



Der Graetz für Alle

Graetz, Leo

Stuttgart, 1929

Zweites Kapitel. Die Magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes
und ihre Anwendungen.

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83225](#)

ZWEITES KAPITEL

DIE MAGNETISCHEN WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES UND IHRE ANWENDUNGEN

Was einen elektrischen Strom in einem Leiter so wesentlich unterscheidet von einem Strom gewöhnlicher Flüssigkeit, das ist die Eigenschaft, von der die erste Kunde durch Oerstedts Entdeckung der Ablenkung der Magnetnadel (oben S. 3) gewonnen wurde, die Eigenschaft, daß ein elektrischer Strom in seiner Nähe, *in seiner Umgebung* gewisse merkwürdige, und zwar magnetische, Wirkungen hervorbringt. Ein elektrischer Strom hat also nicht bloß Wirkungen in den Leitern, die er durchfließt, sondern auch Wirkungen in der Umgebung dieser Leiter. Solche Wirkungen besitzt ein Strom gewöhnlicher Flüssigkeit durchaus nicht, und das ist eine Tatsache, die den elektrischen Strom wesentlich von einem Wasserstrom unterscheidet. Seit nun Oerstedt die Ablenkung einer Magnetnadel als erste magnetische Wirkung eines elektrischen Stromes beobachtet hatte, hat sich die Reihe der magnetischen Wirkungen elektrischer Ströme außerordentlich erweitert. Die Oerstedtsche Beobachtung ist nur eine ganz spezielle aus einer großen, allgemeinen Klasse von Beziehungen zwischen dem galvanischen Strom und Magneten, die allmählich aufgedeckt wurden und die man unter dem Namen „*Elektromagnetismus*“ zusammenfaßt.

Der elektrische Strom ist zunächst imstande, Magnete überhaupt zu erzeugen, unmagnetisches Eisen magnetisch zu machen.

Wenn man nämlich einen elektrischen Strom spiralförmig um einen unmagnetischen Stab weichen Eisens herumführt, so wird der Eisenstab magnetisch. Um den Versuch zweckmäßig auszuführen, umwickelt man einen Hohlzylinder von Holz mit einer Reihe von Windungen aus übersponnenem Draht, wie **Fig. 31** bei C zeigt. Die Enden dieser Drahtwindungen werden mit den Polen einer galvanischen Kette verbunden. Es fließt also der Strom um diesen Zylinder in lauter spiralförmigen Windungen. Man nennt einen solchen mit Draht umwickelten Zylinder eine *Magnetisierungsspule*. Wenn man nun in die Höhlung des Zylinders einen Stab A B aus unmagnetischem Eisen hineinbringt, so wird der Stab außerordentlich kräftig magnetisch, das eine Ende des Stabes wird ein Nordpol, das andere ein Südpol. Man erkennt das daran, daß an dem Stab jetzt z. B. ein Schlüsselbund oder eiserne Nägel kräftig haften bleiben. Sowie man den Strom unterbricht, hört der Magnetismus in dem weichen Eisen auf, das Schlüsselbund fällt wieder ab. Der Stab ist also nur durch die Wirkung des Stromes magnetisch geworden. Man nennt daher auch einen solchen Magneten, der durch den elektrischen Strom erst magnetisch wird, einen *Elektromagneten*.

ZWEITES KAPITEL

Jeder Magnetstab hat einen Nordpol und einen Südpol; es fragt sich also, welches Ende des Stabes A B wird hier ein Nordpol, welches ein Südpol? Die Beantwortung dieser Frage wird durch dieselbe *Ampèresche Schwimmerregel* gegeben, die wir schon oben angeführt haben:

Denkt man sich in dem Draht der Magnetisierungsspule in der Richtung des Stromes schwimmend, so daß man mit dem Gesicht dem Eisenstab zugewendet ist, so wird immer dasjenige Ende des Stabes ein Nordpol, welches zur linken Hand liegt. Es wird also bei einer bestimmten Richtung des Stromes das eine Ende des Stabes ein Nordpol, das andere ein Südpol. Kehrt man durch einen Kommutator die Richtung des Stromes in der Magnetisierungsspule um, so wird auch der Magnetismus in A B umgekehrt; dasjenige Ende, das vorher ein Nordpol war, wird jetzt ein Südpol und umgekehrt.

Viel kräftigere Elektromagnete erhält man, wenn man nicht einen geraden Eisenstab, sondern hufeisenartig geformtes Eisen mit Drahtwindungen umwickelt und den Strom herumsendet. In Fig. 32 ist eine oft benutzte Anordnung gezeichnet, welche zur Hervorbringung sehr starker *Elektromagnete* dient. Zwei dicke Zylinder aus weichem Eisen stehen auf einem festen Tisch, auf welchem sie durch eine Querplatte von Eisen unten verbunden sind, so daß eine Art Hufeisen gebildet wird. Um jeden von den Eisenzyllindern sind drei Magnetisierungsspulen $a^1 a^2 a^3$ und $b^1 b^2 b^3$ geschoben, durch welche der Strom hindurchgesendet werden kann. Die Spulen $a^1 a^2 a^3$ und $b^1 b^2 b^3$ werden nun so miteinander verbunden, daß der Strom in allen nach derselben Richtung fließt. Dann werden die beiden herausragenden Enden des Eisenzyllinders entgegengesetzt magnetisch, der eine ein Nordpol, der andere ein Südpol.

Aus der Ampèreschen Schwimmerregel folgt, daß, wie es in Fig. 33 gezeichnet ist, der Strom um einen Südpol, von oben gesehen, in der Richtung fließt, wie der Zeiger einer Uhr sich bewegt, um einen Nordpol entgegengesetzt dem Zeiger einer Uhr.

Sowie der Strom unterbrochen wird, hört der Magnetismus des Eisens

Fig. 31

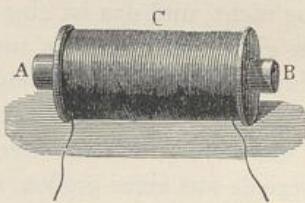
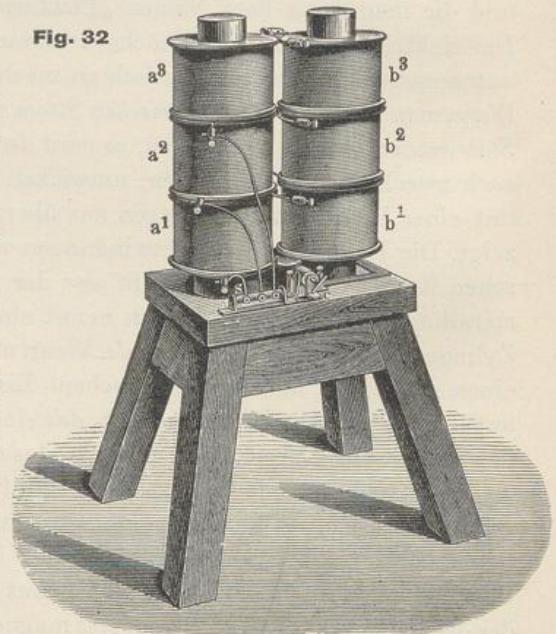


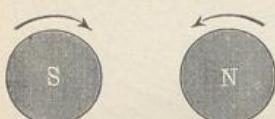
Fig. 32



DIE MAGNETISCHEN WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES

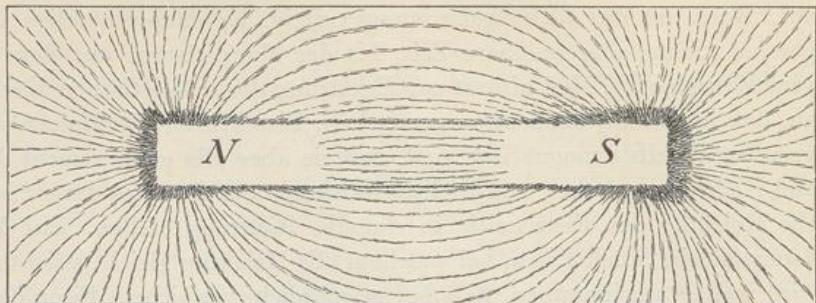
auf. Doch ist das nicht ganz streng richtig. Es dauert nämlich immer eine gewisse kleine, aber meßbare Zeit, bis der Magnetismus aus dem Eisenkern verschwunden ist. Man nimmt zur Erklärung der magnetischen Erscheinungen an, daß in jedem, auch unmagnetischen, Eisenstücke die Moleküle stets von vornherein selbst magnetisch sind, daß sie aber alle ganz verschiedene Lagen und Richtungen haben und daß die Wirkung des Stromes darauf beruht, daß alle Moleküle des Eisens sich in dieselbe Richtung stellen. Ein Magnet ist demnach ein Stück Eisen, bei welchem alle Moleküle gleich gerichtet sind. Es wird weiter angenommen, daß bei gewöhnlichem weichem Eisen die Moleküle sich nahezu ohne weiteres in ihre neuen Lagen einstellen, daß dagegen beim Stahl es nicht leicht ist, diese Richtungsänderung hervorzubringen. Die Stahlmoleküle hängen so fest miteinander zusammen, daß jeder Richtungsänderung eine erhebliche Kraft entgegenwirkt, die man *Koerzitivkraft* nennt. Bei dem weichen Eisen dagegen ist die Koerzitivkraft sehr gering, fast verschwindend. Aber ganz ohne Koerzitivkraft ist selbst weiches Eisen nicht. Daher wird auch dieses nicht sofort in voller Stärke magnetisch, wenn der magnetisierende Strom geschlossen wird, sondern die volle Stärke entwickelt sich erst in einiger Zeit, die allerdings nur ein kleiner Bruchteil einer Sekunde ist. Ebenso wird auch weiches Eisen nicht sofort nach dem Aufhören des magnetisierenden Stromes ganz unmagnetisch, sondern es verliert seinen Magnetismus erst allmählich, wenn auch in sehr kurzer Zeit. Daraus folgt eine bemerkenswerte Tatsache. Wenn man den Strom, der um einen Eisenstab spiralförmig herumgeführt ist, allmählich verstärkt, so wird das Eisen entsprechend immer stärker magnetisch, und wenn man den Strom dann allmählich wieder abnehmen läßt, so wird es wieder schwächer magnetisch. Aber, und das ist das Neue, auf dem Hinweg, bei aufsteigendem (stärker werdendem) Strom, ist bei gleicher magnetisierender Stromstärke der erzeugte Magnetismus kleiner als auf dem Rückweg, bei absteigendem Strom. Es kommt das eben daher, daß bei aufsteigendem Strom sich die Koerzitivkraft der Magnetisierung entgegenstellt, bei absteigendem, schwächer werdendem Strom aber der Entmagnetisierung. Diese Erscheinung nennt man *Hysteresis* des Eisens (von ὑστερεῖν, hysterein, nachbleiben). Sie tritt bei vielen Anwendungen von Elektromagneten störend auf, und man muß mit dieser Eigenschaft selbst des weichsten Eisens in manchen Fällen rechnen. Man kann sich den Vorgang so vorstellen, als ob die Moleküle des Eisens bei ihrer Drehung, bei ihrer Richtungsänderung sich aneinander reiben und dadurch verhindert werden, der einwirkenden Kraft sofort zu folgen. Bei jeder Reibung aber, bei jedem Überwinden eines Widerstandes wird *Wärme* entwickelt. Es muß daher auch in weichem Eisen durch das Magnetisieren und Entmagnetisieren Wärme entwickelt werden. In der Tat, wenn, wie dies bei elektrischen Maschinen meistenteils geschieht, der magnetisierende Strom sehr rasch hintereinander verstärkt und dann wieder geschwächt wird, so daß der Magnetismus des Elektromagnets sich fort-

Fig. 33



ZWEITES KAPITEL

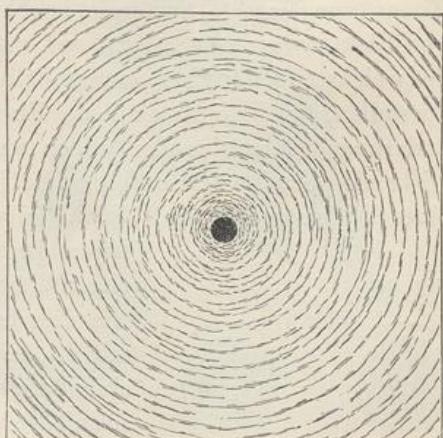
Fig. 34



während rasch hintereinander ändert, so wird infolge der Hysteresis jedesmal eine kleine Wärmemenge erzeugt, und diese kleinen Mengen summieren sich alle, so daß schließlich die Temperatur des Eisens ganz erheblich gesteigert wird, daß das Eisen sich sehr stark erhitzt. Es ist dies ein Übelstand, der bei den elektrischen Maschinen sehr störend auftritt und durch besondere Anordnungen beseitigt werden muß.

Die Tatsache, daß ein Strom magnetisierend auf weiches Eisen wirkt, zwingt notwendig zu der Annahme, daß ein Strom in seiner Umgebung magnetische Kräfte besitzt. Dies kann man auch beweisen. Faraday hat nämlich eine sehr hübsche und einfache Methode angegeben, durch welche man die magnetischen Kräfte, die in der Umgebung eines Magneten — welche man sein *magnetisches Feld* nennt — vorhanden sind, und ihre Richtung gewissermaßen augenfällig sichtbar machen kann. Wenn man nämlich einen Magneten, z. B. einen Magnetstab, auf den Tisch legt, über ihn ein Blatt Papier bringt und nun auf dieses Eisenteilspäne streut, so ordnen sich diese Späne (wenn man das Papier, um die Reibung zu beseitigen, etwas klopft) in bestimmten geraden oder krummen Linien an, die man *magnetische Kraftlinien* nennt. Fig. 34 stellt die so erhaltene Figur bei einem Magnetstab dar. Die Eisenteilspäne werden nämlich durch die Wirkung des Magnetstabes selbst zu kleinen Magneten und ziehen sich gegenseitig an und ordnen sich so, daß sie sich immer in die Richtung der von dem Magneten ausgehenden magnetischen Kräfte einstellen. Man sieht in dieser Figur, daß von beiden Polen aus die Kraftlinien austreten und daß sie sich in mehr oder minder großem Bogen von dem einen Pol zum andern hinziehen. Man ist übereingekommen, als Richtung der Kraftlinien immer diejenige zu nehmen, die vom Nordpol ausgeht und von außen in den Südpol hineingeht. Mit einem Blick übersieht man so die Richtung der Kraftlinien an

Fig. 35



DIE MAGNETISCHEN WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES

jeder Stelle in der Nähe der Magneten, und aus der Dichtigkeit, mit der die Eisenfeilspäne sich an den verschiedenen Stellen anhäufen, kann man auch auf die Größe der magnetischen Kraft an diesen Stellen schließen. Je dichter die Kraftlinien beieinander liegen, umso größer ist die magnetische Kraft.

Diese Faradaysche Methode kann man nun aber auch anwenden, um zu sehen, ob ein *Strom* in seiner Umgebung magnetische Kräfte besitzt, und zu erfahren, welche Richtung in diesem Falle die magnetischen Kräfte haben. Zu dem Zweck steckt man einen geraden Draht, durch welchen man einen starken Strom sendet, senkrecht durch ein Papierblatt hindurch und streut nun Eisen-

feilspäne auf das Papierblatt. Es ordnen sich dann diese Späne so an, wie es **Fig. 35** zeigt. Sie schließen sich nämlich zu Kreisen um den stromführenden Draht herum (dessen Durchstoßungspunkt mit dem Blatt schwarz gezeichnet ist) zusammen. Das beweist uns also, daß die Kraftlinien, die in der Nähe eines geradlinigen Stromes vorhanden sind, Kreise um diesen Strom herum sind. Nimmt man nun nicht einen geradlinigen Strom, sondern einen gebogenen Stromdraht, eine sogenannte *Stromschleife*, wie in **Fig. 36**, und sendet durch sie (etwa von dem gezeichneten Element Z C her) einen Strom, so haben um jeden Teil des Drahtes herum die Kraftlinien die Richtung der kleinen Pfeile, sind also überall senkrecht zum Strom, und diese setzen sich so zusammen, wie es die großen Pfeile zeigen, d. h. die Kraftlinien gehen durch die Ebene der Stromschleife im allgemeinen senkrecht hindurch.

Nehmen wir daher weiter eine Drahtspule, wie **Fig. 37**, so gehen aus demselben Grunde die Kraftlinien im wesentlichen parallel der Achse der Spirale hindurch. Eine solche stromdurchflossene Drahtspule nennt man auch ein *Solenoid*.

Fig. 36

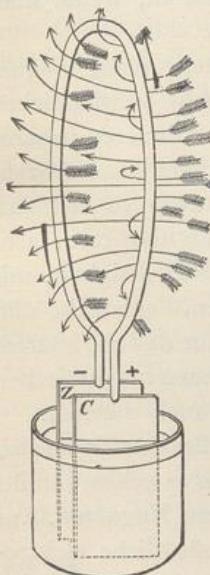
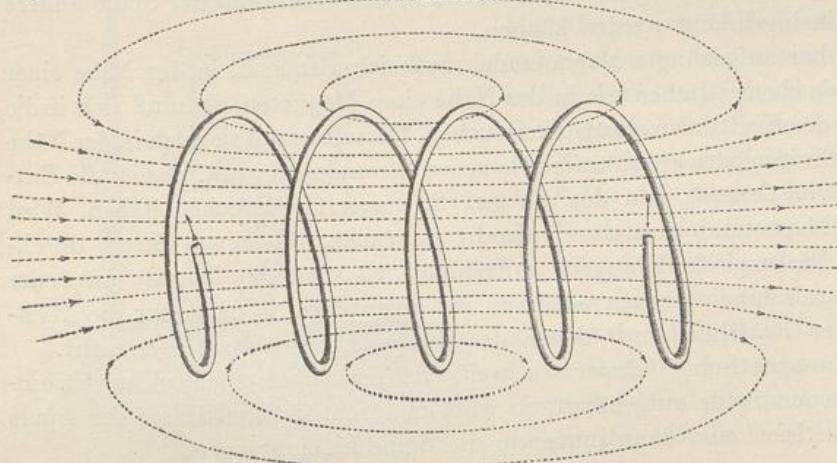


Fig. 37



ZWEITES KAPITEL

Je mehr Windungen die Spule pro 1 cm Länge hat und je stärker der Strom ist, der durch sie fließt, umso größer ist die *magnetische Kraft* im Inneren derselben. Statt des Wortes *magnetische Kraft* gebraucht man auch das ganz gleichbedeutende Wort *Feldstärke*. Die Feldstärke im Inneren eines Solenoids ist also proportional dem Produkt aus der Stromstärke und der Zahl der Windungen und umgekehrt proportional der Länge der Spule. Drückt man die Stromstärke in Ampere aus, so bezeichnet man das Produkt aus der Zahl der Windungen des Solenoids und der Stromstärke als die *Zahl der Amperewindungen* und kann also sagen, die Feldstärke im Inneren eines Solenoids ist umso größer, je größer die Zahl der Amperewindungen und je kürzer das Solenoid ist. Man erhält die Größe der Feldstärke selbst in den gebräuchlichen Einheiten, wenn man die Zahl der Amperewindungen noch mit $\frac{5}{4}$ multipliziert.

Die magnetische Kraft oder die Feldstärke, die an einer Stelle eines magnetischen Feldes herrscht, stellt man zweckmäßig in einer sehr anschaulichen Weise ebenfalls durch die Kraftlinien dar. Herrscht z. B. im Inneren unseres Solenoids die Feldstärke 200, so zieht man durch das Innere eine Anzahl von *Kraftlinien*, in der Richtung der Achse der Spule, und zwar so viel, daß auf jedes Quadratzentimeter gerade 200 kommen. Dann kann man mit einem Blick aus der Zahl der Kraftlinien pro 1 qcm, also aus der Dichtigkeit, mit welcher die Kraftlinien gezeichnet sind, die Feldstärke ersehen. Feldstärke und Zahl der Kraftlinien pro 1 qcm bedeuten also ganz dasselbe, nur daß die letztere Einführung ein übersichtliches Bild von den im Feld vorhandenen magnetischen Kräften gibt. Wir werden von dieser Darstellung öfters Gebrauch machen.

Der Anblick der **Fig. 37** zeigt uns, daß eine solche stromdurchflossene Spule sich nach außen ganz so verhalten muß wie ein Magnetstab. Denn es gehen von ihr nach außen magnetische Kraftlinien aus, ganz so wie bei einem Magneten. Aus dieser Analogie des Verhaltens lassen sich nun in der Tat sämtliche elektromagnetischen Wirkungen einer Spule leicht erklären. Nur der eine Unterschied herrscht zwischen einer Stromspule und einem Magneten, daß bei dem letzteren eben das Innere unzugänglich ist, während in den Hohlraum der Spule andere Körper hineingebracht werden können.

Eine drehbar aufgehängte Magnetnadel muß sich also z. B. in der Nähe einer Stromspule ebenso drehen wie in der Nähe eines Magneten, sie muß sich in die Richtung der Kraftlinien einzustellen suchen. Dasselbe muß sie auch in der Nähe eines gradlinigen oder kreisförmig gebogenen Stromdrahtes tun. Das ist die Entdeckung von *Oerstedt*, von der wir auf S. 3 zuerst gesprochen haben. Wird ferner ein Magnetstab über einer aufrecht stehenden, von einem Strom durchflossenen Drahtspirale beweglich aufgehängt, so wird der Magnet entweder in die Spirale hineingezogen oder von ihr abgestoßen, je nachdem die Richtung seiner Kraftlinien mit denen der Spule übereinstimmt oder nicht.

Ist ein unmagnetischer Körper von weichem Eisen über einer solchen stromdurchflossenen Spule aufgehängt, so wird er durch die Kraftlinien der Spule erst magnetisiert und dann immer in die Spule hineingezogen.

DIE MAGNETISCHEN WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES

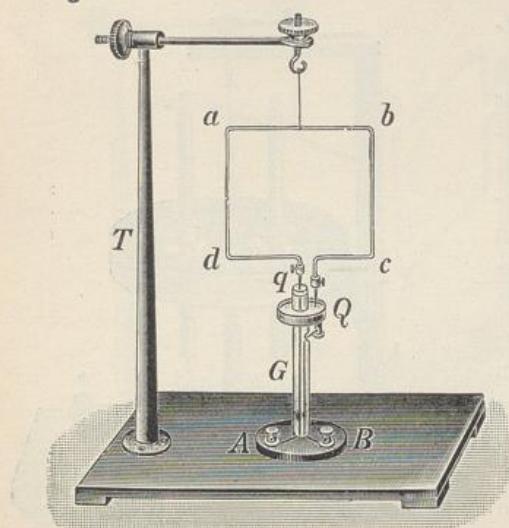
Daraus erklärt sich die Wirkung, die wir oben (S. 11) zur Konstruktion von Amperemetern benutzt haben.

Umgekehrt muß aber auch, wenn der Stromleiter beweglich und der Magnet fest ist, der Stromleiter sich bewegen, und zwar ebenfalls so, daß die Richtung seiner Kraftlinien, die ja senkrecht zu seiner Ebene stehen, parallel der Richtung der Achse des Magneten wird. Um dies experimentell nachzuweisen, ist die erste Aufgabe, einen Stromkreis herzustellen, von dem einzelne Teile frei beweglich sind. Dies wurde von Ampère erreicht durch das nach ihm benannte *Ampèresche Gestell*. In einer einfachen, neueren Konstruktion ist dasselbe in **Fig. 38** dargestellt. Eine Messingsäule *G* trägt oben ein Ebonitgefäß *Q*, innerhalb dessen ein zweites Ebonitgefäß *q* sich befindet. Beide Ebonitgefäß sind mit Quecksilber gefüllt, und das innere Gefäß ist durch einen in der Säule *G* isoliert geführten Draht mit der Klemmschraube *A*, das äußere, ringförmige, durch einen Draht mit der Klemmschraube *B* verbunden. Ein Drahtviereck *a b c d*, das, um es leichter drehbar zu machen, mittels eines Fadens an einem Stativ *T* aufgehängt ist, taucht mit einer Endspitze in das eine Quecksilbergefäß *q*, mit der anderen in das andere *Q*. Der Strom geht von *A* über *q*, *d*, *a*, *b*, *c* nach *Q* und dann nach *B*. Der bewegliche Stromkreis *a b c d* kann sich also um diese Spitzen beliebig drehen, wenn er unter dem Einfluß von Kräften steht. Sowie man einen Magneten in die Nähe eines solchen drehbaren Stromkreises bringt, stellt sich der Stromkreis in der Tat in eine bestimmte Lage gegen den Magneten, und zwar immer so, daß die Ebene des Stromkreises senkrecht steht gegen die Achse des Magneten, daß also die Achse des Magneten und die Kraftlinien des Stromkreises in einer Linie liegen.

Die Richtung dieser Bewegung einzelner Stromteile unter der Einwirkung eines Magneten (in einem magnetischen Feld) läßt sich am einfachsten aus einer

Regel (die aus der Schwimmerregel abgeleitet ist) entnehmen, bei welcher man die drei Finger der *linken* Hand: den Daumen, den Zeigefinger und den Mittelfinger, zu Hilfe nimmt, durch welche man ja drei aufeinander senkrechte Richtungen markieren kann. Wenn man den Zeigefinger in die Richtung der magnetischen Kraftlinien des Feldes bringt, den Mittelfinger in die Richtung des Stromes in dem beweglichen Drahtstück, so gibt die Richtung des Daumens immer die Richtung an, nach der das Drahtstück sich bewegt. Diese Regel nennt man die *Linke-Hand-Regel*. Dabei nimmt man immer an (S. 36), daß die Kraftlinien eines

Fig. 38



ZWEITES KAPITEL

Magneten vom *Nordpol* ausgehen und, durch die Luft sich ausbreitend, in den *Südpol* hineingehen.

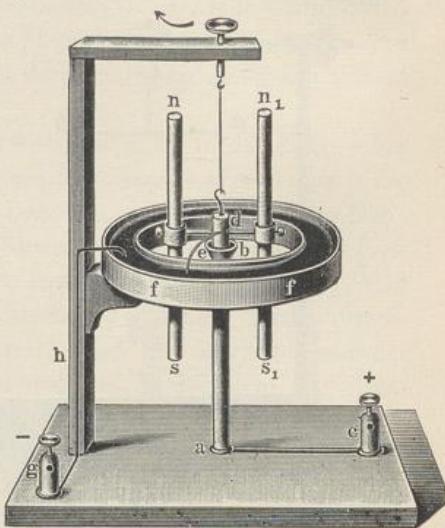
Man kann aber auch durch eine geschickte Kombination von Magneten und Strömen, wie *Faraday* gezeigt hat, es dahin bringen, daß ein Magnet dauernd um einen elektrischen Strom herumrotiert, daß man eine *kontinuierliche Rotation* von Magneten um einen Strom erhält. Diese von *Faraday* ersonnene Anordnung sieht man in **Fig. 39**. Es sind hier die beiden Magnetstäbe n s und $n_1 s_1$, welche rotieren. Der galvanische Strom wird durch die Klemme c eingeführt und steigt in dem Metallstab a b auf. Ein Metallstück d, an welchem die Magnete befestigt sind, und das an einem Faden aufgehängt ist, taucht in das Schälchen mit Quecksilber, welches das Ende von b bildet. Dieses Metallstück d trägt zugleich den Draht e, welcher in die mit Quecksilber gefüllte Rinne f f taucht. Es fließt also der Strom von c durch a b in das drehbare Metallstück d und von diesem durch den Draht e in das Quecksilber bei f, von wo aus er durch den Draht h zur Klemme g und von da zum Element zurückgeführt wird. Der Stromteil d e f ist also mit den Metallstäben beweglich, und in der Tat fängt das Magnetpaar, sowie der Strom fließt, an, sich zu drehen, und dreht sich so lange, bis der Strom unterbrochen wird.

Man kann sich durch Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel überzeugen, daß die Magnete sich drehen müssen, und auch einsehen, nach welcher Richtung die Rotation stattfinden muß. Denkt man sich nämlich den positiven Strom z. B. in der Richtung a b fließend, so steht also der Ampèresche Schwimmer in a b aufrecht, und wenn er den Magneten n s ansieht, so muß dessen Südpol (der näher an dem Strom a b ist als der Nordpol) nach hinten (zur rechten Hand des Schwimmers), wenn er aber $n_1 s_1$ ansieht, so muß dessen Südpol nach vorn aus der Ebene der Figur abgelenkt werden, die Ablenkung der Südpole muß also bei beiden nach entgegengesetzten Richtungen gehen.

Da die beiden Magnete starr miteinander verbunden sind und sich nur um den Aufhängefaden drehen können, so rotieren sie also bei unserer Annahme in demselben Sinne, wie der Uhrzeiger sich dreht. Kehrt man den Strom im Draht a b um, so rotiert das Magnetpaar im entgegengesetzten Sinne. Man kann auch *umgekehrt* ein Stück eines Stromleiters in kontinuierliche Rotation um einen Magneten bringen.

Die magnetischen Wirkungen eines Solenoids und ebenso die jedes einfachen Stromkreises sind derartig, als ob der Stromkreis sich wie ein Magnet verhält, der durch den Stromkreis senkrecht zu seiner Ebene gesteckt ist. Aus diesem

Fig. 39



DIE MAGNETISCHEN WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES

Gründe aber müssen auch zwei Drahtkreise, wenn sie von Strömen durchflossen sind, Kräfte aufeinander ausüben, und wenn einer von ihnen beweglich ist, muß er sich unter dem Einfluß dieser Kräfte bewegen. Denn durch die Ebenen jedes der Stromkreise gehen magnetische Kraftlinien senkrecht hindurch. Die beiden Stromkreise müssen sich also so einzustellen suchen, daß die Kraftlinien beider parallel werden. Man hat also dann zwischen zwei Strömen allein, ganz ohne Magnete, Bewegungen, also scheinbar anziehende und abstoßende Kräfte. Es war Ampère, welcher diese Einwirkung von galvanischen Strömen aufeinander untersuchte und aufklärte. Man nennt die Lehre von den mechanischen Wirkungen galvanischer Ströme aufeinander *Elektrodynamik*; sie ist nach unserer Auffassung nur ein spezieller Fall des Elektromagnetismus.

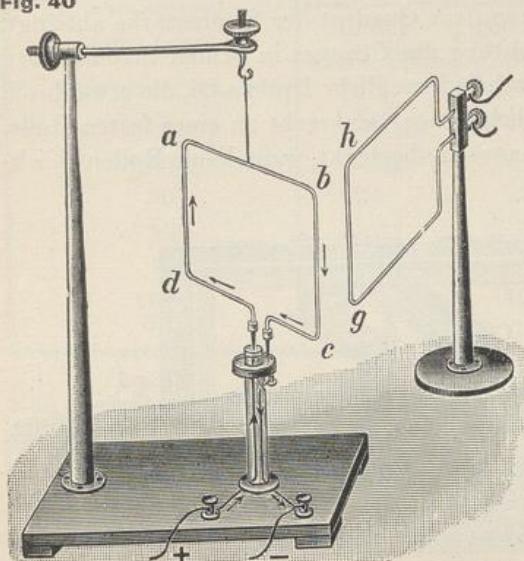
Um die Wirkungen von galvanischen Strömen aufeinander studieren zu können, mußte Ampère die Ströme, wenigstens teilweise, beweglich machen. Es wird also bei diesen Untersuchungen wieder das Ampèresche Gestell angewendet, das schon oben beschrieben wurde. Wenn man in **Fig. 40** durch das Drahtviereck im Ampèreschen Gestell (links in der Figur) einen Strom in der durch die Pfeile angegebenen Richtung hindurchsendet und diesem beweglichen Stromkreis den festen Stromkreis gh (rechts) nähert, so tritt folgendes ein: Fließt der positive Strom in gh von oben nach unten, also in gleicher Richtung wie in bc, so wird bc von gh angezogen. Fließt der Strom in gh von unten nach oben, also in entgegengesetzter Richtung wie in bc, so wird bc abgestoßen. Entsprechendes gilt für die Seite ad des beweglichen Stromkreises. Es ergibt sich daraus der Satz:

- *Zwei parallele gleichgerichtete Ströme ziehen einander an, zwei parallele in entgegengesetzter Richtung fließende Ströme stoßen einander ab.*

Dieses Gesetz ist übrigens eine direkte Folgerung aus der *Linken-Hand-Regel*. Um das einzusehen, betrachten wir in **Fig. 41** die beiden geradlinigen Stromstücke AB und CD, in denen die Ströme parallel nach oben fließen sollen. Um den Strom AB herum, der fest sein möge, sind die Kraftlinien gezeichnet, Kreise, die um ihn umgekehrt wie der Uhrzeiger herumgehen.

An der Stelle M des beweglichen Stromes CD haben wir also von der linken Hand den Mittelfinger nach oben, den Zeigefinger nach hinten zu halten, und daher geht der Daumen, der die Richtung der Bewegung von CD angibt, nach AB hin, d. h. CD wird von AB angezogen.
Sind die Stromleiter nicht

Fig. 40



ZWEITES KAPITEL

parallel, so gilt aus demselben Grunde das Gesetz, daß sie sich parallel zu stellen suchen.

Man kann diese Wirkung zweier gekreuzt gegeneinander gestellten Ströme sehr gut an dem in **Fig. 42** gezeichneten Apparat sehen.

In demselben ist ein fester Rahmen A B mit einer Reihe von Drahtwindungen versehen, in welche ein Strom durch die Klemmschrauben f und g eingeführt wird. Innerhalb des festen Rahmens befindet sich ein beweglicher leichter Rahmen C D, der auch mit einer Lage von Drahtwindungen versehen ist. Auch in diese Drähte kann durch eine, in der Figur nicht gezeichnete, Vorrichtung ein Strom geführt werden. In der Figur sind die beiden Drahtkreise gekreuzt gezeichnet. Sie streben also danach, sich parallel und gleichgerichtet zu stellen, und in der Tat fängt der

innere Rahmen sich unter der Einwirkung der Ströme an zu drehen, bis die Drahtwindungen einander parallel stehen und die Ströme in ihnen gleichgerichtet sind. Wird der Strom in beiden Rahmen zugleich kommutiert, so ändert sich daher weder die Richtung noch die Größe der Kraft, mit der die bewegliche Drahtrolle sich der festen parallel zu stellen sucht.

Diese *elektrodynamische* Kraft, mit welcher ein beweglicher Stromkreis unter dem Einfluß eines festen gedreht wird, hängt ab von dem Produkt beider Stromstärken. Läßt man daher den festen und den beweglichen Stromkreis von demselben Strom durchfließen, so dreht sich der bewegliche Stromkreis um einen Winkel, der von dem Quadrat der Stromstärke abhängt. Er ändert sich nicht, wenn die Richtung des Stromes in beiden Stromkreisen zugleich wechselt. Mithin wird eine solche bewegliche Drahtrolle, die etwa durch eine Feder immer in ihre ursprüngliche Lage, senkrecht zu einer festen Rolle, gezogen wird, auch dann elektrodynamisch abgelenkt, wenn beide Rollen gleich-

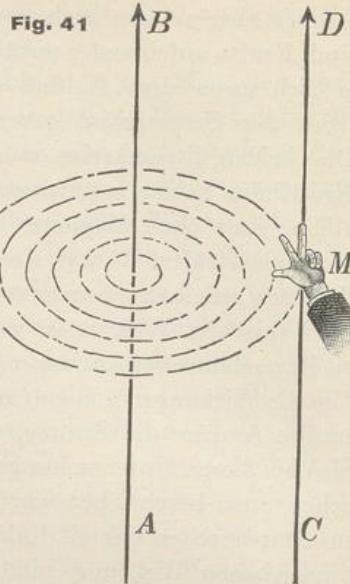
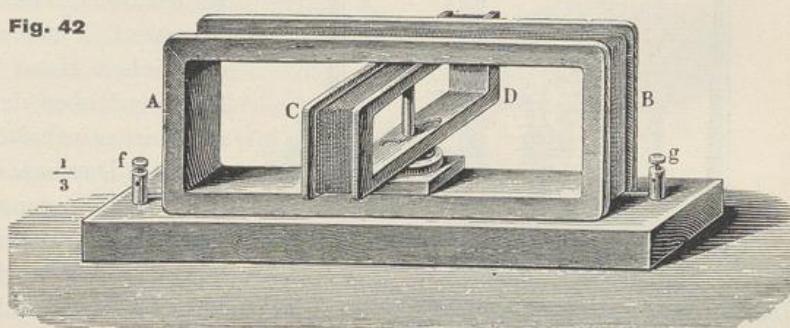


Fig. 42



DIE MAGNETISCHEN WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES

zeitig von Strömen wechselnder Richtung durchflossen werden, von sogenannten *Wechselströmen*, deren Erzeugung wir im nächsten Kapitel besprechen werden.

Wir gehen noch einmal zurück auf die Magnetisierung eines Eisenkernes im Innern eines Solenoids. Die Feldstärke im Innern eines Solenoids ist gleich der Zahl der Amperewindungen dividiert durch die Länge des Solenoids, und ebenso groß ist auch die Zahl der Kraftlinien, die pro Quadratzentimeter durch den Querschnitt des leeren Solenoids gehen.

Bringt man nun in das Solenoid einen Eisenstab, so wird dieser selbst magnetisch. Es wirkt dann also im Innern nicht nur die magnetische Kraft des Stromes, sondern auch noch die des Eisenkerns, die magnetische Kraft ist also durch das Hineinbringen des Eisenkerns gewachsen, und zwar sehr erheblich. Die Zahl der Kraftlinien, die man jetzt in der Spule, d. h. in dem Eisenkern, zeichnen muß, wird bedeutend größer, weil eben das magnetische Eisen selbst je nach der Stärke seines Magnetismus eine magnetische Kraft an jeder Stelle erzeugt oder, was dasselbe ist, mehr oder weniger Kraftlinien enthält und aussendet. Die verschiedenen Eisensorten unterscheiden sich sehr wesentlich darin, in welchem Verhältnis sie die Zahl der Kraftlinien des Solenoids vergrößern. So hat sich z. B. durch Experimente folgender Zusammenhang ergeben für die Zahl der Amperewindungen einer Magnetisierungsspule pro 1 cm Länge einerseits und für die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, die dadurch in den betreffenden Eisenkörpern entstehen, andererseits. Und zwar sind in der folgenden Tabelle enthalten erstens die Zahl der Kraftlinien in der leeren Spule, ferner die in drei Sorten von Eisen, die man als gehärteten Stahl, Dynamoblech, Gußeisen bezeichnet.

Zahl der Ampere-windungen (pro 1 cm)	Zahl der Kraftlinien pro 1 qcm			
	in der leeren Spule	gehärteter Stahl	Dynamo-blech	Gußeisen
5	6,25	—	12 500	—
10	12,5	100	14 000	—
20	25	2 200	15 000	6 200
30	37,5	3 400	15 600	7 000
50	62,5	6 200	16 000	8 100
100	125	10 500	17 200	10 000

Man sieht, daß die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, also die Stärke der Magnetisierung, bei gleicher Amperewindungszahl für Dynamoblech bedeutend größer ist als für Stahl und Gußeisen.

Man bezeichnet das Verhältnis, in welchem die Zahl der Kraftlinien der Spule nach Einbringung des Eisenkerns zu der Zahl der Kraftlinien vorher steht, als

ZWEITES KAPITEL

die magnetische Leistungsfähigkeit des betreffenden Eisens. Häufig braucht man auch dafür den Ausdruck *magnetische Permeabilität*.

Wir können aus unseren obigen Zahlen die magnetische Leitfähigkeit z. B. für das Dynamoblech berechnen. Dadurch erhalten wir folgende Werte:

Dynamoblech							
Zahl der Amperewindungen . .	5	10	20	30	50	100	
Magnetische Leitfähigkeit . .	2000	1120	600	409	256	138	

Man sieht, daß die magnetische Leistungsfähigkeit nicht eine unveränderliche Größe ist, wie die elektrische Leistungsfähigkeit der Metalle, sondern daß sie umso kleiner wird, je stärker die magnetisierenden Kräfte sind, die auf das Eisen wirken. Der Magnetismus, den Eisenkörper annehmen, wächst also nicht im selben Schritt mit der magnetisierenden Kraft, sondern viel langsamer und nähert sich einer Grenze, über die er nicht hinausgeht.

Man kann in demselben Sinne auch von der magnetischen Leistungsfähigkeit anderer Körper als des Eisens sprechen. Für diese, z. B. die Luft oder Kupfer, ist die Leistungsfähigkeit gleich 1, weil sie eben die Zahl der Kraftlinien nicht vermehren, wenn man sie in die Spule bringt. Nur Nickel und Kobalt haben etwas größere Permeabilitäten als 1.

Diese Ausdrucksweise, die zunächst etwas gezwungen aussieht, wird uns aber nun zu einer wichtigen neuen Auffassung der magnetischen Erscheinungen führen.

Wir wollen einen geschlossenen Eisenring nehmen und ihn ganz mit Draht umwickeln. Durch den Draht soll ein Strom von bestimmter Stärke fließen. Dann ist es die gesamte Zahl der Amperewindungen, welche die magnetischen Kraftlinien hervorbringt. Die Zahl der Kraftlinien, welche dann durch den ganzen Eisenring gehen, ist dabei umso größer, erstens je größer die Leistungsfähigkeit des Eisens ist, zweitens je größer der Querschnitt des Ringes ist, drittens je größer die gesamte Zahl der Amperewindungen (multipliziert mit $\frac{5}{4}$) ist, und viertens je kleiner die Länge des Ringes (in der Mittellinie gemessen) ist:

Zahl der Kraftlinien im Eisen

$$\text{magn. Leitfähigkeit} \times \frac{5}{4} \cdot \text{Zahl der Amperewindungen} \times \text{Querschnitt} = \frac{\text{Länge}}{}$$

Bezeichnen wir die gesamte Zahl der Amperewindungen (wieder mit $\frac{5}{4}$ multipliziert) unseres Ringes, welche ja den Magnetismus erst erzeugt, als die *magnetomotorische Kraft*, und bezeichnen wir eine Größe, welche von der Leitungs-

DIE MAGNETISCHEN WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES

fähigkeit, dem Querschnitt und der Länge des Ringes abhängt, als den *magnetischen Widerstand* des Ringes, so zwar, daß der

$$\text{magnetische Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{magnetische Leitfähigkeit} \times \text{Querschnitt}}$$

so können wir sagen: Die Zahl der Kraftlinien in unserem Ring ist gleich der magnetomotorischen Kraft dividiert durch den magnetischen Widerstand:

$$\text{Zahl der Kraftlinien} = \frac{\text{magnetomotorische Kraft}}{\text{magnetischer Widerstand}}$$

Dieses Gesetz hat dieselbe Form wie das Ohmsche Gesetz. Was im Ohmschen Gesetz die Stromstärke ist, das ist hier bei dem magnetischen Gesetz die Zahl der Kraftlinien. Was dort die elektromotorische Kraft ist, ist hier die magnetomotorische Kraft, nämlich die Zahl der Amperewindungen, und was dort der elektrische Widerstand eines Drahtes ist, ist hier der magnetische Widerstand eines Ringes. Es ist der

$$\text{magnetische Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt} \times \text{magnet. Leitfähigkeit}}$$

Ganz ebenso ist ja der

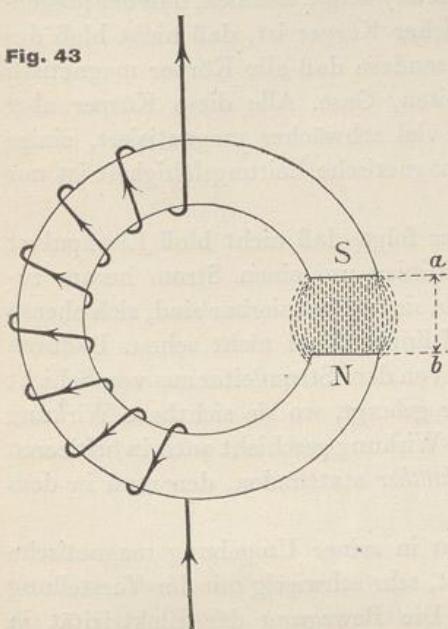
$$\text{elektrische Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt} \times \text{elektr. Leitfähigkeit}}$$

Zunächst gilt dieses Gesetz, welches man das *Ohmsche Gesetz für den Magnetismus* nennt, nur für einen geschlossenen Eisenring, weil nur bei diesem die Kraftlinien ganz in Eisen verlaufen. Man kann aber mit großer Genauigkeit dasselbe Gesetz auch auf nahezu geschlossene magnetische Kreise anwenden,

wenn man nur für den magnetischen Widerstand jedesmal die richtigen Werte annimmt. Betrachten wir z. B. in **Fig. 43** den Eisenring, welcher an der Stelle S N aufgeschnitten ist, so daß dort eine Luftschiicht sich befindet und daß der Ring dort zwei freie Pole hat.

Die Kraftlinien verlaufen in der Luftschiicht, wie es die Figur zeigt, im wesentlichen geradlinig zwischen N und S und biegen sich nur wenig nach außen. Sie tun das umso weniger, je kleiner die Luftschiicht ist. Wir können nun für diesen Fall den magnetischen

Fig. 43



ZWEITES KAPITEL

Widerstand berechnen, wenn wir diesen aus zwei Teilen zusammensetzen. Es ist nämlich der ganze magnetische Widerstand = magnetischer Widerstand des Eisens + magnetischer Widerstand der Luft.

Wir wollen mit bestimmten Zahlen rechnen. Es sei der Querschnitt des Ringes 5 qcm, die Länge des ganzen Ringes (d. h. die Länge der Mittellinie) 60 cm, die Länge der Luftsicht sei 1 cm. Die Leitfähigkeit des Eisens sei 1000. Wenn dann der Ring ohne Unterbrechung wäre, so wäre sein magnetischer Widerstand

$$= \frac{60}{5 \cdot 1000} = 0,012.$$

Da er unterbrochen ist, so ist sein magnetischer Widerstand

$$= \frac{59}{5 \cdot 1000} + \frac{1}{5} = 0,0118 + 0,2 = 0,2118.$$

Man sieht, daß der magnetische Widerstand infolge der Unterbrechung durch die Luftsicht um etwa das 17,7fache gewachsen ist, so daß die Zahl der Kraftlinien im zweiten Fall um das 17,7fache abgenommen hat gegenüber der im ersten Fall.

Dieses Ohmsche Gesetz für den Magnetismus wird bei der Berechnung von Dynamomaschinen, wo man es immer mit nahezu geschlossenen magnetischen Kreisen zu tun hat, allgemein angewendet.

Daß die Luft und daß andere Körper bei diesen magnetischen Wirkungen mit in Betracht gezogen werden müssen, selbst eine Rolle dabei spielen, wissen wir durch Entdeckungen von Faraday. Faraday zeigte nämlich, daß der Magnetismus eine *allgemeine* Eigenschaft sämtlicher Körper ist, daß nicht bloß das Eisen, wie man zunächst glauben sollte, sondern daß alle Körper magnetisch werden können, feste Körper, Flüssigkeiten, Gase. Alle diese Körper aber werden unter gleichen Umständen sehr viel schwächer magnetisiert, einige tausendmal weniger als das Eisen, ihre magnetische Leitfähigkeit ist nur äußerst wenig von eins verschieden.

Aus dieser Entdeckung von Faraday aber folgt, daß nicht bloß Eisenpulver sich zu ringförmigen magnetischen Kraftlinien um einen Strom herum zusammenschließt, sondern daß alle Stoffe, da sie magnetisierbar sind, sich ebenso verhalten müssen, nur daß wir die Kraftlinien dabei nicht sehen. Dadurch pflanzt sich aber die magnetische Wirkung von dem Stromleiter aus von Schicht zu Schicht weiter, bis sie an Eisenkörper gelangt, wo sie sichtbare Wirkung hervorbringt. Und diese Fortpflanzung der Wirkung geschieht auch in luftleeren Räumen, sie muß also auch in dem *Lichtäther* stattfinden, den man in dem leeren Raum annimmt.

Die Tatsache, daß ein elektrischer Strom in seiner Umgebung magnetische Kräfte ausübt, ist, wie oben S. 33 erwähnt, sehr schwierig mit der Vorstellung eines *wirklichen Stromes* zu vereinigen. Die Bewegung der Elektrizität in

DIE MAGNETISCHEN WIRKUNGEN DES ELEKTRISCHEN STROMES

Drähten haben wir wohl als eine Art Strömung der Elektronen auffassen können, aber nun müssen wir fragen, wie kann ein solcher Strom Wirkungen in der Umgebung zeigen? Bei einem Wasserstrom finden wir nur Wirkungen in der Strombahn selbst, in dem Rohr, durch das er fließt, aber nicht in der Umgebung. Gerade dieser Umstand hat lange Zeit einer einheitlichen Auffassung der Elektrizität im Wege gestanden. Diese Fernwirkungen eines Stromes kann man sich nun aber dadurch erklären, daß man annimmt, die Elektronen, die in einem Stromdraht sich bewegen, haben einen ganz besonderen Zusammenhang, eine enge Verknüpfung mit dem Lichtäther. Wo ein Elektron sich befindet, ob es ruht oder sich bewegt, da wirkt es auf den umgebenden Äther ein, indem es diesen in einen besonderen Zustand versetzt. Dieser veränderte Zustand des Äthers pflanzt sich nun in diesem rasch von Schicht zu Schicht fort, und dieser veränderte Zustand des Äthers wirkt wieder auf die Elektronen in den einzelnen Stoffen und bringt so die magnetischen Erscheinungen hervor. Während also der elektrische Strom selbst eine Erscheinung ist, die auf der Bewegung der Elektronen beruht, sind seine magnetischen Wirkungen, nach unseren jetzigen Vorstellungen, Vorgänge im Äther, die durch die Elektronen veranlaßt werden. Den Magnetismus des Eisens (und der anderen Körper) selbst aber können wir uns dadurch leicht erklären, daß wir annehmen, um jedes Eisenmolekül rotiere ein Elektron, wie der Mond um die Erde. Denn ein rotierendes Elektron verhält sich genau so wie ein elektrischer Strom, der in einem Kreise fließt, und von einem solchen wissen wir ja, daß er magnetische Kraftlinien besitzt, die senkrecht zu seiner Ebene stehen. Ein solches rotierendes Elektron macht also aus dem Eisenmolekül einen kleinen Magneten, dessen Achse senkrecht zu der Kreisbahn des Elektrons steht.