

Ueber die magnetischen Kraftlinien Faradays.

Der Schwerpunkt der Fortschritte in den Naturwissenschaften, die das 19. Jahrhundert zu verzeichnen hat, liegt zweifelsohne auf dem Gebiete der Elektrizität, und zwar vor allem deshalb, weil die zahlreichen wichtigen Entdeckungen, die aus den Arbeitsräumen der Forscher hervorgingen, für das Leben der Menschen von weittragendster Bedeutung geworden sind. Der Technik ist es gelungen, die Ergebnisse der reinen Wissenschaft so umzuformen und auszugestalten, dass heutzutage der Verkehr, wie die elektrischen Bahnen und die weitverzweigten Netze der telegraphischen und telephonischen Anlagen beweisen, zum grossen Teil durch die elektrischen Kräfte aufrecht erhalten und Licht und Arbeitskraft in ausgedehnter Masse unter Benutzung elektrischer Maschinen erzeugt wird. In erster Linie unter den Männern, die diese Entwicklung der Elektrizität erheblich gefördert haben, steht der englische Physiker Michael Faraday, der vom 22. September 1791 bis zum 25. August 1867 gelebt hat. Durch seine umfassenden und planmässigen experimentellen Untersuchungen über die elektrischen und magnetischen Kräfte hat er das Feld für die späteren Erfolge vorbereitet, und in gar vielen Beziehungen ist er der erste und unerreichte Bahnbrecher gewesen. Haben die meisten seiner Versuche und Resultate auch einen rein wissenschaftlichen Charakter, da es sich für ihn um die Erforschung der Naturkräfte an sich handelte, so hat er doch für ihre richtige und leichte Erkennung und Anwendung bequeme und fassliche Hilfsmittel geschaffen und dadurch auch den praktischen Wissenschaften wichtige Dienste geleistet. Ein solches Hilfsmittel, das in der Elektrotechnik eine grosse Rolle spielt¹⁾, soll auf den folgenden Blättern besprochen werden, nämlich die Kraftlinien, die Faraday in die wissenschaftliche Betrachtung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen eingeführt hat. Sie geben nicht nur ein anschauliches Bild von den Kräften, die sich in der Umgebung von elektrischen und magnetischen Körpern bethätigen, sondern gestatten auch, die Gesetze der Induktion, welche die wesentlichste Grundlage für die elektrischen Arbeits- und Strommaschinen bilden, in überaus einfacher Weise darzustellen. Auch auf die Schule wirkt die Vorwärtsbewegung der elektrischen Wissenschaften ein, und obwohl die Schule naturgemäss mit mehr Zurückhaltung als die Technik den neu zuströmenden Ergebnissen gegenübersteht, so ist sie doch bestrebt, ihren Unterricht so zu wandeln, dass die Errungenschaften der Wissenschaft, die im Leben eine entscheidende Rolle spielen, dem Schüler übermittelt und seinem Verständnisse näher gebracht werden. Deshalb hat es vielleicht Interesse, an dieser Stelle auf die Kraftlinien Faradays einzugehen und aus seinen Werken kennen zu lernen, was er unter ihnen verstanden wissen will.

Die Abhandlung wurde in der Hauptsache unter Zugrundelegung der Uebersetzung der

Faradayschen Experimentaluntersuchungen über Elektrizität, die Kalischer²⁾ herausgegeben hat, bearbeitet; jedoch wurde an verschiedenen Stellen auf den englischen Text zurückgegriffen, wie er in den ursprünglichen Abhandlungen Faradays vorliegt, die in den Philosophical Transactions und dem Philosophical Magazine erschienen sind. Die Berechtigung zu einem solchen Unternehmen sehe ich in dem Umstande, dass die Experimentaluntersuchungen Faradays nicht nach einem von vornherein feststehenden Plane entstanden sind. Wir finden hier die Ergebnisse seiner Forschungen aneinandergereiht, wie sie von ihm im Laufe der Zeit gewonnen wurden. In den Abhandlungen, die sich auf die Zeit von 1831 bis 1855, also auf einen Zeitraum von über 24 Jahren verteilen, ist deutlich zu bemerken, wie er sich nach und nach zu seinen Ansichten durchgearbeitet hat, wie die einen seiner Ideen im Laufe der Zeit festere Gestalt angenommen haben, andere von ihm fallen gelassen wurden. Will man daher ein Bild von den Vorstellungen geben, die er über einen der Gegenstände, die ihn beschäftigt haben, hegte, so muss man aus den verschiedenen Teilen seines Werkes die einschlägigen Bemerkungen und Gedanken zusammentragen und sie in einen einheitlichen Zusammenhang bringen. Seine Darlegungen beschränken sich nicht darauf, die Versuche sorgfältig und eingehend zu schildern und ihre Resultate zu erläutern, sondern überall sucht er den Gehalt der Erscheinungen aufzudecken und ihre Natur selbst zu enthüllen. Er wird dabei allerdings genötigt, den sicheren Boden des Experimentes zu verlassen und zu Spekulationen seine Zuflucht zu nehmen. Nicht leicht ist es in solchen Fällen, den Gedanken und Ideen Faradays zu folgen; denn seinem genialen Verständnisse erschliessen sich Zusammenhänge und Verknüpfungen der Dinge, seinem wissenschaftlichen Instinkte ergeben sich Einblicke in ihre Natur, die nur schwer durch Worte anderen begreiflich zu machen sind. Es ist daher nicht immer möglich, mit Sicherheit seine wirklichen Meinungen und Ansichten zu ergründen. In Anerkennung dieses Umstandes spricht sogar H. v. Helmholtz³⁾ von den in schwerverständlicher, abstrakter Sprache vorgetragenen Ideen Faradays. Diese eigenartigen Schwierigkeiten machen sich auch in dem vorliegenden Falle geltend. Einige Abhandlungen (XXVIII. und XXIX. Reihe, Artikel 3243—3299 und 3300—3362) hat Faraday unmittelbar den Kraftlinien und verwandten Dingen gewidmet.

Schon in den ersten Reihen seiner Experimentaluntersuchungen über die von ihm entdeckte elektrische Induktion macht Faraday von den magnetischen Kurven Gebrauch; jedoch erst in der XIX. Reihe, welche die Magnetisierung des Lichtes und die Erleuchtung der magnetischen Kraftlinien betrifft, giebt er im Artikel 2149 eine genauere Begriffserklärung der Kraftlinien, während er sich bei ihrer ersten Erwähnung im Art. 114 mit einer erläuternden Anmerkung begnügt und sie im Art. 238 kurz einen blossen Ausdruck für die Anordnung magnetischer Kräfte nennt. Er unterscheidet zwischen magnetischen und elektrischen Kraftlinien. Die ersteren, die auch als Linien magnetischer Kraft oder magnetische Kurven bezeichnet werden, treten in der Umgebung von Magneten und elektrischen Strömen auf und stellen die Aeusserung der magnetischen Kraft dar, wie sie in geraden oder krummen Linien vor sich geht, und zwar verlaufen sie bei einem Magneten von Pol zu Pol, einen elektrischen Strom hingegen umgeben sie in konzentrischen Kreisen. Die elektrischen Kraftlinien geben die Aeusserung der Kräfte wieder, die bei der elektrostatischen Induktion zur Wirkung kommen; auch sie sind gerad- oder krummlinig. Im folgenden werden sie nicht in die Betrachtung hereingezogen.

Die magnetischen Kraftlinien kann man in der Nähe eines Magneten oder Stromes durch

eine sehr kleine drehbare Magnetnadel verfolgen; sie nimmt an jeder Stelle in dem Wirkungsbereiche der magnetischen Kräfte eine ganz bestimmte Lage ein. Bewegt man sie so, dass in jedem Augenblicke ihre Achse mit der Bewegungsrichtung übereinstimmt, so beschreibt der Mittelpunkt der Nadel eine Kraftlinie. Die ganze Umgebung der Kraftquelle ist mit solchen Kraftlinien erfüllt, da an jeder beliebigen Stelle die Nadel sich richtet und jede zum Anfangspunkte der beschriebenen Bewegung gemacht werden kann. Die Linien erstrecken sich also nach allen Seiten hin bis auf unbestimmte Entfernung. Zur Auffindung der Linien benutzte Faraday sodann ein Stück Metalldraht, das mit einem Galvanometer verbunden ist und durch das magnetische Feld geführt wird. Im allgemeinen entsteht in einem solchen Leiter, wenn man seine Lage zu einem in der Nähe befindlichen Magneten oder elektrischen Strome ändert, ein Induktionsstrom. Wird nun der Leiter so durch das magnetische Feld bewegt, dass kein Induktionsstrom sich zeigt, auch nicht einmal das Bestreben einen solchen zu bilden sich geltend macht, so ist die Linie, längs welcher die Bewegung stattfindet, eine magnetische Kraftlinie. Schliesslich kann zu dem nämlichen Zwecke die Eigenschaft verwandt werden, die Wismuthkrystalle oder kleine Gruppen von solchen Krystallen zwischen den Polen eines Magneten aufzuweisen; die Rhomboeder des Wismuths stellen sich nämlich mit dem grössten Durchmesser in bestimmter Weise ein, und zwar kommt die genannte Achse der Krystalle, wenn sie gerade zwischen den Magnetpolen aufgehängt sind, in die Richtung der magnetischen Achse. Mit Hilfe dieser Eigentümlichkeit der Krystalle kann man in ganz ähnlicher Art, wie bei der Magnetnadel, den Verlauf der magnetischen Kurven entdecken. Faraday bezeichnet die Kraft, der diese Krystalle unterliegen, als Magnekrystallkraft und die betreffende Krystallachse als Linie oder Achse der Magnekrystallkraft. Das Verhalten der Wismuthkrystalle erscheint zunächst ganz identisch mit dem der Magnetnadel, und doch ist ein tiefgehender Unterschied vorhanden. Während die Magnetnadel immer nur ein bestimmtes ihrer beiden Enden einem gegebenen Pole zuwendet, kann der Wismuthkrystall jedes Ende seiner Magnekrystallachse nach jedem Pole einstellen; er kann also zwischen den Polen Lagen einnehmen, die einander diametral entgegengesetzt sind. Die Magnekrystallkraft ist also nicht polar oder antithetisch, wie die Kraft der Magnetnadel, sondern von einer Art, die Faraday mit achsial bezeichnet. Während die Magnetnadel und ebenso der bewegte Leiter auch die Richtung der Linien angeben können, vermittelt somit die Linie der Magnekrystallkraft einen derartigen Aufschluss nicht.

Diese Linien führte Faraday ein, weil sie ein getreues Abbild von dem magnetischen Zustande in der Nähe eines Magneten oder elektrischen Stromes und einen richtigen Begriff von der Natur der wirkenden Kraft geben und alte wie neue Erscheinungen auf diesem Gebiete erkennen lehren. So bestimmt sich die Richtung der Kraft an irgend einem Orte durch die Tangente der Kraftlinie, die durch ihn hindurchgeht. Die magnetischen Kräfte, die an einem Orte zur Wirkung kommen, sind einander gerade entgegengesetzt, je nachdem sie einen magnetischen Nord- oder Südpol beeinflussen. Einer jeden Linie kommt nach seiner Meinung ein unveränderlicher Kraftbetrag zu, den sie überall festhält, in welcher Entfernung von der Kraftquelle man sie auch betrachten mag. Legt man demgemäss durch die Linien eines magnetischen Feldes mit Hilfe eines Leiters Schnitte, durch die man die ihnen eigenen Kräfte untersuchen kann, so ist ihre Summe immer dieselbe, sofern man dieselben Linien schneidet. Indem Faraday diese Annahme in die Definition der Linien aufnimmt, werden sie ihm ein Mittel, die

*) Die am Rande stehenden Zahlen sind Hinweise auf die Artikel der Experimentaluntersuchungen.

Stärke der magnetischen Kraft irgendwo im Felde zu bestimmen. Aber er geht noch einen
 3075 Schritt weiter. Im Anfang allerdings kommt es ihm nur darauf an, durch die Linien Richtung
 und Stärke der magnetischen Kraft zu veranschaulichen, und er lässt es einstweilen dahinge-
 stellt, ob man durch sie die Beschaffenheit der in Frage kommenden Kraft enthüllen könne; er
 stellt nur seine Annahme über ihre Wirkungsweise als gleichberechtigt den anderen von einer
 oder zwei magnetischen Flüssigkeiten oder den Kraftmittelpunkten, die sich an den Polen be-
 finden, an die Seite. Derartige Annahmen wären von der grössten Bedeutung für unsere Er-
 kenntniss, wenn sie sich möglichst in Einklang mit den beobachteten Erscheinungen bringen
 liessen. Für die Hypothese der Kraftlinien ist er besonders eingenommen, da sie seines Er-
 achtens eine Fernwirkung entbehrlich macht, die er im Falle der magnetischen Kräfte für
 wenig wahrscheinlich hält. Nach allen Seiten durchdringen die Linien lückenlos den Raum und
 leisten so der Ansicht Vorschub, dass die magnetische Kraft sich von Teilchen zu Teilchen fort-
 pflanze. Nach Abschluss seiner Versuche über diese Fragen und nach Klärung seiner spekula-
 tiven Auffassung über die magnetischen und elektrischen Kräfte ist es ihm jedoch durchaus ge-
 wiss, dass die Kraftlinien aufs engste mit der Natur der wirkenden Kräfte selbst verknüpft sind.

Von besonderer Bedeutung für die Kraftlinien ist es, dass man sie auf mechanischem
 Wege durch Eisenfeilicht darstellen kann und so ein anschauliches Bild von ihrer Verteilung
 und ihrem Verlaufe erhält. Hierbei ist die Anordnung der Feilspäne davon abhängig, ob das
 3235 Eisen rein und frei von Staub und Oxyd ist, ob es gleichmässig oder ungleichmässig, dicht oder
 dünn aufgestreut wird, ob das Papier rauh oder glatt ist. Weiter ist zu bedenken, dass die
 Anwesenheit der Eisenspäne an sich das zu untersuchende magnetische Feld verändert. Man
 erhält daher durch Eisenfeilichtbilder nur in gewisser Annäherung Aufschluss über die Kraft-
 3237 linien. Die Richtung und Gestalt der Linien geben sie mehr oder weniger genau wieder und
 lassen auch erkennen, ob die Kraft zu- oder abnimmt; jedoch ist ein sicherer Schluss auf den
 relativen Betrag der Kraft wegen der angeführten Zufälligkeiten unmöglich⁴⁾. Um ein solches
 3236 Eisenfeilichtbild festzuhalten, legt man ein mit Gummiwasser (1 Teil Gummi, 3 oder 4 Teile
 Wasser) angefeuchtetes Papier darauf und lässt es 30 bis 40 Sekunden mit einem Gewichte
 beschwert liegen oder drückt es vorsichtig mit der flachen Hand an. Nach dem Abheben und
 Trocknen des Papiers sind die Feilichtlinien fixiert. Setzt man dem Gummiwasser etwas ge-
 löstes rotes Blutlaugensalz hinzu, so bildet sich unter jedem Eisenkörnchen etwas Berlinerblau.
 Lässt man schliesslich das Gummiwasser überhaupt fort und tränkt das Papier nur mit einer
 Lösung von rotem Blutlaugensalz, so erhält man eine blaue Zeichnung von den mechanisch
 dargestellten Kraftlinien⁵⁾.

I. Natur und Wesen der magnetischen Kraftlinien.

Nach dieser orientierenden Uebersicht über den Gegenstand unserer Betrachtung wenden wir
 uns der eingehenderen Darstellung zu und suchen zunächst zu ermitteln, was Faraday über die
 Natur und das Wesen dieser Linien gedacht und aufgestellt hat.

Die magnetische Kraftachse im Vergleich mit der elektrischen. An vielen
 Stellen seiner Experimentaluntersuchungen findet man spekulative Betrachtungen, und man
 kann sagen, dass er ihnen mit ganz besonderer Vorliebe nachgegangen hat. Wie oft begegnen
 wir in seinen Werken z. B. dem Gedanken von der Einheit der Naturkräfte! Es sind ihm
 solche Spekulationen unter der Voraussetzung, dass man sich ihrer fraglichen Richtigkeit und
 3244 ihres wechselnden Charakters bewusst bleibt, willkommene Hilfsmittel, die Ansichten über einen

Gegenstand zu klären, neue Erscheinungen zu entdecken und unzweifelhafte Naturgesetze abzuleiten. Auch in dem vorliegenden Falle nimmt er seine Zuflucht zu einer Spekulation. Die duale Natur, die den elektrischen und magnetischen Kräften eigentümlich ist, die Begrenztheit des Betrages ihrer Kräfte und die Möglichkeit, sie von einem Körper auf einen anderen zu übertragen, waren für ihn bestimmend, die magnetische Kraftlinie mit der elektrodynamischen oder, wie man gewöhnlich sagt, dem elektrischen Strom zu vergleichen. Wenn nun auch das Wesen dieses Stromes durchaus noch nicht aufgeklärt ist, so ist doch an dem Vorhandensein eines Zustandes, den wir ganz unabhängig von seiner besonderen physischen Beschaffenheit mit dem Worte Strom bezeichnen, nicht zu zweifeln, und somit ist es nicht ausgeschlossen, dass diese Vergleichung für die magnetischen Kraftlinien gewisse Aufschlüsse giebt. Unter dem elektrischen Strome stellt sich Faraday eine Kraftachse vor, die in entgegengesetzten Richtungen genau gleichgrosse Kräfte besitzt. Diese Auffassung gründet sich auf den Umstand, dass im elektrischen Strome an jeder Stelle ein fortwährender Ausgleich von entgegengesetzten elektrischen Kräften stattfindet, die immer aufs neue erregt werden. Als eine ebensolche Kraftachse ist die magnetische Kraftlinie zu denken; an der Einstellung, die eine Magnetnadel an jedem Orte in einem magnetischen Felde erfährt, kann man die Wirksamkeit der einander entgegengesetzten Kräfte erkennen. Für die vergleichende Betrachtung dieser beiden Kraftachsen ist es vor allen Dingen nötig, sich ihre gegenseitige Abhängigkeit vor Augen zu halten. Faraday denkt sich zu diesem Zwecke zwei verschlungene Ringe⁶⁾, die in zueinander senkrechten Ebenen liegen; stellt der eine, in einer bestimmten Richtung genommen, einen elektrischen Strom dar, so giebt der andere eine von ihm abhängige magnetische Kraftlinie. Geradeso wie beim elektrischen Strome spricht man bei einer magnetischen Kraftlinie von ihrer Richtung, und zwar versteht man darunter diejenige, die ein einzelner Nordpol unter dem Einflusse der magnetischen Kraft auf ihr einschlagen würde, d. h. im Falle eines Magneten die vom Nordpol durch den Aussenraum zum Südpol. Hält man dies fest, so kann man in bekannter Weise nach der Ampèreschen Regel die Richtung der magnetischen Kraftlinie aus der des Stromes bestimmen. Der Umstand, dass die beiden voneinander abhängigen Achsen in Ebenen liegen, die winkelrecht aufeinander stehen, ist für die Beurteilung ihrer Gegensätze und Aehnlichkeiten von besonderer Bedeutung.

Als ein charakteristisches Merkmal des elektrischen Stromes haben Ampère⁷⁾ und Davy⁸⁾ sein Bestreben sich zu verlängern aufgestellt. Ampère lieferte den experimentellen Nachweis mit Hilfe eines mit Seide überspannenen Messingbügels mit rechtwinklig umgebogenen Enden, der auf dem Quecksilber eines Gefässes, das durch eine nichtleitende Scheidewand geteilt war, so schwamm, dass er letztere überbrückte; brachte er die Drähte einer galvanischen Batterie in das Quecksilber, so bewegte sich der Bügel längs der Scheidewand hin von der Eintrittsstelle des Stromes weg⁹⁾. Davy führte die zwei Drähte einer Voltaschen Batterie durch den Boden eines Quecksilbergefässes bis nahe an die Oberfläche und beobachtete kegelförmige Erhebungen des Quecksilbers über den Drahtenden. Im Gegensatze hierzu suchen sich die magnetischen Kraftlinien, wie Faraday zeigt, zu verkürzen, und zwar giebt sich diese Verkürzung in allen Aeusserungen der magnetischen Kraft kund, so dass sie ein entscheidendes Merkmal ihrer Linien darstellt. Dieses Bestreben tritt dadurch zu Tage, dass sich eine Magnetnadel im magnetischen Felde einstellt und dem zugewandten Pole zu nähern sucht, d. h. durch die Anziehung zwischen ungleichnamigen Polen. Es findet also in der Richtung der Linien eine Zugwirkung statt. Diesen das Wesen der Linien treffenden Eigenschaften entgegengesetzter Art schliessen sich andere Verschiedenheiten an, die in den folgenden Sätzen enthalten sind. Gleich-

3267 gerichtete elektrische Ströme, die durch parallele Leiter fließen, ziehen sich an; gleichgerichtete magnetische Kraftlinien stoßen einander ab. Entgegengesetzt gerichtete elektrische Ströme stoßen sich ab; entgegengesetzt gerichtete magnetische Kraftlinien ziehen sich an. Hierbei ist die Richtung der Linien nach dem Orte beurteilt, an dem sie einander nahe kommen. Die von Faraday den Ampèreschen an die Seite gestellten Sätze über die magnetischen Linien leuchten sofort ein, wenn man irgend ein durch Eisenfeilspäne veranschaulichtes magnetisches Feld betrachtet, das von zwei oder mehr Magneten oder elektrischen Strömen erzeugt ist. Der Fall der Abstossung gleichgerichteter Linien tritt z. B. ein, wenn man zwei Magnetstäbe mit gleichnamigen Polen nebeneinander oder einander gegenüber legt; die Linien weichen vor einander zurück¹⁰). Bringt man zwei Magnete in irgend welcher Weise mit ungleichnamigen Polen aneinander, so kann man deutlich beobachten, wie die entgegengesetzt gerichteten Linien miteinander verschmelzen¹¹). Auch durch das Verhalten von sehr kleinen Magnetnadeln, mit deren Hilfe man den Lauf der Kraftlinien im Felde ermitteln kann, ist es leicht, diese Sätze zu veranschaulichen¹²). Kommen zwei solche Magnetnadeln, die man auf den magnetischen Linien mit dem Nordpol voran hinführt, einander gegenüber zu stehen, so stoßen sie sich ab, wenn sie mit ihren Nordpolen nach derselben Richtung weisen, ziehen sich aber an, wenn sie entgegengesetzt gerichtet sind. Ueberträgt man diese Wechselwirkung der Nadel auf die Linien, so gelangt man zu den genannten Beziehungen.

3268 Dieser in den Sätzen über elektrische Ströme und magnetische Kraftlinien enthaltene Gegensatz ist aber nur ein scheinbarer; er verschwindet, wenn wir auf die gegenseitige Lage der Kraftachsen achten. Ein elektrischer Strom ruft in jeder zu ihm senkrechten Ebene ein magnetisches Feld hervor, dessen Linien konzentrische Kreise um ihn bilden; ihre Richtung bestimmt sich nach der Ampèreschen Schwimmregel. Nehmen wir nun an, dass zwei parallele und gleichgerichtete elektrische Ströme in der nämlichen zu ihrem Laufe senkrechten Ebene magnetische Linien erzeugen, so werden diese Linien, da sie in übereinstimmender Weise die Drähte umschlingen, zwischen ihnen mit Teilen einander nahekommen, die entgegengesetzt gerichtet sind und sich daher anziehen, ja sich unter Umständen miteinander vereinigen. Im letzteren Falle gehen sie um beide Drähte in einem Zuge, so dass ein für beide gemeinsames Kraftliniensystem entsteht. Diese Anziehung aber zwischen den magnetischen Linien hat im allgemeinen die Richtung von Draht zu Draht, d. h. sie stimmt mit der Anziehung zwischen den elektrischen Strömen überein. Ebenso ergibt sich aus dem Streben der beide Ströme umgebenden Linien sich zu verkürzen eine Kraft, welche die Drähte einander nähert. Wir erkennen also, dass die Anziehung von gleichgerichteten elektrischen Strömen zusammenfällt mit der von entgegengesetzt gerichteten magnetischen Kraftlinien. Das Entsprechende lässt sich zeigen in betreff der Abstossung von entgegengesetzt gerichteten elektrischen Strömen und gleichgerichteten magnetischen Linien. Von zwei solchen Strömen ruft der aufwärtsgehende in einer horizontalen Ebene von oben gesehen Kraftlinien hervor, die gegen den Uhrzeiger verlaufen, der abwärts gerichtete solche in dem Sinne des Uhrzeigers; zwischen den Drähten nähern sich diese Linien mit Teilen, die dieselbe Richtung aufweisen, wodurch Abstossung bedingt wird. Wie leicht ersichtlich, ist die Richtung der Abstossung zwischen den elektrischen Strömen einer- und den magnetischen Linien andererseits dieselbe. Wenn man nun bedenkt, dass die magnetischen Kraftlinien jederzeit mit dem elektrischen Strome vorhanden sind, dass sie einen wesentlichen Bestandteil desselben darstellen, so erkennt man, wie die Anziehung und Abstossung der elektrischen Ströme durch das Verhalten der magnetischen Linien zu stande kommt¹³). Auf diese

Weise wandeln sich die angeführten Sätze aus scheinbaren Gegensätzen in Beziehungen um, welche die beiden Erscheinungsgebiete eng miteinander verknüpfen. Im Vorstehenden sind sie allerdings etwas anders gefasst, als sie Faraday in den Art. 3267 und 3268 selbst aufstellt. Der Unterschied besteht darin, dass er die Richtung der Linien nicht allein nach dem Orte beurteilt, an dem sie zur Wechselwirkung kommen, sondern nach der gegenseitigen Lage der Magnete, von denen sie ausgehen. So trennt er den Fall, dass zwei Magnetstäbe mit gleichnamigen Polen parallel nebeneinander liegen, von dem anderen, in dem ihre Achsen in dieselbe Gerade fallen und die gleichnamigen Pole einander zugekehrt sind. Im ersten Falle nennt er die Linien gleichgerichtet, im zweiten entgegengesetzt gerichtet¹⁴); in beiden wird man aber den Linien gleiche Richtung zusprechen, wenn man die Art, wie sie am Orte ihres Zusammentreffens einander begegnen, ausschlaggebend sein lässt. Wohl aber gelingt es Faraday, auf diesem Wege Sätze aufzustellen, die auch in der Fassung eine vollkommene Uebereinstimmung zwischen den elektrischen Strömen und magnetischen Linien enthalten. Die Ströme zweier Voltabatterien, die mit gleichnamigen Polen (an den Enden eines gemeinsamen Leiters) einander gegenüberstehen, hemmen sich; die Linien zweier gleichnamigen Pole, die einander zugewandt sind, stossen sich ab. Faraday sagt daher, dass entgegengesetzt gerichtete elektrische Ströme und magnetische Linien sich abstossen. Befinden sich (an den Enden des gemeinsamen Leiters) ungleichnamige Batteriepole einander gegenüber, so tritt Verschmelzung der Ströme ein, desgleichen bei den magnetischen Linien, wenn man die ungleichnamigen Pole der Magnete einander zukehrt; hieraus folgert er, dass gleichgerichtete Ströme und magnetische Linien einander anziehen¹⁵). Noch weitere Aehnlichkeiten bieten die elektrischen Ströme und magnetischen Linien dar. Schaltet man die Elemente einer Batterie auf Spannung, d. h. hintereinander, so tritt keine Verstärkung des elektrischen Stromes ein (bei geringem äusseren Widerstand). Entsprechendes gilt, wenn man mehrere Magnete in eine Reihe legt, mit den ungleichnamigen Polen gegeneinander; die Vereinigung der magnetischen Linien hat keine Steigerung ihrer Intensität zur Folge. Schaltet man hingegen die Elemente auf Quantität, d. h. nebeneinander, so wird die Stärke des Stromes (bei geringem äusseren Widerstand) geradeso gesteigert, wie die magnetische Kraft in dem Falle, dass die Magnete mit den gleichnamigen Polen nebeneinander gelegt werden. Aus alledem leuchtet ein, wie eng die Verwandtschaft ist, die zwischen dem elektrischen Strome und den magnetischen Kraftlinien besteht¹⁶).

Auf die nahen Beziehungen zwischen Elektrizität und Magnetismus wurde Faradays Aufmerksamkeit schon im Anfange seiner wissenschaftlichen Thätigkeit hingelenkt, der in die Zeit der grossen elektromagnetischen Entdeckungen Oerstedts, Aragos und Ampères fiel. Das Bedürfnis, eine klare Uebersicht zu erhalten, veranlasste ihn um die Mitte des Jahres 1821, eine Geschichte des Elektromagnetismus zu entwerfen, und zu diesem Zwecke wiederholte er die meisten der zu besprechenden Versuche¹⁷). Unmittelbar nach Vollendung und Veröffentlichung seines Entwurfes¹⁸) ging er zur weiteren Erforschung dieses Gebietes über, und da gelang es ihm, wie er selbst in einem Briefe vom 12. September 1821 an G. de la Rive und in der Abhandlung: Ueber einige neue elektromagnetische Bewegungen u. s. w.¹⁹) mitteilt, sowohl die Rotation eines elektrischen Stromes um einen Magneten als auch die eines Magneten um einen elektrischen Strom nachzuweisen²⁰). Diese Rotationen bilden eine wertvolle Stütze für den Gedanken von der Einheit dieser Kräfte. Ueberdies ist es möglich, — und Faraday hat gerade davon den ausgedehntesten Gebrauch gemacht — durch den elektrischen Strom die magnetischen Erscheinungen bis ins einzelne zu verfolgen und zu erkennen, indem man einen Leiter durch

3268

3269

3268

das magnetische Feld führt. Diese Thatsachen haben Faraday mehr und mehr in der Ueberzeugung bestärkt, dass die magnetischen Linien geradeso wie die elektrischen Ströme in der Natur wirklich vorhanden sind, und dass sie nicht bloss die Bedeutung eines Vorstellungsbehelfes haben, wie etwa die elektrischen und magnetischen Flüssigkeiten. Diesen wichtigen Punkt seiner Theorie war er bestrebt immer von neuem zu erläutern und zu befestigen.

Ueber die physische Existenz der magnetischen Kraftlinien. In dieser Hinsicht ist es ihm vor allem wichtig, den gekrümmten Verlauf der Linien nachzuweisen. Beeinflussen sich zwei Körper in der Art, dass die zwischen ihnen liegenden Teilchen eines wirklichen oder auch nur vorgestellten Mediums dabei ganz unbeteiligt sind, so wird nicht die mindeste Veranlassung vorliegen, dass die Kräfte anders als in gerader Linie zwischen ihnen wirken. Beruht hingegen die Wechselwirkung der Körper auf der Uebertragung der Kräfte durch die Teilchen des zwischen ihnen liegenden Mediums, so werden sie unter Umständen von ihrer gradlinigen Bahn abweichen und in krummlinigem Zuge von einem Körper zum anderen übergehen. Umgekehrt wird die Gekrümmtheit einer Kraftlinie nur dadurch erklärt werden können, dass sich die durch sie gegebenen Kräfte mit Hilfe des Mediums, das sie durchsetzen, fortpflanzen. Wenn es nun schon nicht ausgeschlossen ist, dass gerade Kraftlinien, wie die der Schwere, des Lichtes und der Wärme, physische Existenz haben, so leistet jedenfalls die gekrümmte Gestalt der Kraftlinien der Annahme, dass sie physisch vorhanden sind, den grössten Vorschub. Auf diesen krummlinigen Charakter der magnetischen Kraftlinien weisen schon die einfachsten Erscheinungen in der Umgebung eines Magneten oder elektrischen Stromes hin. Jedoch besitzt die Darstellung der Linien mit Hilfe von Eisenfeilspänen keine wesentliche Beweiskraft, da ja das Eisenfeillicht selbst das magnetische Feld mehr oder weniger umgestaltet. Ein Kupferdraht hingegen, der nach Faraday die Verteilung der magnetischen Kraftlinien nicht im mindesten stört, würde hierfür schon einwurfsfreiere Belege bringen. Faraday leitet die Gekrümmtheit der magnetischen Linien aus der Natur der magnetischen Kräfte ab. Diese Kräfte sind polar, was sich durch ihre Gegensätzlichkeit an den Enden der magnetischen Achsen oder Linien ausspricht. Das wichtigste Merkmal dieser Polarität der Linien findet er in der Richtung der zu Grunde liegenden Kraft. Wenn ein Leiter durch ein magnetisches Feld geführt wird, so entsteht in ihm im allgemeinen ein Strom. Behält dieser Strom seine Richtung bei, während der Leiter sich immer gradlinig in demselben Sinne bewegt, so ist in diesem Gebiete die Polarität der geschnittenen Linien oder der magnetischen Kraft dieselbe; wäre die Richtung des Stromes die entgegengesetzte gewesen, so hätten auch die Linien die andere Polarität gehabt; ebenso, wenn bei der Bewegung des Leiters in der entgegengesetzten Richtung der nämliche Strom sich ergeben hätte. Mit Hilfe des Leiters kann also an jeder Stelle des Raumes die Polarität einer Kraftlinie aus dem Induktionsstrome, der sich beim Schneiden der Linie herausstellt, ermittelt werden, und zwar ist dies möglich nicht nur für die Umgebung des Magneten, sondern auch für sein Inneres. Es lässt sich so durch den Versuch zeigen, dass eine Kraftlinie auf ihrem Wege von einem Pole durch die Umgebung zum anderen und von diesem durch den Magneten zurück zum ersten in der nämlichen Weise auf den Leiter einwirkt, d. h. immer einen Strom derselben Richtung hervorruft, vorausgesetzt, dass sie jedesmal in demselben Sinne²¹⁾ geschnitten wird. Diese so festgestellte Abhängigkeit der beiden Seiten eines Magneten von einander, die sich durch den umgebenden Raum hindurch geltend macht, ist aber nur möglich, wenn die Kraftlinien in krummlinigem Zuge von einem Pole zum anderen gehen, und wegen dieses Charakters schreibt ihnen Faraday reelle Existenz zu.

3254, 3256,
3261, 3263,
3297

3270

3154

3307, 3164

3306

Man hat sich diese Kraftlinien als geschlossene Kurven zu denken, die im Magneten vom ³²⁶⁴ Südpol zum Nordpol gehen und vom Nordpol durch den äusseren Raum zum Südpol zurückkehren ²²). Da sie in der Umgebung eines im leeren Raume befindlichen Magneten geradeso ³²⁵⁸ vorhanden sind, wie bei einem Magneten, der von einem Stoffe umflossen ist, so ist ihre physische Existenz nicht an eine wahrnehmbare Materie geknüpft. Es ist nicht ausgeschlossen, dass der Aether, der alle Körper durchdringt und dem schon für das Licht wichtige Funktionen übertragen sind, auch für die Kraftlinien des Magnetismus von wesentlicher Bedeutung ist. In welche Verfassung nun der Aether unter dem Einflusse eines Magneten gerät, das konnte ³²⁶³ Faraday nicht entscheiden. Er ist aber auf Grund der über die magnetischen Kräfte erlangten Kenntnis überzeugt, dass in dieser Hinsicht irgend etwas wirklich vorhanden ist, und zwar ist er geneigt, diesen Zustand des Aethers, der die physische Grundlage der magnetischen Kraftlinien ausmacht, in einer Spannung zu sehen. Da er bei seinen elektrischen Arbeiten immer ⁷¹ und immer wieder auf die Notwendigkeit seines Daseins hingelenkt wurde, hat er ihn als den ^{60, 3269} elektrotonischen Zustand bezeichnet. In der ersten Reihe seiner Untersuchungen entdeckte er ⁶⁰ die Thatsache, dass der Draht, wenn er sich ruhend in einem magnetischen Felde befand, keinen Strom zeigte; wohl aber, wenn er in das Feld eingeführt, aus ihm entfernt oder in gewisser Weise in ihm bewegt wurde ²³). Während der erregende Strom oder die magnetische Kraft in ungeschwächter Stärke andauert, ist eine Beeinflussung des ruhenden Drahtes nicht zu beobachten, und doch kann man nicht annehmen, dass gerade in der Zeit, in der die elektrische oder magnetische Kraft ihren Höhepunkt erreicht hat und beibehält, eine jede seitliche Wirkung aufgehoben ist. Nun hat ein solcher Kupferdraht an sich keine magnetischen Eigenschaften gewöhnlicher Art, und die Richtigkeit der Vorstellung, dass allein die Bewegung eines magnetisch indifferenten Körpers die Veranlassung der Induktionsströme sei, war Faraday wenig wahrscheinlich. Er meinte daher, dass der Kupferdraht schon durch seine Anwesenheit in einem magnetischen Felde einen Einfluss erleidet, der nach seiner Auffassung in einer Spannung besteht, der die Teilchen des Drahtes unterliegen. Diese innere Aenderung, die er den elektrotonischen Zustand nannte, befähigt den Draht, wenn ihm eine Bewegung im Felde erteilt wird, im allgemeinen die dynamische Erscheinung eines elektrischen Stromes zu zeigen.

Zu Gunsten dieser Annahme zieht er den Parallelismus zwischen den verwandten Gebieten der elektrischen und magnetischen Kräfte und Erscheinungen heran. Er findet nämlich, dass die unentwickelten Zustände der elektrischen und magnetischen Kräfte, in denen sich die Körper befinden, wenn sie unelektrisch und unmagnetisch sind, in ihrer Natur einander entsprechen ¹⁷³⁴ und ebenso der elektrische Strom der magnetischen Kraftlinie. Während nun die Elektrizität ³²⁶⁹ noch in der Form der statischen beobachtet wird, fehlt auf Seiten des Magnetismus etwas ähnliches. Diese Lücke glaubte Faraday durch den elektrotonischen Zustand ausfüllen zu können. Die Berechtigung hierfür würde gegeben sein, wenn es sich zeigen liesse, dass dieser angenommene Zustand oder auch die ihn veranlassende Transversalkraft des elektrischen Stromes oder Magneten sich gerade so wie die elektrostatische Elektrizität fortpflanzt, nämlich von Teilchen zu Teilchen in dem benachbarten Medium. Dieser Nachweis freilich ist Faraday, wie er selbst ¹⁷²⁹ eingesteht, nicht gelungen. Seine Versuche legten ihm vielmehr den Schluss nahe, dass die vom induzierenden auf den induzierten Körper wirkenden Kräfte von den zwischen ihnen liegenden Substanzen durchaus unabhängig sind. Das Misslingen dieser Versuche und der Umstand, dass es ihm nicht möglich war, den elektrotonischen Zustand irgendwie experimentell zu bestätigen, brachten es mit sich, dass er nicht zu allen Zeiten von der Richtigkeit seiner Hypothese

60 überzeugt war. Er stellte sie im Nov. 1831 auf, und schon im Jan. 1832, nachdem er Klarheit
 231, 242 über die Abhängigkeit der Induktionserscheinungen von den magnetischen Kurven gewonnen
 hatte, liess er sie als überflüssig fallen. Jedoch hielt er immer die Meinung fest, dass ein
 Draht im magnetischen Felde nicht indifferent bleiben könne, und ebenso, dass ein Körper, sei
 er Leiter oder Nichtleiter, wenn man ihn zwischen induzierenden und induzierten Körper bringe,
 in gewisser Weise durch den Vorgang der Induktion beeinflusst werden müsse. Konnte er auch
 das, was er ahnte, nicht beweisen, so war doch sein intuitives Verständnis für die Natur des
 Vorganges so stark, dass er trotz seiner widersprechenden Versuche auf den elektrotonischen
 Zustand zurückkam, um ihn hinfort beizubehalten²⁴). Er rechnete mit der Möglichkeit, dass
 die Erfolglosigkeit seiner Bemühungen nur der noch nicht genügend gesteigerten Empfindlich-
 keit seiner Hilfsmittel zuzuschreiben war²⁵).

Die Konstitution des Magneten. Die magnetischen Kraftlinien, die infolge des
 elektrotonischen Zustandes in der Umgebung eines Magneten wirklich vorhanden sind und
 deshalb von Faraday auch als physische Kraftlinien bezeichnet werden, bilden die Grundlage
 für die Theorie, die er in betreff des Magneten aufstellt. Die ihm bekannten Theorien des
 3301 Magnetismus, nämlich die der magnetischen Flüssigkeiten und der Ampèreschen Molekularströme,
 ebenso wie die Eulersche Aetherhypothese gingen ihm über das Ziel hinaus, das er sich mit
 der seinigen steckte. Ueber den Ursprung der magnetischen Kraft oder über die Art, wie sie
 in einem magnetischen Körper erhalten bleibt, etwas auszusagen, lag nicht in seinem Vorhaben.
 3305 Berührungspunkte hat er erklärermassen mit den Eulerschen Vorstellungen. Euler²⁶) nimmt
 genau wie Faraday an, dass zwischen den Polen eine Abhängigkeit bestehe, die sich in krummen,
 geschlossenen Linien vollzieht. Nach seiner Auffassung bewegt sich das magnetische Fluidum
 in Wirbeln durch und um den Magneten und zwar immer in demselben Sinne. Dies Fluidum
 ist verschieden von dem Aether, und gerade aus diesem Umstande leitet Euler die Ursache der
 Wirbelbewegung ab. Es ist daher nicht zutreffend, wenn Faraday im Art. 3301 meint, nach
 Euler bewege sich das magnetische Fluidum oder der Aether in Strömen durch und um den
 Magneten. Die Aehnlichkeit, die Euler und Faraday in dem Rahmen des Bildes aufweisen, das
 sie vom Magneten entwerfen, ist vermutlich darin begründet, dass beide von der anschaulichen
 Darstellung der Wirkungsweise der magnetischen Kraft ausgehen, wie sie durch Eisenfeilicht
 3302 erhalten werden kann. Faraday hat nicht die Absicht, an Stelle der magnetischen Flüssigkeiten
 oder Ströme ein neues Princip einzuführen, durch das die Gedanken von vornherein in eine
 bestimmte Richtung gezwungen werden könnten, sondern er begnügt sich damit, diejenigen, die
 für ihre Vorstellung eine feste Unterlage haben wollen, auf den auch bei anderen physikalischen
 Hypothesen verwandten Aether zu verweisen. Nicht das scheint ihm ein dringendes Bedürfnis,
 3303 für die Darstellung der Kräfte eine neue Methode zu gewinnen, sondern die Erscheinungen und
 ihre Gesetze mit möglichster Naturwahrheit auszudrücken. Die alten Theorien hätten wohl
 Mittel und Wege geboten, um die magnetischen Kräfte der Rechnung zu unterwerfen und be-
 kannte Erscheinungen auch zahlenmässig zu zergliedern, sie würden ihn aber nie zur Entdeckung
 neuer Erscheinungsgebiete geführt haben. Da die Vorstellung von den magnetischen Kraftlinien
 ihn befähigt hat, neue Wirkungen des Magnetismus, wie die diamagnetischen und die magne-
 tische Drehung des Lichtes aufzufinden, so ist er der Ueberzeugung, dass diese Linien der
 Natur des Magnetismus am meisten entsprechen.

3301 Er nimmt hiernach den Magneten als ein Kraftzentrum an, von dem Kraftlinienbündel
 ausgehen. Am Nordpol verlassen sie den Magneten, wenden sich in krummlinigem Zuge nach

dem Südpol und kehren durch den Magneten an ihren Ausgangsort zurück. An einer Stelle vergleicht er den Magneten mit einer Sonne, die gekrümmte Strahlen aussendet. Diese Linien sind Repräsentanten der magnetischen Kraft im Inneren wie im Aeusseren des Magneten; sie geben ein Bild davon, wie die Uebertragung der Kraft nach einem beliebigen Orte zu stande kommt. Aus ihnen besteht die Kraftatmosphäre, welche die Umgebung des Magneten physisch erfüllt. Es kommt ihnen insofern eine gewisse Unabhängigkeit vom Magneten zu, als sie nicht notwendig mit ihm rotieren müssen; vielmehr kann man sich in gewissen Fällen vorstellen, dass sich der Magnet innerhalb seines eigenen Kraftsystemes um seine Achse dreht. Diese Kraftatmosphäre wird von Faraday in Krafröhren oder Sphondyloide zerlegt. Um dieses Gebilde kennen zu lernen, wollen wir uns einen einfachen Magnetstab mit kreisförmigem Querschnitt denken. Sein magnetisches Feld ist offenbar symmetrisch zur Stabachse. Drehen wir eine geschlossene Krafflinie um diese Achse, so wird von ihr ein Raum umschrieben, den Faraday eine Krafröhre oder Sphondyloid nennt. Bringt man eine sehr kleine Magnetnadel an einen beliebigen Punkt der Oberfläche der Krafröhre, so stellt sie sich tangential zu ihr ein und bewegt man sie in ihrer Richtung, so bleibt sie immer auf ihr. Auch der Raum, der zwischen zwei solchen Oberflächen liegt, kann als Krafröhre aufgefasst werden. Durch die Begrenzungsfläche des Magneten wird das ganze Sphondyloid in ein inneres und ein äusseres geschieden. Diese Gebilde²⁷⁾ haben, wenn der Magnet nicht die genannte einfache Gestalt hat, natürlich mehr oder weniger unregelmässige Form; eine solche Verzerrung tritt schon bei dem Hufeisenmagneten ein. Diese den Magneten umgebende Kraftatmosphäre erstreckt sich im allgemeinen ins Unendliche; jedoch kann sie durch benachbarte magnetische Kraftsysteme auf einen kleineren Raum eingeengt werden. Das Sphondyloid, das in solchem Falle die ganze Kraft des Magneten darstellt, giebt nach Faradays Meinung genau den Kraftbetrag, den das unendlich grosse, das dem freien Zustande des Magneten entspräche, zeigen würde. Dieser Kraftbetrag kann durch einen Leiter ermittelt werden, den man mit den Linien des Sphondyloides zum Schnitte bringt. Durch Versuche hat er weiter gezeigt, dass einer äusseren Krafröhre genau soviel Kraft zukommt, wie der zugehörigen inneren. Diese Kraftatmosphäre des Magneten suchte er zu veranschaulichen, indem er die Verhältnisse einer Voltaschen Batterie zum Vergleich heranzog. Er denkt sich eine solche Batterie in Wasser untergetaucht, so dass dieses den äusseren Stromschluss bildet. Durch und um die Batterie kreisen elektrische Ströme, die durch eine kleine Magnetnadel, die man in das Wasser einführt, oder durch ein Galvanometer, dessen Drahtenden man in das Wasser hält, oder auf elektrolytischem Wege nachgewiesen werden können, ebenso wie die Art ihrer Verteilung im Wasser. Geradeso nun, wie die Ströme durch und um die Batterie wandern, verbreiten sich im Magneten und in seiner Nähe Krafflinien, die in sich geschlossene Kurven bilden.

Weiter wird der Verlauf der äusseren Krafflinien wesentlich bedingt von dem Medium, in dem der Magnet sich befindet. Wie in dem oben angezogenen Beispiele der Voltaschen Batterie das Wasser, unter das die Batterie getaucht wurde, die Voraussetzung für das Zustandekommen eines elektrischen Stromes war, so ist es für die Wirksamkeit eines Magneten das, was ihn umgiebt. Worin nun aber dieses Medium besteht, hat Faraday nicht aufklären können. Da sich die magnetischen Erscheinungen, seien sie nun para- oder diamagnetischer Art, ebenso in Luft oder einer anderen Substanz, wie im leeren Raume abspielen, so ist es in dem letzteren ebenfalls vorhanden; vielleicht ist der Aether mit ihm identisch. Jedenfalls ist nach Faraday kein magnetischer Vorgang möglich ohne dieses Medium, das erst die Verbindung der Pole mit

einander in krummlinigem Zuge herstellt, und es ist somit ein bedeutsamer Teil eines jeden magnetischen Systemes²⁸⁾. In seinen Eigenschaften und Wirkungen hängt es von dem wahrnehmbaren Stoffe in der Nachbarschaft des Magneten ab. Die Kraftlinien, die den Magneten verlassen, werden beim Austritte in den Raum mehr oder weniger von ihrer Bahn abgelenkt, und zwar hängt der Grad dieser Ablenkung oder Brechung von dem magnetischen Verhalten des den Magneten umgebenden Stoffes ab, d. h. von seiner Fähigkeit, die magnetischen Polaritäten mit einander zu verbinden oder die physischen Kraftlinien fortzuleiten. Faraday nennt diese Eigenschaft der Stoffe ihre magnetische Leitungsfähigkeit und hat sie eingehend untersucht. Weiches Eisen und überhaupt die paramagnetischen Körper erleichtern den Kraftlinien den Durchgang; sie führen infolgedessen mehr Kraftlinien durch sich hindurch, als durch den Raum, den sie einnehmen, an sich gehen würden. Es findet durch solche Körper eine Konzentration der Kraftlinien oder eine Zusammenziehung der Sphondyloide statt. Diamagnetische Körper verhalten sich gerade umgekehrt; sie bieten den Linien einen grösseren Widerstand als der Raum an sich; die Kraftlinien weichen deshalb von ihnen zurück; es tritt eine Ausweitung der Kraftröhren ein. In dieser von Faraday über die Natur des Magneten aufgestellten Ansicht spielt die Umgebung eine entscheidende und eigentümliche Rolle. Mit besonderem Eifer sucht er daher ihre Wirksamkeit zu erläutern und begrifflich zu machen und zieht zu diesem Zwecke die einfachsten magnetischen Erscheinungen heran, um an ihnen zu zeigen, wie zwanglos sie sich erklären lassen, wenn man das umgebende Medium als einen notwendigen Bestandteil jedes magnetischen Systemes auffasst.

Erklärung einfacher magnetischer Erscheinungen. Wenn man den Einfluss, den die Stoffe in der Nachbarschaft eines Magneten ausüben, auf eine verschiedene magnetische Leitungsfähigkeit zurückführt, so wird man zu der Vorstellung gedrängt, dass die magnetischen Kraftlinien ganz ähnlich wie der elektrische Strom in dem Stoffe, den sie durchsetzen, einen Widerstand erfahren. Stehen ihnen nun verschiedene Wege zur Verfügung, so werden sie den bevorzugen, der ihnen den geringsten Widerstand bietet. Wird z. B. ein Hufeisenmagnet mit einem Anker aus weichem Eisen versehen, so beobachtet man zu beiden Seiten des letzteren eine wesentliche Schwächung des Feldes. Dies findet darin seine Erklärung, dass die magnetischen Kraftlinien das weiche Eisen des Ankers leichter durchdringen als die Luft; deshalb werden sie ihren Weg möglichst durch das Eisen nehmen und in der umgebenden Luft spärlicher auftreten. Hier ist das Feld, wie sich auch durch den Versuch nachweisen lässt, schwächer geworden. Hat man anderseits einen Hufeisenmagneten bei vorgelegtem Anker bis zur Sättigung magnetisiert, so wird durch Abnehmen des Ankers seine Kraft eine plötzliche Verminderung erfahren. Nach dem Abziehen des Ankers steht den Kraftlinien nur der Weg durch die weniger gut leitende Luft offen; sie finden in ihr einen grösseren Widerstand und werden daher durch sie in geringerer Anzahl gehen als vorher durch das Eisen. Die Aufrechterhaltung der magnetischen Kraft in der mit Hilfe des Ankers erreichten Stärke ist nicht mehr möglich. Diese Ueberlegenheit des Eisens über die Luft ist besonders deutlich bei einem Ringmagneten²⁹⁾. Hier benutzen die Kraftlinien nur den günstigen Weg durch das Eisen und treten so gut wie gar nicht in die Luft hinaus, so dass ein solcher Magnet, wie hoch auch seine Kraft gesteigert sein mag, nach aussen keinen Magnetismus zeigt. Die Verhältnisse werden aber sofort geändert, wenn man einen solchen Magneten öffnet, d. h. ein Stück des Ringes ausschneidet. In der entstandenen Lücke werden nun Kraftlinien erscheinen, die ihren Weg notgedrungen durch die Luft nehmen müssen und von dem Vorhandensein der magnetischen Kraft auch im undurch-

brochenen Zustände Zeugnis ablegen. Auch die Thatsache, dass ein Magnet, dem man weiche Eisenstücke an die Pole gelegt hat, auf einen höheren Grad magnetischer Stärke gebracht werden kann als ohne sie, zeigt deutlich den entscheidenden Einfluss des umgebenden Mediums. Die Eisenstücke können immer so an den Polen befestigt werden, dass der Raum längs der Kraftlinien zwischen den Polen verkürzt oder der quer zu ihnen verbreitert wird. Beide Umstände sind aber geeignet, den Uebergang der Linien von Pol zu Pol zu erleichtern; denn der Widerstand in einer Luftstrecke wird sowohl durch ihre Verkürzung als auch ihre Verbreiterung herabgemindert. Diese Verringerung des Widerstandes, den die Kraftlinien im Aeusseren zu überwinden haben, kommt ihrer Entfaltung im Inneren des Magneten zu gute und erhöht die magnetische Kraft. Hieraus erklärt sich auch der Nutzen, den die Armatur einem natürlichen Magneten bringt.

Eine weitere Bestätigung der angenommenen Wirksamkeit des äusseren Mediums ist darin zu finden, dass kleine Magnete im Verhältnisse zu ihrer Grösse eine weit höhere magnetische Intensität erreichen können als ihnen ähnliche grössere. Denkt man sich einen Magnetstab aus vielen kleinen bestehend, so hätte ein jeder für die Stärke der magnetischen Kraft, deren er fähig ist, eine gewisse Umgebung nötig; um sie ihm unverkürzt zu verschaffen, müsste man die Teilstäbe in gehöriger Weise von einander entfernen oder dem ganzen Magnetstabe müsste ein viel ausgedehnteres äusseres Medium geboten werden, wenn er die Stärke haben sollte, welche der Summe seiner Teile entspräche. Bei Vereinigung der kleinen Stäbe zu einem Stabe ist nicht in gleichem Masse mit ihrer Anzahl auch das verfügbare äussere Medium gewachsen. Da dieses aber eine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung der magnetischen Kraft ist, so hat der grössere Magnet eine relativ geringere Stärke. Ganz ähnlich verhält es sich mit der Abhängigkeit der magnetischen Kraft von der Länge und Dicke der Stäbe. Bringt man zu einer Magnetnadel verschiedene ebensolche Nadeln, die man mit gleichnamigen Polen nebeneinander zu einem magnetischen Systeme vereinigt, so hat das äussere Medium neben der Aufrechterhaltung der Kraft der ursprünglichen Nadel ebendasselbe für die übrigen zu leisten; seine Leistungsfähigkeit ist aber eine begrenzte, und so ist eine unbeschränkte Steigerung des Magnetismus durch Vergrössern der Dicke nicht möglich. Ordnet man gleichstarke unveränderliche Magnetnadeln hintereinander an, so dass sie die ungleichnamigen Pole einander zukehren, so verschmelzen die Kraftatmosphären der Nadeln zu einer gemeinsamen, deren Länge entsprechend gewachsen ist. Wenn hier die magnetische Kraft unverändert geblieben ist, so hängt dies damit zusammen, dass die Verlängerung des Weges im äusseren Medium wie ein Widerstand betreffs der Kräfte, die sich im Innern der Nadeln entfalten, wirkt. Sehr deutlich offenbart sich der Einfluss von Länge und Dicke eines Stabes auf seine magnetische Kraft dann, wenn er eben magnetisiert werden soll. Hat man Stäbe von verschiedenem Querschnitte, aber gleicher Länge, so zeigt sich dem Obigen entsprechend, dass ihre magnetischen Kräfte langsamer wachsen als ihre Querschnitte. Bei gleichem Querschnitte kann den längeren Stäben ein höherer Magnetismus erteilt werden. Es ist deshalb von Vorteil, den Magneten durch gleich starke Eisenstücke zu verlängern. Den Linien wird hierdurch ein Weg von guter Leitungsfähigkeit geboten, und durch Vergrösserung der Oberfläche wird eine innigere Beziehung zu dem äusseren Medium ermöglicht. Beides wirkt auf die Erhöhung der magnetischen Kraft oder auf die Erregung von Kraftlinien in grösserer Zahl im Inneren des Stabes ein. Freilich hat auch die Verlängerung ihre Grenzen. Die Zahl der inneren Kraftlinien kann nicht beliebig gesteigert werden, sondern ist beschränkt durch das Fassungsvermögen des Querschnittes des Stabes am Aequator, durch

den sie alle gehen. Hat man z. B. einen sehr langen dünnen Draht zu magnetisieren, so ist dies wegen des kleinen Querschnittes in einheitlicher Weise überhaupt nicht möglich; er zerlegt sich, und zwar bald so, bald so, in eine Reihe geschlossener magnetischer Teile; es treten in ihm sogenannte Folgepole auf. Faraday fasst das Ergebnis in dem Satze zusammen: Die magnetische Kraft eines zu magnetisierenden Stabes wächst mit seiner Länge und Dicke; jedoch wird die vorteilhafte Wirkung der Verlängerung schliesslich durch die Zunahme des inneren Widerstandes und die der Vergrösserung der Dicke durch das Anwachsen des äusseren aufgehoben.

Geht man schliesslich auf die Erscheinungen ein, die sich bei einer Vereinigung von permanenten Magneten zeigen und im wesentlichen auf Anziehung und Abstossung hinauskommen, so sieht man, dass sich auch hier eine sachgemässe Erklärung auf Grund der Faradayschen Ansichten darbietet. Die Linien solcher magnetischen Systeme, deren Wirkungsbereiche sich treffen, haben das Bestreben, sich einen Weg auszusuchen, auf dem sie den geringsten Widerstand finden, oder die besten Leiter zu durchsetzen. Eine jede noch so verwickelte Zusammenstellung von Magneten und anderen Körpern lässt sich nach diesem Grundsatz verstehen, und die Darstellung des Feldes durch Eisenfeilspäne giebt eine schöne Bestätigung von diesem Verhalten der Linien. Die magnetischen Anziehungen und Abstossungen kann man hiernach als Differentialwirkungen auffassen zwischen den Magneten und den Substanzen in ihrer Umgebung. Ein jeder Körper sucht sich in einem magnetischen Felde so einzustellen, wie es seiner magnetischen Leitungsfähigkeit zukommt; gute Leiter dringen, falls sie ihrem Streben folgen können, nach Orten starker magnetischer Wirkung vor, während schlechte Leiter vor ihnen zurückweichen. Liegen die Substanzen fest und unbeweglich, so ziehen sie die Kraftlinien zu sich heran oder stossen sie ab, je nachdem sie para- oder diamagnetisch sind, und schaffen sich so Orte magnetischer Wirkung, die ihrer Leitungsfähigkeit entsprechen. Dass diese Erscheinungen von Anziehung und Abstossung nichts im Wesen Verschiedenes sind, zeigt sich klar in einem von Faraday angeführten Experimente, bei dem man die Abstossung in Anziehung ohne eine andere Aenderung als die einer Lage überführen kann. Zwei Eisenkugeln, die sich in einem gleichförmigen magnetischen Felde befinden, werden sich abstossen, wenn sie im magnetischen Aequator, etwa in symmetrischer Lage zur magnetischen Achse, aufgehängt sind; dreht man sie so, dass sie schliesslich in der magnetischen Achse einander gegenüber stehen, so nimmt die Abstossung allmählich ab und schlägt in Anziehung um.

II. Die Versuche und ihre Ergebnisse.

Im vorangehenden habe ich versucht die Vorstellungen darzulegen, die sich Faraday in betreff des Magneten und seines Liniensystemes gebildet hat; im folgenden soll auf die hauptsächlichsten Experimente hingewiesen werden, durch die er seine Ansichten, soweit sie nicht rein spekulativ sind, stützte und die Eigenschaften der magnetischen Linien näher kennen lernte.

Die Methode der Untersuchung mit dem elektrischen Leiter. Es bieten sich für die Untersuchung des Feldes eines magnetischen Systemes zwei Methoden dar; entweder bedient man sich einer Magnetnadel, die im Felde Anziehungen und Abstossungen zeigt, oder eines Leiters, in dem Induktionsströme entstehen, wenn er im Felde bewegt wird. Die experimentellen Angaben, die man auf diesen beiden, ihrem Wesen nach verschiedenen Wegen gewinnen kann, unterscheiden sich nicht nur durch die Art ihrer Ermittlung, sondern auch durch

ihre Natur selbst, so dass man vermuten kann, eine jede Methode werde eigenartige Einblicke 3176, 3083
in den Magnetismus gewähren. Faraday zieht die Untersuchung mit dem Leiter vor. Da in
diesem Falle der induzierte Strom über die Verhältnisse des magnetischen Feldes Auskunft
gibt, so ist es von Wichtigkeit, zu wissen, wie die Richtung des Stromes und die Polarität der
magnetischen Linien von einander abhängen. Schon in der ersten Reihe seiner Untersuchun-
gen weist Faraday darauf hin, dass der Induktionsstrom entgegengesetzt gerichtet ist mit dem 38
Strome, der in dem Leiter fließen müsste, wenn von ihm magnetische Kräfte derselben Polarität,
wie die erregenden, auf elektromagnetischem Wege hervorgerufen werden sollten. Um auf die
Richtung des zu erwartenden Induktionsstromes schliessen zu können, braucht man sich daher
nur der Ampèreschen Schwimmregel zu bedienen. Jedoch stellt er im weiteren eine direkte
Regel auf, die an den Erdmagnetismus anschliesst und für die nördliche Halbkugel giltig ist.
Stellt ein Mensch mit seinem Körper den Leiter dar und bewegt sich mit ausgestreckten Armen 3079
vorwärts, so geht unter dem Einflusse des Erdmagnetismus ein Strom vom rechten Arm durch
den Körper nach links. Löst man diese Regel von der besonderen Beziehung zum Erdmagne-
tismus ab, so kann man sie in der folgenden Form aussprechen: Denkt man sich einen Men-
schen so in die Kraftlinien gestellt, dass sie von Kopf zu Fuss verlaufen, so geht bei einer
Vorwärtsbewegung der Induktionsstrom von rechts nach links³⁰). In der ersten Reihe seiner
Untersuchungen giebt Faraday selbst für die Bestimmung der Richtung des Induktionsstromes
eine allgemeine Regel an, die aber weniger vorteilhaft ist als die obige. Man könnte ihr unter
Zusammenfassung der hervorgehobenen Einzelfälle die folgende Form geben: Denkt man sich 114
durch die Achse eines cylindrischen Magneten eine Ebene gelegt, in welche die Bewegungs-
richtungen eines zu ihr senkrechten Leiterstückchens fallen, so geht der Strom, falls der ausser-
halb der Ebene befindliche Beobachter den Leiter um den Nordpol rechts herum bewegt, zu
ihm hin und bei entgegengesetzter Bewegung von ihm weg. Für den Südpol kehren sich die 115
Richtungen um. Dieser Regel giebt er eine etwas handlichere Form, indem er die Klinge eines
Messers als Hilfsapparat heranzieht. Sie lautet: Hält man eine Messerklinge über einen Magneten, 116
so dass die Schneide nach oben weist und die vom Nordpol ausgehenden Linien die gekerbte
Seite treffen, so geht der Strom, wenn man das Messer mit der Schneide voranbewegt, nach der
Spitze, hingegen nach dem Heft, wenn man den Rücken voranbewegt³¹). Er macht die An-
wendung dieser Regel noch besonders bequem, indem er die Herstellung eines einfachen Holz-
modelles angiebt. Ein cylindrisches Stück Holz stellt den Magneten dar, ein durch seine Achse
gehender Faden ohne Ende eine Kraftlinie und ein flaches Holzstückchen, durch das der Faden
hindurchgelegt wird, die Messerklinge.

Der Leiter empfiehlt sich bei magnetischen Untersuchungen vor allem dadurch, dass er
das magnetische Feld nicht beeinflusst, falls nicht seine Masse, wie etwa bei dicken Scheiben, 3176
beträchtlich ist. Die Angaben der Nadel hingegen leiden unter dem Uebelstande, dass sie selbst
nach Massgabe ihrer magnetischen Leitungsfähigkeit Kraftlinien zu sich hinzieht und, wenn sie 3280
aus hartem Stahl hergestellt ist, nur soviel Linien durch sich hindurchleiten kann, als sie selbst
zu erregen vermag. Man wird daher z. B. in der Nähe oder in Höhlungen von weichen Eisen-
massen durch sie nur ungenaue Auskunft über die wirklichen Aenderungen im Felde erhalten. 3279
In solchen Fällen verhält sie sich möglicherweise nahezu indifferent gegenüber dem Hauptmagne- 3293
ten. Mit Hilfe des Drahtes war Faraday im stande, die besondere Wirkung des weichen Eisens
im magnetischen Felde, die in der Zusammendrängung der Linien in seiner Masse besteht, richtig 3279
zu ermitteln. Es kann auch der Fall eintreten, dass der magnetische Körper, der zur Unter-

suchung des Feldes dient, keinen Aufschluss über die Polarität der Linien giebt, indem er sich je nach den Umständen bald in die Richtung der magnetischen Achse, bald zu ihr senkrecht oder äquatorial einstellt. Ein Röhrchen mit einer Lösung von Eisenvitriol zeigt zwischen den 3315, 3155 Polen eines starken Elektromagneten die erstere Einstellung in Luft oder einer schwächeren Lösung, die letztere in einer stärkeren Lösung, und doch hat sich die Richtung der magnetischen Linien, wie durch den Draht nachgewiesen werden kann, nicht geändert; in beiden Fällen haben sie dieselbe Polarität. Ein weiterer Vorzug des Leiters besteht darin, dass der Induktionsstrom von dem magnetischen Verhalten des Stoffes unabhängig ist; so lassen Eisen, Kupfer und Wis- 3152 muth den Induktionsstrom ganz in gleicher Weise entstehen; nur ist seine Stärke in ihnen verschieden und zwar gemäss der elektrischen Leitungsfähigkeit der Stoffe. Ferner ist der Leiter im leeren Raume und in der Luft ebenso gut verwendbar wie in Flüssigkeiten und Gasen, und 3081, 3116 sogar das Innere des Magneten kann der Untersuchung durch ihn zugänglich gemacht werden; die Magnetnadel versagt in dieser Beziehung gänzlich. Schliesslich eröffnet der Leiter die Aus- 3082 sicht, die Kraftwirkung, die einem gewissen Teile der Linien eines Feldes oder einem Querschnitte durch dasselbe eigen ist, zu finden oder den Kraftbetrag mehrerer solcher Schnitte mit einander zu vergleichen. Die Nadel würde nur in ungenügender Weise solchem Zwecke dienen können. Nur in einem Punkte steht der Leiter nach Faradays Meinung hinter der Nadel zu- 3083 rück, das ist in betreff der Empfindlichkeit; jedoch hatte er die Ueberzeugung, dass sie einer wesentlichen Steigerung fähig sei.

Die Wirkungsweise des Leiters. In welcher Weise ist nun ein solcher Leiter durch das magnetische Feld zu führen, damit eine deutliche Wirkung auf die Galvanometernadel eintritt? Schon bei seinen ersten Versuchen erkannte Faraday mit aller Bestimmtheit, dass 217, 3078 durch Bewegung des Leiters in einem gleichförmigen Felde quer durch die Kraftlinien³²⁾ die stärksten Induktionsströme erhalten werden. Hingegen sei es minder vorteilhaft, ihn von Orten mit schwächerer zu Orten mit stärkerer magnetischer Kraft oder umgekehrt zu bewegen. Zur 217 Erläuterung zieht er den Erdmagnetismus heran. Sein magnetisches Feld kann an dem Beobachtungsorte als durchaus gleichförmig angesehen werden; alle Linien laufen, sofern sie der Erdoberfläche nahe liegen, in der Richtung, welche die Inklinationsnadel des Ortes anzeigt. Versetzt man eine horizontale Scheibe, die also mit der Inklinationsrichtung im mittleren Europa einen Winkel von 60° bis 68°³³⁾ bildet, in Rotation, so kann man einen elektrischen Strom beobachten, wenn man die Drahtenden eines Galvanometers mit ihrem Mittelpunkte und 153 einem Peripheriepunkte verbindet. Hingegen bleibt der Strom aus, wenn man die Scheibe in eine Ebene bringt, welche die Inklinationsrichtung enthält, und in ihr sich drehen lässt. Im ersten Fall durchqueren die radialen Teile der Scheibe die parallelen Kraftlinien des gleichförmigen Feldes. Im letzteren findet kein Schneiden der Linien statt. Da die Drehung der Scheibe sich vollständig in einer zur Inklinationsrichtung parallelen Ebene vollzieht, so gleiten ihre Teile 161 längs der Linien wie an Schienen hin. Auf einer sich drehenden Metallkugel, deren Achse mit der Inklinationsrichtung nicht zusammenfällt, sondern mit ihr einen Winkel, z. B. von 90°, bildet, entstehen Induktionsströme, die von Pol zu Pol um die Kugel herumlaufen und von 163 Faraday mit Hilfe einer kleinen astatischen Magnetnadel nachgewiesen wurden. Bei dieser Drehung schneiden die Metallteile der Kugel die Kraftlinien, und zwar in verschiedenem Sinne, je nachdem sie ober- oder unterhalb liegen von der zur Inklinationsrichtung winkelrechten Ebene, in welcher sich im angenommenen Falle die Drehungsachse befindet. Die entstehenden Ströme vereinigen sich zu einem gemeinsamen, der die Kugel in der angegebenen Art umfließt;

fällt die Drehungsachse in die Richtung der Inklinationsnadel, so kann ein Strom am Pole und Aequator abgenommen werden, da dann die Verhältnisse ähnlich liegen, wie bei der rotierenden horizontalen Scheibe. Das nämliche suchte Faraday zu zeigen mit einem Drahtrechtecke, dessen horizontale Seite ein Galvanometer enthält. Drehte man das Rechteck um diese Seite, so entstand immer ein Strom, ob sie sich nun im magnetischen Meridian oder dazu senkrecht oder in irgend welcher Neigung zu ihm befand; nur wenn man den beweglichen Teil des Drahtes parallel zur Inklinationsrichtung auf- und abwärts bewegte, blieb ein Induktionsstrom aus. Dem Angeführten kann man entnehmen, dass im gleichförmigen Felde der Uebergang eines Leiters von einer Stelle zu einer anderen nur dann der Erzeugung eines Induktionsstromes günstig ist, wenn dabei magnetische Kurven geschnitten werden. Dies steht im Einklange mit der Thatsache, dass man die Richtung einer Kraftlinie im gleichförmigen ebenso wie im ungleichförmigen Felde findet, indem man ein Leiterstück, ohne einen Induktionsstrom in ihm hervorzurufen, durch das Feld bewegt. Hierbei wird der Leiter im allgemeinen durch Stellen verschiedener Stärke hindurchgeführt, jedoch so, dass keine Linien geschnitten werden. Zur weiteren Bestätigung sei noch der von Faraday ausgeführte charakteristische Versuch mit einer Kupferscheibe erwähnt, die in dem Felde eines starken Hufeisenmagneten rotiert. Auch das Feld eines solchen Magneten, soweit es unmittelbar zwischen den Polen liegt, kann man als gleichförmig betrachten. Dreht man die Scheibe, während ihre Achse mit der magnetischen zusammenfällt oder ihr parallel ist, so werden die Linien von ihr unter rechten Winkeln geschnitten und es tritt ein Strom in der einen oder anderen Richtung längs ihrer Radien auf, verlegt man hingegen die Drehungsachse der Scheibe in den magnetischen Aequator, so werden nun die Linien des gleichförmigen Feldes nicht mehr geschnitten, da sie jetzt der Scheibe parallel sind, und es zeigt sich nicht die geringste Tendenz zur Bildung eines Stromes in der Scheibe.

Aus alledem ergibt sich: das für die Erzielung eines Induktionsstromes Ausschlaggebende ist das Schneiden der Kraftlinien³⁴). Je nach der Art wie die verschiedenen Teile eines beweglichen Leiters die Linien durchqueren, können sie in demselben oder in entgegengesetztem Sinne wirksam sein, d. h. zu gleich- oder zu entgegengesetztgerichteten Induktionsströmen Veranlassung geben. Nach Massgabe der Bewegung und Gestalt des Leiters entspricht der schliesslich entstehende Strom allen diesen einzelnen Impulsen. Dabei ist es theoretisch wenigstens gleichgiltig, ob die Linien senkrecht oder schief geschnitten werden. Die Wirkung bleibt die nämliche, wenn nur der Leiter immer mit den nämlichen Linien zum Schnitte kommt.

Der Apparat. Zur Untersuchung der Kraftlinien nach dem geschilderten Wirkungsprincipe bediente sich Faraday eines einfachen Apparates, der nun zuerst beschrieben werden soll. Auf einem Holzbrettchen befinden sich zwei vertikale Ständer, die zwischen sich eine drehbare hölzerne Welle tragen. Letztere ist zu beiden Seiten ihrer Achse so eingeschnitten, dass zwei gleiche Magnetstäbe parallel und symmetrisch zur Drehungsachse gelagert werden können und zwar mit den gleichnamigen Polen nebeneinander. Die schmale Scheidewand, die beide Stäbe trennt, ist von der Mitte, dem Aequator der Stäbe, aus nach einer Seite bis zur Drehungsachse ausgehoben und die entstandene Kerbe bis ans Ende der Welle fortgesetzt. Auf dem Boden der Kerbe führt von dem Ende der Welle aus ein Draht hin, der am Aequator der Stäbe nach aussen tritt und jenseits der beiden Pole, zwischen welchen er hindurchgeht, zurück zur Welle gelangt. Die von einander isolierten Enden des Drahtes können mit einem Galvanometer verbunden werden. Der im Inneren längs der Drehungsachse verlaufende Draht des Leiters kann herausgehoben werden. Es ist in folgedessen möglich, den Magneten für sich ohne

den Leiter rotieren zu lassen. Eine Teilung der inneren und äusseren Leitung wird vermittels
 3097 eines Kupferringes erzielt, der Magnetstäbe und Welle am Aequator umgiebt, und auf dem der
 äussere Leiter schleift. Da mit dem Ringe die innere Leitung in Verbindung steht, so gelingt
 es, den inneren wie den äusseren Teil der Leitung für sich in Umschwung zu versetzen. Die
 Einrichtung ist so getroffen, dass der innere Leiter ganz oder teilweise durch den Magneten
 3098 ersetzt oder auch unter Anwendung eines radialen Drahtstückchens von dem Magneten voll-
 ständig isoliert werden kann; der achsiale Teil des inneren Leiters ist für sich allein drehbar.

Um die Wirkungsweise des Apparates zu verstehen, werden einige Bemerkungen über die
 Art und Weise am Platze sein, wie die Kraftlinien von dem beweglichen Leiterteile geschnit-
 ten werden. Die Ebenen eines magnetischen Feldes, die durch die Achse des cylindrisch ge-
 3100 dachten Magneten gehen, nennt Faraday Hauptebenen³⁵⁾. In einer solchen Ebene denken wir
 uns den Draht, soweit er ausserhalb des Magneten verläuft, von einem Punkte des Aequators
 über einen Pol hinweg nach einem beliebigen Punkte der magnetischen Achse gerichtet³⁶⁾ und
 von da aus nach dem gegenüberliegenden Aequatorpunkte fortgesetzt. Ein solcher Draht wird
 alle Linien der Hauptebene einmal schneiden, ebenso wie ein Draht, der im Achsenpunkte endet,
 3101 nur die Hälfte dieser Linien durchkreuzt. Dreht man den letzteren Draht um diesen Achsen-
 punkt oder, falls er die Endfläche³⁷⁾ des Magneten in einem anderen Punkte trifft, um diesen,
 während sein anderes Ende am Aequator schleift, so wird er bei einer Umdrehung alle Linien
 des Feldes einmal schneiden. Ein solcher Schnitt aller Linien des magnetischen Feldes tritt
 auch bei einem beliebig geformten Magneten ein, etwa einem Hufeisenmagneten, wenn das eine
 Ende des Drahtes in irgend einem Punkte der Oberfläche dem Magneten aufliegt und das andere
 so am Aequator entlang um ihn herumgeführt wird, dass dabei die Drahtschleife über einen
 der Pole³⁸⁾ hinweggeht.

3091 Versuche. Wenn man den äusseren Teil des Leiters oder den Magneten mit dem innen
 verlaufenden Leiterteile dreht, ergeben sich Induktionsströme, die entgegengesetzte Richtungen
 haben, falls die Drehung beide Male in demselben Sinne erfolgt. Im ersten Falle stimmt die
 Richtung des Stromes mit der überein, auf welche die früher angegebenen Regeln führen, so
 dass sie durch das Experiment bestätigt werden. Man hat sich zur Erklärung des Vorganges
 vorzustellen, dass der äussere Leiter bei einem Umschwunge alle Kraftlinien des Feldes einmal
 schneidet und zwar in demselben Sinne, d. h. so, dass überall an den wirksamen Teilchen des
 Leiters ein Strom der nämlichen Richtung in ihm entsteht. Auch in dem anderen Falle, wo
 sich der Magnet bewegt und der äussere Leiter festliegt, kann man nach den angezogenen Re-
 geln die Richtung des Induktionsstromes im voraus bestimmen, wenn man aus dem obigen
 Versuche folgert, dass eine Drehung des Magneten ebenso wirkt, wie eine Drehung des äusseren
 Leiters in entgegengesetzter Richtung. Werden Magnet und Leiter gleichzeitig in Umschwung
 3092 gesetzt, so entsteht kein Induktionsstrom. Die entgegengesetzt gerichteten Ströme, die durch
 die gleichsinnigen Drehungen des Magneten und des äusseren Leiters hervorgerufen werden, sind
 in ihrem absoluten Betrage gleich und neutralisieren einander. Nimmt man nun den Leiter aus
 3094 der Achse heraus, verlegt ihn nach aussen und dreht bei festgehaltenem Leiter den Magneten,
 3093 so ergiebt sich kein Strom. Da auch bei gleichzeitiger Rotation von Magnet und Leiter kein
 Induktionsstrom auftritt, so ist bei Bewegung des Leiters allein eine von Null verschiedene
 Wirkung nicht vorhanden. Geht der Draht in einer Hauptebene von Pol zu Pol und liegt dem
 3102 Aequator an, so schneidet er die Hälfte aller Linien dieser Ebene zweimal (oder eine gerade
 Anzahl mal), und dies geschieht auch, wenn er dem Aequator nicht anliegt, mit den Linien, die

er überhaupt schneidet³⁹⁾. Wird eine Linie mehrere Male von einem Leiter geschnitten, so geschieht dies an benachbarten Stellen notwendig in entgegengesetztem Sinne, da die positive Richtung der Kraftlinien an solchen Stellen für einen, der sich längs des Drahtes vorwärts bewegt, zu verschiedenen Seiten liegt. Deshalb zeigt sich bei Drehung des Leiters um den Magneten kein Strom. Die Ströme, die sich in den verschiedenen Teilen des Drahtes bilden wollen, haben immer gleiche Stärke und entgegengesetzte Richtung. Hält man den Draht fest und lässt den Magneten um seine Achse rotieren, so ist ebenfalls keine Ablenkung am Galvanometer zu spüren. Um hierfür eine Erklärung zu finden, stellt sich Faraday die Zustände im Inneren eines Magneten ganz entsprechend denen in der Umgebung vor. Die nach innen sich fortsetzenden Linien werden von der Masse des Magneten selbst zweimal in entgegengesetztem Sinne geschnitten, wodurch das Ausbleiben der Wirkung veranlasst wird. Der Grundsatz, der in diesen Erscheinungen zum Ausdrucke kommt, ist von ihm in dem sogenannten Neutralitätsgesetze niedergelegt worden, das man etwa so aussprechen kann: Schneidet ein um die Achse eines Magneten rotierender Leiter eine Kraftlinie zweimal, so neutralisieren sich die durch die Schnitte erregten Ströme. 3102

Der unveränderliche Kraftbetrag der Linien. Eine wichtige Folgerung aus diesem Satze ist, dass der Schnitt einer Kraftlinie, wo er auch immer stattfindet, eine Wirkung von unveränderlicher Grösse ausübt. Dieser Eigentümlichkeit wird Faraday schon bei der Begriffsbestimmung der Kraftlinien gerecht, indem er einer solchen Linie einen unveränderlichen Kraftbetrag zuschreibt, den sie in ihrem ganzen Verlaufe bewahre. Jedoch gab er auch eine Bestätigung dieser Verhältnisse durch geeignete Versuche. Das zu beweisende Gesetz spricht er in Art. 3109 in der folgenden Form aus: Der Betrag der magnetischen Kraft, wie er in der Erregung von elektrischen Strömen zu Tage tritt, ist für die nämlichen Kraftlinien ein bestimmter, wie weit auch immer der Punkt oder die Ebene vom Magneten entfernt sei, wo ihre Kraft sich äussert; oder ist derselbe in irgend welchen Schnitten der nämlichen Kraftlinien, wie sie auch immer gestaltet und in welcher Entfernung vom Sitze der Kraft sie gelegt sein mögen⁴⁰⁾. Die Richtigkeit des Satzes kann man schon aus den Versuchen schliessen, die oben angeführt wurden. Bei vollständig aussen verlaufender Leiterbahn führte weder die gleichzeitige Drehung von Draht und Magnet, noch die von Magnet oder Draht allein zu einem Induktionsstrome. 3073

Dreht sich z. B. der Leiter bei festgehaltenem Magneten, so wird eine jede Kraftlinie zweimal in verschiedenen Entfernungen vom Magneten und in verschiedenem Sinne geschnitten. Demnach laufen die Ströme, die durch den zweimaligen Schnitt einer Kraftlinie entstehen, einander entgegen. Da nun der Versuch ergibt, dass kein Strom den Draht durchfließt, so sind auch die einander entgegengesetzten Wirkungen ihren absoluten Beträgen nach genau gleich, oder die Wirkung des Schnittes einer Kraftlinie ist unabhängig von seiner Entfernung vom Magneten. 3093

Um diese Folgerung noch einleuchtender zu machen, verlieh Faraday bei diesen Versuchen dem Leiter andere und andere Gestalten. Dadurch erzielte er, dass die Schnittstellen der Linien an beliebigen Orten lagen, bald nahe, bald entfernt von dem Sitze der Kraft; trotz alledem waren die Ergebnisse dieselben: es fand durchaus keine Ablenkung der Galvanometernadel statt. Weiter verlegte Faraday den Leiter teilweise nach innen und führte ihn vom Aequator in beliebigem Zuge durch die Kraftlinien direkt nach dem Galvanometer; durch beliebige Anordnung 3093, 3094

des letzteren Leiterteiles wurde wiederum erreicht, dass die Linien an den verschiedensten Stellen geschnitten wurden. Die Versuche ergaben das frühere Resultat, d. h. bei Drehung des Magneten wurde immer ein Ausschlag von gleichbleibender Grösse am Galvanometer beobachtet. 3099

Bei der Besprechung dieses Vorganges redet Faraday von dem Schnitte der Kraftlinien mit den Leitungsdrähten nach dem Galvanometer. Da letztere in Ruhe sind, so muss er hier annehmen, dass die Linien mit dem Magneten rotieren. Die innere Leitung kann hierbei ein in der Drehungsachse liegender Draht von dem einen Ende der Welle bis zum Aequator und von da
 3068 aus ein kleiner radial gestellter nach dem Kupferringe besorgen, oder der Magnet selbst. In
 3107 gleicher Weise erhielt Faraday, als er dem äusseren Leiter den gewöhnlichen Verlauf vom Aequator aus über den einen Pol zurück zur Welle gab, bei beliebiger Aenderung der Grösse und Gestalt des äusseren Teiles der Leitung immer Ablenkungen der Galvanometernadel, die gut miteinander übereinstimmten.

Wenn man den Draht nicht beliebig durch die Kraftlinien legt, sondern ihm einen besonderen Weg vorschreibt, so kann man unmittelbar durch den Versuch die Schnitte durch beliebige Kraftliniengruppen⁴¹⁾ miteinander vergleichen und die Gleichheit der Kraft irgendwelcher
 3110 Schnitte durch dieselben Linien nachweisen. Führt man z. B. einen Draht in einer Hauptebene des Feldes eines cylindrischen Magneten von einem Punkte der Achse aus bis zu einem beliebigen Orte, von diesem aus längs der Kraftlinie, die ihm zugehört, weiter und etwa in der Gegend des Aequators quer durch dieselben Kraftlinien, die er im Anfange schnitt, und bringt ihn längs einer Kraftlinie in die Nähe des Ausgangspunktes zurück, so kann die Wirkung der beiden Schnitte durch die Linien des zur Achse symmetrischen Feldes, die bei Rotation des ebenen Drahtes entstehen, untersucht werden. Der Kraftbetrag beider durch dieselben Linien gelegten Schnitte ergibt sich als derselbe, da die Galvanometernadel nicht ausschlägt. Auch jede geschlossene Drahtschlinge in einer Hauptebene eignet sich für solchen Nachweis; denn die Kraftlinien werden an der einen Seite in sie ein- und an einer anderen Seite aus ihr austreten; es wird sich der Draht also immer so in Teile zerlegen, dass sie die nämlichen Kraftlinien schneiden, wenn auch in entgegengesetzten Richtungen. Die Gleichheit ihrer Kraftbeträge erkennt man an dem Ausbleiben einer Wirkung. Die von den Leiterteilen beschriebenen Schnittflächen werden von den Linien in verschiedener Art durchdrungen, d. h. durch die eine Fläche kommen sie etwa divergierend herein, während sie durch die andere konvergierend hinausgehen, und weiter sind sie gegen die Flächen im allgemeinen unter verschiedenen Winkeln geneigt. Da die Wirkungen sich immer vollständig aufheben, so ist von solchen Faktoren die Erscheinung nicht bedingt. Auch ist es nicht nötig, dass der Leiter ein ebener ist; für beliebig gekrümmte gilt entsprechendes. Faraday legt seine Ergebnisse in
 3111 dieser Beziehung in den folgenden Sätzen nieder: Durch die Entfernung erleidet die magnetische Kraft nicht irgend welchen Verlust, noch geht sie in einen latenten Zustand über. Die
 3112 Konvergenz oder Divergenz der Kraftlinien verursacht keinen Unterschied in ihrem Kraftbetrage,
 3113 ebensowenig die Schiefe des Schnittes.

Das Innere des Magneten. Aber nicht nur die Verhältnisse in der Umgebung des
 3116 Magneten beleuchtete Faraday durch seine Versuche; es gelingt ihm sogar, das Dunkel seiner inneren Zustände aufzuhellen, und dazu bietet ihm die Methode des bewegten Leiters die nötigen Mittel. Wie er zu diesen wichtigen Schlussfolgerungen gelangt, sei im folgenden kurz dargestellt. Liegt der Leiter durchaus ausserhalb des Magneten und werden Leiter und Magnet gleichzeitig in Rotation versetzt, so entsteht kein Strom. Nach Faradays Erklärung durchquert der Leiter die Kraftlinien zweimal, und zwar in entgegengesetzten Richtungen. Diese Auffassung ist nur zulässig, wenn die Linien vom Magneten unabhängig sind und somit an seiner Drehung nicht teilnehmen. Verlegt man nun einen Teil des Leiters in das Innere des magnetischen Systemes,

so dass er längs der Achse nach dem Aequator geht und da nach aussen übertritt, so beobachtet man wiederum bei gleichzeitiger Drehung von Magnet und Leiter nicht den leisesten Ausschlag am Galvanometer. Bei letzterer Anordnung führt nun aber der äussere Teil des Leiters zu einem Strome, da alle Kraftlinien bei einer Umdrehung einmal geschnitten werden, und zwar immer in demselben Sinne. Wo ist nun die Kraft, die diese Wirkung aufhebt? Es liegt nahe anzunehmen, dass der jetzt innen verlaufende Teil des Leiters der Träger der Gegenwirkung ist. Um hierüber Klarheit zu gewinnen, zerlegte Faraday den inneren Leiter in einen achsialen Teil, der von dem Ende der Welle bis zum magnetischen Aequator reichte, und einen radialen, der von da aus isoliert vom Magneten nach dem Kupferringe ging. Wurde nun der achsiale Teil des Leiters oder der äussere Leiter und der Magnet nebst dem radialen Teile des inneren gedreht, so trat am Galvanometer kein Anzeichen irgend einer Kraftäusserung ein. Hingegen wurden Induktionsströme beobachtet, wenn man den äusseren Teil des Leiters allein rotieren liess oder den radialen des inneren und den Magneten. Die wirksamen Teile waren in diesen Fällen bezw. der äussere Leiter und der kleine radiale Teil des inneren; denn nur in diesem Drahtstücke kann im zweiten Falle der Strom zu stande kommen, da der Magnet selbst in den Stromkreis nicht eingeschlossen ist. Die absoluten Beträge der Kräfte in beiden Fällen sind einander genau gleich, da bei gleichzeitiger Rotation jeder Ausschlag am Galvanometer verschwindet. Diese Ergebnisse ändern sich nicht, wenn man die ganze innere Leitung durch einen grösseren oder kleineren Teil des Magneten ersetzt. Der Magnet übernimmt in solchem Falle die Rolle des radialen Teiles der isolierten inneren Leitung. Die Wirksamkeit des inneren Leiterstückes führte Faraday geradeso wie die der äusseren Leiterteile auf ein Schneiden der Kraftlinien zurück. So wurde er zu dem Schlusse genötigt, dass die Kraftlinien, die im Aeusseren den Magneten umgeben, eine Fortsetzung nach innen haben und zwar auch in bezug auf ihre Richtung oder Polarität; denn die Wirkung des Schnittes der inneren Linien ist derjenigen der äusseren gerade entgegengesetzt unter sonst gleichen Umständen. Als Richtung der Kraftlinien im Aussenraume eines Magneten ist die vom Nordpol zum Südpol festgesetzt; sollen sich die inneren diesen äusseren unmittelbar anschliessen, so werden sie vom Südpol zum Nordpol gehen. Aus der Gleichheit der Wirkungen des äusseren und inneren Leiterteiles, die durch die mitgeteilten Versuche nachgewiesen ist, ist weiterhin zu folgern, dass die Kraftlinien auch auf ihrem Wege durch den Magneten den ihnen eignen Kraftbetrag bewahren. Faraday fasst dies alles in dem Satze zusammen: Im Inneren eines Magneten existieren Kraftlinien von genau derselben Natur wie die äusseren, so dass die Kraftlinien überhaupt geschlossene Kurven sind. In einem jeden Teile ihrer Bahn stellen sie denselben unveränderlichen Kraftbetrag dar. Diese Betrachtungen Faradays über innere Kraftlinien beruhen auf der Vorstellung, dass sich ein Magnet innerhalb seines eignen Kraftsystemes drehen kann, oder dass seine Linien nicht notwendig mit ihm umschwingen müssen. Um diese Auffassung zu stützen, weist er darauf hin, dass auch die Sonne innerhalb ihrer Lichtstrahlen rotiere und nicht diese mit ihr. Diese Grundlage für die Erklärung der Versuche ist aber nicht ausnahmslos von ihm inne gehalten worden, wie schon aus dem Vorangehenden (vergl. S. 20) zu ersehen ist. In gewissen Fällen, sagt er, könne man ein Rotieren des Magneten zwischen seinen eignen Kräften voraussetzen. Er unterscheidet zwischen einer rotatorischen und einer translatorischen Bewegung des Magneten. Während er im letzteren Falle die Linien immer mit dem Magneten fest verbunden denkt, lässt er im ersteren beide Vorstellungen zu, wenn er auch die Unabhängigkeit des Kräftesystemes vom Magneten zu bevorzugen scheint⁴²⁾. Zum Beweise für diese Behauptung

3098

3116

3096

3117

3090

3090

3087

220

- 228, 229 sei der folgende Versuch angeführt. Ein Magnet, der um seine Achse gedreht werden kann, schwimmt bis zum Aequator in Quecksilber; der freiliegende Pol und das Quecksilber sind mit einem Galvanometer verbunden. Wenn der Magnet rotiert, werden Ströme hervorgerufen, die nach Faraday darin ihren Grund haben, dass die Seitenteile des Magneten die magnetischen Kurven schneiden. Eine solche Erklärung setzt das Feststehen seines Kraftliniensystemes während der Bewegung voraus. Im Felde der rotierenden Erdkugel pflegt man unwillkürlich entsprechende Verhältnisse anzunehmen. Weiter ist zu bemerken, dass Faraday an Stelle des wirklichen Inneren eines Magneten einfache magnetische Systeme dem Versuche unterwirft, die nach seiner Meinung dem zu untersuchenden Inneren hinreichend ähnlich sind. Würde man sich statt der zwei getrennten Magnete seines Apparates einen einzigen denken, indem man sich die Lücke magnetisch ergänzt vorstellt, so würde dadurch der Charakter des magnetischen Feldes nicht wesentlich beeinträchtigt werden; ebensowenig, wenn man aus einem Magneten durch Zerschneiden längs der Achse zwei Magnete herstellt und ihnen einen kleinen Abstand giebt. Hält man es für möglich, einen Magneten durch solche magnetische Systeme zu ersetzen und aus ihren Verhältnissen auf die in dem Magneten selbst vorhandenen zu schliessen, so erkennt man nun weiter, dass ein Magnet eine überraschende Aehnlichkeit hat mit einer elektromagnetischen Spule oder einem Solenoid. Die magnetischen Linien eines Solenoides sind geschlossene Kurven und treten inner- und ausserhalb in derselben Anzahl auf; genau ebenso haben wir uns den Verlauf der Kraftlinien bei einem Magneten zu denken.
- 3100 Die Zahl der Kraftlinien. Von besonderer Wichtigkeit in diesen Resultaten ist die Unveränderlichkeit des Kraftbetrages, der einer Linie auf ihrem ganzen Wege, dem inneren wie äusseren, zukommt. Ermittelt man demnach die galvanometrische Wirkung irgend welcher Querschnitte durch die sämtlichen Kraftlinien bei verschiedenen Magneten, so kann man leicht ihre magnetischen Kräfte miteinander vergleichen. Es liegt nahe, diesen Umstand zu benutzen, um ein Mass für die Stärke eines Magneten zu erhalten. Faraday hoffte, dass es späteren Untersuchungen gelingen werde, im Anschlusse an die Idee der Kraftlinien auf experimentellem Wege ein Normalmass für die magnetischen Kräfte aufzustellen. Inzwischen benutzte er hierzu die Kraftlinien selbst, indem er in einer Linie die Einheit der magnetischen Kraft sah. Es liegt diese Auffassung dem folgenden Satze zu Grunde: Die induzierte Strommenge ist direkt proportional der Anzahl der magnetischen Kraftlinien⁴³⁾, welche von dem bewegten Drahte geschnitten werden. Schon aus den angeführten Versuchen kann man die Richtigkeit dieses wichtigen Satzes ableiten. Jedoch begnügte sich Faraday hiermit nicht, sondern suchte durch weitere Betrachtungen jeden Zweifel auszuschliessen. Zu diesem Zwecke bediente er sich eines Drahtrechteckes, das um die Mittelparallele zu zwei Gegenseiten in dem gleichförmigen Felde des Erdmagnetismus gedreht wurde und an dem einen Ende der Achse offen war. Die Enden des Drahtes waren an den Platten eines Kommutators so angelötet, dass das Rechteck und die Isolierschicht des Kommutators in derselben Ebene lagen. Der Kommutator war durch Schleifedern mit dem Galvanometer verbunden. Ein Stromwechsel trat allemal ein, wenn die Isolierschicht in die Horizontalebene gelangte. Die Rotation fand um eine zum magnetischen Meridian senkrechte Achse statt. Es werden daher diejenigen Gegenseiten, die der Drehungsachse parallel sind, die wirksamen Teile des Drahtes darstellen, während die beiden anderen lediglich der Leitung dienen. Diese wirksamen Seiten schneiden nun die Kraftlinien in entgegengesetzten Richtungen⁴⁴⁾, geben also zu einander entgegengesetzten Strömen Veranlassung. Infolge der besonderen Anordnung der Leiterteile laufen aber beide in demselben Sinne durch das Recht-
- 3120
- 3121
- 3115, 3177
- 3192-3194

eck und den Galvanometerdraht. Sobald jedoch die Gegenseiten ihre Stellungen bei der Drehung vertauschen, erhält der Strom die entgegengesetzte Richtung. Der Kommutator sorgt aber dafür, dass der Strom wiederum in derselben Richtung durch das Galvanometer geht. Der Wechselstrom, den dieser Versuch ergibt, wird auf diese Weise in einen Gleichstrom verwandelt. Das Feld des Erdmagnetismus wurde von Faraday bevorzugt, weil aus seiner Gleichförmigkeit ohne weiteres folgt, dass gleiche Stücke einer Ebene von gleich viel Linien durchsetzt werden⁴⁵⁾. 3177
 Um die magnetische Kraft des Feldes einer gewöhnlichen Magnetnadel gehörig auszunützen, ist es vorteilhaft ihre sämtlichen Kraftlinien durch einen Draht und zwar in mehreren Windungen 3195
 zu umschliessen und zu schneiden. Bei dem Erdmagnetismus ist eine solche Umspannung des ganzen Feldes ausgeschlossen. Die Anzahlen der Linien, die durch zwei ähnliche⁴⁶⁾ Stücke einer Ebene im erdmagnetischen Felde gehen, verhalten sich wie ihre Inhalte oder wie die Quadrate ihrer Umfänge. Legt man Drähte um solche Stücke, so umschliesst ein Draht von der Länge n n^2 mal soviel Linien als ein solcher von der Länge 1. Denkt man sich hingegen einen Draht von der Länge n in n Windungen um das Flächenstück mit dem Umfange 1 herumgelegt, so werden die Linien dieser Fläche n mal geschnitten. Es ist also n mal so günstig, eine Fläche mit einem Drahte einfach zu umfassen, als eine ähnliche durch n Windungen eines ebensolangen Drahtes. Auf Grund solcher Erwägungen benutzte Faraday Rechtecke oder Kreisringe aus einfachem Drahte. Er fand in Uebereinstimmung mit dem nachzuweisenden Satze, dass zwei Rechtecke, deren Flächeninhalte 144 und 128 Quadratzoll waren, Ausschläge am 3199
 Galvanometer gaben, die sich nahe wie 144:128 verhielten. Zwei Rechtecke mit dem Flächeninhalte 128 Quadratzoll, deren Seiten 16 und 8 Zoll waren, wurden so gedreht, dass das eine die Drehungsachse parallel zu den grösseren, das andere zu den kleineren Seiten hatte. Die gleichstarke Beeinflussung der Galvanometernadel war eine Bestätigung des Satzes. Die Längen der wirksamen Teile und ebenso ihre Geschwindigkeiten ändern das Ergebnis nicht, vorausgesetzt, 3200
 dass die Anzahl der geschnittenen Linien dieselbe bleibt. Auch sehr grosse Rechtecke unterwarf Faraday dem Versuche. Bei zwei Rechtecken von 9 und 1 Quadratfuss Inhalt stellte sich heraus, dass ihre Wirkungen sich wie 9:1 verhielten, d. h. wie die Anzahlen der geschnittenen 3211
 Linien. Da bei sehr grossen Rechtecken naturgemäss der Umschwung mehr Zeit in Anspruch nahm, so war es möglich, die Stellen des Weges zu ermitteln, an denen der Leiter am besten wirkte. In den Lagen des Rechteckes, in denen die Kraftlinien nahezu winkelrecht durch- 3208
 schnitten werden und daher auch in kurzer Zeit sehr viele, fand die maximale Wirkung statt, die geringste hingegen an den Orten, wo die wirksamen Teile sich fast parallel zu den Linien bewegten⁴⁷⁾. Bei einer Umdrehung gab es so zwei Hauptimpulse, die bei diesen grossen Drahtrechtecken gut beobachtet werden konnten.

Mit besonderem Erfolge bediente sich Faraday der Vorstellung von den Kraftlinien bei seinen berühmten Versuchen über den Einfluss des Magnetismus auf das polarisierte Licht, ebenso wie bei denjenigen, die den Diamagnetismus betrafen. Jedoch soll in dieser Abhandlung, die sich nur zum Ziele setzt, die hauptsächlichsten Erscheinungen und Eigenschaften der magnetischen Kraftlinien zusammenzustellen, wie sie Faraday mitteilt, nicht auf diese interessanten Dinge eingegangen werden. Mit einer gewissen Notwendigkeit legte ihm sein eigentümlicher Entwicklungsgang gerade die in den Kraftlinien niedergelegte Anschauung von Kraft nahe. Aus einfacher Familie stammend (sein Vater war Grobschmied) hatte er nur den gewöhnlichen

Volksschulunterricht genossen und war sonst durchaus auf sich selbst gestellt. Was ihm der Zufall in die Hände spielte, benutzte er wissbegierig zu seiner Ausbildung; sein Augenmerk wurde so wohl auf Physik und Chemie schon früh hingelenkt, nicht aber auf die mathematischen Wissenschaften, die zur Anwendung des Begriffes unvermittelt in die Ferne wirkender Kräfte unentbehrlich waren. Er schuf sich daher, um Klarheit über die beobachteten Erscheinungen und die in ihnen wirkenden Kräfte zu erhalten, eine neue Auffassung der Kraft, die er unmittelbar den Kraftlinien entnahm. Was er hier sah und erfuhr, befestigte in ihm die Ueberzeugung, dass eine jede Kraftwirkung einer Vermittelung bedürfe, oder dass eine unvermittelte Wirkung in die Ferne schlechterdings undenkbar sei, eine Ueberzeugung, die allerdings zu der Schulmeinung seiner Zeit in scharfem Gegensatze stand. Als Gewährsmann hierfür konnte er Newton selbst anführen, der sich im 3. Briefe an Bentley folgendermassen ausspricht⁴⁸⁾: „Dass die Schwerkraft der Materie eingeboren, immanent und wesentlich sei, so dass ein Körper auf einen anderen in die Ferne durch ein Vakuum wirken könne, ohne Dazwischenkunft von irgend Etwas, wodurch ihre Wirkung und Kraft aufeinander übertragen wird, scheint mir als eine so grosse Ungereimtheit, dass ich nicht glaube, dass Jemand, der philosophisch zu denken vermag, auf dieselbe verfallen könne u. s. w.“ Er kam durch den weiteren Ausbau seiner Ansichten über die Kräfte dazu, überhaupt die ganze Atomistik zu bekämpfen; in der Abhandlung: Eine spekulative Betrachtung über elektrische Leitung und über die Natur der Materie⁴⁹⁾ knüpfte er an die alten Ansichten von Boscovich an, der in den Atomen nichts weiter als Kraftzentren sah. Es gelang Faraday nicht ohne weiteres, mit seinen Ideen auch nur in dem Gebiete der elektrischen Wissenschaften durchzudringen; erst als namhafte Physiker, wie Maxwell und Thomson, die zugleich in seltenem Grade über das mathematische Rüstzeug verfügten, sich ihrer bemächtigten und ihre strenge Durchführbarkeit nachwiesen, fanden sie Anklang und Verbreitung. Aber auch noch in der neueren Zeit verhält man sich, trotzdem, dass seine Kraftlinien für die Beschreibung und das Verständnis der elektrischen Maschinen ein unentbehrliches und durchaus geläufiges Hilfsmittel geworden sind, vielfach ablehnend; so ist in der bekannten Geschichte der Elektrizität von Hoppe, die 1884 erschien, im Register von den Kraftlinien überhaupt nicht die Rede, und im Texte habe ich nur eine Stelle auf Seite 464 gefunden, wo sie erwähnt werden. Hierin scheint sich erst in neuester Zeit ein Wandel zu vollziehen; denn in der Litteratur mehren sich die Werke, die den Errungenschaften gerecht zu werden suchen, die wir dem genialen Faraday verdanken.

Anmerkungen.

1) Bei Gelegenheit des naturwissenschaftlichen Ferienkursus (Ostern 1893) in Berlin sprach sich Slaby dahin aus, dass mit den Kraftlinien in der Elektrotechnik „nicht mehr als alles“ gemacht werde (vergl. Velde, die magnetischen Kraftlinien im physikalischen Unterricht. Wiss. Beilage zum Jahresbericht der 8. städt. Realschule zu Berlin. Ostern 1894. S. 1). Gercken (Ueber die Notwendigkeit und Möglichkeit, die magnetischen Kraftlinien im Schulunterrichte einzuführen. Jahresbericht des Kgl. Realgymnasiums zu Perleburg. 1895. S. 4) nennt die Kraftlinien das A und O der Elektrotechnik.

2) Experimentaluntersuchungen über Elektrizität von Michael Faraday, deutsche Uebersetzung von Dr. S. Kalischer.

3) Hertz, die Principien der Mechanik, Vorwort S. XIV.

4) Nach den Stellen stärkster magnetischer Wirkung werden häufig von den benachbarten die Eisenspäne weggezogen, so dass Anhäufungen von Eisenteilchen entstehen, die von fast eisenfreien Gebieten umgeben sind. Hieraus darf man nicht schliessen, dass an letzteren Orten die magnetische Kraft verschwindend klein ist. Vergl. H. Ebert, magnetische Kraftfelder § 21.

5) Neben der von Faraday angegebenen Methode des Abdrückens des Bildes auf ein mit Klebstoff überzogenes Blatt hat man in neuerer Zeit andere Verfahrungsweisen angewandt, die hier in Kürze angedeutet werden sollen. Man erzeugt z. B. das Eisenfeilichtbild auf einem Blatte Papier oder einer Glasplatte, nachdem man sie mit einer dünnen Schicht Paraffin, Wachs oder Schellack überzogen hat, und fixiert es durch Erwärmen. Weiter kann man das auf einer nicht besonders vorgerichteten Platte hervorgerufene Bild dadurch befestigen, dass man es mit einem feinen Regen einer Lösung von weissem Schellack oder Mastix in Alkohol übersprüht. Stellt man die Bilder auf lichtempfindlichem Pauspapier (Ferroprussiatpapier) her, so gewinnt man nach dem Belichten und Fixieren ein weisses Abbild der Linien auf blauem Grunde. Die Bilder können auch in der photographischen Kammer unmittelbar auf der Gelatineschicht der Bromsilbertrockenplatte durch feines Eisenpulver (Limatura ferri alcoholisata) hergestellt und dann in gewöhnlicher Weise fixiert werden. Die Röntgenstrahlen können ebenfalls zum Photographieren der Kraftlinien benutzt werden. Bei allen diesen Darstellungen ist es nötig, das Bild zunächst durch zweckentsprechendes Klopfen des Papierblattes oder der Glasplatte herauszuarbeiten. Dieses das Ergebnis beeinflussende Erschüttern wird vermieden, wenn man auf eine erwärmte und mit einem Gelatineüberzug versehene Platte einen Sprühregen von Wasser, das feinsten Eisenstaub enthält, sendet oder wenn man unmittelbar auf die genau wagrechte Platte eine innige Mischung von französischem Terpentinöl mit Eisenpulver bläst. Vergl.: Ebert, a. a. O. § 7; Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik, 9. Aufl. von Pfaundler, III. Band § 35; Frick, physikalische Technik, 6. Aufl. von O. Lehmann, II. Band § 159; A. Jamieson, Elemente des Magnetismus und der Elektrizität, übersetzt von Kollert, S. 20 u. f.; Grimsehl, die magnetischen Kraftlinien, Programm der Realschule zu Cuxhaven 1893 S. 5; Richarz, neuere Fortschritte auf dem Gebiete der Elektrizität, S. 135; Poske, Zeitschrift für physikalischen und chemischen Unterricht XII, 3 S. 153 u. f.

6) Führt man in den von Daumen und Zeigefinger der linken Hand gebildeten Ring den Zeigefinger der rechten Hand von aussen ein und legt den Daumen von innen an ihn an, so geben diese kettengliederartig ineinander gefügten Fingerringe die Abhängigkeit der beiden Kraftlinien und die Zeigefinger ihre Richtungen. Ebert, a. a. O. § 149a.

7) Annales de chimie et de physique. T. XXI. 1822 S. 46. Der Ampèresche Versuch wird am genannten Orte von de la Rive fils mitgeteilt. Wenn man, wie Ebert (a. a. O. § 200) thut, von de la Rives schwimmendem Bügel redet, so lässt diese Bezeichnung den falschen Schluss zu, dass der Versuch von de la Rive und nicht von Ampère herrühre. Ampère selbst sagt in betreff dieses Versuches (Ann. de ch. et de ph. T. XX S. 420): j'en ai (depuis) fait l'expérience avec Auguste de la Rive et elle a complètement réussi.

8) Phil. Trans. 1823. S. 155 u. f.

9) Maxwell (Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, übersetzt von Weinstein. II. Band S. 393 § 688) folgert aus mathematischen Entwicklungen, „dass es sich in dem Ampèreschen Experimente um etwas ganz anderes als um die Wirkung collinearer Stromelemente handelt“. Hingegen giebt Wüllner (Lehrbuch der Experimentalphysik, 5. Aufl. III. Band S. 926) die ursprüngliche Erklärung; er findet, dass ein besonderer Fall der Abstossung zweier sich kreuzenden Ströme vorliegt, von denen der eine von dem Schnittpunkte weg, der andere nach ihm hin läuft. Auch Schüleke (Elektrizität und Magnetismus. Jahresberichte des Realgymnasiums zu Osterode in Ostpreussen 1890 und 1891 § 57 b) stellt den Satz auf: Teile desselben Stromes stossen einander ab. Ebert (a. a. O. § 200) hingegen sieht in dem Querdrucke der Kraftlinien, die von dem schwimmenden Bügel umschlossen werden, gegen die Leiterbahn die bewegende Kraft.

10) Ebert (a. a. O. § 33) drückt dies sehr anschaulich in dem Satze aus: Die Felder gleichnamiger Pole drücken sich von einander weg.

11) Ebert (a. a. O. § 33) sagt: Die Felder ungleichnamiger Pole werden auf einander zu gezogen.

12) Vergl. Börner, Lehrbuch der Physik S. 471 und Gercken, a. a. O. S. 10.

13) Vergl. Ebert, a. a. O. § 196 und 197 und Schüleke, a. a. O. II. Teil § 57 d u. e.

14) Hierbei sei bemerkt, dass sich die Worte like und unlike des englischen Textes m. E. nur auf den Richtungsunterschied der Linien und Ströme beziehen. Da den Linien auf Grund bestimmter Festsetzung eine gewisse Richtung eigentümlich ist, so können sie einen solchen Unterschied an der Stelle aufweisen, an der sie zusammentreffen. Eine andere Verschiedenheit, etwa hinsichtlich ihrer Art, ist nicht vorhanden. Es ist daher irreführend, wenn Kalischer die Worte bald durch gleich- und entgegengesetztgerichtet, bald durch gleich- und ungleichartig übersetzt.

15) Faraday nimmt diesen Eigenschaften der magnetischen Kraftlinien gemäss in ihrer Längsrichtung eine Zug- und nach der Seite, d. h. senkrecht zu ihnen, eine Druckspannung an; in jedem magnetischen Felde sind diese Spannungen vorhanden. Es fragt sich nun, ob man der Vorstellung solcher Wirkungen durch besondere Veranschaulichungsmittel zu Hilfe kommen kann. Die Annahme einer einfachen Strömung längs der Linien führt offenbar nicht zum gewünschten Ziele; es würden sich daraus die verschiedenen Spannungen schwer erklären lassen. Die Drehung der Polarisationssebene des Lichtes durch die magnetischen Kraftlinien, die Faraday 1845 entdeckte, veranlasste Sir William Thomson (Lord Kelvin) im Jahre 1856 (vergl. Ebert, a. a. O. § 120), die Linien als Achsen aufzufassen, um welche Drehungen stattfinden. Die Richtung der Achse stimmt mit derjenigen der Linien überein und die Drehung mit der des Uhrzeigers, wenn man in der Richtung der Linien beobachtet (Ebert, a. a. O. § 121). Wenn auch die einer einzelnen Linie zukommende Drehung sich der Beobachtung entzieht und verborgen ist, so äussert sich doch der Gesamteffekt in den eigentümlichen Wirkungen des magnetischen Feldes. Ein einfaches mechanisches Modell, das den Vorgang im magnetischen Felde veranschaulicht, ist von Ol. Lodge (Neueste Anschauungen über Elektrizität, übersetzt von Anna von Helmholtz und Estelle du Bois-Reymond, herausgegeben von R. Wachsmuth, Leipzig 1896, S. 221; vergl. Ebert, a. a. O. § 125) angegeben worden. Eine elastische Röhre, die an beiden Enden geschlossen und mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, wird um ihre Achse gedreht. Durch die Zentrifugalkraft wird eine Verkürzung derselben eintreten und ihre Wände werden sich bauchig ausweiten. Besteht nun eine magnetische Kraftlinie aus lauter solchen elastischen Elementen, die sich um die Linie als Achse in gleichartiger Rotation befinden, so erklärt sich in rein mechanischer Weise das Bestreben der Linien, sich zu verkürzen und nach der Seite zu drücken. Schüleke (a. a. O. § 58) stellt sich die Kraftlinien einfach als elastische Fäden vor, die einen seitlichen Druck ausüben müssen, wenn sie sich zusammenziehen. In sehr einfacher und ansprechender Art weiss er sogar die Induktionsvorgänge auf diesem Wege abzuleiten.

16) In dieser Beziehung führt Faraday (3268) noch an, dass sich das Bestreben des elektrischen Stromes sich zu verlängern in derselben Richtung vollziehe, wie das der magnetischen Linien, die ihn umgeben, sich seitlich von einander zu trennen, wenn man nur auf die gegenseitige Lage der Achsen Rücksicht nimmt. — Der elektrische Strom wird überall in seinem ganzen Verlaufe von kreisförmigen magnetischen Kraftlinien umgeben, die alle das Bestreben haben, sich von den unmittelbar benachbarten zu trennen; die seitliche Abstossung zwischen den magnetischen Linien findet also nach allen Seiten statt, parallel zum elektrischen Strome und in jeder beliebigen Neigung zu ihm. Das Bestreben des elektrischen Stromes sich zu verlängern macht sich hingegen nur in der Richtung geltend, die sein Lauf vorschreibt. Es ist mir daher unklar, wie lediglich durch Berücksichtigung der gegenseitigen Lage der Kraftachsen diese Wirkungen als in dieselbe Richtung fallend erkannt werden sollen.

17) Nach Faradays eigener Erklärung (Faraday, a. a. O. II. Band S. 144 Geschichtliches über elektromagnetische Rotationen) führten ihn vor allem diese Wiederholungen zur Entdeckung der Rotationen von Stromleiter und

Magnet um einander. Man hat ihm seinerzeit zum Vorwurfe gemacht, dass er sich in seinen Veröffentlichungen über diesen Gegenstand gar nicht auf Wollaston bezogen habe, der sich schon vor ihm (Aug. 1820) mit dem Gedanken der Möglichkeit dieser Rotationen beschäftigte. Faraday betonte demgegenüber ausdrücklich, dass er Wollastons Ansichten nur unvollständig gekannt habe, wie sich auch aus seinem Entwurfe einer Geschichte des Elektromagnetismus ergebe, und verwahrte sich entschieden dagegen, etwas von ihm entlehnt zu haben. Jedenfalls hat er den hierauf bezüglichen Versuchen, die Wollaston mit eigens zu diesem Zwecke konstruierten Apparaten in Gegenwart von H. Davy im Laboratorium der Royal Institution etwa im Anfange des Jahres 1821 anstellte, nicht beigewohnt und auch die Apparate nicht gesehen. Er kam erst hinzu, als man zu anderen Experimenten übergegangen war. Diese leidige Angelegenheit hat ihm trotz der nachdrücklichsten Bemühungen, sie klarzustellen und seine Unschuld nachzuweisen, noch bei der Aufnahme in die Royal Society Schwierigkeiten bereitet. Vergl. Tyndall, Faraday und seine Entdeckungen, deutsch herausgegeben von Helmholtz, S. 193.

18) Faraday, a. a. O. II. Band S. 265.

19) Tyndall, a. a. O. Anhang II. S. 189; Faraday, a. a. O. II. Band S. 115.

20) Faraday ist der Entdecker dieser Rotationsbewegungen. Die hierbei benutzten Apparate findet man beschrieben in: Faraday, a. a. O. II. Band S. 115 u. f.; Ebert, a. a. O. § 190; Wiedemann, die Lehre vom Galvanismus u. s. w. 2. Aufl. II. Band § 123 und § 142. Die Bemerkung Tyndalls, dass Faraday am Christfest des Jahres 1821 zum ersten Male einen Magneten um einen elektrischen Strom sich drehen sah (Tyndall, a. a. O. S. 12), ist schon von Helmholtz richtig gestellt (Tyndall, a. a. O. Anhang II. S. 189). Vermutlich liegt eine Verwechslung mit dem Versuche, einen elektrischen Strom durch den Erdmagnetismus in Drehung zu versetzen, vor; dieser ist ihm tatsächlich erst Weihnacht 1821 (Tyndall, a. a. O. Anhang II. S. 190) gelungen. In dieser Hinsicht war ihm aber Ampère zuvorgekommen (Ann. de ch. et de ph. T. XVIII 1821 p. 333). Faraday bediente sich zum Nachweise dieser Rotation eines Kupferdrahtes, der mit Hilfe eines Fadens an der Zimmerdecke aufgehängt wurde und in horizontaler Richtung schwebte; seine beiderseits rechtwinklig umgebogenen Enden tauchten in Quecksilberbassins. Wenn er nun die Quecksilbergefäße mit den Polen einer Batterie verband und so einen Strom durch den Draht schickte, so bewegte sich der Draht senkrecht zu seiner Längsrichtung. Hoppe (E. Hoppe, Geschichte der Elektrizität. 1884, § 172) bezweifelt, ob die Erscheinung allein auf den Erdmagnetismus zurückzuführen sei, ohne aber nähere Gründe beizubringen. Ebert (a. a. O. § 187) stellt einen ganz entsprechenden Versuch an, um die Bewegung eines elektrischen Stromes durch einen festen Magnetstab zu zeigen; bei Faraday ist der Magnetstab durch die Erde ersetzt. Erscheint schon dieser Versuch durchaus beweiskräftig, so hat Faraday doch noch mit Hilfe eines anderen Apparates (Faraday, a. a. O. II. Band S. 139) denselben Nachweis geführt. Er hängte einen Kupferdraht so auf, dass er etwa unter einem Winkel von 40° gegen die Wagerechte geneigt war, und liess das untere Ende in Quecksilber tauchen; schickte er einen Strom durch den Draht, so rotierte der Draht (Der Apparat in verbesserter Form bei Wiedemann, a. a. O. § 138). Nur in dem Falle, dass der Draht, dem man auch andere Neigungen gegen die Horizontalebene geben konnte, gerade mit der Inklinationsrichtung parallel war, trat keine Bewegung ein. Die Bemerkung Hoppes (a. a. O. § 172): „Dagegen gelang die Rotation eines beweglichen in der Richtung der Inklinationsnadel befindlichen Stromtheiles nicht“ scheint auf einem Irrthume zu beruhen; unter solchen Umständen findet überhaupt keine Rotation statt. (Faraday, a. a. O. II. Band S. 140 und Wiedemann, a. a. O. II. Band § 139).

21) Eine Kraftlinie wird verschiedenartig geschnitten, je nachdem man den Leiter aus dem Inneren des Gebietes, das sie umschliesst, durch sie hindurch nach aussen bewegt oder gerade umgekehrt.

22) Maxwell behält für die Kraftlinien das Bild der Strömung bei und bezeichnet demgemäss die Stellen, von denen Linien ausgehen und an denen sie ins Innere hinabtauchen, als Quellen; er unterscheidet positive und negative Quellen (Ostwalds Klassiker No. 69 § 7). Im Anschlusse hieran nennt Ebert den Nordpol eines Magneten einen Quellpunkt und den Südpol eine Sinkstelle (Ebert, a. a. O. § 36).

23) Die Uebersetzung der ersten Hälfte des Art. 60, die Boltzmann (Ostw. Klass. No. 69 S. 44) giebt, ist m. E. durch die in den Klammern hinzugefügten Bemerkungen entstellt. Sie lautet: „So lange ein Draht voltaelektrischer oder magnetoelektrischer Induktion unterworfen ist, scheint er sich in einem besonderen Zustande zu befinden, denn er widersteht [wenn ungeschlossen] der Bildung eines elektrischen Stromes in seinem Inneren, während hingegen ein solcher Strom [zum Ausgleich der an seinen Enden durch die Induktion angehäuften freien Elektrizitäten] einträte, wenn sich der Leiter in seinem gewöhnlichen Zustande befände; sobald er aber uninfluenziert [ohne Elektrizität an den Enden] ist, hat er die Fähigkeit, einen Strom zu erzeugen, welche er unter gewöhnlichen Umständen nicht besitzt.“ Die beiden ersten Einfügungen erregen den Gedanken, dass ein Strom entstehen würde, wenn der Leiter geschlossen wäre; dies ist aber nicht der Fall. Der in Rede stehende besondere Zustand

liegt zwischen den beiden Zeiten, zu denen die Induktionsströme entstehen (vergl. Faraday, a. a. O. Art. 26, und den Brief an Philipps vom 29/11 1831, in dem es heisst: „Der neue elektrische Zustand, der durch Induktion zwischen dem Anfange und Ende derselben (also während des Schlusses des Hauptstromes. D. H.) eintritt, führt zu sehr merkwürdigen Resultaten.“ Ostw. Klass. No. 81 S. 92). So lange die induzierende Kraft unverändert besteht, giebt es weder einen Strom noch eine Spannung, die etwa der elektrostatischen Induktion (Influenz) entspräche. Die Bemerkung Faradays, dass der Leiter in seinem gewöhnlichen Zustande einen Strom erzeugen würde, kann wohl nur darauf gehen, dass ein Leiter, der vorher keiner Induktion ausgesetzt, also in seinem gewöhnlichen Zustande war, beim Eintritte in ein magnetisches Feld von einem Strome durchflossen wird. Was die dritte Einfügung betrifft, so sind die Worte: when left uninfluenced durch: wenn man den Leiter unbeeinflusst vom induzierenden Körper zurücklässt, d. h. seiner Wirkung entzieht (vergl. Faraday, a. a. O. Art. 60 und Ostw. Klass. No. 81, S. 19), wiederzugeben, und Faraday will damit sagen, dass für die Entstehung eines Stromes in diesem Falle notwendige Voraussetzung ist, dass sich der Leiter vorher in der Wirkungssphäre des induzierenden Körpers befindet und nicht unter gewöhnlichen Umständen ausserhalb derselben.

24) Vergl. Maxwell, a. a. O. II. Band § 540.

25) Diese Gedanken über den elektrotonischen Zustand und die damit zusammenhängenden über die Ausbreitung der von elektrischen Strömen und Magneten ausgehenden Kräfte von Teilchen zu Teilchen im umgebenden Medium wurden durch Hertz als richtig erwiesen. Vergl. Hertz, die Principien der Mechanik, Vorwort von Helmholtz S. XVI. Hertz selbst sagt in den Folgerungen, die er den Versuchen über die Ausbreitung elektrodynamischer Wirkungen anreihet, an erster Stelle: „Die unmittelbarste Folgerung ist die Bestätigung der Faradayschen Anschauung, nach welcher die elektrischen Kräfte selbständig im Raume bestehende Polarisationen sind. Denn in den von uns untersuchten Erscheinungen sind solche Kräfte noch im Raume vorhanden, nachdem die Ursachen, welche sie erzeugt haben, wieder verschwunden sind. Diese Kräfte sind also nicht lediglich Teile oder Attribute ihrer Ursachen, sondern sie entsprechen veränderten Zuständen des Raumes. Die mathematischen Bestimmungsstücke dieser Zustände rechtfertigen es dann, dass man sie als Polarisationen bezeichne, welches auch immer die Natur dieser Polarisationen sein mag.“ (Hertz, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, 2. Aufl. S. 131). Ebert (a. a. O. § 235) versteht unter dem elektrotonischen Zustande das Vorhandensein der Magnetkraftlinien in der Umgebung einer Leiterbahn. Maxwell hat ihn in die mathematische Betrachtung eingeführt.

26) Leonhard Eulers Briefe über verschiedene Gegenstände aus der Naturlehre. Nach der Ausgabe der Herren Condorcet und de la Croix aufs neue aus dem Französischen übersetzt und mit Anmerkungen, Zusätzen und neuen Briefen vermehrt von Friedrich Kries, III. Band 190.—192. Brief.

27) Zur mechanischen Auffindung solcher Krafröhren, deren wesentliches Merkmal darin besteht, dass sie gänzlich von Kraftlinien begrenzt sind, kann man bei einem beliebig gestalteten Magneten durch eine sehr kleine Magnetnadel oder einen Leiterdraht gelangen. Man gebe sich in einer beliebigen Ebene seines magnetischen Feldes eine geschlossene Kurve an und suche mit Hilfe eines der genannten Mittel die Kraftlinien auf, die durch die Punkte der Kurven gehen. Diese Linien umschliessen dann eine Krafröhre.

28) Da alle sogenannten leeren Räume, die wir herstellen können, noch Materie enthalten, so ist es nicht nötig, einen solchen hypothetischen Stoff für magnetische Erscheinungen einzuführen (Ebert, a. a. O. § 34).

29) Solche Ringmagnete nennt man Toroide. Vergl. Ebert, a. a. O. § 97 u. 98.

30) Velde (a. a. O. S. 13) giebt die Richtungsregel in dieser allgemeineren Fassung, befreit von der Beziehung zum Erdmagnetismus, und mit der Abänderung, dass die Linien von Fuss zu Kopf durch den Körper gehen, als Faradaysche Regel. Meines Wissens kommt sie in dieser Form bei Faraday nicht vor. Etwa in derselben Art wie bei Velde steht sie schon bei Grimsehl (a. a. O. S. 12), der nur eine menschliche Figur zu Hilfe nimmt. Eine ähnliche, vielleicht etwas zu knappe Schwimmregel stellt Schülcke (a. a. O. II. Teil S. 11) auf: Man denke sich in der Kraftlinie schwimmend und den Leiter ansehend, so geht der Strom nach links. Es ist hierbei die Bewegung des Leiters auf den Beobachter zu als selbstverständlich vorausgesetzt. Wesentlich einfacher ist die Dreifingerregel der rechten Hand von Fleming (The Electrician XIV p. 396), die das Hineindenken des ganzen Menschen in das magnetische Feld durch das anschauliche Hineinhalten der rechten Hand ersetzt. Sie kann so ausgesprochen werden: Hält man Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger der rechten Hand zu einander senkrecht und bringt den Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien und den Daumen in die der Bewegung des Leiters, so giebt der Mittelfinger die Richtung des Induktionsstromes. Um die Anwendung dieser Regel zu erleichtern, rät Weiler (Zeitschr. f. phys. u. chem. Unterr. VII, 3 S. 133) die Herstellung eines entsprechenden Drahtgestelles. Pfandler giebt einen automatischen Inductionszeiger an; eine Magnetnadel trägt einen mit ihr unter rechtem Winkel festverbundenen Messingpfahl und dreht sich um einen einerseits zugespitzten Kupferdraht, der zur Ebene

von Nadel und Pfeil senkrecht steht (vergl. Pfandler, a. a. O. III. Band S. 687 u. 688; Frick-Lehmann, a. a. O. II. Band S. 448 und 449). Am einfachsten scheint mir die Regel, die Weiler an demselben Orte (S. 134) mitteilt. Zeigt der ausgestreckte Daumen der rechten Hand in die Richtung der Bewegung und treten die Kraftlinien an der Handfläche ein und am Handrücken aus, so fließt der Induktionsstrom in der Richtung des Zeigefingers (vergl. Ebert, a. a. O. § 208). Weiler stellt ebenda auch eine allgemeine Regel auf, die sowohl die Induktion als den Elektromagnetismus berücksichtigt.

31) Bei dieser Regel setzt Faraday voraus, wie auch aus der Figur zu Art. 116 hervorgeht, dass die Messerklinge die Kerbe rechts besitzt, wenn man vom Hefte aus nach dem Rücken sieht. Da aber diese Kerbe sich gewöhnlich links befindet, so wäre die Regel entsprechend abzuändern.

32) Faraday schreibt im Art. 3078, dass im Leiter der grösste Induktionseffekt eintrete, when moving in places of equal action, i. e. transversely across the lines of force. Es ist hierbei zu bemerken, dass ein Bewegen des Leiters im gleichförmigen Felde nicht in jedem Falle mit einem Durchqueren der Kraftlinien zusammenfällt; es ist auch ein Gleiten längs der Linien möglich.

33) Vergl. Ebert, a. a. O. § 39. Faraday gab für London im Jahre 1832 einen Winkel von 70° an (Art. 149).

34) In Uebereinstimmung hiermit sagt Pfandler (a. a. O. III. Band S. 687): Im Leiter wird eine elektromotorische Kraft induziert, sobald und solange durch seine Bewegung Kraftlinien durchschnitten werden.

35) Der bei Faraday vielfach (z. B. im Art. 3100) auftretende Ausdruck a great plane ist von Kalischer durch „grösste Ebene“ wiedergegeben worden. Alle hier in Frage kommenden Ebenen durch das magnetische Feld sind unbegrenzt zu denken; eine Unterscheidung nach der Grösse ist also unzulässig. Der Ausdruck scheint mir auf die Bedeutsamkeit ihrer Lage zu gehen. Die wichtigste Linie des ganzen Systemes nach seiner geometrischen Gestaltung ist die magnetische Achse. Faraday bezeichnet daher die durch sie hindurchgehenden Ebenen mit dem obigen Ausdrücke, der sinntsprechend mit Hauptebene übersetzt werden kann.

36) Die Worte: but . . . , any wire or line proceeding from a point in the magnetic equator of the bar, over one of the poles, so as to pass through the magnetic axis, and so on to a point on the opposite side of the magnetic equator, must intersect all the lines . . . im Art. 3100 sind dem Sinne nach etwa so zu verstehen: aber . . . , wenn irgend ein Draht oder eine Linie von einem Punkt des Aequators des Stabes aus über einen der Pole hinläuft, so dass er durch die magnetische Achse hindurchgeht und weiter nach einem Punkte der entgegengesetzten Seite des Aequators gelangt, so muss er alle Linien schneiden . . . Die von Kalischer gegebene Uebersetzung („längs der magnetischen Achse“) scheint mir nicht zutreffend zu sein.

37) Im Art. 3101 sind in der Uebersetzung die Worte at the end of the bar nur durch „an dem Stabe“ wiedergegeben.

38) Die Uebersetzung giebt die Worte and the loop of wire be made to pass over either pole des Art. 3101 durch: „und die Drahtschleife über beide Pole hinweggeht“ wieder, während es doch heissen muss „über einen von beiden Polen“.

39) In der Uebersetzung steht im Art. 3102: „Wenn er (der Draht) den Aequator nicht berührt, so schneidet er doch sämtliche Linien zweimal u. s. w.“ Das kann missverstanden werden; unter den sämtlichen Linien sind nicht alle vorhandenen, sondern nur die zu verstehen, die geschnitten werden. Der Text lautet: If it do not touch at the equator, still, whatever lines it intersects, are twice intersected etc.

40) Der zweite Teil des Satzes enthält in der Uebersetzung von Kalischer eine unrichtige Fassung. Es muss in: „oder er ist derselbe in jedem Querschnitte derselben Kraftlinien, welches auch ihre Gestalt und ihre Entfernung von dem Sitze der Kraft sein mag,“ heissen: welches auch seine Gestalt und seine Entfernung u. s. w. Das Pronomen their des englischen Textes ist auf das vorausgehende sections zu beziehen.

41) Zu ähnlichen Versuchen benutzen Szymański (Zeitschr. f. ph. u. ch. U. VII, 1 S. 12) und Ebert (a. a. O. § 226) Hufeisenmagnete, in deren Feldern einige Kraftlinien durch Metallschienen gekennzeichnet sind. Auch Pfandler (a. a. O. § 193) hat einen entsprechenden Apparat konstruiert.

42) Demgegenüber betont Weiler (Zeitschr. f. ph. u. ch. U. VII, 6) ausdrücklich, für das Verständnis aller Induktionsvorgänge sei festzuhalten, dass der Magnet von seinem Kraftsysteme untrennbar ist, also mit diesem rotiert, nicht in ihm. Nach seiner Behauptung bewirken daher die inneren Linien eines Magneten keine Induktion. In der That lassen sich alle Erscheinungen der unipolaren Induktion (s. Anm. 44), bei denen nur ein Magnet in Frage kommt, auf dieser Grundlage ebenso befriedigend erklären, wie mit Hilfe der Faradayschen Ansicht von der Unabhängigkeit der Linien. Der Mann, der wohl zuerst den Gedanken, dass die Linien mit dem Magneten fest verbunden sind und mit ihm rotieren, bestimmt und folgerichtig vertreten hat, ist Tolver Preston. In seiner Abhandlung: On some electromagnetic experiments of Faraday and Plücker (Phil. Mag. (5) 19 S. 131—140, 1885) begründet er ein-

gehend seine von Faraday abweichende Stellung. Nachdem im Laufe der Zeit von verschiedenen Seiten vergebliche Anstrengungen gemacht worden waren, eine experimentelle Lösung der Frage herbeizuführen, teilte Lecher im Jahre 1894 in den Sitzungsberichten der math. naturw. Klasse der Kais. Akademie der Wissenschaften zu Wien (103. Band Abt. IIa, 1894, S. 949—980) Versuche mit, die nach seiner Meinung unzweideutig zu Gunsten Faradays sprechen. Zu seinem Hauptversuche, dem *experimentum crucis*, benutzte er zwei gleiche stabförmige Elektromagnete, die er mit ungleichnamigen Polen gegen einander kehrt, so dass ihre Drehungsachsen in dieselbe Gerade fallen. Die Leitungen nach dem Galvanometer gehen in den Verlängerungen der gemeinsamen Achsenlinie von den Magneten weg. Er erhielt nach Grösse und Richtung gleiche Ausschläge, gleichgiltig, ob er den einen Magneten in der einen Richtung oder den anderen in der entgegengesetzten drehte. Bei gleichzeitiger Rotation der Magnete in entgegengesetzten Richtungen ergab sich der doppelte Ausschlag, bei gleichsinniger Drehung keiner. Die Erklärung dieser Versuche ergibt sich ungezwungen, wenn man mit Faraday feststehende Linien annimmt. Die sämtlichen inneren Linien werden im ersten Falle von dem rotierenden Magneten geschnitten; daher entstehen gleichgrosse Ausschläge. Die Mantelflächen der Magnete schneiden die Linien, die im allgemeinen aus dem einen hervorquellen und in den anderen hinabtauchen, in entgegengesetztem Sinne; daher bilden sich in der Galvanometerleitung bei gleichsinniger Drehung entgegengesetzt gerichtete Ströme, im anderen Falle aber Ströme von gleichem Verlaufe. Hiermit ist auch sofort einleuchtend, dass für gleichzeitige Rotationen beider Magnete eine Subtraktion oder Addition der Einzelwirkungen eintreten wird. Ganz anders liegt die Sache, wenn man nach Prestons Principe die Erscheinungen zu deuten sucht. Es ist da zunächst der Umstand sehr störend, dass die Kraftlinien erfahrungsgemäss ineinander fliessen und miteinander verschmelzen. Wieweit können die Linien in dieser Vereinigung ihren Magneten, mit denen sie unlösbar verknüpft sein sollen, bei der Drehung folgen? Lässt sich etwa die Grenze bestimmen, bis zu welcher die Wirkungen der Einzelmagnete reichen? Wird man schliesslich zu der Annahme genötigt, dass die Linien eine andere Rotationsgeschwindigkeit haben als der Magnet, dem sie eigen sind, so giebt man dadurch bereits die Grundlage der Untrennbarkeit von Magnet und Linie bis zu einem gewissen Grade preis. Eine weitere Schwierigkeit entspringt der Thatsache, dass ein Magnet in der Nachbarschaft eines anderen eventuell die Zahl seiner Linien vermehrt. Auf Grund solcher Erwägungen folgert Lecher die Unmöglichkeit, sein Experiment ohne neue Voraussetzungen aus dem Prestonschen Principe abzuleiten, und die Richtigkeit der Faradayschen Ansicht. Freilich hat er einen wichtigen Versuch, den Preston in einer nachträglichen Hinzufügung (*Subsequent Addendum*) zu seiner Abhandlung bespricht, nicht in seine Betrachtung aufgenommen. Es handelt sich um die bekannte Erscheinung, dass ein Magnet, der an einem Pole und am Aequator mit den Enden einer galvanischen Batterie verbunden ist, sich um seine eigene Achse drehen kann. Preston macht darauf aufmerksam, dass es nicht einzusehen sei, wie der Magnet veranlasst werden könne zu rotieren, wenn seine Kraftlinien unabhängig von seiner Masse seien, während nach seiner Hypothese der Magnet den Kraftlinien folgt, die vom elektrischen Strome im festen Leiter zur Seite gedrückt werden. Der Versuch wird in der Regel durch die Vorstellung erläutert, dass der Magnet aus einem Bündel von Magneten bestehe (vergl. Pfundler, a. a. O. III. Band § 196); auch hierdurch werden die Linien oder magnetischen Kräfte als etwas vom Magneten Untrennbares angesehen. Die Streitfrage, die neben ihrer theoretischen Wichtigkeit auch eine sehr praktische Seite hat (vergl. C. L. Weber, Ueber unipolare Induktion, Elektrotechnische Zeitschrift 1895, Heft 33, S. 513), ist noch nicht entschieden, obwohl W. Weber hoffte, sie werde schon durch die Prestonsche Abhandlung endgiltig erledigt werden (Lecher a. a. O. S. 951 Anm. 2).

43) Der Gedanke, die Anzahl der Kraftlinien in Zusammenhang zu bringen mit der Stärke der magnetischen Kraft an den verschiedenen Stellen des Feldes wird besonders durch die mechanische Darstellung des Feldes vermittels Eisenfeilicht gefördert. Es zeigt sich da im allgemeinen, dass an den Stellen grösserer magnetischer Wirkung die Linien näher aneinander gerückt, an denjenigen schwächerer Wirkung weiter von einander entfernt erscheinen. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass sich überall im Raume Kraftlinien befinden, nicht bloss da, wo das Eisenfeilicht sie kundgiebt. Es umgiebt einen Magneten eine Kraftatmosphäre, die aus unendlich vielen Linien besteht, die sich lückenlos aneinander schliessen und die Nachbarschaft des Magneten bis auf beliebige Entfernung hin erfüllen. Sollen die Linien und zwar ihre Anzahl zu dem genannten Zwecke verwandt werden, so ist es nötig, genau zu entscheiden, wie die Linien zu zählen sind, oder was unter einer Einheitslinie zu verstehen ist. Eine solche bestimmte Erläuterung habe ich bei Faraday nicht gefunden. Er hat das zweifellose Verdienst, auf diese Bestimmung der magnetischen Kraft die Wissenschaft hingewiesen zu haben; nicht vollkommen zutreffend aber scheint es mir, wenn Ebert (a. a. O. § 71) die exakte Festsetzung über die Kraftlinienzahl, die er giebt, Faraday zuschreibt. Sie lautet: „Von den unendlich vielen, wirklich existierenden Kraftlinien sollen an jeder Stelle nur gerade so viele pro cm^2 hervorgehoben werden, als die Feldstärke daselbst absolute Einheiten besitzt.“ („Oder mit anderen Worten: Wo eine Kraftlinie auf den cm^2 entfällt, da, sagen wir, herrscht die Feldintensität 1, wo wir $\frac{1}{2}$ Kraftlinien senk-

recht durch die Flächeneinheit stossen sehen, herrscht die Feldintensität $\mathfrak{H} \text{ cm}^{-1/2} \text{ gr}^{1/2} \text{ sek}^{-1}$.⁴⁴⁾ Da die absoluten Einheiten der Feldstärke (Ebert, a. a. O. § 68) sich durch den Versuch bestimmen lassen, so ist damit ein Mittel gewonnen, auch die Anzahl der Kraftlinien an jeder Stelle zu finden. Es werden hiernach nicht alle Linien gezählt, sondern nur gewisse Einheitslinien, die eben durch jene Vorschrift definiert werden. Vergl. Jamieson-Kollert, a. a. O. S. 80 und 81.

44) Diese Untersuchung des Erdmagnetismus mit dem Rechtecke unterscheidet sich wesentlich von der früheren mit der horizontalen Scheibe (Art. 149, 150). Die wirksamen Seiten des Rechteckes schneiden die Kraftlinien bei einer Umdrehung zweimal, die Radien der Scheibe hingegen nur einmal. Das letztere gilt auch bei dem Apparate (Art. 3084), mit dessen Hilfe Faraday die Induktionserscheinungen studiert hat; auch bei ihm schneidet der Draht, der von der Mitte des Magneten aus über einen Pol hinweg nach der Achse geht, jede Kraftlinie nur einmal im Verlaufe einer Umdrehung. Während die Induktionsströme bei zweimaligem Schnitte Wechselströme sind, ergeben sich bei einmaligem Gleichströme. Man hat die letztere Induktionsart als unipolare und die erstere als bipolare Induktion bezeichnet. Da ein einmaliger Schnitt der Kraftlinien auch in dem Falle eintreten kann, dass beide Pole induzierend wirken, wenn z. B. eine Kupferscheibe in dem Felde eines Hufeisenmagneten (Art. 3159) sich um eine den Kraftlinien zwischen den Polen parallele Richtung dreht, so sind die genannten Namen nicht recht zutreffend. Weiler (Zeitschr. f. ph. u. ch. U. VII, 6) hebt deshalb ausdrücklich hervor, dass das unterscheidende Merkmal dieser beiden Induktionsarten nur in dem ein- oder zweimaligen Schnitte der Kraftlinien während einer Umdrehung liege. Die in Rede stehende Bezeichnung rührt von W. Weber her, der von anderer Ansicht über das Wesen des Magnetismus ausgehend sie in Pogg. Ann. LII, 3 S. 356 folgendermassen begründet: „Es wird die Existenz zweier magnetischer Fluida vorausgesetzt, eines nördlichen und südlichen, welche in den Molekülen eines Magneten in gleicher Menge vorhanden, aber von einander geschieden sind. Wird ein solcher Magnet bewegt, so wird in einem benachbarten Leiter ein galvanischer Strom nach bekannten Gesetzen induziert. Dieser Strom ist so beschaffen, dass er in zwei Ströme zerlegt werden kann, von denen der eine durch die Bewegung des nördlichen Fluidums, der andere durch die Bewegung des südlichen Fluidums entsteht. Diese Induktion zweier Ströme durch die Bewegung beider magnetischen Fluida heisse im Allgemeinen eine bipolare Induktion. Es ist aber auch eine Induktion denkbar, wobei entweder bloss ein magnetisches Fluidum bewegt wird, und also der von dem anderen Fluidum induzierte Strom stets Null ist, oder das andere Fluidum positive, bald negative Ströme induziert, deren Summe Null ist, so dass auch hier bloss derjenige Strom bleibt, welcher vom ersteren Fluidum induziert wird. Diese Induktion eines Stromes durch die Bewegung eines magnetischen Fluidums heisse eine unipolare Induktion.“ Auch Ebert (a. a. O. § 224) weist auf das Unzutreffende dieser Benennungen hin und empfiehlt dafür einerseits die von Matteucci (Cours spécial sur l'induction p. 65) herrührende achsiale Induktion und andererseits Rotationsinduktion.

Es sei bei dieser Gelegenheit bemerkt, dass der Versuch 91a von Ebert in Widerspruch steht mit dem Faradayschen im Art. 3099. Ebert giebt an, dass man keinen merklichen Ausschlag bei Rotation eines Magneten um seine Achse erhalte, wenn man die Galvanometerdrähte in der Mitte und an einem Punkte jenseits eines der Pole nahe der Achse mittels Schleiffedern anbringe. Dieses Versuchsergebnis scheint mir nicht nur mit dem Faradayschen Versuche (vergl. auch Weiler, Zeitschr. f. ph. u. ch. U. VII, 6; Wiedemann, a. a. O. II, § 725) unvereinbar zu sein, sondern auch mit der theoretischen Erklärung, die Ebert selbst unmittelbar vorher giebt. Die Anzahl der geschnittenen Kraftlinien ist genau so gross wie die der Linien, die zwischen beiden Gleitstellen hindurchgehen. Zwischen den beiden Schleiffedern befindet sich nun die Hälfte aller Linien einer Hauptebene. Bei einer Umdrehung des Magneten werden somit alle Linien einmal geschnitten, wodurch eine elektromotorische Kraft geweckt wird.

45) Denkt man sich eine Ebene senkrecht zur Inklinationsrichtung, so sendet der Erdmagnetismus durch jeden Teil der Ebene von 2 qcm Inhalt eine Kraftlinie (Ebert, a. a. O. § 77).

46) In der Uebersetzung ist vor dem Worte „Rechtecken“ im Art. 3195 „ähnlichen“ ausgelassen.

47) Während der Umdrehung des Rechteckes ändert sich die Zahl der Linien, die das Innere des Leiters durchsetzen, und zwar langsam, wenn sich die wirksamen Rechtecksseiten den Linien nahezu parallel bewegen, und schnell, wenn sie letztere fast winkelrecht durchqueren. Die elektrische Wirkung ist von der Geschwindigkeit der Aenderung der Zahl der Linien abhängig. Sieht man in der Richtung der Kraftlinien auf das Rechteck, so fliesst in dem Falle, dass die Linienzahl abnimmt, ein Strom im Sinne des Uhrzeigers und in dem Falle, dass sie zunimmt, gegen den Uhrzeiger durch den Draht. Auf diese Vorgänge bezieht sich die Maxwellsche Regel, die von Ebert (a. a. O. § 213) so ausgesprochen wird: „Wird durch irgend einen Vorgang innerhalb einer Leiterschleife

die Kraftlinienzahl vermindert, so wird ein direkter, wird sie vermehrt, ein inverser Strom induziert“. Dabei ist angenommen, dass der Beobachter in der Richtung der Kraftlinien den Leiter ansieht. Diese Regel ist ein bequemes Hilfsmittel für die Feststellung der Richtung des Induktionsstromes, wenn ein geschlossener Leiter vorliegt. Da es sich im Falle der unipolaren Induktion um einen offenen linearen Leiter handelt, der die Kraftlinien während der Rotation durchschneidet, so findet sie hierbei keine Anwendung. Der Leiter umschliesst quer zu den Kraftlinien keine Fläche; denn die Linien fallen mit dem Leiter in dieselbe Ebene. Man kann daher nicht, wie Weiler (Zeitschr. f. ph. u. ch. U. VII, 6) thut, davon reden, „dass die Anzahl der durch seine (des Leiters) Fläche gehenden Kraftlinien sich ändert“. Das, was die Induktionswirkung entstehen lässt, ist das Schneiden der Linien, das man sich an äusseren oder inneren, feststehenden oder beweglichen Linien gleich befriedigend vorstellen kann.

48) Vergl. Faraday, a. a. O. III. Band S. 466, und Newtons Werke, Horsley's ed. 1783 vol. IV. p. 438.

49) Vergl. Faraday, a. a. O. II. Band S. 255.