor langer Zeit von Beetz festgestellt; doch will ich an dieser Stelle nicht näher darauf eingehen, sondern verweise auf Maxwell (II. Band, Kap. VI).

*Erweiterung der Ampère'schen Theorie durch Weber
zur Erklärung des Diamagnetismus*

77. Fassen wir nun das Vorhergehende kurz zusammen. Wir haben folgende Behauptungen aufgestellt:

(1) Ein Magnet besteht aus einer Ansammlung polarisirter Molekeln.

(2) Jede dieser Molekeln ist an sich ein permanenter Magnet, einerlei ob die Substanz sich in ihrem gewöhnlichen oder in magnetisirtem Zustande befindet, und das Magnetisiren besteht darin, sie sämtlich mehr oder weniger übereinstimmend zu richten.

(3) Wenn die Molekeln alle in derselben Richtung eingestellt sind, ist die Substanz magnetisch vollständig gesättigt.

(4) Wenn jede Molekel eines bestimmten Stoffs einen elektrischen Strom von bestimmter Stärke enthält, der in einer unendlich leitenden Bahn kreist, so sind die magnetischen Eigenschaften des Stoffs vollständig erklärt.

Aber, zugegeben, dass die Behauptungen richtig sind, wie kommt es, dass wir die Molekularströme nicht durch

magnetische Induktion erzeugen können? Und wenn wir dies nicht können, sind wir wenigstens im Stande, ihre Stärke zu verändern?

78. Die Antwort auf diese Fragen ist in nachstehenden Sätzen enthalten, die ich der Bequemlichkeit halber gleich folgen lasse und erst weiter unten erklären und rechtfertigen will.

(5) Wenn ein mit diesen Molekularströmen ausgestatteter Stoff in ein magnetisches Feld eingeführt wird, so wird der Strom in denjenigen Molekeln, die sich in die Richtung der Kraftlinien umzulagern vermögen, abgeschwächt; werden sie aus dem Felde entfernt, so erhalten sie ihre ursprüngliche Stärke wieder.

(6) Wenn unter normalen Verhältnissen in den leitenden Bahnen *keine* oder nur sehr schwache Ströme kreisen, so werden diese durch Einführung des Stoffs in ein magnetisches Feld umgekehrt, d. h. es werden *entgegengesetzte* Ströme erzeugt, die so lange anhalten, wie der Körper im Felde bleibt, aber aufhören, wenn er daraus entfernt wird.

(7) Dasselbe geschieht, wie stark die Ströme auch sein mögen, wenn die Molekeln unbeweglich sind und sich nicht unter der Einwirkung des Feldes richten können.

(8) Die auf diese Art magnetisch inducirten Molekularströme genügen, um die Erscheinung des *Diamagnetismus* zu erklären.

79. Rufen wir uns zunächst die bekannten elementaren Thatsachen der Strominduktion in's Gedächtniss. In einem Stromkreis, einer Drahtspule z. B., die man plötzlich einer stromleitenden Spule oder einem Magneten nähert, wird ein vorübergehender Strom inducirt, dessen Richtung der des inducirenden Stroms entgegengesetzt ist, der mit anderen Worten eine vorübergehende Abstossung zwischen beiden verursacht. Verharrt der Stromkreis in dieser Lage, so geschieht weiter nichts; entfernt man ihn aber, so wird darin ein zweiter, vorübergehender Strom in der dem ersten entgegengesetzten Richtung inducirt. Oder, um kurz die Thatsachen ganz allgemein zu fassen: Befindet sich ein Leiter in einem magnetischen Feld und nimmt dieses aus irgend einem Grunde an Intensität zu, so entsteht in dem Leiter ein vorübergehender Strom, der danach strebt, ihn aus dem Felde zu verdrängen; sinkt dann das magnetische Feld wieder auf seinen ursprünglichen Werth herab, so strömt genau die gleiche Elektrizitätsmenge in der umgekehrten Richtung. Ein Apparat, der diese Thatsachen veranschaulicht, ist in Fig. 28 dargestellt. Eine Kupferscheibe hängt an einem drehbaren Arm dem Pol eines unerregten Stab-Elektromagneten gegenüber. Erregt man den Magneten, so wird die Scheibe heftig abgestossen, sie wird dagegen wieder angezogen, sobald die Magnetisirung aufhört.

80. Warum sind nun alle diese Wirkungen vorübergehend? Was hält den inducirten Strom so schnell

wieder auf? Nichts anderes als der Verbrauch von Energie; die Reibung in einem unvollkommenen Leiter. Der Strom wird nicht erhalten, findet bei seinem Durchgang durch das Metall Widerstand und hört daher auf.

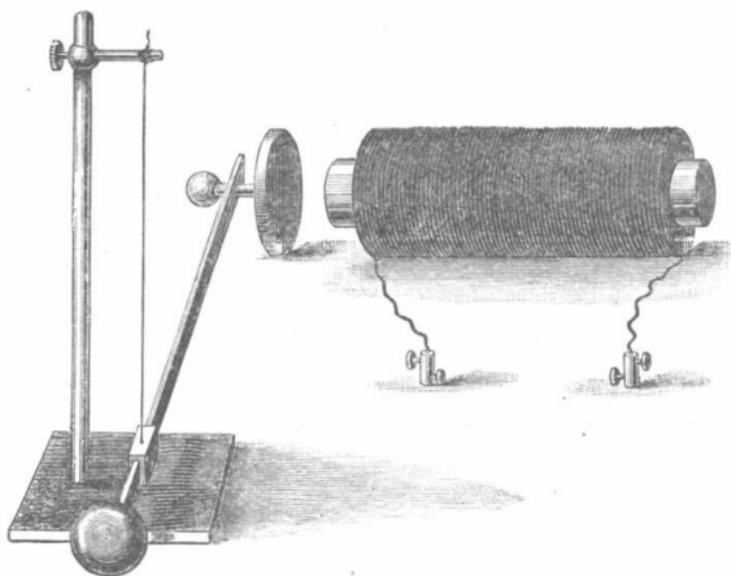


Fig. 28. — Eine starke Kupferscheibe an einem horizontal aufgehängten Arm ist dem einen Pol eines Stab-Elektromagneten genähert. Die Scheibe wird abgestossen, wenn der Magnet erregt wird, und angezogen, sobald die Magnetisirung aufhört.

In einem vollkommenen Leiter, wie z. B. einer Molekel, würde kein derartiger Verbrauch stattfinden. In einem derartigen Körper gehorcht die Elektrizität dem ersten Gesetz der Bewegung und strömt weiter, bis sie durch die Einwirkung einer Gegenkraft aufgehalten wird. Nur die Vernichtung des magnetischen

Feldes kann einen inducirten Molekularstrom aufheben, sonst nichts. Hieraus folgt, dass die Abstossung, die eine Molekel erleidet, keine vorübergehende Wirkung ist, wie die auf Fig. 28, sondern eine ebenso permanente, wie das magnetische Feld, das sie erregt.

Demnach wird sich also ein Körper, dessen Molekeln vollkommen leiten, ohne dass jedoch ein specifischer Strom darin kreist, diamagnetisch verhalten, d. h. er wird von den starken Theilen des Feldes den schwachen zustreben, oder, wenn er sich nur drehen kann, sich wenigstens querstellen, wie Wismuth.

Diese Erklärung des Diamagnetismus ist, wo nicht die wahre, doch jedenfalls eine mögliche; ja, mir scheint sie höchst wahrscheinlich. Sie ist als die Theorie von Weber bekannt.

Es ist übrigens nicht unbedingt nothwendig, dass diamagnetische Stoffe gar keine specifischen Molekularströme besitzen; diese müssen nur schwächer sein, als die durch ein gewöhnliches magnetisches Feld inducirten. Wenn man sich also eines ausserordentlich schwachen Feldes bediente, so würden die specifischen Ströme nicht völlig neutralisirt werden und der Körper müsste sich verhalten wie eine sehr schwache magnetische Substanz. Man hat versucht eine solche Wirkung nachzuweisen.¹⁾

81. Aber es wäre auch allenfalls möglich, dass eine Substanz specifische Molekularströme besässe und doch

¹⁾ Siehe Nature, 33. Band S. 484.

nicht merkbar magnetisch wäre; jede einzelne Molekel könnte nämlich so festgeklemmt sein, dass sie nicht im Stande wäre, sich zu richten; ein derartiger Körper würde schwerlich wahrnehmbare magnetische Eigenschaften aufweisen. Die Molekeln würden sich in einem Zustand von kleinster potentieller Energie befinden und unfähig sein, irgend eine Wirkung auszuüben. Die inducirten Molekularströme würden sich den ursprünglichen Molekularströmen superponiren, als ob diese nicht vorhanden wären. Allerdings könnte man vielleicht durch Erwärmung oder Abkühlung die molekulare Anordnung einer solchen Substanz umändern und dadurch magnetische Eigenschaften in ihr wachrufen, ähnlich wie man durch Erwärmung oder Abkühlung elektrische Eigenschaften in Krystallen, wie z. B. im Turmalin wachruft.

Wir wissen nun mit Sicherheit soviel: die zur Erklärung des Magnetismus nothwendigen Molekularströme können unmöglich durch den Vorgang des Magnetisirens erregt werden, weil sie sich in der falschen Richtung bewegen. Da diejenigen Molekularströme, welche Abstossung verursachen, inducirt sind, müssen diejenigen Ströme, welche Anziehung verursachen, schon vorher dagewesen sein und nur durch die magnetisirende Kraft in neue Lagen gedreht werden. Ein intensives magnetisches Feld wird sie abschwächen und daher eine magnetische Substanz weniger magnetisch erscheinen lassen.

*Funktion des Eisens im Magneten. Zwei
Anschauungsweisen*

82. Wir sind nun in der Lage zu erklären, wie Eisen oder andere magnetische Substanzen zur Verstärkung des magnetischen Feldes beitragen. Wenn man durch eine kreisförmig gebogene Drahtspule (Fig. 29) einen

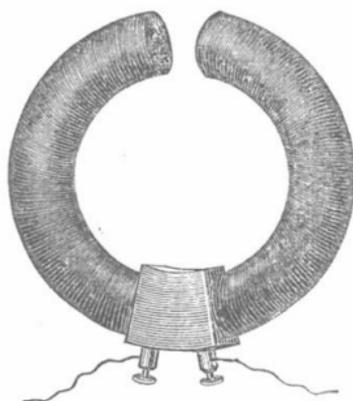


Fig. 29.

Strom hindurchleitet, so entsteht zwischen den beiden einander gegenüberstehenden Endungen ein gewisses Feld, eine gewisse Anzahl von Kraftlinien. Füllt man die Drahtspule mit Eisen aus, sodass ein Elektromagnet entsteht, so wird die Intensität des Feldes wesentlich erhöht. Warum? Gewöhnlich erklärt man diese Erscheinung, indem man den magnetischen Kreis mit dem galvanischen Stromkreis vergleicht. So wie dort eine

elektromotorische Kraft, haben wir hier eine magneto-
motorische Kraft und einen gewissen Widerstand oder
eine „Reluctanz“, wie Hr. Heaviside sagt. Der Quotient
dieser beiden ergibt die magnetische Induktion oder
die Gesamtzahl der Kraftlinien. Eisen ist, nehmen wir
an, 3000 mal durchlässiger als Luft; mithin ist der
Widerstand des eisernen Theils des Kreises unwesent-
lich im Vergleich zu dem mit Luft erfüllten Zwischen-
raum zwischen den Polen. Man erhält also annähernd
die Gesamtintensität des Feldes, wenn man die
magnetomotorische Kraft durch die Länge dieses
Zwischenraumes theilt, oder noch besser und voll-
ständiger, wenn man die Verschiedenheiten des Mate-
rials und des Querschnitts eines magnetischen Kreises
genau so berücksichtigt wie bei einem galvanischen
Stromkreise und auf diese Weise den Gesamtwider-
stand berechnet. Eisen ergibt sich dann als ein 100
bis 10000 mal besserer magnetischer Leiter als Luft.
Sein spezifisches magnetisches Leitungsvermögen oder,
wie die üblichere (von Thomson eingeführte) Bezeich-
nung lautet, seine Permeabilität wird bemessen nach
dem Verhältniss der erzeugten Magnetisirung zu der
angewandten magnetisirenden Kraft. Man setzt dafür
gewöhnlich das Zeichen μ .¹⁾

83. Diese Anschauungsweise ist zweifellos einfach
und bequem. Ihrer allgemeinen Aufnahme verdanken
wir wesentliche Verbesserungen in der Konstruktion

¹⁾ Siehe Anhang (b).

von Elektromagneten und Dynamomaschinen und ihr praktischer Nutzen kann kaum überschätzt werden; nichtsdestoweniger darf man nicht vergessen, dass sie dem Ding nicht auf den Grund geht. Betrachten wir die Sachlage weniger mit Rücksicht auf ihre praktische Fasslichkeit, als um uns über den wirklichen Vorgang klar zu werden, so werden wir sie in folgender Weise darstellen:

Ehe das Eisen in die Spule eingeführt wurde, befanden sich innerhalb derselben eine gewisse Anzahl kreisförmiger Kraftlinien, die auf den Strom allein zurückzuführen waren. Ein gewöhnliches Stück Eisen besitzt, wiewohl es voll polarisirter Molekeln ist, keine nach Aussen wirkenden oder nutzbaren Kraftlinien; sie sind sämmtlich in kleinen geschlossenen Kreisen im Innern des Eisens gleichsam festgelegt. Sobald aber das Eisen in ein magnetisches Feld eingeführt wird, erschliessen sich einige dieser Linien, es bildet sich eine Kette polarisirter Molekeln und die Kraftlinien ihrer Molekularströme gesellen sich denjenigen zu, die dem Strom der magnetisirenden Spirale angehören.

Mithin besitzt nun unser Ring-Elektromagnet nicht bloß seine eigenen ursprünglichen Kraftlinien, sondern noch einen grossen Theil der dem Eisen angehörigen, die sich jenen sympathisch angeschlossen haben.

Folgende Bemerkung sei hier eingeschaltet. Wenn das Eisen auf je eine anderweitig im Felde erzeugte Linie etwa 3000 eigene Linien (mehr oder weniger, je

nach seiner Beschaffenheit) mitbringt, so befindet es sich im Zustande höchster Permeabilität; es ist unendlich weit davon entfernt gesättigt zu sein. Nach einiger Zeit zeigt es jedoch Spuren der Sättigung und schliesslich giebt es gar keine eigenen Linien mehr her. Als dann ist es als vollständig gesättigt zu betrachten und seine Permeabilität ist genau die der Luft. Die Permeabilität des Eisens ist eine ausserordentlich unbestimmte Quantität. Sie schwankt nicht allein bei demselben Stück, während es sich der Sättigung nähert, sondern sie ist auch überaus verschieden bei verschiedenen Sorten. So giebt es Manganstahl, dessen Permeabilität nur $1\frac{1}{2}$ mal grösser ist als die der Luft, oder ungefähr ebenso gross wie die des Zinks, während Ewing Eisen gefunden hat, dessen Permeabilität bis zu 20000 betrug, wenn es beim Magnetisiren erschüttert wurde.

Das Endergebniss beider Anschauungsweisen ist natürlich dasselbe: Die Zahl der Kraftlinien zwischen den Polen wird durch die Anwesenheit des Eisens vermehrt. Während jedoch bei der ersten Methode die Permeabilität nicht erklärt wird, bleibt bei der zweiten Methode nichts unerklärt, ausser gewissen grundlegenden Thatsachen, wie der, weshalb Ströme danach streben, sich mit ihren Achsen parallel zu einander einzustellen, und Aehnliches mehr.

Permanenter Magnetismus

84. Eine merkwürdige Wirkung, die nicht übersehen werden darf, wird durch die Einführung von Eisen oder anderen festen magnetischen Mitteln in ein magnetisches Feld hervorgebracht. Diese Wirkung hängt ab von der Festigkeit der Substanz, d. h. von der Unbeweglichkeit oder Starrheit ihrer Molekeln. In einem Fluidum können sich die Molekeln nach Belieben fortwährend neu anordnen; sein innerer Bau hat eine ebenso unbestimmte Form wie seine äussere Gestalt. Anders verhält es sich mit einem festen Körper. Haben die Molekeln in diesem einmal eine bestimmte Stellung angenommen, so streben sie mehr oder weniger danach, darin zu verharren; der Stoff kann elastisch sein, aber nach grösseren Störungen wird doch stets eine dauernde Veränderung in der Anordnung der Molekeln eintreten. Daher haben feste Körper eine bestimmte Gestalt, die nur mit Gewalt verändert werden kann; daher können sich auch ihre Molekeln zu geometrischen Formen krystallisiren.

Da nun der Vorgang des Magnetisirens darin besteht, eine Anzahl bereits polarisirter Molekeln übereinstimmend zu richten, so leuchtet ein, dass feste magnetische Substanzen sich anders verhalten werden als flüssige. Bei flüssigen Mitteln kann die magnetisirte Anordnung nur durch fortgesetzte Einwirkung der magnetisirenden

Kraft erhalten werden; sobald diese entfernt wird, verfallen die Molekeln wieder in den ursprünglichen regellosen Zustand kleinster Energie und verlieren jede Spur einer Magnetisirung. Sie lassen sich mit der grössten Leichtigkeit magnetisiren und entmagnetisiren sich eben so leicht wieder von selbst. Anders verhalten sich feste Körper. Werden die Molekeln nur durch eine schwache Kraft in ihrer magnetisirten Lage festgehalten, so schnellen sie fast vollständig wieder zurück, sobald die magnetisirende Kraft entfernt wird; wirkt aber eine einigermaßen starke Kraft ein, so kehren sie nur theilweise zurück und eine dauernde Veränderung in der Anordnung der Molekeln tritt ein. Der erstere Vorgang entspricht temporärem, der zweite permanentem Magnetismus. Der Unterschied zwischen beiden lässt sich veranschaulichen, indem man ein Stück Papier und einen Streifen Blech zusammenbiegt und dann wieder loslässt.

In der Fähigkeit den Magnetismus zu behalten, zeigen die verschiedenen Stoffe ausserordentliche Unterschiede; Stahl besitzt diese Eigenschaft bekanntlich in hohem Grade, doch ist sie allen Stoffen mehr oder weniger eigen.¹⁾ Viele Stoffe behalten Spuren der magnetischen Anordnung, solange man sie in Ruhe lässt, verlieren sie aber bei Erschütterung, Erwärmung, manche sogar schon bei leiser Berührung. Ein langer dünner Stab aus weichem Eisen ist in dieser Beziehung

¹⁾ Siehe einen Brief in Nature, 33. Band S. 484.

ungemein lehrreich. Er lässt sich leicht mit Hülfe des Erdmagnetismus magnetisiren, indem man ihn vertical hält und mit dem Finger klopft. Kehrt man ihn nun langsam und vorsichtig um, so bewahrt er fast den ganzen inducirten Magnetismus; wenn man ihn aber wieder klopft oder (so empfindlich sind manche Stäbe) auch nur mit den Fingern daran entlang streicht, so genügt dies, um die ganze Erscheinung umzukehren. Weiches Eisen kann eigentlich bedeutend mehr Magnetismus behalten als Stahl, aber es verliert ihn leicht wieder. Sein Magnetismus ist nur als halb permanent zu bezeichnen.

85. Ein kurzer dicker Stab behält weniger Magnetismus als ein langer dünner; ein kurzer Stab aus dem weichsten Eisen behält ihn so gut wie garnicht. Besser eignet sich ein Stück Eisen, das, wie auf Fig. 29, ringförmig gebogen ist; noch vortheilhafter ist es, wenn die Lücke zwischen den Polen durch ein zweites Stück Eisen, einen sogenannten „Anker“, ausgefüllt wird. Dagegen bewahrt ein aus einem Stück geschweisster Ring, bei dem die letzte Spur einer Luftschicht zwischen Anker und Magnet fehlt, den Magnetismus fast vollständig. Doch ist auch in diesem Falle eine gewisse entmagnetisirende Kraft vorhanden, da ein magnetisirter Flüssigkeitsring nicht magnetisch bleibt. Auch habe ich selbst festgestellt, dass das Klopfen und Erschüttern eines Eisenringes dessen Magnetisirung merklich schwächt; doch ist diese entmagnetisirende Kraft sehr

gering im Vergleich zu der eines Eisenringes mit einer Luftlücke.

Hieraus geht hervor, dass der speciell entmagnetisirende Theil eines magnetischen Kreises der flüssige, d. h. der aus Luft bestehende Theil ist; je grösser das Verhältniss dieses flüssigen Theils zum Ganzen, um so leichter vollzieht sich die Entmagnetisirung. Wenn man also in Luft oder Flüssigkeit, die einen festen Magneten umgiebt, Kraftlinien künstlich aufrecht erhält, so entfällt die ganze Spannung lediglich auf die Starrheit des festen Körpers. Denn da Flüssigkeiten ihren Magnetismus sofort wieder verlieren, so muss der feste Körper nicht nur seinen eignen Magnetismus, sondern auch den des übrigen Feldes bewahren, d. h. die Molekeln der Flüssigkeit ihrer Gegenkraft zum Trotz richten.

86. Sämmtliche über den Magnetismus bekannte That- sachen haben seit Kurzem durch die Untersuchungen von Ewing neues Interesse erhalten. Der längst be- kannte Umstand allerdings, dass feste Körper frühere molekulare Störungen in ihrem Bau aufbewahren, sodass die Spuren einer Wirkung noch erkennbar sind, nachdem die Ursache längst aufgehört hat zu bestehen, ist keineswegs auf den Magnetismus be- schränkt; es ist dies eine allgemeine Eigenschaft aller festen Körper, die ihre theoretische Behandlung nicht wenig erschwert. Die Eigenschaften aller Fluida, der Flüssigkeiten sowohl wie der Gase, sind nur abhängig

von ihrem gegenwärtigen Zustande. Wie sie in diesen Zustand gelangten und was früher mit ihnen vorgegangen ist, kommt nicht in Betracht. Wasserstoff von 0° C. unter 76 cm Druck ist eine vollkommen definirte Substanz. Wasser von 50° C. unter 1 Atmosphäre Druck ist ebenfalls ein fester Begriff. Beinahe dasselbe gilt von einigen krystallinischen Körpern. Quarz oder Eis bei gegebener Temperatur und gegebenem Druck können als bestimmt definirte Zustände angesehen werden, wiewohl sie vielleicht nicht ganz so bestimmt sind, wie man gewöhnlich annimmt. Aber Glas oder Stahl oder Kupfer bei gegebener Temperatur sind keineswegs definirte Substanzen, sondern unterscheiden sich, je nachdem sie auf die bestimmte Temperatur abgekühlt oder erwärmt wurden. Wir müssen erst wissen, ob sie zuvor gehärtet, angelassen oder gekühlt worden sind, u. s. w. Die Eigenschaften eines festen Körpers beruhen ebensowohl auf seiner Vergangenheit, als auf seinem gegenwärtigen Zustand.

Dies Alles gilt im höchsten Grade auch von der Magnetisirung. Um das Verhalten eines Magneten von Grund aus zu verstehen, muss man nicht nur seinen gegenwärtigen Zustand kennen, sondern man muss auch wissen, wie er in diesen Zustand gelangt ist. Ein Stück Stahl, das schon einmal magnetisirt war und wieder magnetisirt wurde, unterliegt anderen Bedingungen, als wenn es sich nie in einem magnetischen Felde befunden hat; es sei denn, dass es umgeschmolzen worden ist.

Soviel muss allerdings zugegeben werden, dass, wenn *Alles* über den gegenwärtigen Zustand eines Körpers bekannt wäre, man nicht auf seine Vergangenheit zurückzugreifen brauchte; man würde sie vielleicht sogar zum Theil aus seinem gegenwärtigen Zustand schliessen können. Aber gerade deshalb, weil wir uns unmöglich über die Lage und Beziehungen jeder einzelnen Molekel unterrichten können und weil wir uns mit der Erkenntniss weniger, in die Augen fallender That-sachen begnügen müssen, ist die Erforschung der Ver-gangenheit geboten. Für Flüssigkeiten genügt die Beobachtung weniger Thatsachen; für feste Körper sind sie in den meisten Fällen unzureichend.

Ich habe auf diesen Punkt besonderes Gewicht ge-
legt, weil sich daran eine wichtige allgemeine Unter-
scheidung knüpft zwischen solchen Zuständen, die ge-
wissermassen auf sich beruhen und solchen, die auf
frühere Vorgänge zurückzuführen sind.

87. Eine weitere Einzelheit dieses Unterschiedes
ist, dass feste Körper, die durch eine bestimmte Reihen-
folge von Veränderungen in einen Zustand gelangt
sind, nicht immer durch die umgekehrte Reihenfolge
in den Urzustand zurückkehren; die Umkehrung der
Ursache bringt nicht stets die umgekehrte Wirkung
hervor. Versetzt man eine Flüssigkeit aus einem
Zustand in den anderen, so braucht man die Reihen-
folge von Vorgängen, die dazu führte, nur umzukehren,
damit sie auf demselben Wege in ihren Urzustand

zurückkehrt und Alles wieder so ist, als ob inzwischen keine Arbeit geleistet worden wäre. Anders verhalten sich feste Körper. Wenn man ein Stück Stahl durch ein bestimmtes Verfahren magnetisirt, und dieses dann in umgekehrter Reihenfolge wiederholt, so kehrt der Stahl weder auf demselben Wege, noch überhaupt in seinen Urzustand zurück. Wiederholt man mehrmals den Vorgang des Magnetisirens und Entmagnetisirens, so kann man den Körper schliesslich dahin bringen, einen Kreislauf von Veränderungen wenigstens annähernd durchzumachen. Aber er wird stets auf einem Wege hingelangen und auf einem anderen zurückkehren.

Wenn nun irgend ein Körper auf einem Wege aus dem Zustand *A* in den Zustand *B* und auf einem anderen Wege wieder von *B* nach *A* zurückversetzt wird, wie der Dampf in einer Dampfmaschine, so muss bei der Ausführung dieses Kreislaufs stets eine gewisse Arbeit durch den Körper oder an ihm geleistet werden. Beim Dampf ist die Rückkehr auf *anderem* Wege keine Nothwendigkeit; es kann also nach Belieben Arbeit geleistet werden oder nicht. Bei einem magnetisirten festen Körper aber ist keine andere Möglichkeit gegeben. Die aufsteigende Kurve des zunehmenden und die absteigende Kurve des abnehmenden Magnetismus decken sich nicht und können sich niemals decken. Wenn also ein Stück Eisen einen Kreislauf magnetischer Veränderungen durchmacht, so wird stets irgend eine Arbeit geleistet.

Das Produkt dieser Arbeit ist gewöhnlich Wärme;

ein mehrmals rasch hinter einander magnetisirtes und entmagnetisirtes Stück Eisen wird daher warm. Diese direkte erwärmende Wirkung ist aber sehr schwach und nur durch die „Transformatoren“ der modernen Elektrotechnik fängt sie seit Kurzem an wahrnehmbar zu werden.¹⁾

Alle hierher gehörigen Eigenschaften des Eisens und anderer Substanzen nennt Ewing Hysterēsis (von *ὑστερέω*, zurückbleiben).

87 a. Ueber den mechanischen Vorgang des Magnetisirens und das Wesen der Kräfte, durch welche feste Körper den Magnetismus zurückbehalten, ist vor Kurzem eine wichtige Entdeckung gemacht worden. Man glaubte bisher, dass eine Art Reibung oder ein anderer mechanischer Zwang nothwendig sei, um die Molekeln in ihrer Lage festzuhalten, sodass sie dem drehenden Impuls der magnetischen Kräfte nur bis zu einem gewissen Punkt nachzugeben vermöchten, während darüber hinaus eine Art Zähigkeit sich geltend mache und sie in ihrer neuen Lage mehr oder weniger dauernd festlege. Ewing hat jedoch durch den Versuch gezeigt, dass einem aus polarisirten Molekeln bestehenden festen Körper hinreichende Festigkeit verliehen wird, wenn die Rotationsachsen der Molekeln unbeweglich

¹⁾ Die starke indirekte Erwärmung durch inducirte Ströme (sogenannte Foucault-Ströme) ist zu allgemein bekannt, als dass nicht ein blosser Hinweis darauf genüge, um eine Verwechslung mit der oben besprochenen auszuschliessen.

sind. Bei Atomen, die frei wandern, wie bei Flüssigkeiten, ist eine permanente Magnetisirung unmöglich; wenn sie aber verhindert werden, sich frei zu bewegen und um einen festen Mittelpunkt rotiren müssen, alsdann ergeben sich alle magnetischen Eigenschaften fester Körper aus der Einwirkung der magnetischen Kräfte auf diese polarisirten, sonst aber vollkommen freien Atome. Es bedarf dann keines mechanischen Zwanges mehr, um permanente Magnetisirung und Hysterësis zu erklären, das Ganze ergiebt sich ohne Weiteres aus dem Verhalten einer Anzahl magnetisirter Theilchen, die innerhalb ihrer gegenseitigen Wirkungssphäre um feste Achsen rotiren, und kann sehr vollständig nachgebildet werden durch eine Gruppe drehbarer Kompassnadeln. Es ist dies ein bedeutender Schritt zur Vereinfachung und Aufklärung unserer Vorstellungen von der Konstitution fester Körper. Die Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen gehen bekanntlich in einander über und sind erklärbar durch die Annahme einer Anzahl gleichartiger Theilchen, die sich mehr oder weniger ihrer gegenseitigen Wirkungssphäre nähern. Wahrscheinlich wird man sich auch betreffs der festen Körper dieser Annahme anschliessen, mit dem Unterschiede, dass man sich die Molekeln nicht frei beweglich, sondern um feste Achsen rotirend denkt.

Noch einmal vom elektrischen Beharrungsvermögen

88. Auf einen Punkt muss ich an dieser Stelle aufmerksam machen. Die hier nach Ampère, Weber und Maxwell vorgetragene Theorien des Magnetismus und Diamagnetismus beruhen auf der Voraussetzung, dass die Elektrizität in vollkommenen Leitern dem ersten Gesetz der Bewegung gehorcht, das heisst, dass sie weiter fliesst, bis sie durch eine Gegenkraft aufgehalten wird. Diejenige Eigenschaft der Materie aber, die ihr diese Fähigkeit verleiht, ist das Beharrungsvermögen oder die Trägheit; das Gesetz heisst das Gesetz der Trägheit; und alle Stoffe, die sich in der geschilderten Weise verhalten, müssen unbedingt Beharrungsvermögen besitzen.

Nun darf man zwar eine so wichtige Folgerung nicht aus einer noch unerwiesenen Theorie ziehen; immerhin aber ist es bemerkenswerth, dass die lebendige Kraft eine wesentliche Bedingung der Ampère'schen Theorie des Magnetismus ist. Diese Theorie ist die einzige bisher aufgestellte und sie wird unhaltbar, wenn die Elektrizität kein Beharrungsvermögen besitzt.

Nichtsdestoweniger ist es eine Thatsache, dass ein Elektromagnet sich nicht verhält wie ein Schwungrad oder ein Kreisel; eine lebendige Kraft ist durch mechanische Versuche nicht nachweisbar (§ 39). Sollte sich

dieser Satz definitiv bewahrheiten, so müssen wir also annehmen, dass der elektrische Molekularstrom aus zwei gleichen entgegengesetzten Strömen verschiedener Elektrizitätsgattungen besteht, und uns entschliessen, die negative Elektrizität nicht als eine blosser Negation oder Verminderung der positiven, sondern als eine Erscheinung für sich anzusehen. Ihre Beziehungen zur positiven Elektrizität dürften mehr denen des Natriums zum Chlor, als denen der Kälte zur Wärme gleichen.

89. Dass Wirkungen des elektrischen Beharrungsvermögens durch *mechanische* Versuche nicht nachweisbar sind, ist unter der Annahme zwei gleicher entgegengesetzter Ströme verschiedener Elektrizitäten sehr begreiflich. Man denke sich zwei Gummischläuche so zusammengebunden, dass sie eine Doppelröhre bilden und sende zwei Wasserströme in entgegengesetzten Richtungen hindurch. Dieser doppelte Strom besitzt keine gyrostatischen Eigenschaften und die einzige Art, wie sich unter diesen Umständen die lebendige Kraft des Wassers äussern kann, besteht im Widerstand gegen Veränderungen der Geschwindigkeit, ähnlich den Wirkungen des „Extrastroms“ bei der Elektrizität (§ 38).

Solange wir uns mit dem Fliessen der Elektrizität in gewöhnlichen Leitern beschäftigten, konnten wir die Frage nach ihrem Beharrungsvermögen zum Theil umgehen, indem wir uns vorstellten, dass sie an jedem

Punkt ihrer Bahn fortbewegt würde durch eine Kraft, die gerade hinreicht, um an diesem einen Punkt den Widerstand zu überwinden; hierdurch wurde zwar die Form der Strömungslinien erklärt (§ 49) aber nicht die Erscheinungen der Selbstinduktion, nämlich das Zurückbleiben der Elektrizität im Innern des Drahts beim Oeffnen und Schliessen des Stroms (§§ 43—48), noch weniger ihr vorübergehendes Beharren in der Bewegung nach Entfernung der treibenden Kraft.

Sobald wir es aber mit vollkommenen Leitern zu thun haben, bei denen eine treibende Kraft gar nicht existirt, ist das Fortdauern der Molekularströme unerklärlich ohne das Vorhandensein von Beharrungsvermögen oder einer Eigenschaft, die dieser so ähnlich sieht, dass sie zunächst denselben Namen verdient. Allerdings sind die Molekularströme selbst bis jetzt noch hypothetisch; dies ist der einzige Ausweg, der uns bleibt, um einer endgültigen Schlussfolgerung vorläufig aus dem Wege zu gehen (§§ 98 und 185).

KAPITEL IX

AUFBAU EINES MAGNETISCHEN FELDES

90. Wir wollen nun die verschiedenen Thatsachen und Erfahrungen durchgehen, die uns zu einer dualistischen Theorie der Elektrizität geführt haben, einer Theorie, die in gewisser, wenn auch sehr modificirter Weise, zwei Fluida annimmt.

Da sind zunächst die alten Versuche, welche die Existenz einer besonderen negativen Elektrizität unbestimmt vermuthen lassen:

(1) Der Wind, der von einer positiven oder negativen Spitze ausgeht. Eine Lichtflamme wird immer von der Spitze fortgeweht, sowohl wenn diese auf dem Conduktor der Elektrisirmaschine sitzt und das Licht in der Hand gehalten wird, als auch wenn die Spitze in der Hand gehalten und dem Licht auf dem Conduktor genähert wird. Aus demselben Grunde rotirt auch das elektrische Spitzenrad immer in derselben Richtung, einerlei ob man es an dem Conduktor anbringt

oder auf dem Erdboden in der Nähe des Conductors befestigt.

(2) Gewisse die Funkenentladung begleitende Erscheinungen, z. B. bei dem alten Versuch von Wheatstone, bei dem durch Ueberspringen der Funken zwischen drei hintereinander geschalteten Luftstrecken die Geschwindigkeit der Elektrizität bestimmt werden sollte; ferner der doppelte Wulst bei der Funkenentladung durch ein Stück Pappe, der die Vermuthung nahe legt, dass Etwas gleichzeitig in entgegengesetzten Richtungen die Pappe durchbohrt.

Alsdann haben wir folgende Ergebnisse neuerer Untersuchungen:

(3) Die Thatsache, dass das Volumen eines Dielektricum durch elektrostatische Spannung nahezu keine Veränderung erleidet. Hieraus dürfte man auf einen abscheerenden oder verschiebenden Druck schliessen, der nur die Form und nicht die Grösse verändert, d. h. auf eine gleichzeitige Verrückung der positiven Elektrizität nach aussen und der negativen nach innen (§ 13).

(4) Die Erscheinungen der Elektrolyse und die doppelte Wanderung der Atome in entgegengesetzten Richtungen.

(5) Die Erscheinungen der Selbstinduktion und das Verhalten eines dicken Drahts gegen einen Wechselstrom. Ferner die Verzögerung beim Magnetisiren von

Eisen und besonders die Möglichkeit des permanenten Magnetisirens; sowie

(6) Das Fehlen der lebendigen Kraft beim elektrischen Strom und des Rotationsmomentes beim Elektromagneten (vgl. § 39), soweit mechanische Versuche dafür massgebend sind.

Ich gebe von vorn herein zu, dass viele dieser Punkte nur oberflächliche Anzeichen enthalten, die vor einer näheren Kritik kaum bestehen dürften; nur 3, 4, 5 und 6 können ernstlich in Betracht kommen; von diesen aber scheinen mir 5 und 6 zusammen eine Art vorläufigen hypothetischen Beweis zu liefern, der durch 3 erheblich gekräftigt wird.

Hier müssen wir den Gegenstand vorläufig wieder verlassen, kommen aber im § 118 und § 155 noch einmal darauf zurück.

Darstellung eines magnetischen Feldes

91. Jene Störung, die wir Magnetismus nennen und die wir im VII. Kapitel auf Wirbelerscheinungen — Rotiren um eine Achse — zurückführten, beschränkt sich keineswegs auf den Stahl oder das Eisen des Magneten, sondern verbreitet sich durch den ganzen umgebenden Raum und bildet das sogenannte magnetische Feld. Einen Plan dieses Feldes erhält man mit Hülfe von Eisenfeilspänen, die sich aneinandersetzen

und die Richtung der magnetischen Kraft an jedem Punkt anzeigen (Fig. 33).

Die so entstehenden Kraftlinien sind als die Achsen der Molekularwirbel anzusehen (Fig. 30). Sie sind Fortsetzungen entsprechender Linien in der Masse des Stahls, und jede Linie bildet eigentlich eine geschlossene

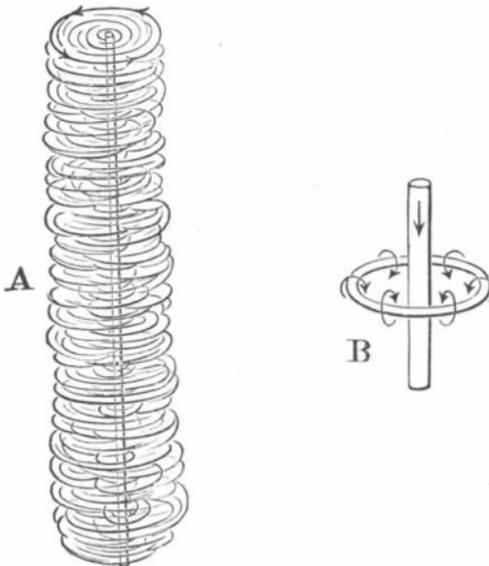


Fig. 30. — A. Theil einer magnetischen Kraftlinie, nebst dem sie umschliessenden elektrischen Wirbel. — B. Bruchstück eines elektrischen Stromkreises nebst einer der ihn umschliessenden Kraftlinien, die ihrerseits wieder von dem elektrischen Wirbel umschlossen ist; jede einen Strom umschliessende magnetische Kraftlinie bildet einen elektrischen Wirbelring. Vergl. Fig. 39.

Kurve, die zum Theil im Stahl, zum Theil in der Luft verläuft. Bei einer Drahtspule, wie auf Fig. 16 oder 29, befinden sich die ganzen Linien in der Luft, aber ein Theil ihrer Bahn geht durch die Spule, während der andere sich mehr oder weniger zwischen ihren beiden Enden ausbreitet.

Nach Ampère's Theorie besteht jedoch kein *wesentlicher* Unterschied zwischen einer solchen Spule und einem Stahlmagneten; sobald man die Ströme in den Molekeln des Magneten in Betracht zieht, löst sich das Ganze in Ketten und Molekularströme auf, die sich um eine gemeinsame, geschlossene Kurve oder Achse winden.

Jedes Atom, im Stahl sowohl wie in der Luft, ist der Sitz eines elektrischen Wirbels, der mehr oder weniger so gerichtet ist, dass sich seine Ebene durchschnittlich senkrecht zu den Kraftlinien befindet. Will man es vermeiden, die unvollständig gerichteten Wirbel mit in Betracht zu ziehen, so denke man sich am Besten sämtliche Atome in zwei Systeme getheilt, solche, die genau übereinstimmend gerichtet sind, und solche, die sich nach jeder beliebigen Richtung wenden, und vernachlässige die letzteren.

92. Nun denke man sich eine Kette von Wirbeln als eine Reihe von rotirenden Kügelchen, die auf einem Draht aufgezogen sind, und vergegenwärtige sich die Wirkung, die eintreten würde, wenn eine materielle Flüssigkeit unter diesen Umständen rotirte. Offenbar würde sich die Flüssigkeitssäule bei der Rotation verkürzen und ihr Durchmesser zunehmen, wie auf Fig. 32. Eine Reihe derart parallel angeordneter Wirbel würde sich also zusammendrängen oder einen seitlichen Druck ausüben. Gleichzeitig würden die freien Längsachsen

danach streben sich zu verkürzen und eine Spannung in der Längsrichtung verursachen.

Die Achsen solcher Wirbel können in Wirklichkeit nur frei sein an der Grenze des Mittels, wie z. B. an

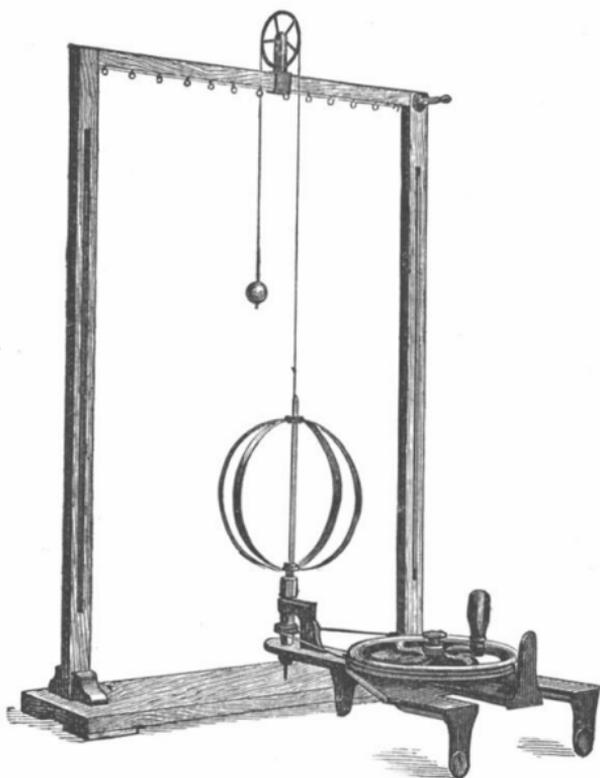


Fig. 31. — Erdkugel-Modell, das beim Rotiren eine axiale Spannung erzeugt, durch welche ein an der Achse befestigtes Gewicht emporgezogen wird, während das Ausbauchen der Wände einen seitlichen Druck ausübt.

der freien Oberfläche einer Flüssigkeit. Magnetische Wirbel sind eigentlich immer geschlossene Kurven; da sich aber ein Theil derselben in einem beweglichen Fluidum wie Luft und der andere Theil in einer

festen Masse wie Eisen oder Stahl befinden kann, so empfiehlt es sich, beide Theile zu unterscheiden; man kann sich also die Luftwirbel gesondert vorstellen, wie sie sich von einem Stück Eisen zu dem anderen erstrecken und durch ihr Streben nach Verkürzung oder ihre Centrifugalkraft die beiden Eisenstücke zu vereinigen suchen.

Der auf Fig. 31 abgebildete Apparat zeigt die Kraft, die ein rotirendes, elastisches Gestell längs und senkrecht zu seiner Rotationsachse ausübt.

Diese Wirkung eines Wirbels lässt sich auch in einer mit Flüssigkeit angefüllten Tasse bequem beobachten. Man versetze die Flüssigkeit in eine lebhafte kreisende Bewegung. Alsdann drückt sie stärker gegen die Wände als zuvor, sodass diese unter dem seitlichen Druck ausbauchen würden, wenn sie elastisch wären; zugleich wird das obere oder freie Ende der Rotationsachse hinabgesogen, sodass der Schwerkraft entgegen eine trichterförmige Senkung entsteht. Noch auffallender tritt die Erscheinung hervor bei dem auf Fig. 32 abgebildeten Apparat.

Zwei kreisförmige Brettchen sind durch eine kurze, breite, elastische Röhre verbunden; an dem unteren Brett ist ein Gewicht befestigt, das obere hängt an einer horizontalen, rotirenden Scheibe; die Trommel wird mit Wasser angefüllt und das Ganze in Bewegung gesetzt. Alsbald hebt die Längsspannung das

Gewicht, und der seitliche Druck drängt die Wände hinaus.

Es ist nicht nöthig, dass das ganze Gefäß sich dreht; wenn die Flüssigkeit inwendig rotirt, wird derselbe Zweck erreicht.

93. Nun denke man sich ein Mittel, das aus zahllosen derartigen, mit rotirender Flüssigkeit angefüllten

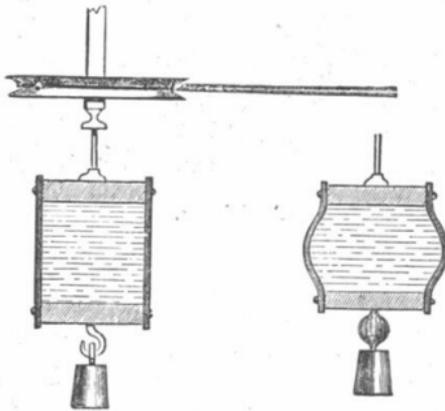
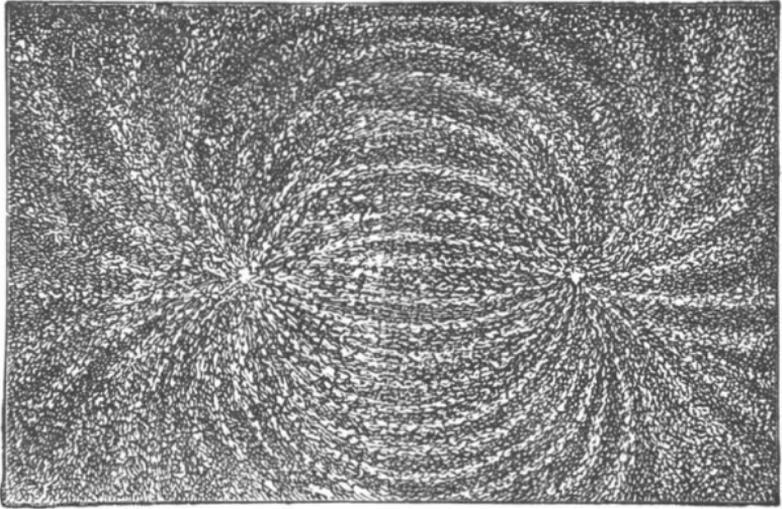
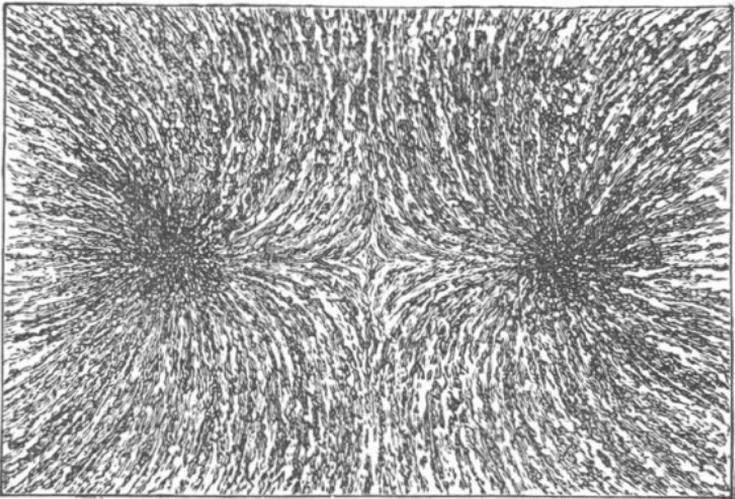


Fig. 32. — Cylindrisches Gefäß mit elastischen Wänden, das an einer rotirenden Scheibe hängt und mit Flüssigkeit angefüllt ist. Beim Rotiren hebt es vermöge seiner Centrifugalkraft ein Gewicht und dehnt sich seitlich aus; es veranschaulicht die Spannung längs und den Druck senkrecht zur Rotationsachse.

Zellen besteht; die Zellen seien entweder sehr lang oder eine an die andere angesetzt, sodass sie eine Kette, oder parallele Reihen von Ketten bilden; alsdann hat man das Bild eines magnetischen Mittels mit seinen Kraftlinien. Die äussersten Grenzen des Feldes streben danach sich einander zu nähern und stellen die magnetische Anziehung dar, während in seitlicher Richtung die Kraftlinien (die Achsen der Wirbel) sich gegenseitig



Anziehung.



Abstossung.

Fig. 33. — Anziehung und Abstossung. Die Spannung längs der Kraftlinien oder Rotationsachsen strebt das eine Paar Pole zu vereinigen; der senkrecht zur Achse auftretende, auf die Centrifugalkraft der Wirbel zurückzuführende Druck treibt das andere Paar Pole auseinander.

wegdrängen und die Abstossung erläutern. Dies ist Clerk Maxwell's Vorstellung von einem elektro-magnetischen Medium und von der Art, wie magnetischer Druck und magnetische Anziehung und Abstossung zwischen festen Körpern entsteht.

Da, wo die Kraftlinien von einem Körper zum anderen hinüberreichen, streben die Körper sich zu vereinigen, als würden sie von Gummibändern gezogen (Fig. 33); da aber, wo die Kraftlinien eines Körpers sich den Kraftlinien eines anderen Körpers *seitlich* darbieten, werden die Körper auseinander gedrängt.

KAPITEL X

MECHANISCHE MODELLE EINES MAGNETISCHEN FELDES

Erstes Schema eines durch einen Strom erzeugten Feldes

94. Kehren wir nun zurück zur Betrachtung eines einfachen Stromkreises; z. B. eines linearen Leiters, durch den wir einen Strom senden. Wie haben wir uns die Entstehung der Kraftlinien in dem Mittel vorzustellen und wie sollen wir uns die Ausbreitung der magnetischen Induktion veranschaulichen? Wir wollen zunächst davon ausgehen, dass der Strom das Feld erregt (obgleich das Umgekehrte sich vielleicht zuletzt als richtiger herausstellen wird).

Wenn man sich die Elektrizität in den Molekeln des isolirenden Mittels ähnlich zusammenhängend denkt wie ein System von Zahnrädern, die gleichzeitig in einander und in die Zähne des metallischen Leiters eingreifen, so kann man sich leicht ein Bild davon machen,

wie die Rotation vom Strom aus seitlich übertragen wird: ganz wie eine in Bewegung begriffene Zahnstange eine Anzahl Triebe in Gang setzt, die gleichzeitig in einander und in die Zahnstange eingreifen (Fig. 34). Allein dann wird die eine Hälfte der Räder in der einen, die andere Hälfte in der anderen Richtung rotieren, eine Anordnung, die der Wirklichkeit nicht genau entspricht.

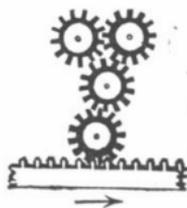


Fig. 34.

Auf welche Weise könnte ein System von parallelen Wirbeln durchweg in derselben Richtung rotieren?



Fig. 35.

Hängen sie zusammen, so müssen sie sich gegenseitig aufhalten, weil sie sich an der Berührungsstelle in entgegengesetzten Richtungen drehen; hängen sie nicht zusammen, wie kann sich alsdann die Rotation durch das Feld verbreiten?

Hier müssen wir wieder auf die alten Seilmodelle zurückkommen, deren wir uns bedienten, um die Elektrostatik zu erklären; jedoch fügen wir zu ihren übrigen Eigenschaften jetzt noch eine magnetische Wirbelbewegung hinzu. Wir veranschaulichten, wie immerlich, auf Fig. 5, 6 und 7a die Atome und die Elektrizität durch Kügelchen, die auf ein Seil gereiht waren. Die Seile bedeuteten abwechselnd positive und

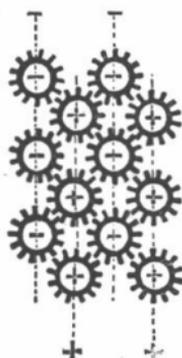


Fig. 36. — Reihen abwechselnd positiver und negativer Zellen, die in einander eingreifen und frei beweglich um feste Achsen rotieren.

negative Elektrizität und wurden in entgegengesetzten Richtungen verschoben (siehe § 90).

Zu einer ähnlichen Anschauungsweise gelangen wir nun auch in Bezug auf die Anordnung der Zahnräder. Sie müssen, um richtig zu arbeiten, abwechselnd positive und negative Elektrizität darstellen (Fig. 36). Rotiren sie *nun* abwechselnd in entgegengesetzten Richtungen, so ist Alles in Ordnung, und die elektrische Cirkulation oder Reaktion vollzieht sich in dem ganzen Felde in

einer Richtung. Jedes einzelne Rad erfasst und dreht das nächstliegende und so verbreitet sich die Rotation durch das ganze Mittel mit einer Geschwindigkeit, die von der Elasticität und Dichtigkeit des Mediums abhängt, welches bei derartigen Störungen betheiligt ist.

Vorläufig erscheint die Frage noch nicht angezeigt, ob die Zahnräder Stoffatome oder nur Elektrizität darstellen. Es kann sein, dass jedes Atom elektrostatisch geladen ist und selbst rotirt; in diesem Falle würde die Ladung mitrotiren und dadurch den erwünschten Molekularstrom erzeugen; das scheinbare Beharrungsvermögen der Elektrizität würde sich sehr einfach erklären als Beharrungsvermögen der rotirenden Atome; und die Unmöglichkeit, durch mechanische Mittel beim Elektromagneten ein Rotationsmoment nachzuweisen, würde sich gleichfalls erklären durch die gleichzeitige, entgegengesetzte Rotation der benachbarten Atome. Allerdings könnte die Frage entstehen, weshalb das Beharrungsvermögen der entgegengesetzten Molekeln genau gleich und entgegengesetzt sein sollte, was der Fall sein müsste, da ein flüssiges, magnetisirtes Mittel sonst körperlich rotiren würde; auch mögen noch andere Schwierigkeiten mit der körperlichen Rotation elektrostatisch geladener Molekeln verknüpft sein; sie ist aber auch bis jetzt eine blosser Möglichkeit, auf die kein Gewicht gelegt werden darf, bis sie festere Gestalt gewonnen hat. Für unseren gegenwärtigen Zweck genügt das Rotiren der Elektrizität innerhalb der Atome, oder

sogar unabhängig von diesen, vollkommen. Da überdies die magnetische Induktion sich mit Leichtigkeit durch ein Vacuum ausbreitet, so muss das Räderwerk von materiellen Atomen im Wesentlichen unabhängig sein.

Wer an den leeren Zwischenräumen auf Fig. 36 Anstoss nimmt, sei auf Fig. 37 verwiesen, die gleiche Dienste leistet und die Schwierigkeit auf ein Minimum reducirt.

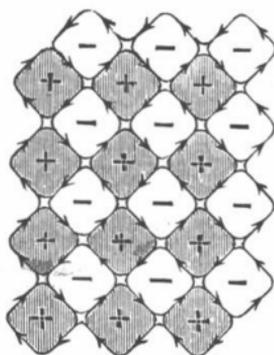


Fig. 37. — Abschnitt eines magnetischen Feldes, das senkrecht zu den Kraftlinien angeordnet ist. Abwechselnde entgegengesetzt rotierende Zellen. Andere Darstellungsweise der Fig. 36.

Diese Zahnradmodelle sind von mir nach dem Muster des im § 154 erwähnten Aethermodells von Professor Fitzgerald entworfen; dieses Modell ist in Bezug auf praktische Ausführbarkeit entschieden das Beste und weit zweckmässiger als das ursprüngliche Modell von Clerk Maxwell (siehe § 155), das allen derartigen Darstellungen von den Gleichungen eines magnetischen Feldes zu Grunde liegt.

Schema eines elektrischen Stromes

95. Man beachte nun, dass in einem so gearteten, magnetisirten Mittel, in welchem also das Räderwerk vollkommen korrekt arbeitet, ein Fortschreiten der Elektrizität oder ein Strom in irgend einer Richtung nicht stattfindet. Denn, wenn an jeder Berührungsstelle zwischen zwei Rädern die positiven und negativen Elektrizitäten mit derselben Geschwindigkeit in derselben Richtung sich bewegen, so ergibt das keinen Strom. Nur wenn sich die positive Elektrizität in der einen und die negative in der *entgegengesetzten* Richtung bewegt oder wenn die eine stillsteht oder wenigstens sich mit anderer Geschwindigkeit bewegt, kann die Elektrizität fortschreiten oder strömen.

Nichtsdestoweniger kann ein Strom durch den auf Fig. 36 oder 37 abgebildeten Mechanismus leicht veranschaulicht werden; die Räder brauchen nur unvollkommen in einander einzugreifen und an einander zu gleiten. An solchen Gleitstellen bewegt sich die positive Elektrizität schneller als die negative, oder umgekehrt; hier entsteht also ein Strom. Eine zusammenhängende Reihe solcher Gleitstellen entspricht mithin einem linearen Strom. Wenn man sich das klar macht, so wird man begreifen, dass eine Reihe gleitender Räder stets einen Ring bilden muss, mit anderen Worten, dass die Elektrizität stets in einem geschlossenen Kreise fließen

muss (§ 4). Denn, wenn ein einzelnes Rad gleitet, so beschränkt sich der Stromkreis auf die Peripherie dieses Rades; wenn eine Reihe gleitet, so befinden sich der Hin- und Rückstrom auf den entgegengesetzten Seiten der Reihe. Endlich, wenn ein grosser Raum von beliebiger Gestalt, in dem alle Räder korrekt arbeiten, von einer Reihe gleitender Räder eingeschlossen ist, so haben wir einen Stromkreis von beliebiger Gestalt, aber immer einen geschlossenen Stromkreis. Wohlverstanden hat man sich den Strom nicht als eine räumliche *Fortbewegung* der Räder vorzustellen; diese können feste Achsen haben; es handelt sich nur um ein Gleiten der *Ränder* an einander.

Man denke sich sämtliche Räder innerhalb des leeren Rahmens auf Fig. 38 rotierend, die positiven im Sinne des Uhrzeigers, die negativen umgekehrt. Dagegen sollen die Räder ausserhalb des Rahmens stillstehen oder sich mit einer anderen Geschwindigkeit oder in entgegengesetzter Richtung bewegen; alsdann ist die Grenze des inneren Systems eine solche Linie, wo die Räder gleiten, das heisst wo die positiven Ränder im Sinne des Uhrzeigers und die negativen Ränder entgegengesetzt rotieren. Diese Grenze stellt also einen im Sinne des Uhrzeigers sich bewegendem positiven Strom dar, der den inneren Rand des leeren Rahmens umkreist.

Man kann indessen einwenden, dass, wenn die Rotation innerhalb des Rahmens fort dauert, die äusseren

Räder früher oder später ihre Geschwindigkeit den inneren mittheilen müssen und die Gleitung aufhören wird. Dem ist in der That so, es sei denn, dass der Zusammenhang zwischen dem inneren und äusseren System vollständig unterbrochen ist, wie auf Fig. 38.

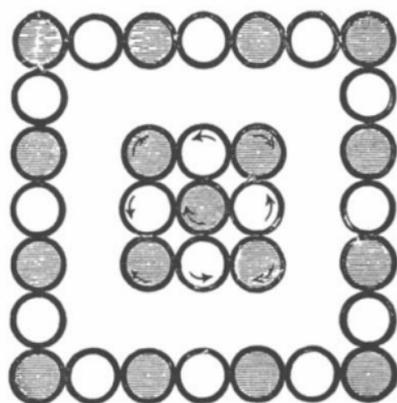


Fig. 38. — Diagramm eines peripherischen Stroms, der von dem umgebenden Mittel durch einen vollkommenen Leiter getrennt ist, welcher keine Bewegung überträgt, mithin einen vollkommenen magnetischen Schirm bildet. Siehe auch § 101 und Fig. 41. Die schraffirten Räder bedeuten positive Elektrizität. Der Strom läuft im Sinne des Uhrzeigers um die äussere Grenze des inneren Räderystems.

Besteht irgend ein Zusammenhang zwischen beiden, so können die Räder nur vorübergehend gleiten und zwar nur solange die Periode der Beschleunigung dauert.

Unterschied zwischen einem Dielektricum und einem Metall in Bezug auf ihr Verhalten gegen ein veränderliches magnetisches Feld

96. In einem Dielektricum ist der Zusammenhang zwischen den Atomen ein bestimmter und vollständiger. Wenn das eine sich dreht, muss das nächste sich auch drehen, und die in einander eingreifenden gezahnten Flächen gleiten niemals. Der Bau eines Dielektricum entspricht also dem auf Fig. 36 abgebildeten Zahnradsystem. Stromleitung ist darin unmöglich.

In metallischen Leitern dagegen ist der Eingriff unvollkommen. Es ist ein Fall von Reibungskuppelung mit mehr oder weniger Schmierung und Gleitung, so dass ein rotirendes Rad das nächstliegende zwar schnell aber doch nicht augenblicklich in Gang setzt. Es entsteht daher eine Bewegung des positiven Randes, die durch die gleiche, gleichzeitige Bewegung des anstossenden negativen Randes ungenügend kompensirt wird, bis dieser in Gang kommt; mit anderen Worten, es findet ein vorübergehender elektrischer Strom statt, bis die Räder ihre volle Geschwindigkeit erlangt haben.

In *vollkommenen* Leitern sind die Räder ganz ungezahnt. Die Schmierung ist so vollkommen, dass die Atome ganz unabhängig von einander sind. In einem derartigen Mittel kann daher eine Rotation überhaupt nicht fortgepflanzt werden. Der einzige in einem voll-

kommenen Leiter mögliche Strom ist eine auf die äusserste Oberfläche beschränkte Erscheinung. (Siehe auch Kap. V und § 104.)¹⁾

Ein magnetisirtes Mittel, welcher Art es auch sei, hat man sich also zu denken als erfüllt von rotirenden Rädern, von denen sich die positiven in der einen, die negativen in der anderen Richtung drehen. Ist das Mittel nicht magnetisirt, sondern nur magnetisch, das heisst magnetisierbar, so kann man sich denken, dass seine Räder entweder stillstehen, oder beliebig nach allen Richtungen gewendet sind. Letztere Vorstellung ist wahrscheinlich die richtigere, erstere ist vorläufig die leichtere.

Ob das Mittel isolirt oder leitet, bleibt sich gleich in Bezug auf die allgemeine Thatsache, dass in seinem Innern, überall wo Kraftlinien hindurchgehen, Räder rotiren. In einem leitenden Mittel aber ist der Eingriff der Räder unvollkommen; dementsprechend zeigt sich während der veränderlichen Stadien eines magnetischen Feldes, wenn seine Wirbelbewegung zu- oder abnimmt, ein sehr wichtiger Unterschied zwischen isolirender

¹⁾ Man hat mich darauf aufmerksam gemacht, dass obgleich in vollkommenen Leitern durch seitliches Einwirken des umgebenden Mittels kein Strom erzeugt werden könne, das Entstehen thermo-elektrischer, durch Kontaktkraft erzeugter Ströme in seinem Innern nicht ausgeschlossen sei. Ich möchte jedoch dagegen einwenden (§ 62), dass in einem vollkommenen Leiter keine thermo-elektrischen Kräfte vorhanden sein können, weil er nicht im Stande ist, die Elektrizität festzuhalten.

und leitender Materie. In leitender Materie gleiten die Räder überall, solange die Periode der Beschleunigung dauert und es vergeht eine gewisse Zeit, bis ein konstanter Zustand erreicht ist. In dielektrischer Materie braucht die Wirbelbewegung zwar ebenfalls eine endliche Zeit um sich fortzupflanzen; diese ist aber ausserordentlich kurz und der Vorgang vollzieht sich ohne Gleitung durch eine leichte zurückschnellende Federung (Siehe §§ 103 u. 159).

97. Stark magnetische Substanzen, wie Eisen, Nickel und Kobalt, hat man sich als ebenso konstituiert vorzustellen, nur dass ihre Räder viel massiger oder viel zahlreicher oder beides zugleich sind. Die Grösse, die wir in den §§ 82, 83 als Permeabilität bezeichneten und durch den Buchstaben μ ausdrückten, kann man jetzt als der Dichtigkeit des magnetischen Mittels äquivalent ansehen; sodass Substanzen mit grossem μ einen magnetischen Mechanismus oder ein Räderwerk von ausserordentlicher Massigkeit besitzen.

*Erscheinungen, die mit einem veränderlichen Strom
verknüpft sind. Wesen der Selbstinduktion*

98. Man vergegenwärtige sich nun, was in der Umgebung eines Leiters geschieht, in dem ein Strom entsteht, wie dies im V. Kapitel zum Theil geschildert wurde. Ohne den Vorgang in erschöpfender Weise

darstellen zu wollen, kann man sich doch mechanische Vorrichtungen denken, die den elektrischen Erscheinungen einigermaßen analog sind.

Zunächst stelle man sich ein in einander greifendes System von Zahnrädern vor, das an einer Stelle durch eine Zahnstange in Bewegung gesetzt wird. Man achte



Fig. 39. — Vorläufige Darstellung eines Stroms, der ein umgebendes Dielektricum entweder treibt oder von ihm getrieben wird. Längsschnitt des Drahts. Vergl. Fig. 30B.

hauptsächlich auf jedes zweite Rad, das positive Elektrizität darstellt. Die dazwischen liegenden negativen Räder sind nothwendig um die Bewegung fortzupflanzen und dienen gleichzeitig dazu, das Fortschreiten der positiven Elektrizität in irgend einer bestimmten Richtung zu neutralisiren, ausgenommen da, wo die Räder gleiten; sonst interessiren sie uns nicht.

Man erinnere sich, dass jedes Rad Beharrungsvermögen besitzt, wie ein Schwungrad (§ 88).

Sobald die Zahnstange sich bewegt, fangen die Räder an zu rotiren und erlangen sämtlich binnen Kurzem ihre volle Geschwindigkeit. Bis dies geschieht, hat die Zahnstange eine Gegenkraft zu überwinden, die nicht auf Reibung oder gewöhnlichem Widerstand, sondern auf der Trägheit des Räderwerks beruht.

Diese Trägheit stellt dasjenige dar, was wir Selbstinduktion nennen und seine Wirkung ist der sogenannte „Extrastrom beim Schliessen“ oder richtiger die elektromotorische Gegenkraft des elektro-magnetischen Beharrungsvermögens oder der Selbstinduktion.

Ist die Zahnstange einmal in Gang gesetzt, so übt das Räderwerk keine Wirkung mehr auf sie aus, solange sie sich mit konstanter Geschwindigkeit vorwärts bewegt; aber wenn sie zum Stillstand gebracht werden soll, so gelingt dies nur unter Anwendung von Gewalt; das Beharrungsvermögen des Räderwerks treibt sie noch eine Zeit lang weiter und man erhält den sogenannten „Extrastrom beim Unterbrechen“.

99. Nimmt man nun an, dass die Zahnstange die in einem Kupferdraht fortschreitende Elektrizität darstellt, so kann man das Diagramm als Längsschnitt eines vollständigen Feldes ansehen; das ganze Feld erhält man, wenn man das Diagramm um die Achse der Zahnstange rotiren lässt. Geschieht dies, so wird man finden, dass die Achse jedes Rades sich zu einem kreis-

förmigen Kern verlängert und jedes Rad zu einem Wirbelring wird, der die Zahnstange umschliesst und an ihr hinabrollt, während sie sich vorwärtsbewegt, ähnlich wie wenn man einen Stab durch einen enganschliessenden Gummiring schiebt. (Siehe Fig. 30 B.)

Je weiter man sich von der Zahnstange entfernt, um so länger werden die kreisförmigen Achsen der Wirbel; da sich aber auf die zunehmende Stoffmenge eine gegebene Wirbelbewegung vertheilt, so ist ersichtlich, dass die Rotation in dem Grade abnehmen muss, in dem die Entfernung wächst und dass in einer entsprechenden Entfernung von dem Leiter das Mittel fast gar keine Störung mehr erleiden wird.

100. Um zu erfahren, wie weit das Mittel unter der Einwirkung eines gegebenen Stromkreises rotirt, muss man dessen Gestalt, das heisst die Lage seiner Rückleitung kennen.

Man nehme zunächst eine lange, schmale Drahtschleife und leite einen Strom auf der einen Seite hin, auf der anderen zurück. Die von jeder Leitung ausgehenden Rotationen decken einander, und obgleich sie innerhalb der Schleife die gleiche Richtung haben, bewegen sie sich ausserhalb der Schleife in entgegengesetzten Richtungen. Das Mittel ausserhalb eines derartigen Leiters ist daher fast gar keiner Störung unterworfen; es wird überhaupt nur ein kleiner Theil des Dielektricums gestört; mithin ist das Beharrungs-

101. Fig. 38 und 41 zeigen den Vorgang bei einem geschlossenen Stromkreis. Der leere Rahmen auf Fig. 38 stellt einen vollkommenen Leiter oder eine vollständige Unterbrechung des Zusammenhanges zwischen den Zahnrädern dar. Um die innere Begrenzung

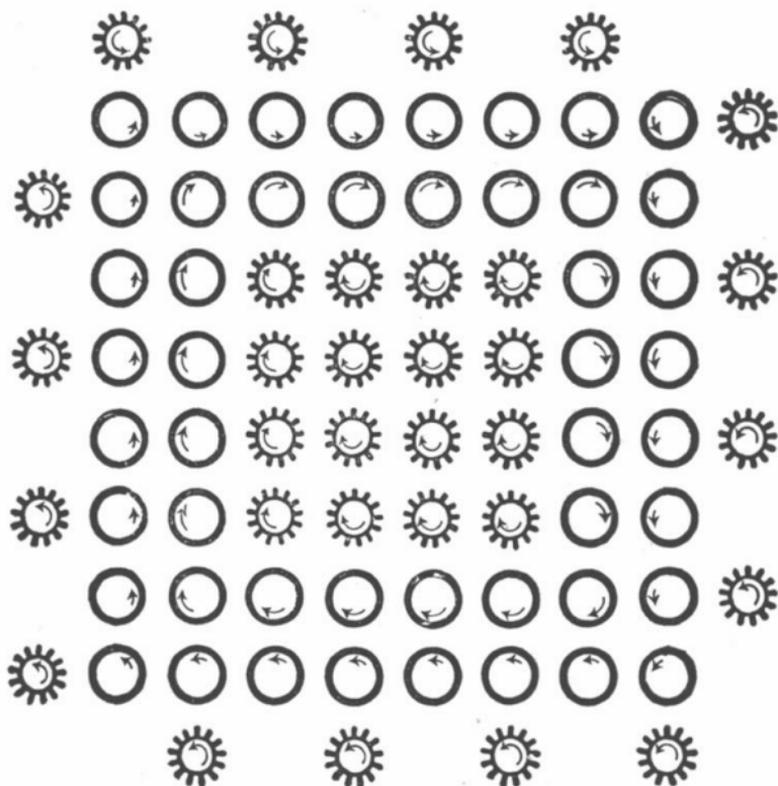


Fig. 41. — Diagramm eines einfachen leitenden Draht rings oder einer Galvanometerwindung. Die negativen Verbindungsradchen sind weggelassen. Es sind innerhalb und ausserhalb des Leiters gleichviel dielektrische Räder gezeichnet, um zu veranschaulichen, dass die Rotation innerhalb und ausserhalb gleich ist, obgleich sie sich ausserhalb auf eine grössere Stoffmenge vertheilt und daher schwächer auftritt. Das Diagramm zeigt einen positiven Strom, der im Sinne des Uhrzeigers konstant um die Windung fliesst, nebst der dazu gehörigen Vertheilung des Magnetismus. Querschnitt in der Ebene der Windung. Man achte nicht bloss auf die Richtung der Pfeile, sondern auch auf ihre Länge.

dieses Rahmens sieht man die positive Elektrizität in der Pfeilrichtung kreisen; unabhängig davon könnte sie auch um die äussere Begrenzung kreisen: das Innere des vollkommenen Leiters würde dadurch in keiner Weise berührt. Er ist deshalb als leerer Raum abgebildet.

Der entsprechende Theil auf Fig. 41 soll einen gewöhnlichen Leiter darstellen, dessen Zahnräder gleiten können. Die Gleitung muss in diesem Fall andauern, weil sich die Räder auf beiden Seiten des Leiters in entgegengesetzten Richtungen drehen; die Atome müssen sich also diesen Bedingungen anpassen, so gut es geht; einige rotiren in der einen, andere in der anderen Richtung, und noch andere, die sich auf einer gewissen neutralen Linie im Leiter befinden, stehen still. Ist der Leiter gerade und unendlich lang, so befindet sich diese neutrale Linie in der Mitte. Ist er eine Schleife, so nähert sie sich der äussersten Begrenzung, weil das Mittel innerhalb der Schleife am stärksten rotirt. Wird die Schleife so eng zusammengebogen, dass sie gar keinen Raum mehr umschliesst, so liegt die neutrale Linie nahezu auf der äussersten Begrenzung (Fig. 40). Wird endlich der leitende Draht um einen Ring gewickelt, alsdann sind die Achsen der Wirbel ganz in den Draht eingeschlossen und es findet ausserhalb desselben gar keine Rotation statt.

Fig. 42 zeigt einen Querschnitt unter diesen Be-

dingungen. Die Räder des äusseren Dielektricum drehen sich garnicht. Das innere rotirt, vielleicht sogar ungemein heftig; wir haben also zwischen den inneren und äusseren Schichten des Leiters eine starke Gleitung und einen grossen Verlust an Energie — mit anderen Worten einen starken Strom.

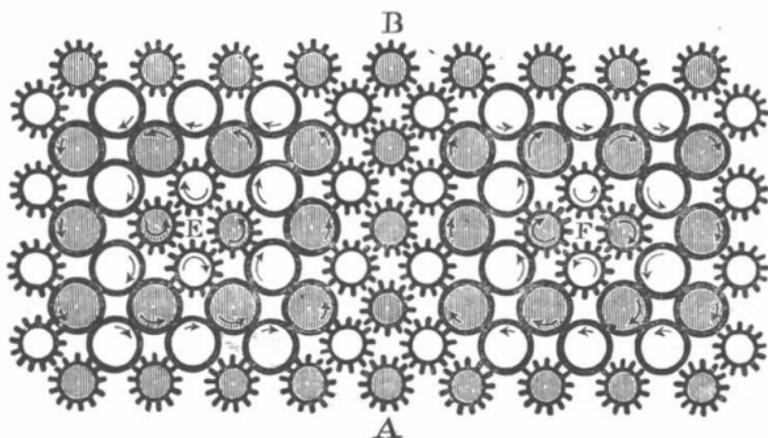


Fig. 42. — Querschnitt eines geschlossenen magnetischen Kreises oder elektrischen Wirbelringes oder hohlen gebogenen Solenoids, wie auf Fig. 29, der einen aus Luft gebildeten Ringanker umschliesst. AB ist die Achse des Ringes. E und F sind die Querschnitte seines Kerns. Die Länge der Pfeile bezeichnet die Intensität der Rotation, das heisst des magnetischen Feldes. Sie erreicht in der Mitte jedes Querschnitts ihr Maximum und ist ausserhalb gleich Null. Besteht der Kern aus Eisen statt aus Luft, so müssen seine Räder 100 bis 10000 Mal massiger gedacht werden; ist das Eisen massiv, so gleiten die Räder; besteht er aus einem Bündel dünner lackirter Drähte, so sind die Räder gezahnt. Vergl. Fig. 47.

102. Diese oben geschilderte Gleitung vollzieht sich in jedem Leiter, durch den ein Strom, sei er konstant oder veränderlich, befördert wird; *sie ist überhaupt selbst der Strom*. Sie ist stets verbunden mit einem Verlust an Energie und der Erzeugung von Wärme —

nur in einem vollkommenen Leiter kann sie ohne Reibung stattfinden. Bei einem constanten Strom vertheilt sich die Gleitung gleichmässig durch den ganzen Querschnitt des Leiters. Während der veränderlichen Stadien ist sie ungleichmässig vertheilt; sie concentrirt sich alsdann mehr auf die Peripherie des Drahts, wie ich durch die Diagramme zu veranschaulichen suchte und im § 43 schilderte.

Beim Schliessen eines Stroms werden die äussersten Schichten des Drahts zuerst erregt und die Bewegung schreitet stufenweise, obgleich sehr rasch, bis zur Achse vor. Die Verzögerung oder Selbstinduktion in einem Draht ist daher um so grösser, je dicker er ist und je besser das Material leitet, aus dem er besteht. Wählt man Eisen, so wird die Masse oder Anzahl der Räder so gross, dass die Verzögerung erheblich zunimmt. Die Rotation seiner äusseren Schichten ist alsdann so stark, dass sie im Stande ist die von Herrn Hughes experimentell nachgewiesenen Wirkungen hervorzubringen (vergl. § 43).

Gleitung darf niemals mit Rotation verwechselt werden. Gleitung ist Strom, Rotation ist Magnetismus. Die Räder, die sich auf der Achse eines geraden, unendlichen, stromleitenden Drahts befinden, stehen still und wenn man sich von der Achse entfernt, rotiren sie auf beiden Seiten nach entgegengesetzten Richtungen, sodass kreisförmige Wirbelkerne um die Achsen ent-

stehen (Fig. 30B). Die Gleitung dagegen ist gleichmässig durch den ganzen Draht vertheilt, sobald der Strom constant geworden ist. Die Gleitung vollzieht sich nur in der Richtung des Drahts. Die Rotationsachsen befinden sich stets im rechten Winkel zu dieser Richtung.

KAPITEL XI

MECHANISCHE MODELLE VON STRÖM- INDUKTION

Entstehen eines inducirten Stroms in einem sekundären Stromkreis

103. Um sich klar zu machen, wie sich ein auf beliebige Art erregtes Feld in einem leitendem Mittel verbreitet, betrachte man Fig. 43 und denke sich den Raum innerhalb des Quadrats A B C D als einen gewöhnlichen leitenden Raum, das heisst als erfüllt mit Rädern, die schlecht in einander greifen und gleiten können.

Sobald die Zahnstange sich bewegt, fangen alle Räder ausserhalb des Quadrats A B C D an sich zu drehen und erlangen bald ihre volle Geschwindigkeit. Die äusserste Räderschicht innerhalb des Quadrats fängt gleichfalls an zu rotiren, aber nicht sofort; es dauert eine gewisse Zeit bis sie in Gang kommt; noch länger dauert es, bis sich die nächste Schicht bewegt u. s. w.;

Aufhören der Gleitung veranschaulicht alsdann die Art, wie dieser inducirte Strom anwächst, um allmählich wieder zu vergehen, sobald das magnetische Feld (d. h. die Rotation) in das Innere sämtlicher Leiter eingedrungen ist und sie dauernd beherrscht.

Nun denke man sich, dass die Zahnstange plötzlich angehalten wird; alsdann bleiben alle gezahnten Räder gleichfalls stehen, wenn auch infolge ihrer lebendigen Kraft nicht ohne einen Ruck und heftige Oscillationen. Die Räder innerhalb des Quadrats $ABCD$ dagegen drehen sich noch eine Zeit lang weiter. Die äusserste Schicht dieses Systems gleitet in der Richtung, die den direkten inducirten Strom bei der „Unterbrechung“ veranschaulicht, und steht zuerst still. Das Gleiten und Stillstehen dringt dann allmählich nach innen vor, genau so wie zuvor die umgekehrte Bewegung, bis jede Spur einer Rotation aufhört. Dieser umgekehrte Vorgang entspricht dem direkten inducirten Strom beim „Unterbrechen“.

104. Durch einen vollkommenen Leiter würde die Störung niemals übertragen werden, denn die dielektrischen Räder an seiner Oberfläche würden mit solcher Vollkommenheit gleiten, dass sie die Bewegung niemals den inneren Schichten mittheilen könnten. Es würde nichts weiter entstehen, als ein oberflächlicher Strom, der ins Unbegrenzte oder vielmehr solange fort-dauern würde, wie das magnetische Feld (die Rotation der dielektrischen Räder) andauert und der Leiter

würde für jedes hinter oder in ihm befindliche Dielektricum einen vollständigen magnetischen Schirm bilden. Ein derartiger vollkommener Leiter ist durch den leeren Rahmen auf Fig. 38 dargestellt. Ein magnetisches Feld oder eine Wirbelbewegung, die ausserhalb dieses Rahmens erregt wird, kann sich niemals dem inneren Rädernsystem mittheilen; und umgekehrt. (§ 153.)

105. Man wird nunmehr begreifen, dass ein rotirendes Schwungrad das mechanische Ebenbild des Magnetismus oder, genauer ausgedrückt, des Querschnitts einer magnetischen Kraftlinie oder Krafröhre ist; und dass ein Hebel, der entweder beschleunigend oder hemmend auf das Schwungrad einwirkt, nebst der Gleitung, dem Verbrauch an Energie und der Erzeugung von Wärme, die dadurch eintreten, den elektrischen Strom mechanisch veranschaulichen.

Ein magnetisches Feld soll man sich demnach denken als erfüllt von einem System elastischer Wirbel, deren einige zahnradartig in einander greifen, während andere nur mit glatten Rändern gegen einander angepresst sind. Diese letzteren können gleiten und an den Stellen, wo sich solche Räder befinden, können Ströme entstehen. Die hierbei verbrauchte Energie wird von der Kraftquelle aus durch die nichtgleitenden oder dielektrischen Theile des Feldes übertragen, genau so wie die Energie einer Dampfmaschine durch Getriebe oder Wellen an diejenigen Stellen befördert wird, wo sie durch Reibung verbraucht werden soll. (Siehe §§ 42—44.)

Uebertragung der Energie in die Ferne

106. Wir wollen nun versuchen, uns die Bedeutung eines Telegraphendrahtes von diesem Gesichtspunkt aus klar zu machen. Angenommen, dass wir an einem Ort ein magnetisches Feld erregt haben, wie können wir es derart in die Ferne übertragen, dass an einem anderen Ort Magnetnadeln in Bewegung gesetzt und Signale ausgeführt werden? Der erste Gedanke, der sich darbietet, ist folgender: Da es keinen vollkommenen Leiter oder absoluten magnetischen Schirm giebt, so ist das Feld eines jeden Magneten vollständig unbegrenzt; es erstreckt sich also schon bis zu dem entfernten Ort hin. Man nehme *hier* einen langen Eisenstab, den man nach Belieben magnetisiren und entmagnetisiren kann, *dort* ein sehr empfindliches Magnetometer und die Aufgabe ist gelöst. In der That liegt kein Grund vor, weshalb man nicht versuchen sollte, unter gewissen Bedingungen auf diese Art über kurze Strecken ohne Draht zu signalisiren. Da jedoch die durch einen gegebenen Magneten verursachte Wirkung umgekehrt proportional dem Quadrat seiner Entfernung ist, so liegt es auf der Hand, dass die Kraft eines Magneten, selbst wenn er mehrere Meter lang wäre, schon in einer Entfernung von einigen Kilometern ausserordentlich schwach wird.

Ein zweiter Gedanke würde dahin gehen, einige der

magnetischen Kraftlinien vermittelt eines eisernen Stabes oder Drahts nach dem entfernten Ort hinzu-
leiten. Ein Draht aus weichem Eisen eignet sich hierzu
soviel besser als Luft, dass eine sehr lange eiserne Schleife,
die an einem Ende durch eine magnetisirende Draht-
spule, am anderen durch eine Empfängerspule hindurch-
geht, eine gewisse Verbindung zwischen beiden Orten
herzustellen vermag. Erzeugt man nämlich an einem
Ende einen primären Strom, so entsteht am anderen
ein sekundärer inducirter Strom. Dies wäre ein magne-
tischer Telegraph, durch den eine magnetische Wirbel-
bewegung nur längs eines Drahtes fortgepflanzt und
ein Strom an dem entfernten Ort erregt würde.

Nun sind aber der Stromkreis und der magnetische
Kreis vertauschbar; der Gedanke liegt also nahe, die
lange magnetische Schleife, deren Enden mit kleinen
Stromwindungen umwickelt sind, durch eine lange
Stromschleife zu ersetzen, deren Enden durch kleine
magnetische Windungen hindurchgehen. Ebendies ist
bei dem elektrischen Telegraphen der Fall. Diese An-
ordnung ist aus folgenden Gründen vorzuziehen: Eisen
leitet den Magnetismus ungefähr 1000 mal besser als
Luft, aber nicht unendlich viel besser; mithin würden
sehr viele Kraftlinien unterwegs aus der eisernen Schleife
austreten und einen kürzeren Kreis durch die Luft
zurückbeschreiben. Kupferdraht dagegen ist ein fast
unendlich viel besserer Leiter der Elektrizität als

Guttapercha oder Porzellan. Ein elektrischer Telegraph ist daher zweckmässiger als ein magnetischer.

Die Leitfähigkeit von Blei oder Neusilber ist eine Million mal grösser als die verdünnter Schwefelsäure, und doch würde man nur mit sehr geringem Erfolge mittelst eines blanken Drahtes aus Blei oder Neusilber durch ein Meer verdünnter Schwefelsäure signalisiren können. Bei einem entsprechenden magnetischen Stromkreis aus Eisen wäre der Verlust noch weit grösser.

107. Worin besteht nun die eigentliche Wirksamkeit des Drahtes beim elektrischen Telegraphen? Wir sehen, dass ein magnetisches Feld an einem Ende mit sehr geringem Verlust ein magnetisches Feld am anderen Ende erzeugt; mit Hülfe des Drahtes wird fast das ganze Feld am anderen Ende concentrirt. Der Draht befähigt uns also, die magnetischen Erscheinungen in jeder beliebigen Richtung fortzuleiten und an jeder Stelle nach Wunsch hervorzurufen. Man sagt zwar gewöhnlich, dass ein Strom in dem Draht fiesse; aber seit wir den Strom nur als ein unvollkommenes Ineinandergreifen des Zahnradsystems im magnetischen Mittel erkannt haben, wissen wir, dass eigentlich nichts durch den Draht hindurchgeht.

Wir wollen der Einfachheit halber annehmen, dass der Draht ein vollkommener Leiter ist. Das magnetische Räderwerk, das alles erfüllt und die magnetische Wirbelbewegung überall hin fortpflanzt, hört an seiner

Oberfläche auf und theilt ihm nichts mehr mit. Er ist, elektrisch betrachtet, nichts als eine willkürlich geformte Reihe von gleitenden Rädern, die das magnetische Feld durchschneidet und verändert. Bis an seine Oberfläche dringt die magnetische Wirbelbewegung vor; dort hört sie auf.

In wie fern befähigt dieser Umstand den Draht, Signale zu befördern? Das haben wir uns klar zu machen.

Man greife zurück auf Fig. 30 B und betrachte sie im Lichte der Fig. 39; diese aber fasse man nur als einen Schnitt auf, sodass der einzelne Pfeil auf Fig. 30 B dasselbe bedeutet wie je ein Zahnrad auf Fig. 39. Ferner denke man sich die Zahnstange auf Fig. 39 ganz fort oder ersetze sie durch einen vollständig glatten Stab, lasse jedoch die Räder auf irgend eine Art weiterrotiren, genau als wenn sich die Zahnstange noch vorwärts bewege. Alsdann haben wir an der Oberfläche des unbeweglichen oder nicht vorhandenen Stabes jene Gleitung, die wir jetzt als Strom anzusehen gelernt haben. Welche Rolle spielt nun der Stab oder der leere Raum, den er ausfüllt? Er gestattet dem Räderwerk auf beiden Seiten in entgegengesetzten Richtungen zu rotiren; wäre er nicht da, und liesse man die Zähne über den Raum weg in einander eingreifen, so würden sie sich sofort festklammern und die Bewegung würde aufhören.

Entfernen wir den langen Leiter, so bleibt nichts

als die gewöhnliche Rotation um die Kraftlinien, die mit der Entfernung rasch abnimmt; behalten wir ihn dagegen, so dient er den Wirbeln als Kern und verändert das Bild total. In einiger Entfernung vom Draht ist das Feld schwach; aber in seiner Nähe ist es stark; er ist in seiner ganzen Ausdehnung umgeben von einem intensiven magnetischen Feld, wie auf Fig. 30 B, das durch die Länge des Drahtes absolut nicht abgeschwächt wird.

Damit sich der Draht in dieser Weise verhält, muss er einen geschlossenen Kreis bilden und irgendwo mit einer motorischen Kraftquelle versehen sein, die ihn an dieser einen Stelle mit Wirbelkernen umgibt. Sind diese Bedingungen gegeben, so wandern die Wirbelkerne unaufhaltsam an ihm entlang, so lang er auch sein mag, und erzeugen am anderen Ende ihre Wirkungen.

Es ist nicht ganz leicht, ein Diagramm von diesem Vorgang zu entwerfen, weil es zahllose Räder bedingen würde, und diese das Abnehmen der Wirbelbewegung im Verhältnisse zur Entfernung nicht gut veranschaulichen.

Man denke sich jedoch das Diagramm wie folgt:

Die Zahnstange auf Fig. 39 soll ein unendlich kleines Bruchstück eines langen Stromkreises vorstellen, der bis nach New-York und zurück reicht. Sie kann nach Belieben glatt oder gezahnt sein; um den Gedanken an eine materielle Uebertragung zu vermeiden,

denke man sie sich besser glatt. Nun erzeuge man an einem Punkt vermittelst einer Batterie, Dynamomaschine oder anderen elektrischen Vorrichtungen bei einigen Rädern diejenige Bewegung, die eintreten würde, wenn die Zahnstange sich vorwärtsbewegte. Sofort verbreitet sich die Bewegung durch die Zahnräder über das ganze Dielektricum und zwar mit einer Geschwindigkeit, die wir vorläufig als unendlich betrachten wollen, die wir aber später als die Geschwindigkeit des Lichts erkennen werden. In einiger Entfernung vom Draht ist die Rotation schwach; in seiner unmittelbaren Nähe aber sind die entgegengesetzt rotirenden Zahnräder von einander getrennt und drehen sich daher sehr schnell. Mit ausserordentlicher Geschwindigkeit schießt die wirbelartige Bewegung dicht am Draht entlang; in seiner ganzen Ausdehnung ist er von Wirbelringen umgeben, wie auf Fig. 30 B, und indem man einen Theil dieses Wirbels an der entfernten Station auf einen kleinen Raum zusammendrängt, erzielt man eine sichtbare Wirkung oder ein Signal.

Dies ist der Zweck des Drahts; er giebt den Wirkungen, die das Dielektricum mittheilt, die Richtung. Er selbst überträgt nichts; die Isolirschicht ist es, welche die Energie vermittelt; aber er schreibt ihr die Bahn vor, indem er die entgegengesetzt rotirenden Zahnrad-systeme von einander trennt.

Soviel von einem vollkommen leitenden Draht. Ein gewöhnlicher Draht verhält sich genau ebenso, nur dass

die Räder an seiner Oberfläche nicht vollkommen frei gleiten können, sondern dass dabei gleichsam Reibung eintritt; dadurch geräth das in dem Draht enthaltene Zahnradsystem schichtenweise in Bewegung bis auf die Achse, die keine Störung erleidet. Die Uebertragung geschieht in derselben Weise wie bei einem vollkommenen Leiter, mit zwei Unterschieden. Erstens wird der Vorgang dadurch verzögert, dass die Räder in dem Metall erst in Gang kommen müssen, besonders wenn sie sehr massig sind, wie dies bei Eisen der Fall ist. Dieser erste Unterschied beruht darauf, dass der Leiter entweder sehr dick oder sehr magnetisch oder beides ist. Der zweite Unterschied besteht darin, dass die Reibung und Gleitung an der Oberfläche des unvollkommenen Leiters einen Theil der ursprünglich zugeführten Energie in Wärme umsetzt, dass er mithin weniger Energie überträgt als ein vollkommener Leiter. Man beachte jedoch, dass, obgleich der Draht die Energie ableitet, er sie keineswegs überträgt. Diejenige Energie, die auf ihn übergeht, ist verloren. Das Dielektricum allein überträgt sie mit Hülfe seines Zahnradgetriebes an entfernte Orte. (§§ 42—45.)

Wie wir später sehen werden, ist dieses Getriebe nicht starr, sondern elastisch, sodass die Uebertragung eine gewisse Zeit erfordert und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit endlich ist. Ja, ich kann sagen, wir haben uns schon davon überzeugt; wir haben ferner gesehen, dass einige Dielektrica weniger starr sind als

andere, z. B. Guttapercha weniger als Luft. (Siehe §§ 16 u. 23.) Diese übertragen daher die Störungen langsamer, aber stets, wie wir finden werden, nahezu mit Lichtgeschwindigkeit, soweit das Dielektricum allein in Betracht kommt. (§§ 133 u. ff.)

*Einwirkung einer mechanischen Kraft auf einen
strombefördernden Leiter*

108. Auf Fig. 41 sahen wir den leitenden Theil eines Stromkreises nebst den dazugehörigen entgegengesetzten Rotationen auf beiden Seiten. Auf diese superponire man eine Wirbelbewegung, die sich durchweg in einer Richtung vollzieht, sodass die Rotation auf der einen Seite verstärkt, auf der anderen abgeschwächt wird; mit anderen Worten: man führe den Strom in ein magnetisches Feld ein. Alsdann überwiegt die Centrifugalkraft der Wirbel auf der einen Seite und drängt alle beweglichen Theile des Leiters aus den stärkeren in die schwächeren Theile des Feldes. Oder wenn keine beweglichen Theile vorhanden sind, so wird der Stromkreis wenigstens danach streben sich auszudehnen, wenn die superponirte magnetische Wirbelbewegung mit der im Innern des Stromkreises bereits vorhandenen übereinstimmt; während er danach streben wird sich zu-

sammenzuziehen, wenn sie mit der ausserhalb vorhandenen gleichgerichtet ist.

Das durch einen Hin- und Rückstrom eingeschlossene Feld kann man in ähnlicher Weise darstellen, indem man die zu der einzelnen Leitung gehörigen Wirbel superponirt. (Siehe Fig. 40.) Auf diese Art entsteht zwischen den Drähten eine sehr starke Centrifugalkraft des Wirbels, während ausserhalb der Drähte fast gar keine Rotation stattfindet. Die Drähte werden also auseinandergedrängt; und darum strebt ein Stromkreis stets danach, einen möglichst grossen Raum einzuschliessen, sogar wenn kein anderes magnetisches Feld auf ihn einwirkt, als sein eigenes. Der auf Fig. 41 dargestellte Stromkreis z. B. strebt sich auszudehnen, auch ohne der Einwirkung eines magnetischen Feldes unterworfen zu sein, einfach weil die Wirbelbewegung inwendig stärker concentrirt und daher intensiver ist als aussen.

Wenn man ferner zwei Stromkreise mit entgegengesetzter Stromrichtung nebeneinander in dieselbe Ebene bringt, so hebt der eine die Einwirkung des anderen auf den zwischen ihnen liegenden Raum mehr oder weniger auf; sodass, wenn sie gleich stark sind, an dieser Stelle keine Wirbelbewegung stattfindet. Infolgedessen überwiegt die Centrifugalkraft auf der anderen Seite und drängt die Leiter zusammen; mit anderen Worten, gleichgerichtete Ströme ziehen einander an. Fig. 44.

109. Die Wirkung, welche die Einführung von

Eisen in den Stromkreis hervorruft, besteht nun darin, dass es in den Raum, den es ausfüllt, 100 bis 1000 mal soviel Wirbellinien hineinbringt, als zuvor darin waren, und dadurch begreiflicherweise sämtliche Wirkungen gewaltig steigert, sowohl die mechanischen Kraftäusserungen wie die Aeusserungen des Beharrungsvermögens.

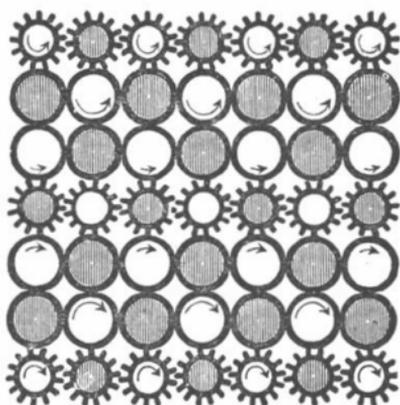


Fig. 44. — Zwei parallele Leiter, die gleich starke Ströme in der gleichen Richtung befördern, werden durch die Centrifugalkraft der äusseren Wirbel zusammengedrängt, da zwischen ihnen die Rotation aufgehoben ist. Die Länge der Pfeile bezeichnet wieder die Vertheilung des Magnetismus in den Leitern. Fig. 40 zeigt die entsprechende Abstoßung zwischen entgegengesetzten Strömen.

Wenn ich sage, was ungefähr zutrifft, dass Eisen 1000 neue Linien in das Feld einführt, so bedeutet dies, dass auf einen einzigen anderweitig im Felde erregten Wirbel, im Eisen 1000 Wirbel eine übereinstimmende Richtung erhalten. Dieser Vorgang dauert fort, während das Feld zunimmt, bis fast alle im Eisen enthaltenen Wirbel in Anspruch genommen sind; ist

dieser Punkt erreicht, so nimmt das Verhältniss der Zunahme ab und man sagt, dass das Eisen Spuren von Sättigung zeigt. Käme es je dahin, dass sämtliche Wirbel übereinstimmend gerichtet wären, so würde es vollständig gesättigt sein. Allein lange ehe dieser Zustand eintritt, macht sich eine andere Wirkung geltend, nämlich die Abschwächung der bereits gerichteten Wirbel durch die Einwirkung der starken magnetischen Induktion, welche die ganze Zeit bestrebt ist, die Molekularströme im Eisen nach Möglichkeit herabzumindern. Und so wäre der durch das Experiment bisher noch unerreichte Fall denkbar, dass das Eisen nicht nur aufhörte, das Feld zu verstärken, sondern sogar anfinge, es abzuschwächen; dass heisst seine Permeabilität könnte auf weniger als 1 heruntergehen, als wenn es eine diamagnetische Substanz wäre. (Vergl. § 81.)

Die einfachste Vorstellung von der Wirksamkeit des Eisens erhält man, wenn man sich seine Räder 100 bis 1000 mal massiger denkt als die der Luft, sodass ihr Beharrungsvermögen und ihre lebendige Kraft sehr gross sind. (Vergl. § 97.)

Dasjenige, was man gewöhnlich als magnetische Permeabilität bezeichnet und durch den Buchstaben μ ausdrückt (§ 82), kann in der That als eine Art Beharrungsvermögen aufgefasst werden; ein Beharrungsvermögen bezogen auf die Volumeneinheit; mit anderen Worten eine *Dichtigkeit* des Aethers; obschon man

nicht recht einsieht, wie es zugeht, dass der Aether im Innern von Eisen mit einem besonders grossen Beharrungsvermögen ausgestattet sein sollte. Möglich, dass sich die Eisenatome mit der Elektrizität drehen (§ 94); möglich auch, dass der Grund ein ganz anderer ist. Worauf aber immer das eigenthümliche Verhalten von Eisen, Nickel u. s. w. zurückzuführen ist, seine Ursache wird von tiefgehendster Bedeutung sein, sobald wir durch eine nähere Kenntniss von dem molekularen Bau dieser Stoffe in die Lage versetzt sein werden, sie zu verstehen.

Induktion in Leitern, die keinen eigenen Strom befördern, sondern sich in einem magnetischen Felde bewegen

110. Das Entstehen inducirter Ströme in einem Leiter, der sich durch ein gleichförmiges magnetisches Feld bewegt, ist nicht ganz leicht zu erklären, weil keines der Diagramme sich dazu eignet, Stromkreise von wechselnder Gestalt und Grösse zu veranschaulichen.

Bringt man einen starren Leiter in ein magnetisches Feld, wie auf Fig. 45, und dreht ihn um 180^0 aus seiner Ebene, so liegt auf der Hand, dass ein Strom darin erregt werden wird; denn der Vorgang ist im Wesentlichen derselbe, als ob der Leiter fest bliebe und das Feld umgekehrt würde.

Es wird jedoch in einem geschlossenen Leitungskreis auch dann ein Strom erzeugt, wenn man nur ein einzelnes Leitstück bewegt, und dieses die Kraftlinien in der Weise schneidet, dass die Zahl der Kraftlinien im Stromkreis vergrössert wird. Dieser Strom entsteht dadurch, dass die inneren Wirbel sich ausdehnen, den Leiter wegzudrängen suchen und dabei Arbeit leisten,

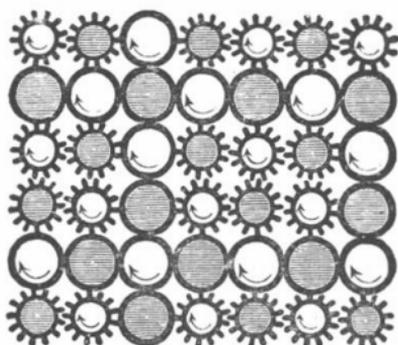


Fig. 45. — Querschnitt eines gleichförmigen magnetischen Feldes, mit zwei Schienen und einem verschiebbaren Verbindungsstück. Wenn das Verbindungsstück hin- und hergeschoben wird, werden die inneren Räder abwechselnd comprimirt und ausgedehnt. Dementsprechend gewinnen oder verlieren sie Energie und es entsteht jene Gleitung, die wir als inducirten Strom kennen gelernt haben.

während die äusseren Wirbel dieser Bewegung widerstreben, dadurch comprimirt werden und Energie aufspeichern. Die inneren Räder drehen sich daher etwas langsamer, weil sich der Stromkreis ausdehnt, während die Räder auf der anderen Seite des verschiebbaren Verbindungsstücks etwas schneller rotiren. Beide Vorgänge veranlassen das Räderwerk zu gleiten und zwar erst rings um die Innenseite und dann durch die ganze

Materie des Drahts, wodurch sich die positive Elektrizität in der einen, die negative in der anderen Richtung um den Kreis vorwärtsbewegt. Auf diese Weise kann man sich die Entstehung des Stroms erklären. Man darf sich jedoch nicht vorstellen, dass eine endliche Erweiterung der Räder eintritt. Die Diffusion durch den Draht gleicht den Unterschied der Bewegung rasch aus, und neue Räder kommen um den Draht herum in den Kreis hinein; sobald daher der Leiter aufhört, sich zu bewegen, wird das Feld wieder constant; nur befinden sich jetzt viel mehr Räder innerhalb des Rahmens als zuvor.

Darstellung eines elektrostatischen Feldes und Superponierung auf ein senkrechtes magnetisches Feld

III. Eine elektrostatische Spannung wird bekanntlich verursacht durch gleich grosse entgegengesetzte Verrückungen der positiven und der negativen Elektrizität längs der Kraftlinien. Fig. 7 A lieferte ein rohes Bild dieses Vorganges; nunmehr können wir ihn mit Hülfe unserer elastischen Zellen genauer darstellen. (Fig. 46.)

Hier sind die positiven Zellen in der einen, die negativen in der anderen Richtung verschoben. Wird die verrückende Kraft entfernt, so strebt das Mittel danach, in die Ruhelage zurückzuschnellen, und übt da-

bei einem Zug in der Richtung seiner Kraftlinien (der Richtung, in der es zuvor ausgedehnt wurde) und einen Druck in senkrechter Richtung zu ihnen (der Richtung, in der es sich dabei zusammenzog) aus.

Wenn nun sämtliche Zellen mit parallelen Wirbeln erfüllt sind, wie bei dem Diagramm vorausgesetzt wurde, so ist es nicht unwahrscheinlich, dass diese elektrostatische Verrückung oder „abscheerende Wirkung“ des Mittels einen gewissen Einfluss auf seine magnetischen Eigenschaften ausübt und dass, wenn die elektrostatische Spannung rasch umgekehrt wird, schwache magnetische Oscillationen auftreten werden; doch lassen sich diese Wechselwirkungen vorläufig noch nicht ins Einzelne verfolgen.

Disruptive Entladung

112. Die disruptive Entladung kann man sich in der Weise vorstellen, dass die schraffirten Zellen gewaltsam an einander vorbeigerissen werden, wobei das Mittel eine wirkliche Zerreissung, eine Art Elektrolyse, erleidet und die beiden Elektricitäten in entgegengesetzten Richtungen auf der Entladungsbahn an einander vorbeiwandern.

Man vergegenwärtige sich die Bewegung einer horizontalen Reihe schraffirter Zellen, wie auf Fig. 46, während eine solche Zerreissung des Mittels stattfindet.

Die Zellen gleiten nach rechts und hemmen im Gleiten die Rotation der oberen Reihe negativer Zellen, während die der unteren beschleunigt wird. Infolgedessen entsteht eine richtige magnetische Wirkung, genau wie diejenige, die einen Strom begleitet. Eine disruptive Entladung besitzt also sämtliche Eigenschaften eines Stroms.

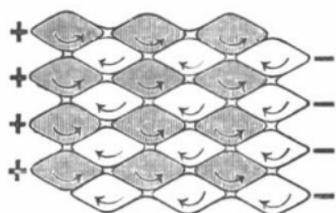


Fig. 46. — Theil eines elektrostativen Feldes zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Körpern mit Kraftlinien in der Richtung von rechts nach links. Die Elasticität der Zellen (vielleicht zurückführbar auf das Rotiren einer Flüssigkeit in ihrem Innern, siehe § 156) veranlasst einen Zug längs und einen Druck senkrecht zur Richtung der Kraftlinien. Zugleich zeigt der Querschnitt magnetische Kraftlinien in senkrechter Richtung zum Bilde. Während dieses magnetische Feld erregt und von unten nach oben fortgepflanzt wurde, musste in den elastischen Zellen eine schwache Spannung entstehen, ähnlich wie die oben abgebildete, nur unendlich viel geringer im Verhältniss zu ihrem Normalzustand (Fig. 37). Umgekehrt wurden, während diese elektrostativ Spannung entstand, die positiven Wirbel etwas beschleunigt und die negativen gehemmt, wodurch eine sehr schwache magnetische Wirkung hervorgebracht wird. Wenn das Mittel nicht magnetisirt ist, fallen die Wirbel deshalb nicht fort, sie sind nur nicht übereinstimmend gerichtet.

Wirkungen einer fortbewegten Ladung

113. Diese Bewegung einer Reihe positiver oder negativer Zellen ist nahe verwandt mit der Fortbewegung einer Ladung durch ein dielektrisches Mittel.

Wenn ein geladener Körper mit grosser Geschwindigkeit vorwärtsbewegt wird, so versetzt er die ihm

zunächst liegenden Zellen in eine stärkere Rotation als die entfernteren und erzeugt auf diese Weise die einem magnetischen Felde eigenthümliche Wirbelbewegung. Mithin verhält sich eine fortbewegte Ladung genau wie ein Strom von einer gewissen Stärke.

Es mag sogar sein, dass dies die gewöhnliche Art ist, wie ein galvanischer Strom erregt wird; denn die chemischen Kräfte in einer Säule veranlassen die geladenen Atome, sich fortzubewegen, und erzeugen dadurch ein Feld, das, in der von Herrn Poynting geschilderten Weise sich ausbreitend (§ 42), in sämmtliche Theile des metallischen Stromkreises vordringt und darin den Strom erregt.

Elektrostatische Wirkungen eines beweglichen oder veränderlichen magnetischen Feldes

114. Ebenso wie ein bewegliches oder veränderliches elektrostatisches Feld schwache magnetische Wirkungen hervorbringen kann, so erzeugt auch ein bewegliches oder veränderliches magnetisches Feld eine Art elektrostatischer Spannung.

Denn ein zunehmendes Feld überträgt fortwährend die Rotation von einer Räderschicht auf die andere. Wenn die Räder gleiten, erhält man inducirte Ströme (Fig. 43); die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist verhältnismässig gering, da der Vorgang mehr als eine Art von

Diffusion gedacht werden kann. Aber selbst wenn die Räder nicht gleiten, ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht unendlich, es sei denn, dass das Räderwerk vollkommen starr ist. In Wirklichkeit ist sie sehr gross, woraus hervorgeht, dass die Starrheit oder Elasticität der Räder im Verhältnis zu ihrer Trägheit sehr bedeutend ist, aber sie ist nicht unendlich. Die Ausbreitung der Rotation ist daher von einer vorübergehenden Spannung begleitet. Ein Theil des Feldes ist bereits von der Wirbelbewegung erfasst, während ein entfernterer Theil noch ruht; zwischen beiden entsteht eine Spannung, dass heisst das Räderwerk verschiebt sich etwas, während es in Bewegung versetzt wird. Auf diese Weise verursacht ein zunehmendes magnetisches Feld eine vorübergehende schwache elektrostatische Spannung im rechten Winkel zu der Richtung seiner Kraftlinien und zu der Richtung, in der es fortschreitet.

Erzeugung eines magnetischen Feldes. Induktion in geschlossenen Stromkreisen

115. Man denke sich ein unmagnetisiertes Stück Eisen; seine Wirbel sind sämmtlich vorhanden, aber sie sind in kleine geschlossene Kreise festgelegt und daher nicht äusserlich wirksam; magnetisirt man das Eisen, so erschliessen und erweitern sich einige dieser

Kreise, sodass ein Theil ihrer Bahn durch die Luft geht. Magnetisirt man es stärker, so erschliesst sich ein ganzes System von Kreisen zu Wirbelkernen, die, von Wirbeln umgeben, die gewöhnlichen magnetischen Kraftlinien bilden. Man braucht sich nicht einmal Eisen oder Stahl zu denken; auch in der Luft oder in jeder beliebigen anderen Substanz sind die Wirbel vorhanden, wenn auch viel schwächer und weniger zahlreich, und ihre Achsen bilden gewöhnlich kleine

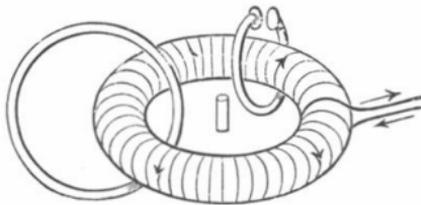


Fig. 47. — Geschlossener magnetischer Stromkreis, wie auf Fig. 42 mit einem geschlossenen und einem offenen sekundären Kreis; sowie mit einem in der Mitte aufgestellten, kurzen, stabförmigen Leiter.

geschlossene Kreise, vielleicht sogar innerhalb der einzelnen Atome. Man braucht nur einen strombefördernden Draht um sie zu wickeln, so erschliessen sie sich sofort zu den einem Stromkreis eigenthümlichen Kraftlinien.

Nun denke man sich wieder einen eisernen Ring oder ein kranzförmiges Drahtbündel, umwickle es mehrfach mit Kupferdraht (Fig. 47) wie eine Abtheilung eines Gramme'schen Ringes und sende einen Strom hindurch. Sofort erschliessen sich die im Eisen festgelegten Wirbel, schiessen hervor, durchmessen den

von dem Ring eingeschlossenen Luftraum (natürlich ohne sich auf eine Ebene zu beschränken) und treten auf der entgegengesetzten Seite wieder in den Ring ein; sodass, sobald der Strom constant geworden ist, sämtliche Kraftlinien wieder im Innern des Eisens festgelegt sind, mit dem Unterschiede, dass sie jetzt einen Raum von der Grösse des Ringes umschliessen, statt unendlich kleine Ringe zu bilden. In gewissem Sinne ist also das Eisen noch immer unmagnetisirt, denn seine Kraftlinien bilden geschlossene Kurven in seinem Innern und ragen nirgends in die Luft hinaus. In einem anderen Sinne hingegen ist es so stark und nachhaltig in sich selbst magnetisirt, dass der Magnetismus nicht leicht wieder daraus vertrieben werden kann, ausser durch zweckmässige Anwendung umgekehrter Ströme.

Es bildet sich nunmehr ein einziger grosser elektrischer Wirbelring statt einer ungeordneten Anhäufung mikroskopischer Kreise. Sein Querschnitt ist auf Fig. 42 abgebildet. (Siehe auch Anhang [d] und [n].)

Während der veränderlichen Periode, das heisst während der Strom zunimmt oder umgekehrt wird, ist der von dem Ring eingeschlossene Raum sowie seine ganze Umgebung erfüllt von Myriaden sich erschliessender Kraftlinien, die im rechten Winkel zu ihrer Richtung von einer Seite des Eisens nach der anderen herüberschiessen und dort aufhören. Diese sich bewegenden Kraftlinien, die als kleine Wirbelringe nur

einen „einfach zusammenhängenden“ Flächenraum im Eisen einschlossen, nun aber in den „zweifach zusammenhängenden“ Raum des ganzen Eisenringes übergehen, oder umgekehrt, erzeugen gerade während dieses Ueberganges die starken inducirten Ströme in „sekundären Generatoren“.

In der That haben wir bei jeder Veränderung eines magnetischen Feldes überhaupt Kraftlinien, die sich senkrecht zu ihrer Richtung bewegen, ihre Wirbelbewegung ausbreiten und das Mittel, durch das sie sich bewegen, mehr oder weniger stören.

Sodann betrachte man einen sich fortbewegenden oder rotirenden Magneten. Seine Linien wandern mit ihm zusammen und da sie geschlossene Kurven bilden, müssen sie sich, wie oben, senkrecht zu ihrer Richtung durch das Feld bewegen, sodass auch hier genau dieselbe Wirkung eintreten wird, wie bei einem veränderlichen magnetischen Feld.

Wenn eine senkrecht zu ihrer Richtung sich fortbewegende Kraftlinie einen Leiter schneidet, so hemmt dies ihre Bewegung, denn ihre Räder gleiten an ihm und können nur allmählich den Wirbel in das Innere des mit gleitendem Räderwerk erfüllten Leiters übertragen; dabei entsteht, wie wir wissen, ein inducirter Strom. (Siehe § 103.)

Verschlingt man einen leitenden Ring mit dem oben geschilderten Eisenring, ähnlich wie ein Karabinerhaken mit einer Oese verschlungen wird, so muss

jeder Wirbel, der sich erschliesst, während der Ring magnetisirt wird, den leitenden Ring einmal schneiden, einerlei von welcher Gestalt und Grösse er ist. Die elektromotorische Kraft der Induktion ist daher in diesem Falle vollkommen definirt; sie ist einfach proportional der Zahl von Windungen, mit denen der sekundäre Leiter den Kern des Ringes umgiebt. (Fig. 47.)

Statt des geschlossenen sekundären Leiters denke man sich einen offenen: alsdann befindet sich noch immer eine elektromotorische Kraft darin, aber eine etwas schwächere, weil einige der sich erschliessenden Kraftlinien durch die Lücke hinausschiessen und keine Wirkung hervorbringen. Die Elektrizität muss also, während der Ring magnetisirt und entmagnetirt wird, hin und her wallen, wie Wasser in einem auf und abschwankenden Trog und ein kleiner, mit den beiden freien Enden verbundener Kondensator wird abwechselnd geladen und entladen werden. Man könnte sich die Lücke so gross denken, dass nichts übrig bliebe, als ein kurzer Stab (Fig. 47); auch in diesem würden ähnliche elektrische Oscillationen auftreten.

Nun aber denke man sich überhaupt keinen sekundären Ring, sondern nur das von dem Ring eingeschlossene Dielektricum. In diesem muss jedesmal eine elektrische Verrückung stattfinden, wenn der Magnetismus umgekehrt wird. Sie kann oscillatorisch sein, aber sie wird sich im Ganzen in einer Richtung vollziehen, während der Magnetismus zunimmt,

und in der entgegengesetzten Richtung, während er abnimmt. An einem geladenen, in der Mitte des Ringes frei aufgehängten Körper kann die Einwirkung dieser magnetisch hervorgerufenen, ausserordentlich schwachen elektrostatischen Spannung wahrgenommen werden.¹⁾

116. Um uns klar zu machen, auf welche *Art* eine elektrostatische Verrückung in dem von dem Ringe eingeschlossenen Raum entsteht, brauchen wir nur einen Blick auf Fig. 42 zu werfen und die Reihe von Rädern auf der Linie AB zu betrachten, welche die beiden Hälften des Querschnitts von einander trennt. Diese Räder können nicht konstant in derselben Richtung rotiren, weil sie von beiden Seiten in entgegengesetzten Richtungen mitgenommen werden; mit anderen Worten, in der Nähe eines solchen Ringes giebt es, wie wir wissen, kein magnetisches Feld; nichtsdestoweniger aber wird bei Veränderungen des Magnetismus, wenn die Geschwindigkeit der inneren Wirbel wechselt, die Reibung am Dielektricum, die nöthig ist, um die äusseren Räder des Leiters aufzuhalten, entweder vermehrt oder vermindert. Da nun, wie wir gesehen haben (§ III), die Räder eine gewisse Elasticität besitzen, so wird durch dieselbe während der veränderlichen Stadien des Magnetismus die elektrostatische Spannung im Felde verändert.

¹⁾ Ueber den experimentellen Nachweis dieser Wirkungen siehe Phil. Mag. Juni 1889.