Die Anregung zu den folgenden Zeilen verdanke ich in erster Linie Herrn Direktor Dr. Szymański, der mich nicht allein in liebenswürdigster Weise bei meinen Versuchen mit seinem Rat unterstützte, sondern mir auch gestattete, seinem Unterrichte beizuwohnen und die aufserordentlich günstigen Erfolge zu sehen, die er durch seine Methode erzielte. Da ich gleichzeitig Gelegenheit hatte, das Gehörte im eigenen Unterricht bei einem ganz andern Schülermaterial zu verwerten und dabei sah, dafs auch hier ein tieferes Verständnis der Schüler mit geringerer Mühe durch eingehendere Besprechung der Kraftlinien erzielt wurde, so veröffentliche ich diese Zeilen, die, wenn sie auch wenig Neues bieten sollten, doch vielleicht dem einen oder andern meiner Herren Kollegen willkommen sein dürften.

Faraday, bei dessen Untersuchungen die Betrachtung der magnetischen Kraftlinien eine so bedeutende Rolle spielt, bezeichnet dieselben an verschiedenen Stellen als „die Repräsentanten der magnetischen Kraft", „den wahren Ausdruck alles dessen, was wir über die eigentümliche Wirkung des Magneten wissen", „den genauen Ausdruck für die Natur, den Zustand, die Richtung und den verhältnismäfsigen Betrag der magnetischen Kräfte". Er ist der Ansicht, dafs die Einführung der Kraftlinien vorzüglich geeignet sei, die magnetischen Erscheinungen verständlich zu machen. Sehen wir uns nun die in unsern Schulen gebräuchlichen Lehrbücher der Physik daraufhin an, so scheint es, als ob sich diese Ansicht Faradays nicht als richtig erwiesen habe, denn in keinem dieser Bücher spielt die Betrachtung der Kraftlinien eine wesentliche Rolle, in vielen wird sie als für den Schüler ungeeignet überhaupt fortgelassen. Dem entspricht auch, wie ich aus Besprechungen mit Kollegen schliefse, im allgemeinen die Behandlung der Lehre vom Magnetismus und der Elektrizität im Unterricht. Auch die Mahnung hervorragender Fachmänner, die Bedeutung der Kraftlinien wegen ihrer Wichtigkeit für die Praxis in der Schule zum Verständnis zu bringen, hat bis jetzt, wie ich glaube, kaum eine Änderung bewirkt. Wer die herrlichen Vorträge des Herrn Geheimrat Prof. Dr. Slaby, die allen Teilnehmern an dem naturwissenschaftlichen Ferienkursus Ostern 1893 in dankbarer Erinnerung sein dürften, gehört hat, wird dessen Ausspruch, dafs mit den Kraftlinien in der Elektrotechnik „nicht mehr als alles" gemacht werde, durchaus verständlich finden. Auch Herr Professor Slaby ist der Ansicht, dafs die Bedeutung der Kraftlinien im heutigen physikalischen Unterricht nicht genügend gewürdigt werde. Er sagte, dafs die Methode, die in den jetzt gebräuchlichen Lehrbüchern der Physik ganz besonders in der Elektrizitätslehre befolgt werde, für die Praxis absolut nicht zu gebrauchen sei, die Unterrichts-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

methode müsse unbedingt geändert werden, da bei jungen Leuten, die ihre in der Schule erworbenen Kenntnisse in der Physik praktisch verwerten wollten, jetzt eine geraume Zeit darauf verwendet werden müsse, ihre bisherigen Anschauungen zu „vernichten". Dieselbe Ansicht finden wir vertreten durch Herrn Direktor Szymański in seinem Aufsatz: Experimentelle Einführung in die Theorie der Magnet-Induktion unter Zugrundelegung der Theorie der magnetischen Kraftlinien (Zeitschr. für den phys. und chem. Unterricht Okt. 1893). Er sagt: „Während ein Schüler, der nach der bisher üblichen Methode die Induktionserscheinungen kennen gelernt hat, sich auf einem ihm ganz fremden Gebiete findet, wenn er irgend ein Buch über die praktische Anwendung der Elektrizität in die Hand nimmt, gewinnt der Schüler bei dieser Art der Behandlung eine Grundlage, die ihm ermöglicht, den Fortschritten der angewandten Elektrizität zu folgen". Aber, so könnte man vielleicht sagen, unsere Schulen sind doch keine Fachschulen für Elektrotechniker; gewifs nicht, aber die Grundbegriffe der Elektrotechnik wie z. B. Volt, Ohm, Ampère u. s. w. spielen im praktischen Leben eine so wichtige Rolle, dafs es unmöglich ist, sie in der Schule mit Stillschweigen zu übergehen, und will man sie dem Schüler zu wirklichem Verständnis bringen, so ist eine eingehende Besprechung der Kraftlinien unerläfslich. Dazu kommt noch, dafs der Unterricht dadurch wesentlich vereinfacht wird, da durch die Einführung der Kraftlinien die Erklärung der verschiedensten Erscheinungen, der Magneto- und Volta-Induktion, der Annäherungs- und Entfernungsströme sowie die Wirkungsweise der verschiedensten elektrischen Maschinen unter denselben Gesichtspunkt gebracht werden, und dafs zugleich die Betrachtung des Kraftfeldes uns von vornherein stets ein anschauliches Bild der ganzen Erscheinung verschafft. Die Übereinstimmung der magnetischen und elektrischen Vorgänge erscheint bei den bisher üblichen Betrachtungsweisen als eine zufällige, sie ergiebt sich aber als eine notwendige, wenn man von der Betrachtung des Kraftfeldes ausgeht. Faraday sagt in dieser Beziehung: „Welcher Vorstellung wir uns auch zum Ausdruck der magnetischen Kraft bedienen, so werden wir in dieselbe zuletzt auch die elektrischen Kräfte einschliefsen müssen, denn beide sind mit einander so verknüpft, dafs ein und derselbe Ausdruck für beide gelten sollte. In dieser Beziehung scheint mir die Idee der Kraftlinien Vorzüge vor der Methode zu haben, sich die magnetischen Kräfte als Wirkungscentren vorzustellen. In einem geraden Draht z. B., den ein elektrischer Strom durchfliefst, ist es offenbar unmöglich, sich die magnetischen Kräfte als Wirkungscentren vorzustellen, während die Kraftlinien ein einfacher und treuer Ausdruck derselben sind." (Über den physikalischen Charakter der Kraftlinien, Philosophical Magazine, Juni 1852.)

Den Unterrichtsgang denke ich mir etwa folgendermafsen: Nachdem über natürliche und künstliche Magnete, Formen und Eigenschaften derselben kurz gesprochen, wird der Begriff des Kraftfeldes als Wirkungsbereich des Magneten erläutert und die Betrachtung der Kraftlinien als ein Mittel, eine genauere Vorstellung über die vorhandenen Kräfte zu gewinnen, angegeben. Zu dem Begriff der Kraftlinien kann man auf folgende Weise gelangen. Nähert man dem einen Pol eines langen Magnetstabes eine möglichst frei bewegliche Magnetnadel, so stellt sich dieselbe stets in radiale Richtung zu dem Pole des Stabmagneten. Nehmen wir statt der einen Magnetnadel deren viele, oder streuen wir Eisenfeilspäne auf ein Blatt Papier, welches auf das eine Ende des vertikal aufgestellten Magnetstabes gelegt ist, so zeigt sich dieselbe Erscheinung, die Eisenteilchen ordnen sich in bestimmter Weise, so dafs sie vom Magnetpol ausgehende Linien bilden, welche

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

die Richtung der vom Pol ausstrahlenden Kraft anzeigen. (In manchen Fällen, besonders bei schwachen magnetischen Kräften, ist es vorteilhaft, statt der Eisenfeilspäne Eisenpulver zu wählen. Man erhält dann zartere Linien, da man hier aber auch glattes Papier anwenden mufs, so zeigen sich bei stärkeren magnetischen Kräften in der Nähe der Pole leere Stellen, da sich dort das feine Pulver nicht halten kann. Am besten macht man es, wie Grimsehl in seiner Programmabhandlung „Die magnetischen Kraftlinien und ihre schulgemäfse Behandlung zur Erklärung der Induktionsströme" Cuxhaven 1893 vorschlägt, so, dafs man sich Eisenfeilicht verschiedener Stärke herstellt.)

Hängt man den Magnetstab in horizontaler Lage auf und führt eine kleine Inklinationsnadel oberhalb desselben langsam von einem Ende zum andern, so bemerkt man, dafs die Nadel in der Mitte des Stabes horizontal schwebt, dafs aber der Nordpol der Nadel sich immer mehr senkt, je mehr sich dieselbe dem Südpol nähert u. s. w. Dieselben Erscheinungen zeigen sich, wenn die Magnetnadel unterhalb des Magnetstabes an diesem entlang geführt wird, oder wenn man eine in horizontaler Ebene frei bewegliche Nadel an den Seiten des Magneten in die verschiedenen Lagen bringt; stets zeigt sie die resultierende Richtung der auf sie wirkenden Kräfte an. Nimmt man auch hier wieder statt der einen mehrere kleine Magnetnadeln, oder bestreut ein Blatt Papier, welches auf dem in horizontaler Lage befindlichen Magneten liegt, mit Eisenfeilicht, so erhält man geschlossene Kurven, einen ebenen Schnitt der Kraftflächen, und wenn man gleichzeitig Eisenfeilspäne und eine kleine Magnetnadel in das Kraftfeld bringt, so stellt sich die Nadel in tangentiale Richtung zu den gebildeten Kurven. Daraus geht hervor, dafs uns diese Linien an jeder Stelle des Kraftfeldes die resultierende Richtung der dort wirksamen magnetischen Kräfte angeben. Um dies noch auf andere Weise zu zeigen, macht Herr Direktor Szymański folgenden interessanten Versuch: Er läfst in einem gröfseren Gefäfs einen Kork, auf welchem in vertikaler Stellung eine magnetisierte Stricknadel befestigt ist, auf Wasser schwimmen. In der Höhe des oberen Endes der Nadel, das ein Nordpol sein möge, bringt er einen mit Draht umwickelten weichen Eisenstab an und läfst den Nordpol das eine Ende des Stabes berühren. Wird nun das Eisen durch einen elektrischen Strom so magnetisiert, dafs das von der Nadel berührte Ende ein Nordpol wird, so wird die Nadel abgestofsen und bewegt sich in einer gekrümmten Linie, einer Kraftlinie, zum Südpol des Stabes. Dasselbe geschieht, wenn man die Stricknadel an irgend eine andere Stelle des Gefäfses bringt; sobald ein magnetisches Feld erzeugt wird, folgt der Nordpol der Nadel der durch den Punkt gehenden Kraftlinie. Um zu verhindern, dafs die Nadel durch die plötzlich erfolgende Abstofsung in gerader Linie fortbewegt und so in das Gebiet anderer Kraftlinien geschleudert wird, werden an dem Kork zwei gekreuzte Glimmerplättchen angebracht, wodurch ein gröfserer Widerstand gegen die Bewegung erzeugt wird.

In gleicher Weise wie beim Stabmagneten zeigt man durch Fixierung von Eisenfeilspänen den Verlauf der Kraftlinien beim Hufeisenmagneten und zwischen den Polen zweier verschiedener Magnete. Stehen zwei ungleichnamige Pole einander gegenüber, so verlaufen die Kraftlinien ungehindert von Pol zu Pol, während sie bei gleichnamigen Polen sich abstofsen und seitlich ablenken. Da sich die Eisenteilchen sehr leicht verschieben, so läfst man entweder schon vorher mit Schellacklösung fixierte Bilder der Kraftfelder zirkulieren, oder man fixiert sie vor den Augen der Schüler, indem man mit Schellacküberzug versehene Bogen nimmt, die man nach dem Auf-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

streuen der Eisenfeile mit Alkohol anfeuchtet, worauf man die Blätter, ohne die Bilder zu zerstören, herumreichen kann. (Jamieson empfiehlt in seinen Elementen des Magnetismus und der Elektrizität, Papier zu nehmen, welches mit einem Paraffinüberzug versehen ist, und nach dem Aufstreuen der Eisenfeilspäne die Bilder durch Erwärmung des Papiers zu fixieren.)

Nachdem diese einfachsten Kraftfelder dargestellt und betrachtet sind, bringt man ein Stück weiches Eisen in das magnetische Feld. Die Kraftlinien biegen sich demselben zu, werden von ihm gleichsam aufgesogen (vergl. Fig. 3). Faraday vergleicht diese Wirkung des Eisens im magnetischen Felde mit der Änderung, welche in den Strömungskurven der Elektrizität und der Wärme hervorgerufen wird, wenn man in den von den Strömungskurven durchsetzten Raum einen bessern Leiter der Elektrizität resp. Wärme hineinbringt. Gerade so, wie ein Strom, der durch ein System von Drähten verschiedener Substanzen geleitet wird, in gröfserer Menge diejenigen Teile durchströmt, die ihm den geringsten Widerstand oder die gröfste Leitungsfähigkeit darbieten, so durchsetzen auch die Kraftlinien in gröfster Zahl diejenigen Stoffe, welche ihnen den geringsten Leitungswiderstand entgegensetzen. Ewing (Magnetische Induktion im Eisen und verwandten Metallen) stellt zur Erklärung dieser Erscheinung folgenden Vergleich an. Er vergleicht das homogene magnetische Feld mit einer vom Strom durchflossenen langen und weiten Quecksilberröhre, in welcher die Stromdichte über den ganzen Querschnitt hin gleich ist. Wird in diese Röhre ein Kupferdraht parallel zur Achse eingeführt, so konvergieren die Stromlinien, welche vorher gerade und parallel waren, mehr oder weniger gegen das Kupferstück und häufen sich darin an, weil sein Leitungsvermögen viel gröfser ist als das des umgebenden Quecksilbers. Das Kupfer erhält einen Teil des Stromes, welcher gröfser ist als das Verhältnis, in dem sein Querschnitt zu dem der ganzen leitenden Röhre steht, oder die das Kupfer durchfliefsende Strommenge ist gröfser als die des gleichen Quecksilberquerschnitts. Bringen wir in das magnetische Feld verschiedene Substanzen, wie Holz, Pappe, Messing, Kupfer, Glas, Hartgummi u. s. w., so zeigt sich, dafs die Kraftlinien ebenso verlaufen, wie wenn an ihrer Stelle Luft sich befindet. Die Leitungsfähigkeit dieser Körper, ihre Permeabilität (Sir William Thomson), ist also dieselbe oder doch nur wenig anders als die der atmosphärischen Luft oder auch die des leeren Raumes; wir bezeichnen sie als schlechte Leiter für die Kraftlinien, während Eisen und Stahl gute Leiter sind. Dafs auch ihre Leitungsfähigkeit noch verschieden ist, zeigt Fig. 1, wo sich gleiche Stückchen Eisen und Stahl im magnetischen Felde befinden. Wenn wir also in diesem Sinne von dem „Leitungsvermögen" der Körper sprechen, so verstehen wir darunter die Fähigkeit der verschiedenen Substanzen, den Durchgang der magnetischen Kraftlinien zu beeinflussen. Körper, welche wie das Eisen diesen Durchgang erleichtern, bezeichnen wir als paramagnetische, während diejenigen, welche wie Wismuth ihn mehr oder weniger hemmen, zu der Gruppe der Diamagnetika gehören. Wird ein paramagnetischer Körper in das magnetische Feld eingeführt, so bewirkt er eine Konzentration der von andern Stellen abgelenkten Kraftlinien, so dafs den von ihm erfüllten Raum mehr magnetische Kraft durchsetzt als vorher. Eine in das magnetische Feld gebrachte diamagnetische Substanz wird dagegen eine Zerstreuung der Kraftlinien hervorrufen, und es wird durch den von ihm eingenommenen Raum weniger magnetische Kraft hindurchgehen, als wenn sie nicht vorhanden wäre. Durch die Verdichtung der Kraftlinien in paramagnetischen Körpern wird natürlich eine Verminderung der magnetischen Kraft an den

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

äquatorialen Stellen veranlafst, während bei diamagnetischen Körpern umgekehrt eine Verdichtung an diesen Stellen eintritt. Daraus erklärt sich auch, dafs sowohl zwei Eisenkugeln wie zwei Wismuthkugeln, welche in einem gleichförmigen magnetischen Felde mit ihren äquatorialen Teilen nebeneinander liegen, sich von einander entfernen (Faraday 3298). Die ersteren thun es, weil zwischen ihnen eine Verminderung der Kraftlinien eingetreten ist und sie das Bestreben haben, sich von Orten schwächerer zu Orten stärkerer Wirkung zu begeben, die letzteren, weil zwischen ihnen die Kraftlinien dichter zusammengedrängt sind als auswärts und sie von Orten stärkerer zu Orten schwächerer Wirkung zu gehen bestrebt sind. Paramagnetische und diamagnetische Körper nähern sich, weil der erstere in der Nähe des letzteren einen Ort stärkerer Wirkung, der letztere in der Nähe des ersteren einen Ort schwächerer Wirkung findet. Auch die Erscheinungen der gewöhnlichen Anziehung und Abstofsung erklären sich auf diese Weise. Die guten Leiter zeigen das Bestreben, die Lage anzunehmen, in welcher sie die meisten Kraftlinien aufnehmen und fortführen können, sei es durch ein Richten, sei es durch Annähern, indem der beste Leiter zu dem Orte stärkster Wirkung hingeht. Nähert man einen Magnetpol einem festliegenden gleichnamigen Pol, so bäumen sich die Kraftlinien gegen einander auf und stofsen sich ab; die des einen Magneten können in den andern nicht eindringen, da sie Strahlen entgegengesetzter Richtung vorfinden; ist aber einer der Magnete beweglich, so dreht er sich so, dafs die von dem andern ausgehenden Kraftstrahlen einen ungehinderten Verlauf durch ihn hindurch nehmen können. Genau so ist es bei weichem Eisen; die Kraftlinien streben dem guten Leiter zu, durchsetzen ihn in grofser Dichte und drehen die Molekularmagnete so, dafs sie durch diese hindurch einen möglichst ungehinderten Verlauf nehmen können. Das Eisen wird infolge dessen magnetisch, und zwar entsteht an der Stelle, wo die Kraftlinien eintreten, ein Südpol, da, wo sie das Eisen verlassen, ein Nordpol. Setzen wir auf einen Hufeisenmagneten Polschuhe von weichem Eisen, so verlaufen die Kraftlinien zwischen diesen in grofser Dichte und ziemlich gleichmäfsig (Fig. 2), wogegen bei vorgelegtem Anker nur sehr wenig Kraftlinien in die Luft austreten, fast alle gehen durch den Anker direkt vom Nordpol zum Südpol. Wir ersetzen nämlich einen schlechten Leiter durch einen guten, durch den weit mehr von der Kraft des Magneten hindurchgelassen wird als vorher durch denselben Raum, und es wird infolge dessen die magnetische Kraft in dem umgebenden Raum sehr vermindert. Besitzt ein in das magnetische Feld gebrachter weicher Eisenkörper einen Hohlraum, so weichen die Kraftlinien der Höhlung aus, nur sehr wenige treten in dieselbe ein, und fast alle verlaufen innerhalb des Eisens, so dafs in den Hohlraum gebrachte Eisenfeilspäne ungeordnet bleiben, wie es Fig. 3 zeigt, wo sich ein weicher Eisenring im magnetischen Felde befindet. Teilen wir den Ring in zwei Hälften, bringen sie etwas auseinander und betrachten die Kraftlinien zwischen den beiden Teilen, so können wir aus dem Verlauf derselben einen Schlufs auf ihr Verhalten im Innern des Eisenkörpers ziehen. (Fig. 4.) Zugleich erkennen wir noch etwas anderes; während bei dem geschlossenen Eisenring die Eisenfeilspäne im Innern desselben ungeordnet blieben, sehen wir jetzt auch dort deutlich Kraftlinien. Dadurch, dafs man zwischen die beiden Ringhälften eine Luftstrecke, also einen schlechten Leiter einschaltet, wird ein Teil der Kraftlinien abgelenkt und tritt in den innern Hohlraum ein, und zwar wird die Zahl derselben um so gröfser, je breiter die trennende Luftschicht ist. Fig. 5 stellt eine andere Lage der beiden Ringhälften dar, nämlich die, wo die Trennungsstellen in der Verbindungslinie der beiden Pole liegen. Bei dieser Stellung dringen

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

bei gleicher Entfernung der beiden Hälften viel weniger Kraftlinien in den Innenraum ein als bei der frühern.

Nach diesen Betrachtungen geht man zur Besprechung des erdmagnetischen Feldes über, weist darauf hin, dafs die Erde von magnetischen Kraftlinien umhüllt ist, die sich in der einen magnetischen Hemisphäre erheben und über die äquatorialen Gebiete in die andere übergehen, wo sie in das Innere der Erde eintreten und den Kraftkreis schliefsen, dafs sich ferner eine frei bewegliche Magnetnadel als Tangente an diese Kurven einstellt (Inklination, Deklination u. s. w.).

Wir wenden uns nun zur Bestimmung der Intensität der Kraft an verschiedenen Stellen des magnetischen Feldes und zeigen, dafs die Kraftlinien als genaue Darstellungen der magnetischen Kraft sowohl hinsichtlich der Richtung als auch der Gröfse derselben angesehen werden können. Zunächst sehen die Schüler, dafs die Kraftlinien an verschiedenen Stellen verschieden dicht verlaufen, dafs sie in der Nähe der Pole am dichtesten, in der Nähe der Indifferenzzone weniger dicht erscheinen, und dadurch werden sie auf einen Zusammenhang zwischen der Dichte der Kraftlinien und der Stärke des magnetischen Feldes geführt. Von dem Pole eines langen, dünnen Stabmagneten verlaufen die Kraftlinien strahlenförmig nach allen Richtungen und zwar ist ihre Anzahl unendlich grofs. Will man sie aber zur Bestimmung der magnetischen Kraft benutzen, so mufs man eine begrenzte Zahl zu Grunde legen, und dies erreicht man auf folgende Weise. Zunächst ist klar, dafs, wenn man sich um einen Pol eine Kugelfläche gelegt denkt, durch sie alle Kraftlinien hindurchgehen. Hat diese Kugelfläche einen Radius von 1 cm, so erhält sie dieselbe Zahl von Kraftlinien, wie wenn sie 10 cm Radius hat; da die letztere Fläche aber 100 mal so grofs ist als die erstere, so kommt auf jedes qcm derselben nur der hundertste Teil der Kraftlinien, welche auf 1 qcm der kleineren Kugelfläche fallen. Es ist also die Anzahl der Kraftlinien, welche eine zu ihnen senkrechte Fläche von bestimmter Gröfse durchsetzen, umgekehrt proportional dem Quadrat ihrer Entfernung vom Ausgangspunkte. Diese Zahl hängt aber ferner ab von der Stärke des Magnetpols. Ist diese m, so gehen auch m-mal so viel Kraftlinien durch die Fläche, als wenn die Polstärke 1 ist. Wählt man also das Kraftlinienbündel, welches von einem Pol von der Stärke 1 ausgehend, in einer Entfernung von 1 cm eine Fläche von 1 qcm durchsetzt, als Einheit und nennt dies eine Kraftlinie, so gehen bei der Polstärke m in einer Entfernung von 1 cm m Kraftlinien durch die Fläche von 1 qcm. Die Zahl der Kraftlinien, welche in der Entfernung r durch die Flächeneinheit gehen, ist $\frac{m}{r^2}$. Die um den Pol gelegte Einheitskugel hat eine Oberfläche von 4π qcm, es gehen also durch sie bei der Polstärke 1 nach obiger Definition 4π Kraftlinien hindurch, und ein Pol von der Stärke m sendet $4\pi m$ Kraftlinien aus.

Was heifst das nun aber, ein Pol hat die Stärke m? Wir schliefsen auf die Stärke eines Magnetpols aus der Gröfse der Kraft, mit welcher derselbe einen ungleichnamigen Pol anzieht, einen gleichnamigen abstöfst. Denken wir uns zwei lange, dünne, gleich stark magnetisierte Stricknadeln, von denen die eine fest, die andere frei beweglich ist, mit den gleichen Polen in einer Entfernung von 1 cm einander zugekehrt, so wird die bewegliche Nadel infolge der Abstofsung sich entfernen. Diese abstofsende Kraft können wir durch eine Gegenkraft, deren Gröfse wir genau zu bestimmen im stande sind, aufheben; ist diese Gegenkraft gleich einer Dyne, so ist die Polstärke gleich der magnetischen Einheit. Man könnte hier einwenden, dafs sich in

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Wirklichkeit diese Einheit gar nicht herstellen läfst, aber müssen wir denn alle Mafseinheiten wirklich herstellen? Wir vergleichen Flächen mit Flächen, Körper mit Körpern, aber nachdem wir die Mafseinheiten definiert haben, messen wir nur Längen und finden durch Rechnung die Anzahl der Flächen- und Körpereinheiten. Ist nun die magnetische Einheit definiert, so können wir zur Bestimmung der Feldstärke in einem bestimmten Punkte P übergehen. Zu dem Zwecke denken wir uns durch diesen Punkt einen zu den Kraftlinien senkrechten Schnitt gelegt. Dann ist die Feldstärke gleich der Zahl der Kraftlinien, welche durch die Einheit dieser Fläche an der betreffenden Stelle gehen. Ist diese Anzahl m, so ist die wirkende Kraft dieselbe, wie sie ein Pol von der Stärke m in der Einheit der Entfernung ausübt, so dafs also ein Pol von der Stärke 1, der sich in P befindet, mit einer Kraft von m Dynen angegriffen wird.

Nachdem das durch einen Magneten erzeugte Kraftfeld besprochen ist, wenden wir uns dem durch einen elektrischen Strom hervorgerufenen zu. Ob man hier zunächst die Erzeugung des Stromes durch Batterieen mehr oder weniger eingehend behandeln, oder ob man nach dem Vorschlage Jamiesons u. a. dies einer späteren Gelegenheit vorbehalten und Batterieen und Dynamomaschinen „einfach als Quellen elektrischer Energie“ vorführen soll, „denen man nach Gefallen irgend eine gewünschte Menge von Strom für die Zwecke unserer Versuche entnehmen kann“ (Jamieson, Elemente des Magnetismus und der Elektricität), lasse ich dahingestellt. Mir kommt es hier nur darauf an zu zeigen, welch hohe Bedeutung die Kraftlinien für den physikalischen Unterricht haben, und wie durch Besprechung derselben der Unterricht wesentlich vereinfacht wird.

Zunächst wird gezeigt, dafs ein von einem elektrischen Strom durchflossener Draht auf seiner ganzen Länge im stande ist, Eisenfeilspäne anzuziehen, die sich dann senkrecht zur Drahtrichtung stellen. Um uns ein Bild von dem Verlauf der Kraftlinien in dem durch den elektrischen Strom erzeugten magnetischen Felde zu verschaffen, führen wir einen starken Kupferdraht (etwa 3 mm) durch einen Bogen steifen Papiers und streuen, während der Strom durch den Draht fliefst, Eisenfeile auf, die dann auf die bekannte Weise fixiert werden. Es zeigt sich ein System von koncentrischen Kreisen (Fig. 6), und es handelt sich nun darum, festzustellen, in welcher Richtung der Kraftflufs in diesen Kraftlinien stattfindet, was mit Hülfe einer kleinen Magnetnadel geschieht. Dieselbe stellt sich auch hier, wenn ein Strom den Draht durchfliefst, an allen Stellen als Tangente an die Kreislinien ein, und die Lage ihrer Pole läfst sich durch die Ampèresche Schwimmregel oder die Flemingsche Handregel leicht bestimmen. Berücksichtigen wir, dafs sich die Nadel, wie wir früher sahen, im magnetischen Felde so einstellt, dafs sie dem Verlauf der Kraftlinien möglichst wenig Widerstand bietet, dafs also die Richtung der durch den elektrischen Strom erzeugten Kraftlinien dieselbe ist wie die Richtung der Kraftlinien im Innern der Nadel wenn sie dem Einflufs des Stromes ausgesetzt ist, so finden wir, dafs der Nordpol der Magnetnadel uns an allen Stellen die Richtung der Kraftlinien anzeigt. Könnten wir einen isolierten Nordpol erzeugen, so würde derselbe während der Dauer des Stromes in der Richtung der magnetischen Kraftlinien rotieren; da aber ein Nordpol stets mit einem Südpol verbunden ist, der natürlich mit der gleichen Kraft nach der entgegengesetzten Richtung getrieben wird, so nimmt die Nadel die tangentiale Stellung ein.

Führen wir einen U-förmig gebogenen dicken Kupferdraht, dessen Schenkel etwa 3—4 cm auseinander stehen, durch das Papier, schicken einen Strom hindurch, der in dem einen Schenkel

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

aufwärts, im andern abwärts fliefst, und streuen Eisenfeile auf, so müfsten sich zwei Systeme von konzentrischen Kreisen bilden, in welchen der Kraftflufs in entgegengesetztem Sinne stattfindet. Die beiden Systeme beeinflussen sich aber und zwar in der Weise, dafs die Kraftlinien zwischen den beiden Drähten, wo sie gleich gerichtet sind, sich abstofsen und fast geradlinig werden (Fig. 7). Ändern wir den Versuch so ab, dafs in beiden Schenkeln die Stromrichtung dieselbe ist, indem wir zwei Drähte in der Weise biegen wie es Fig. 12 zeigt, und ihre Enden zusammenbringen, so erzeugt der elektrische Strom ein Kraftfeld, wie es Fig. 8 darstellt. Die Kraftlinien haben hier zwischen den Drähten entgegengesetzte Richtung und ziehen einander an. Es ist klar, dafs wir daraus sofort Ampères Gesetze über das Verhalten paralleler und gekreuzter Stromleiter ableiten können. Führen parallele Stromleiter gleich gerichtete Ströme, so ziehen sie einander an, da die zwischen ihnen verlaufenden Kraftlinien entgegengesetzte Richtung haben; sind die Ströme entgegengesetzt gerichtet, so erfolgt Abstofsung. Ebenso lehrt die Anschauung der Kraftfelder auch, wie gekreuzte Ströme sich beeinflussen. Es zeigt sich sofort, dafs diejenigen Teile, in welchen die Ströme sich nach dem Kreuzungspunkte hin bewegen oder beide von ihm weg fliefsen, sich anziehen u. s. w.

Wenn wir den stromführenden Draht zu einer Schlinge oder einem Kreise biegen, so besitzt der von dem Draht umschlossene Raum ebenfalls magnetische Eigenschaften, und zwar verhält er sich wie eine magnetische Platte, deren Polarität wir wieder mit Hülfe der Handregel bestimmen. Die Kraftlinien verlaufen im Innern der Schlinge vom Südpol zum Nordpol, während sie aufserhalb überall vom Nordpol zum Südpol gehen. Wird ein Magnet einer solchen stromführenden Schleife genähert, so stellt sich letztere, wenn sie leicht beweglich ist, so, dafs die Kraftlinien des durch den Strom erzeugten Feldes dieselbe Richtung haben wie die des Magneten, was der Anziehung ungleichnamiger Pole gleichkommt. Ist umgekehrt die Schleife fest, der Magnet leicht beweglich, so stellen sich ebenfalls die ungleichnamigen Pole einander gegenüber, und der Magnet wird in die Schleife hineingezogen; die Stellung ist stets so, dafs eine möglichst grofse Zahl der Kraftlinien des Stromfeldes mit den Kraftlinien im Innern der Magnetnadel zusammenfällt.

Nachdem das Kraftfeld einer einzelnen Drahtwindung besprochen ist, untersuchen wir dasjenige mehrerer gleichgerichteter Windungen, das Feld einer Drahtspule oder eines Solenoids. Die Kraftfelder der einzelnen Windungen unterstützen sich, die Kraftlinien gehen in einander über, so dafs wir im Innern eine grofse Menge (bei n Windungen eine n-mal so grofse Zahl als bei einer Windung) geradliniger Kraftstrahlen haben, während diese aufserhalb bogenförmig von einem Ende zum andern gehen. Fig. 9a zeigt das Kraftfeld aufserhalb einer Spule und zwar in einer durch die Achse derselben gelegten Ebene, während Fig. 9b einen ebenen Schnitt durch das Kraftfeld im Innern der Spule darstellt. Das letztere Bild wurde auf folgende Weise hergestellt. Ein mit Eisenfeile bestreuter Papierstreifen wurde in das Innere der Spule gebracht und dann ein starker Strom durch dieselbe geschickt. Nachdem sich die Eisenfeilspäne geordnet, was man durch leichtes Aufklopfen befördert, wurde der Strom unterbrochen, der Streifen sehr vorsichtig herausgenommen und das Bild fixiert. Die Übereinstimmung dieses Kraftfeldes mit dem eines Stabmagneten tritt deutlich hervor; man kann dieselbe noch weiter verfolgen, indem man eine kleine Magnetnadel an verschiedene Stellen innerhalb und aufserhalb des Solenoids bringt, oder indem man andere Schnitte des Kraftfeldes, z. B. senkrecht zur Achse der Spule,

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

darstellt. Wir sehen also, dafs das Kraftfeld eines vom Strom durchflossenen Solenoids genau so beschaffen ist wie das eines Magneten, und dafs infolge dessen das Solenoid ebenso gut Polarität besitzen und die Erscheinungen der Anziehung und Abstofsung zeigen mufs wie ein Magnet. Wir können deshalb für alle magnetischen Erscheinungen von dem Vorhandensein des Stromes absehen, wenn wir den Stromkreis durch seine magnetischen Kraftlinien ersetzen. Dafs wir mit Hülfe des elektrischen Stromes auch Eisen und Stahl magnetisieren können, wird sofort klar, wenn wir Fig. 9a und b betrachten. Bringen wir Eisen in das Innere des Solenoids, so tritt eine Konzentration der dort verlaufenden Kraftlinien ein, da fast alle ihren Weg durch den bessern Leiter nehmen, dessen Leitungsfähigkeit ja 1000—1500mal so grofs ist als die der atmosphärischen Luft. Dafs dadurch die Molekularmagnete gedreht werden, das Eisen also magnetisch wird, und da, wo die Kraftlinien eintreten, ein Südpol, an der Austrittsstelle ein Nordpol entsteht, läfst sich sehr schön zeigen, wenn man ein mit Eisenfeile gefülltes Reagenzglas in das Innere der Spule bringt. Die Polarität des Eisens stimmt mit der des Solenoids überein, wodurch eine bedeutende Verstärkung des Feldes eintritt. Es kommt noch hinzu, dafs, wenn kein Eisenkern vorhanden ist, viele der kleinen durch den Strom erzeugten kreisförmigen Kraftlinien als geschlossene Kurven um ihren eigenen Draht verlaufen, während sie bei Anwesenheit von Eisen aus ihrer Bahn abgelenkt und in das Eisen hineingezogen werden. In Fig. 10 ist das Kraftfeld derselben Spule, die zu Fig. 9 benutzt wurde, die aber hier einen Eisenkern enthält, dargestellt. Es mufste dabei aber ein viel schwächerer Strom angewandt werden, da ein Strom von der Stärke des vorher benutzten auf grofse Entfernung hin noch die Eisenfeile an Eisenkern und Spule zog, so dafs in der Nähe derselben keine Späne auf dem Papier hafteten.

Ströme verschiedener Intensität erzeugen natürlich auch verschieden starke Kraftfelder, und durch Messung letzterer erhalten wir ein Mittel, die Intensitäten verschiedener Ströme mit einander zu vergleichen. Denken wir uns einen stromführenden Leiter von der Länge l in Form eines Kreisbogens vom Radius r, und im Mittelpunkt des Kreises einen Magnetpol von der Stärke m, so ist die Wirkung des Stromes auf den Pol proportional der Drahtlänge l, der Stromstärke i, der Polstärke m und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung r, also gleich $\frac{C\,l\,i\,m}{r^2}$; es ist also die Feldstärke

$$H = \frac{C\,l\,i}{r^2},$$

für den ganzen Kreis ist sie $\frac{2\,\pi\,C\,i}{r}$, wo die Gröfse des Faktors C von dem gewählten Strommafs abhängt. Wählen wir denjenigen Strom als Einheit, der einen Kreis von 1 cm Radius durchfliefsend, im Mittelpunkt desselben die Feldstärke $2\,\pi$ erzeugt, so wird $C = 1$; also für einen Kreis vom Radius r in diesem Strommafs:

$$H = \frac{2\,\pi\,i}{r}.$$

In der Praxis verwendet man den 10. Teil der eben genannten Einheit als Mafseinheit und nennt sie 1 Ampère. (Zum Nachweis des Gesetzes, dafs die Stromstärke umgekehrt proportional ist dem Quadrat der Entfernung, hat Szymański einen sehr sinnreichen einfachen Apparat konstruiert. Derselbe besteht aus drei konzentrischen Drahtkreisen von 10, 20 und

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

30 cm Radius, die in einer Querleiste aus Holz befestigt sind, und in deren Mittelpunkt eine kleine Magnetnadel sich befindet. Der innere Kreis besteht aus einer, der mittlere aus zwei und der äufsere aus drei Windungen. Schickt man nun z. B. einen Strom durch den kleinsten Ring und zugleich durch den mittleren in entgegengesetztem Sinne (Fig. 13), so erfolgt kein Ausschlag der Nadel. Da der zweite Ring die vierfache Länge des ersten hat, so würde bei gleicher Entfernung seine Wirkung auf die Magnetnadel auch die vierfache sein, da hier aber der zweite Ring die doppelte Entfernung hat, so erfolgt keine Ablenkung. Dasselbe ist der Fall, wenn der Strom in derselben Weise durch den ersten und dritten oder durch den zweiten und dritten Ring geführt wird.)

Dafs Eisen, welches sich im Innern einer vom Strom durchflossenen Spule befindet, magnetisch wird, haben wir bereits gesehen. Aus der Betrachtung des Kraftfeldes geht sofort hervor, dafs auch Eisen, welches sich in der Umgebung einer solchen Spule befindet, magnetische Eigenschaften erhält. Es wurde schon früher gesagt, dafs da, wo die Kraftlinien in das Eisen eintreten, ein Südpol, wo sie dasselbe verlassen, ein Nordpol entsteht. Ferner zeigt das Kraftfeld, wie eine frei bewegliche Eisenmasse sich unter dem Einflufs der Spule bewegen würde. Sie würde, der Richtung der Kraftlinien folgend, sich zu den Stellen begeben, wo dieselben am dichtesten sind. Befindet sich z. B. ein Eisenstab in der Verlängerung der Achse des Solenoids, so wird er in dasselbe hineingezogen, und bekanntlich ist dieser Vorgang bei Besprechung der Regulierung von Bogenlampen u. s. w. von Wichtigkeit. Es würde sich hier die Besprechung der Elektromagnete, der elektromagnetischen Motoren, Telegraphie u. s. w. anschliefsen, ohne darauf einzugehen, wende ich mich zu dem Kapitel der

Erzeugung von elektrischen Strömen durch Bewegung eines Stromleiters im magnetischen Felde.

Gerade bei diesem Kapitel tritt die Wichtigkeit der Behandlung der Kraftlinien im physikalischen Unterricht am deutlichsten hervor, da sich die gesamten Induktionserscheinungen auf das Schneiden von Kraftlinien zurückführen lassen und somit eine getrennte Betrachtung von Magnet- und Volta-Induktion u. s. w. vermieden wird. Ich halte mich im folgenden an den Gang, den Herr Direktor Szymański in seinen Vorträgen im Verein zur Förderung des physikalischen Unterrichts und im Ferienkursus Ostern 1893 kurz andeutete. Zunächst scheint es mir wesentlich, dafs man zuerst den Schülern die Entstehung eines Stromes durch Bewegung eines Leiters im Felde eines permanenten Magneten und nicht eines Elektromagneten zeigt; denn wenn es auch im Grunde genommen dasselbe ist, so ist es doch nicht unwesentlich, dem Schüler zu zeigen, dafs ohne das Vorhandensein irgend eines Stromes ein elektrischer Strom durch Bewegung erzeugt werden kann. Allerdings ist zu diesen Versuchen ein gutes Galvanometer erforderlich, aber ich glaube, dafs die Anschaffung eines solchen bei der grundlegenden Bedeutung gerade dieser Experimente sich wohl lohnen und rechtfertigen lassen dürfte, ganz abgesehen davon, dafs bei recht vielen andern Versuchen der Besitz eines empfindlichen Galvanometers sehr wünschenswert erscheint.

Zunächst wird also die Erzeugung eines Stromes durch Bewegung eines begrenzten geradlinigen Leiters im magnetischen Felde gezeigt. Das letztere wird erzeugt durch einen vertikal aufgestellten Hufeisenmagneten, auf dessen Schenkel weiche Eisenplatten als Polschuhe

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

aufgesetzt sind, um ein möglichst gleichförmiges Feld zu erhalten. Wollten wir nun aber die Bewegung des Leiters ohne jegliche Hülfsvorrichtung ausführen, so würde keine Wirkung sichtbar werden, denn wenn auch elektromotorische Kraft geweckt und die entgegengesetzten Elektrizitäten nach den Enden des bewegten Leiters getrieben werden, so entsteht doch kein Strom, da eine Verbindung zwischen den Enden fehlt. Die aufgewandte Arbeit setzt sich allerdings in Wärme um, aber es würde zu lange dauern, bis man ein merkliches Wärmequantum erzielte. Wir verbinden deshalb den beweglichen Leiter mit einem Galvanometer. Würde dies aber direkt geschehen, so würden auch die Zuleitungsdrähte bei der Bewegung mit bewegt werden, und abgesehen davon, dafs dadurch das Galvanometer sehr leicht erschüttert wird, könnten wir auch nicht wissen, ob der entstehende Strom von der Bewegung des geradlinigen Leiters oder der Zuleitungsdrähte herrührte. In Bezug auf die hier nötigen Hülfsmittel verweise ich auf den schon früher erwähnten Aufsatz von Herrn Direktor Szymański in der Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht Okt. 1893, woselbst der Herr Verfasser die von ihm konstruierten und bei den hierher gehörigen Grundversuchen benutzten, ebenso einfachen wie sinnreichen und praktischen Apparate beschrieben hat. Durch die dort ebenfalls beschriebenen Grundversuche wird zunächst gezeigt, dafs Ströme entgegengesetzter Richtung in dem bewegten Leiterstück entstehen, wenn die Kraftlinien in entgegengesetzter Richtung geschnitten werden, dafs aber kein Strom entsteht, wenn der Leiter parallel den Kraftlinien bewegt wird. Die folgenden Versuche zeigen die Abhängigkeit der Stromstärke von der Zahl der geschnittenen Kraftlinien. Bei doppelter Weite der „Gleit-Schienen" erhält man am Galvanometer (bei gleichförmigem magnetischen Felde) einen doppelt so grofsen Ausschlag als bei einfacher Weite, wenn der Leiter um dieselbe Strecke auf- oder abwärts bewegt wird. Bei rascher Bewegung wird ein gröfserer Ausschlag erzielt als bei langsamer; im ungleichförmigen magnetischen Felde zeigt das Galvanometer den stärksten Strom an, wenn der Leiter an den Stellen bewegt wird, wo die Kraftlinien am dichtesten sind u. s. w.

Zur Feststellung der Richtung des entstehenden Stromes kann man entweder die Faradaysche oder die Flemingsche Regel benutzen. Die erstere lautet: Denkt man sich im magnetischen Felde befindlich, so dafs die Kraftlinien bei den Füfsen ein- und am Kopfe austreten, sieht man ferner nach der Richtung, nach welcher der Draht bewegt wird, so ist der im Leiter erzeugte Strom stets nach rechts gerichtet. Die Flemingsche „Dreifingerregel" lautet: Man halte Zeigefinger, Daumen und Mittelfinger der rechten Hand so, dafs sie möglichst senkrecht zu einander stehen wie die Achsen eines rechtwinkligen Koordinaten-Systems. Bringt man dann den Zeigefinger in die Richtung der Kraftlinien, den Daumen in die Bewegungsrichtung, so giebt der Mittelfinger die Richtung des im bewegten Leiter erzeugten positiven Stromes. (Die letztere Regel ist insofern vielleicht praktischer, als man darnach den Schüler die Stromrichtung sofort anzeigen lassen kann, während es häufig Schwierigkeiten macht, sich in die nach der Faradayschen Regel erforderliche Stellung hineinzudenken.) Mit Hülfe dieser Regeln läfst sich nun auch leicht zeigen, dafs der Strom stets in demselben Sinne fliefst, an welcher Seite eines Poles der Leiter auch bewegt werden mag, wie aus Fig. 14, bei welcher die Bewegung nach unten gedacht ist, sofort ersichtlich ist. (Die punktierten Pfeile zeigen die Richtung der Kraftlinien, die vollen die Stromrichtung an.) Führen wir also mehrere Drahtstücke, die untereinander verbunden sind, über den Pol, so müssen sich dieselben genau so unterstützen, wie es bei galvanischen Elementen der Fall ist, welche hintereinander geschaltet sind. Es wird dies auch durch den Versuch

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

bestätigt, denn wenn man eine Drahtschleife, deren Enden an den Schienen entlang gleiten, über den Pol führt, so erhält man einen bedeutend stärkeren Ausschlag, der natürlich noch vergröfsert wird, wenn man statt der einen Windung deren mehrere nimmt. Man kann auf diese Weise z. B. zeigen, wie durch die Bewegung eines Leiters im erdmagnetischen Felde ein Strom erzeugt wird. Hält man eine Drahtspule, deren Enden mit dem Galvanometer verbunden sind, in die Richtung der Inklinationsnadel, so dafs also die Richtung der erdmagnetischen Kraftlinien der Achse der Spule parallel ist, so zeigt sich bei Bewegung der Spule ein Ausschlag am Galvanometer. Konzentriert man die Kraftlinien dadurch, dafs man in das Innere der Spule einen Eisenkern bringt, so ist der Ausschlag natürlich entsprechend gröfser.

Nachdem die Abhängigkeit der erregten elektromotorischen Kraft von der Zahl der geschnittenen Kraftlinien gezeigt ist, kann auch das Mafs für dieselbe eingeführt werden. Bewegt man im magnetischen Felde von der Intensität 1 (was das heifst, wurde früher erklärt) einen Draht von 1 cm Länge mit einer Geschwindigkeit von 1 cm, so wird in dem Drahte eine bestimmte elektromotorische Kraft erregt, die man als Einheit gewählt hat. Da diese Einheit aber sehr klein ist und bei praktischen Messungen sehr grofse Zahlen ergeben würde, so hat man 10^8 derselben zu einer neuen Einheit zusammengefafst, die man 1 Volt nennt. Ein Draht von 1 cm Länge, der mit einer Geschwindigkeit von 1 cm bewegt wird, bestreicht aber in der Sekunde eine Fläche von 1 qcm, und da ferner die Feldstärke gleich 1 angenommen ist, so geht auch eine Kraftlinie durch diese Fläche, die von dem bewegten Drahte geschnitten wird. Es ist demnach die Zahl der erregten elektromotorischen Krafteinheiten gleich der Zahl der geschnittenen Kraftlinien. Ist die Länge des bewegten Drahtes l, die Geschwindigkeit c, die Intensität des Feldes h, so werden in der Sekunde h l c Kraftlinien geschnitten und ebenso viele elektrische Krafteinheiten erregt. Es lassen sich hieran eine Menge ganz interessanter Aufgaben knüpfen, z. B. wie lang ein Draht sein müfste, der mit einer Geschwindigkeit von 600 m im erdmagnetischen Felde bewegt, eine elektromotorische Kraft von 1 Volt erzeugte u. s. w.

Wir sahen, dafs, wenn ein geschlossener Leiter im magnetischen Felde so bewegt wird, dafs Kraftlinien geschnitten werden, stets ein Strom erzeugt wird. Selbstverständlich ist es nun aber gleichgültig, ob der bewegte Leiter die Kraftlinien, oder die bewegten Kraftlinien den Leiter schneiden. Wie aber kann man die Kraftlinien bewegen? Zunächst dadurch, dafs man den Träger derselben, den Magneten oder den stromführenden Draht bewegt, zweitens durch Bewegung von Eisen im magnetischen Felde, drittens durch Öffnen und Schliefsen eines Stromkreises oder durch Veränderung der Stromstärke. Bewegt man z. B. einen Magneten in eine Drahtspule hinein, so entsteht ein Strom, da die Drähte von Kraftlinien geschnitten werden; dasselbe geschieht, wenn der Magnet aus der Spule herausgezogen wird, nur zeigt im letzteren Falle die Galvanometernadel einen Strom von entgegengesetzter Richtung wie im ersten Falle an. Um die Stromrichtung zu bestimmen, läfst sich die Flemingsche Dreifingerregel nicht ohne weiteres anwenden, da diese die Bewegung des Leiters voraussetzt. Es läfst sich allerdings leicht zeigen (oder aus dem Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung schliefsen), dafs es in Bezug auf die Richtung des induzierten Stromes vollkommen gleichgültig ist, ob man den Magneten der Rolle oder die Rolle in umgekehrter Richtung dem Magneten nähert, aber ebenso leicht kann man auch zeigen, dafs in allen Fällen die induzierten Ströme eine solche Richtung haben, dafs sie die Bewegung, durch welche sie erzeugt werden, zu hemmen suchen (Lenzsches

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Gesetz). Bei der Annäherung des Magneten an die Spule entsteht ein Strom, der die entgegengesetzte Richtung hat von demjenigen, der den Magneten mit seiner Polarität erzeugen könnte, während bei der Entfernung ein dem letzteren gleichgerichteter Strom entsteht. Nähern wir also z. B. der Rolle einen Nordpol, so erzeugt dieser an dem zunächst gelegenen Ende der Spule ebenfalls einen Nordpol, und da gleichnamige Pole sich abstofsen, so erfordert es eine gröfsere Anstrengung, den Magneten gegen die Rolle hin zu bewegen, als wenn nur der Widerstand der Luft zu überwinden wäre. Bewegen wir den Nordpol des Magneten in entgegengesetzter Richtung, so ruft er in dem ihm zugewandten Ende der Spule einen Südpol hervor, der den sich entfernenden Nordpol anzieht und wieder die Bewegung zu hemmen sucht.

Wollen wir zeigen, dafs Ströme dadurch erzeugt werden, dafs Eisen im magnetischen Felde bewegt wird, so führen wir einen umsponnenen Draht in mehreren Windungen um einen Magnetpol und verbinden die Enden des Drahtes mit dem Galvanometer. Nähern wir nun dem Magneten ein weiches Stück Eisen, so bewegen sich die Kraftlinien, um ihren Weg durch den guten Leiter zu nehmen, schneiden die Drahtwindungen, und es entsteht ein Strom, der durch den Ausschlag der Galvanometernadel angezeigt wird. (Telephon.)

Endlich können noch Induktionsströme in einem geschlossenen sekundären Leiter erzeugt werden durch Schliefsen oder Verstärken und durch Öffnen oder Vermindern des primären Stromes. Die plötzlich entstehenden oder verschwindenden Kraftlinien schneiden den sekundären Leiter und rufen dadurch den Induktionsstrom hervor, der im ersten Falle die entgegengesetzte Richtung des primären Stromes hat, während er im zweiten Falle diesem gleichgerichtet ist.

Da die Bewegung eines Leiters im magnetischen Felde einstweilen das bequemste und billigste Mittel zur Erzeugung starker elektrischer Ströme ist, so hat man in der Praxis vielfach Anwendung davon gemacht. Bei allen Maschinen, die zu diesem Zwecke konstruiert worden sind, kommt es naturgemäfs darauf an, dafs das Schneiden der Kraftlinien unter möglichst günstigen Verhältnissen eintritt, und da ich hier auf die verschiedenen Arten der Magneto-Induktionsmaschinen nicht näher eingehen kann, wende ich mich sofort zu den Dynamomaschinen, die jetzt die wichtigste Rolle in der Praxis spielen. Der Feldmagnet ist hier ein Elektromagnet, auf dessen Schenkel zur Erzeugung eines kräftigen, möglichst gleichmäfsigen Feldes Polschuhe aufgesetzt sind. Da der weiche Eisenkern infolge des remanenten Magnetismus stets etwas magnetisch ist, so ist von vornherein ein wenn auch schwaches magnetisches Feld vorhanden. Bewegt man nun einen Leiter in diesem Felde und führt den dadurch entstehenden Strom um die Schenkel des Magneten, so verstärkt man das Feld desselben und dadurch auch die durch Bewegung des Leiters entstehenden Induktionsströme. So verstärkt also der Strom den Magnetismus und dieser wiederum den Strom, so dafs man bald der Maschine einen starken elektrischen Strom entnehmen kann. Wie ist nun aber der bewegte Leiter beschaffen? Denken wir uns zwischen den cylindrisch ausgedrehten Polschuhen einen Holzring, dessen Achse senkrecht auf den Kraftlinien steht, und auf welchem mehrere Drahtspulen befestigt sind. Auf die Achse sind Kupferlamellen aufgesetzt, welche untereinander und von der Achse sorgfältig isoliert sind (Kollektor). Zu ihnen führen die Enden der Drahtspulen und zwar so, dafs ein Ende der einen mit dem zunächst gelegenen Ende der folgenden an derselben Lamelle befestigt sind. Wird der Ring bewegt, so schneiden die Drähte die Kraftlinien, es entstehen Induktionsströme, die, wie man sofort erkennt, von verschiedener Stärke sein müssen, da an verschiedenen Stellen des Kraftfeldes in gleichen Zeiten

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

eine ungleiche Zahl von Kraftlinien geschnitten werden. Die meisten werden da geschnitten, wo die Bewegungsrichtung senkrecht zur Richtung der Kraftlinien ist, also bei A und B (Fig. 15). Je mehr die Bewegungsrichtung sich der Richtung der Kraftlinien nähert, desto weniger werden geschnitten, fallen die beiden Richtungen zusammen, wie bei C und D, so werden gar keine geschnitten, die Drähte gleiten hier gewissermafsen an den Kraftlinien entlang, es entsteht also kein Strom. Es ist klar, dafs bei der Stromerzeugung nur diejenigen Teile der Drahtspule in Betracht kommen, die Kraftlinien schneiden. Betrachten wir eine einzelne Drahtwindung und denken uns dieselbe der Einfachheit halber in viereckiger Form, so würden zwei Seiten dieses Vierecks keine Kraftlinien schneiden, da sie bei der Bewegung ihnen parallel bleiben, und nur die beiden andern Seiten würden zur Erzeugung des elektrischen Stromes beitragen. Dementsprechend bleiben alle diejenigen Teile der Spulen unwirksam und kommen nur als Verbindung der übrigen Teile in Betracht, welche sich an den Seiten des Ringes befinden. Das ist auch der Grund, weshalb man dem Anker cylindrische Form giebt, welche es ermöglicht, die wirksamen Teile im Verhältnis zu den unwirksamen lang zu machen. Um die Richtung der entstehenden Induktionsströme zu finden, wenden wir die Flemingsche Regel an. Es zeigt sich, dafs z. B. bei A die Stromrichtung, wenn der Ring im Sinne des Uhrzeigers sich bewegt, in die Ebene des Papiers hineingeht, dasselbe ist aber bei A′ der Fall, auf der andern Seite werden dagegen sowohl bei B als bei B′ Ströme erzeugt, die aus der Papierebene heraustreten. Demnach sollte man glauben, dafs gar kein Strom in der Spule entstehen könnte; machen wir aber den Versuch, so zeigt sich doch ein Strom, der allerdings sehr schwach ist. Es liegt dies daran, dafs die Drahtwindungen auf der Innenseite bei A′ und B′ auf einen kleinern Raum zusammengedrängt sind und deshalb weniger Kraftlinien schneiden als die Windungen der Aufsenseite bei A und B, dafs also die erzeugten entgegengesetzt gerichteten Induktionsströme nicht von gleicher Stärke sind, sich daher auch nicht vollständig aufheben können. Aus der Figur, in welcher die Pfeile die Stromrichtung angeben, ist ersichtlich, dafs sich die induzierten Ströme für jede der beiden Hälften DAC und DBC, in welche der Ring fortwährend bei der Drehung zerfällt, addieren, genau so, wie es bei mehreren hintereinander geschalteten galvanischen Elementen der Fall ist. Würde man nun aber keine weitere Vorrichtung anbringen, so würde ebenso wenig ein Strom entstehen, wie wenn man bei zwei gleich starken Elementen die beiden positiven und die beiden negativen Pole mit einander verbinden würde. Schliefst man aber diese nebeneinander geschalteten Elemente durch einen äufsern Verbindungsdraht, so erhält man einen Strom. Genau so ist es hier; setzt man die Stellen P und Q vermittelst der sogenannten Bürsten oder Schleiffedern durch eine Drahtleitung in Verbindung, so erhalten wir einen Strom, der in unserer Figur von Q nach P fliefst. Wie oben schon bemerkt, würde diese Dynamomaschine aber nur sehr schwache Ströme liefern, da die durch die inneren Teile der Drahtwindungen erzeugten Induktionsströme die durch die äufseren Teile erzeugten sehr schwächen würden. Ganz andere Resultate werden aber erzielt, wenn wir statt des Holzringes einen Eisenring nehmen. Es ändert sich, wie wir früher sahen, die Richtung der Kraftlinien sofort, wenn man Eisen in das magnetische Feld bringt, sie treten dann, wie Fig. 3 zeigt, senkrecht in den Eisenring hinein und verlaufen innerhalb desselben, so dafs in den inneren Raum fast gar keine Kraftlinien gelangen. Noch deutlicher zeigt dies Fig. 11, die in der Weise hergestellt wurde, dafs in das Kraftfeld eines Hufeisenmagneten mit aufgesetzten Polschuhen zwischen die letzteren ein Ring

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

von weichem Eisen gebracht wurde. Der Vorteil, den man dadurch, dafs der innere Raum nicht von Kraftlinien durchsetzt wird, erreicht, ist ein doppelter. Erstens werden jetzt an allen Stellen (mit Ausnahme von C und D Fig. 15) die Kraftlinien von den äufseren Drahtteilen senkrecht geschnitten, und zweitens schneiden die inneren Teile der Drahtwindungen fast gar keine Kraftlinien, so dafs die entstehenden Induktionsströme nicht geschwächt werden. Es kommen bei dieser Anordnung also nur die an der äufseren Ringfläche liegenden Teile des Drahtes in Betracht, während bei den sogenannten Innenpolmaschinen, wie sie z. B. in den Berliner Elektrizitätswerken im Betriebe sind, die an der Innenseite liegenden Drähte die stromerzeugenden sind. Die übrigen Teile der Drahtwindungen spielen nur die Rolle von Stromleitern, und man ersetzt daher die an der Aufsenseite liegenden Teile bei den Innenpolmaschinen durch dicke Kupferstäbe, die durch Asbest von einander getrennt sind. Es können dann die Bürsten direkt auf der Aufsenseite des Ringes schleifen, wodurch der Kollektor überflüssig wird. Diese Maschinen sind gewöhnlich vielpolige, und der Zahl der Pole entspricht dann auch natürlich die Zahl der Bürsten, von denen die Ströme zu einem gemeinsamen Kabel geleitet werden. Der Ring mufs bei diesen Maschinen eine bedeutende Gröfse haben, der Durchmesser desselben beträgt bei den grofsen zehnpoligen Maschinen der eben genannten Elektrizitätswerke 3 m. Sie sind ohne Zwischenübertragung direkt auf die Achse der Dampfmaschine gesetzt und machen 69 Touren in der Minute. Bei kleineren Maschinen mufs natürlich die Tourenzahl bedeutend gröfser sein (1500 und mehr in der Minute), da ja die Gröfse der induzierten elektromotorischen Kraft auch von der Umdrehungsgeschwindigkeit abhängt. Um eine so grofse Tourenzahl zu erreichen, setzt man den Motor (Dampfmaschine, Gasmotor u. s. w.) durch eine Transmission mit der Dynamomaschine in Verbindung, wobei ein Kraftverlust natürlich unvermeidlich ist.

Der durch Schneiden von Kraftlinien erzeugte Induktionsstrom wird, wie oben erwähnt, von den Bürstenklemmen aus um die Schenkel des Elektromagneten geführt, und je nachdem dies geschieht, unterscheidet man drei Hauptarten von Dynamomaschinen: Hauptstrom-, Nebenschlufs- und Compoundmaschinen. Bei den ersteren geht der Strom von einer Bürstenklemme aus um den Elektromagneten und dann durch den äufsern Schliefsungskreis zur andern Bürste zurück. Wird bei diesen Maschinen der äufsere Stromkreis unterbrochen, so verliert auch der Elektromagnet seinen Magnetismus, und die Maschine mufs von neuem angeregt werden. Dieser Übelstand wird vermieden bei den Nebenschlufs- und Compoundmaschinen. Bei den ersteren verzweigt sich der Strom von den Bürstenklemmen aus, ein Zweig geht um die Schenkel des Elektromagneten, der andere durch den äufsern Schliefsungskreis, die Nutzleitung. Die Compoundmaschinen oder Maschinen mit gemischter Wickelung haben die Einrichtung, dafs zunächst ein Zweigstrom von den Bürstenklemmen aus um die Elektromagnete geht, dann aber auch der Draht der äufseren Leitung um dieselben geführt wird. Diese verschiedenen Verhältnisse sind für die Wirkung einer Maschine, besonders für die Gleichmäfsigkeit ihrer Leistungen, von grofser Wichtigkeit. Bei allen magnetelektrischen und dynamoelektrischen Maschinen hängt die Gröfse der erzeugten elektromotorischen Kraft ab von der Zahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien, und diese ist wiederum abhängig von der Stärke des magnetischen Feldes, der Zahl der Ankerwindungen, der Tourenzahl des Ringes und der Lage des letzteren gegen die Pole. Was die Feldstärke anbetrifft, so ist diese bei den magnetelektrischen Maschinen konstant, während sie bei den Dynamomaschinen von der Stärke des um die Schenkel fliefsenden Stromes

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

abhängt, und da diese wiederum nicht allein von dem innern Widerstande der Maschine, sondern auch von der Gröfse des Widerstandes im äufsern Stromkreis beeinflufst wird, so ändert sich die Stärke der elektromotorischen Kraft mit jeder Änderung des äufsern Widerstandes. Wird z. B. bei einer Hauptstrommaschine der Widerstand der Nutzleitung vergröfsert, so wird auch sofort der um die Schenkel des Magneten fliefsende Strom und damit das magnetische Feld schwächer, die elektromotorische Kraft geringer, also der in der Nutzleitung fliefsende Strom mehr geschwächt, als es nach dem Ohmschen Gesetz der Fall sein würde. Bei weitem geringer sind die Schwankungen der elektromotorischen Kraft bei den Nebenschlufs- und Compoundmaschinen. Wird hier der äufsere Widerstand vergröfsert, so wird der Strom geschwächt, dafür geht dann aber auch ein gröfserer Bruchteil des Stromes durch den Nebenschlufs, und es kann durch passende Wickelung erreicht werden, dafs die Klemmspannung ziemlich konstant bleibt. Während nach einem in Grätz: „Die Elektrizität und ihre Anwendungen" (S. 279) angeführten Beispiel bei einer Hauptstrommaschine (Tourenzahl 1300) die Klemmspannung von 58,98 Volt auf 23,39 sank, wenn der äufsere Widerstand von 2,851 Ohm auf 12,65 Ohm vergröfsert wurde, entsprach bei einer Compoundmaschine (Tourenzahl 670) einer Änderung des äufseren Widerstandes von 0,474 Ohm auf 11,59 Ohm eine Verminderung der elektromotorischen Kraft von 110 auf 107,8 Volt. Selbst als der äufsere Stromkreis geöffnet wurde, der Widerstand also unendlich grofs war, sank die Klemmspannung nur auf 107,3 Volt. Um auch diese geringen Schwankungen zu beseitigen, schaltet man in den Zweigstrom, der um die Schenkel des Elektromagneten fliefst, einen Regulierwiderstand ein, und dadurch wird es ermöglicht, die Stärke des Kraftfeldes so zu regulieren, dafs die Klemmspannung konstant bleibt.

Zum Schlufs führe ich noch die in der Praxis übliche Berechnung der elektromotorischen Kraft bei Nebenschlufs- und Kompoundmaschinen an. Es bezeichne J_1 die Intensität des Ankerstromes, J_2 diejenige des Zweigstromes um den Elektromagneten, i die Intensität des Stromes der Nutzleitung, R_1, R_2 und r die betreffenden Widerstände, E die erzeugte elektromotorische Kraft, e die Klemmspannung und W den Gesamtwiderstand, so ist die Berechnung folgende:

I. Nebenschlufsmaschine.

Gemessen werden: i, e, R_1, R_2.

Es ist: $E = J_1 W$; $J_1 = i + J_2$.

Der Gesamtwiderstand W setzt sich zusammen aus dem Widerstand des Ankers und dem „reduzierten Widerstand" (Widerstand der Verzweigung: Nutzleitung und Nebenschlufs); der erstere ist R_1, der zweite $\frac{R_2 r}{R_2 + r}$; also ist:

$$E = (i + J_2)\left(R_1 + \frac{R_2 r}{R_2 + r}\right).$$

Da J_2 und r nicht gemessen werden, so drückt man sie durch die gemessenen Gröfsen aus:

$$J_2 = \frac{e}{R_2}; \qquad r = \frac{e}{i}$$

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

und wir erhalten:

$$E = \left(i + \frac{e}{R_2}\right)\left(R_1 + \frac{R_2 \frac{e}{i}}{R_2 + \frac{e}{i}}\right).$$

II. Compoundmaschine.

Die Bezeichnungen seien dieselben wie vorher. Es kommt hier nur noch die zweite Wickelung um den Elektromagneten, deren Widerstand R_2' sein möge, hinzu, so dafs wir jetzt in der Nutzleitung den Widerstand $r + R_2'$ haben; der reduzierte Widerstand ist demnach jetzt:

$$\frac{R_2 (r + R_2')}{R_2 + r + R_2'}.$$

Auch der Wert von J_2 ändert sich; es ist:

$$\frac{i}{J_2} = \frac{R_2}{r + R_2'}; \qquad J_2 = \frac{i r + i R_2'}{R_2} = \frac{e + i R_2'}{R_2}.$$

Gemessen werden: i, e, R_1, R_2, R_2'.

$$\begin{aligned} E &= J_1 W; \\ &= (i + J_2)\left[R_1 + \frac{R_2 (r + R_2')}{R_2 + r + R_2'}\right]; \\ &= \left(i + \frac{e + i R_2'}{R_2}\right)\left[R_1 + \frac{R_2 \left(R_2' + \frac{e}{i}\right)}{R_2 + R_2' + \frac{e}{i}}\right]. \end{aligned}$$

Es sei noch darauf aufmerksam gemacht, dafs die Widerstandsmessungen vorgenommen werden müssen, so lange die Maschine noch warm ist, da ja die Gröfse des Widerstandes mit der Temperatur sich ändert. So ergaben z. B. die Messungen, als die Maschine kalt war:

$$R_1 = 0{,}37; \qquad R_2 = 0{,}18; \qquad R_2' = 20.$$

Dagegen in warmem Zustande:

$$R_1 = 0{,}42; \qquad R_2 - 0{,}185; \qquad R_2' = 20{,}45.$$

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Druck von W. Pormetter in Berlin.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf