

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Abhandlungen

zur

Didaktik und Philosophie der Naturwissenschaft.

(Sonderhefte der Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht.)

Herausgegeben

von

F. Poske in Berlin, A. Höfler in Prag und E. Grimsehl in Hamburg.

Die „Sonderhefte“ werden zwanglos ausgegeben, sowohl ihrem Umfange, wie der Zeit ihres Erscheinens nach. Jedes Heft ist einzeln käuflich, der Preis richtet sich nach dem Umfange. Eine größere Zahl von Heften im Gesamtumfange von ca. 40 Bogen wird zu je einem Bande (M. 12—16) vereinigt.

I. Band, Preis M. 14,20.

Inhalt:

- Heft 1: **Die elektrische Glühlampe im Dienste des physikalischen Unterrichts.** Von Prof. E. Grimsehl, Oberlehrer an der Oberrealschule auf der Uhlenhorst in Hamburg. Preis M. 2,—.
- Heft 2: **Zur gegenwärtigen Naturphilosophie.** Von Dr. Alois Höfler, o.ö. Professor an der deutschen Universität Prag. Preis M. 3,60.
- Heft 3: **Der naturwissenschaftliche Unterricht — insbesondere in Physik und Chemie — bei uns und im Auslande.** Von Dr. Karl T. Fischer, a. o. Professor an der Kgl. Technischen Hochschule in München. Preis M. 2,—.
- Heft 4: **Wie sind die physikalischen Schülerübungen praktisch zu gestalten?** Von Hermann Hahn, Oberlehrer am Dorotheenstädtischen Realgymnasium zu Berlin. Preis M. 2,—.
- Heft 5: **Strahlengang und Vergrößerung in optischen Instrumenten.** Eine Einführung in die neueren optischen Theorien. Von Dr. Hans Keferstein, Professor an der Oberrealschule auf der Uhlenhorst in Hamburg. Preis M. 1,60.
- Heft 6: **Über die Erfahrungsgrundlagen unseres Wissens.** Von Dr. A. Meinong, o.ö. Professor an der Universität Graz. Preis M. 3,—.

II. Band.

- Heft 1: **Elementare Messungen aus der Elektrostatik.** Von Professor Dr. Karl Noack, Oberlehrer a. D. Preis M. 2,—.
- Heft 2: **Experimentelle Einführung der elektromagnetischen Einheiten.** Von Prof. E. Grimsehl, Oberlehrer an der Oberrealschule auf der Uhlenhorst in Hamburg. Preis M. 1,60.

—— Weitere Hefte befinden sich in Vorbereitung. ——

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.

Experimentelle Einführung der elektromagnetischen Einheiten.

Von

Prof. E. Grimsehl,

Oberlehrer an der Oberrealschule auf der Uhlenhorst zu Hamburg.

ISBN 978-3-642-89773-3
DOI 10.1007/978-3-642-91630-4

ISBN 978-3-642-91630-4 (eBook)

Inhalt.

	Seite
Einleitung	3
§ 1. Das magnetische Kraftfeld eines geradlinigen Stromleiters, qualitativ untersucht	5
§ 2. Quantitative Untersuchung des Magnetfeldes	8
§ 3. Das Magnetfeld eines kreisförmigen Stromleiters	9
§ 4. Die Einheit der elektrischen Stromstärke	14
§ 5. Das homogene magnetische Feld	17
§ 6. Die ponderomotorische Wirkung des magnetischen Feldes	19
§ 7. Die elektromagnetische Induktion, qualitativ untersucht	25
§ 8. Die elektromagnetische Induktion, quantitativ untersucht	29
§ 9. Die Widerstandseinheit	33
§ 10. Die Einheit der Elektrizitätsmenge	34
§ 11. Die magnetische Permeabilität; Hysteresis	37
§ 12. Der Wechselstrom	38
Schlußwort	41

Einleitung.

Die Einführung der elektromagnetischen Einheiten bietet im Schulunterricht verhältnismäßig große Schwierigkeiten, weil man nicht imstande ist, die Einheiten in ihrer wahren Größe experimentell vorzuführen, so daß daher der diesen Gegenstand behandelnde Unterricht in den meisten Fällen ein reiner Wortunterricht bleibt. Für die absoluten Einheiten der Kraft und der Arbeit kann man sich leicht eine Versinnbildlichung schaffen, die den Schülern von der Größe des Dyn oder des Erg wenigstens eine Vorstellung bringt, da das Dyn annähernd gleich der Kraft ist, mit der 1 mg von der Erde angezogen wird. Anders dagegen steht es mit den elektrostatischen und den elektromagnetischen Einheiten, deren Definition sich zwar auf die Definition der Kraft und Arbeit stützt, aber dennoch für die Schüler wenig handgreiflich ist. Für die Versinnbildlichung der absoluten magnetischen Einheit benutzt man wohl am besten eine magnetisierte Stricknadel mittlerer Dicke, bei der die Polstärke durchschnittlich 20 magnetische Einheiten beträgt. Die Bestimmung der Polstärke läßt sich auf mannigfaltige Weise ausführen. Am einfachsten geschieht der Nachweis mit Hilfe der von mir konstruierten und *Ztschr. f. phys. u. chem. Unt. XVI 334* beschriebenen magnetischen Polwage, deren wesentlicher Bestandteil eine leicht beweglich konstruierte Wage ist, bei der eine magnetisierte Stricknadel der eine Wagearm ist, deren freies Ende demnach einen freien Pol der Stricknadel darstellt, während der andere Pol mit der Drehungsachse der Wage zusammenfällt, daher auf die Drehung des Wagebalkens ohne Einfluß ist. Der andere Arm der Polwage besteht aus einem Reiterlineal, auf dem kleine Aluminiumreiter, die nach Dyn geeicht sind, aufgesetzt werden können. Eine zweite Stricknadel, welche der ersten möglichst gleich ist, wird in einem passenden Stativ, in wagerechter Lage auf und ab verschiebbar, befestigt und mit ihrem gleichnamigen Pole senkrecht über dem freien Pole der Polwage in meßbarem Abstände aufgestellt. Mit Hilfe der Reitergewichte wird dann die Polwage wieder ins Gleichgewicht gebracht. Die Größe der abstoßenden Kraft wird mit Hilfe der Reitergewichte und des Verhältnisses der Wagearme berechnet. Betreffs näherer Ausführung verweise ich auf die

a. a. O. gegebene Beschreibung. Die mit dieser Wage ausgeführten Messungen sind hinreichend genau, um dem Schüler eine Vorstellung von der Größe der magnetischen Einheit zu geben.

Mit Hilfe einer kleinen Abänderung läßt sich die Polwage auch als absolutes Elektrometer verwenden. Man braucht nämlich nur die Stricknadel durch einen kleinen dünnen, mit Schellack überzogenen, isolierenden Glasstab zu ersetzen, an dessen Ende eine leitende Kugel angebracht ist. Ebenso muß die Stricknadel in dem festen Stativ durch ein ähnliches Stäbchen mit leitender Kugel ersetzt werden. Die empfehlenswerteste Anordnung ist hierbei die Verwendung einer dünnwandigen Glaskugel, deren Oberfläche versilbert ist, statt der sonst gebräuchlichen Hollundermarkkugeln. Abgesehen davon, daß sich diese Kugeln direkt an die als Halter dienenden Glasstäbchen anschmelzen lassen, haben sie noch den Vorteil, daß sie gut leitend sind, bei einer Berührung also ihre Ladung vollkommen verlieren, oder auch bei Berührung mit einem elektrischen Körper auf ihrer ganzen Oberfläche gleichmäßig geladen werden. Die Resultate der Messungen, die mit der so abgeänderten Polwage ausgeführt werden, sind ebenfalls für Unterrichtszwecke hinreichend genau.

Es liegt in der Natur der Sache, daß die elektrostatische Einheit nicht in so greifbarer Form dargestellt werden kann wie die magnetische Einheit. Man kann sich aber trotzdem eine Vorstellung davon machen, wenn man weiß, daß die Größe der Ladung, die eine kleine Kugel von etwa 2 mm Radius dann annimmt, wenn sie mit dem Konduktor einer kleinen Handelektriermaschine berührt ist, während die Elektriermaschine das Maximum ihrer Wirkung zeigt, etwa der elektrostatischen Einheit gleich ist. Das ist natürlich nur eine Veranschaulichung, die je nach der zur Verfügung stehenden Elektriermaschine verschieden sein wird. Da die elektrostatischen Einheiten nicht der Gegenstand unserer Untersuchungen sind, so mag diese Andeutung hier genügen.

Die in den folgenden Paragraphen dargestellten Versuchsanordnungen sind unter Beifügung von Figuren so ausführlich beschrieben, daß sie, wie ich hoffe, ohne Mühe nachgemacht werden können. Die meisten Anordnungen sind mit den in jedem gut ausgestatteten physikalischen Kabinette verfügbaren Hilfsmitteln ausführbar. Die in der Abhandlung beschriebenen neuen Apparate erleichtern natürlich die Ausführung der Versuche, doch bemerke ich, daß ich die Originalapparate eigenhändig gebaut habe, woraus hervorgeht, daß sie nicht übermäßig kompliziert sind. Die Apparate werden jetzt nach meinen Angaben auch von den Firmen A. Krüß, Hamburg, und E. Leybolds Nachfg., Cöln a. Rh., gebaut. Die Dimensionen der Apparate sind aus einem in der Figur mit abgebildeten Maßstabe dort, wo es nötig ist, direkt zu entnehmen. Trotzdem habe ich in der Beschreibung die Größenverhältnisse vielfach beigefügt.

**§ 1. Das magnetische Kraftfeld eines geradlinigen Stromleiters,
qualitativ untersucht.**

Es ist zuerst zu untersuchen, in welcher Weise ein elektrischer Strom einen in seiner Nähe befindlichen einzelnen Magnetpol beeinflusst, m. a. W. es ist das magnetische Feld eines vom Strome durchflossenen Leiters zu untersuchen.

Ein von einem elektrischen Strome¹⁾ durchflossener, blanker Kupferdraht wird in Eisenfeilspäne getaucht. Man beobachtet, daß sich die Feilspäne in ringförmig angeordneten Wülsten um den Draht gruppieren und beim Herausheben des Drahtes an ihm hängen bleiben. Hierdurch wird die magnetische Wirkung des Stromleiters in der rohesten Form vorgeführt.

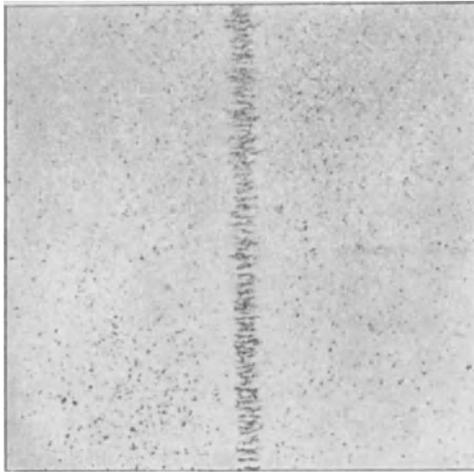


Fig. 1.

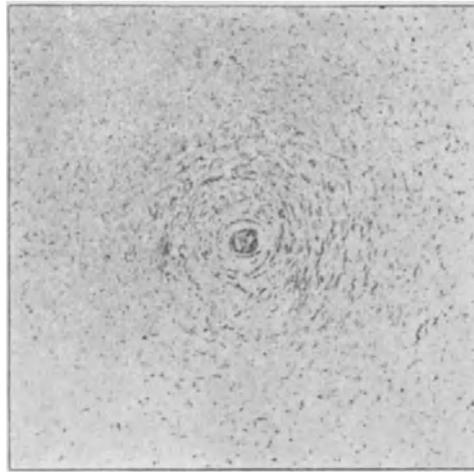


Fig. 2.

Man legt den vom Strome durchflossenen Draht wagerecht auf den Tisch und bedeckt ihn mit einem Stück Papier, auf das man Eisenfeilspäne streut. Die Feilspäne ordnen sich in kurzen Linien, die senkrecht zur Längserstreckung des Drahtes laufen, über dem Draht an. Figur 1 gibt die Anordnung nach einem photographisch fixierten Kraftlinienbilde wieder.

Ein blanker Kupferdraht wird mit Hilfe zweier Fußklemmen so befestigt, daß ein Teil des Drahtes auf eine größere Strecke hin vertikal steht.

¹⁾ Die Stärke des zu den Versuchen benutzten Stromes beträgt 10—20 Ampere. Eine größere Stromstärke zeigt zwar noch kräftigere Wirkungen, doch steht die Erhöhung der Wirkung in keinem Verhältnis zu der Schwierigkeit in der Beschaffung eines stärkeren Stromes und in der Hantierung mit demselben (dicke steife Kupferdrähte). Bei Verwendung schwächerer Ströme muß man schon den Projektionsapparat zur Hilfe nehmen, um die Wirkung von fern zu demonstrieren. Läßt man die Zuhörer gruppenweise herantreten, so kann man auch bei schwächerem Strome den Projektionsapparat entbehren.

Bevor der Draht befestigt ist, wird ein Stück steifen Papiers oder weißen Kartons, das mit einem kleinen Loche versehen ist, über den Draht geschoben. Dieses Stück Papier wird auf untergelegte Holzklötze wagerecht so aufgelegt, daß es sich ungefähr in der Mitte des vertikal verlaufenden Teiles des Drahtes befindet. Es werden Eisenfeilspäne gleichmäßig auf das Papier gestreut, dann wird ein elektrischer Strom, der einer stärkeren Batterie (am besten Akkumulatorenbatterie) entnommen ist, durch den Draht geleitet. Klopft man auf die Kartonscheibe, so ordnen sich die Feilspäne in den bekannten kreisförmigen, den Draht konzentrisch umgebenden Formen an. Figur 2 gibt das Bild wieder. Diese Figuren deuten das magnetische Kraftfeld des elektrischen Stromes an.

Es muß jetzt untersucht werden, welche Bedeutung die durch die Feilspäne dargestellten Figuren haben. Man ist erst dann berechtigt, die Linien „magnetische Kraftlinien“ zu nennen, wenn man weiß, daß sie tatsächlich die Richtung und Größe der magnetischen Kraft in jedem Punkte des Feldes andeuten. Wenn sie die Richtung der magnetischen Kraft angeben sollen, so muß ein einzelner magnetischer Pol, wenn er frei beweglich ist, die Kraftlinien als Bahnen benutzen, d. h. also, er muß den Draht umkreisen.

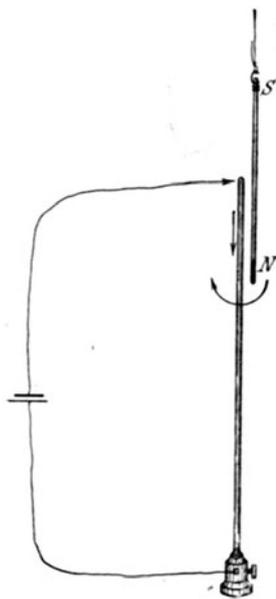


Fig. 3.

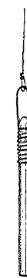


Fig. 4.

Um diesen Nachweis zu führen (Fig. 3), stellt man eine Messingstange von etwa 8 mm Durchmesser und 50 cm Länge vertikal auf dem Tische auf, am besten, indem man sie mit einem Bleifuß versieht, auf dem eine Klemmschraube zur Zuleitung des elektrischen Stromes festgelötet ist. Senkrecht über der Stange ist an der Zimmerdecke ein Haken befestigt, durch den ein dünner Faden hindurchgeht. An das eine Ende dieses Fadens ist eine aus dünnem Messingdraht gewickelte, kurze, federnde Spirale, deren oberes Ende zu einem kleinen Häkchen umgebogen ist, angeknüpft. In die durch die Spirale gebildete federnde Hülse wird eine magnetisierte Stricknadel mit ihrem Südpol hineingesteckt (Fig. 4). Die Stricknadel hängt senkrecht herunter mit dem Nordpol nach unten. Das andere Ende des durch den Deckenhaken gezogenen Fadens wird an einen schweren Gegenstand angebunden, der auf dem Tische verschoben werden kann, und zwar so, daß dabei die Stricknadel höher oder tiefer zu hängen kommt. Man regelt die Lage des Fadens so, daß die Mitte der Nadel mit dem oberen Ende der messingenen Stativstange zusammenfällt.

Die auf dem Fuße der Stativstange befindliche Klemmschraube wird mit dem negativen Pole einer starken Stromquelle verbunden, während an

den positiven Pol der Stromquelle ein langer, dicker Leitungsdraht abgeschlossen ist, dessen äußerstes Ende gut metallisch blank gemacht ist. Als Stromquelle ist hier ein einzelner großer Akkumulator oder eine Batterie von wenigen Zellen am besten geeignet. Fast unbrauchbar ist der Anschluß an eine elektrische Starkstromleitung von 110 oder 220 Volt, da dann bei der Unterbrechung des Stromes eine starké Funkenbildung, die Bildung eines Lichtbogens, störend auftritt.

Berührt man das freie Ende des mit dem positiven Pole verbundenen Drahtes mit dem oberen Ende der messingenen Stativstange, so gerät die Stricknadel sofort in Rotation um die Messingstange als Achse. In dem Augenblicke, wo die Stricknadel in die Nähe des berührenden Drahtes kommt, muß man diesen einen kurzen Augenblick zurückziehen, um die Stricknadel vorbeizulassen. Dann wird der Strom sofort wieder geschlossen. Die Stricknadel kommt in andauernde rasche Rotation; sie beschreibt tatsächlich kreisförmige Bahnen, wie das durch die Eisenfeilspäne dargestellte Bild vermuten ließ.

Der Sinn der Rotation läßt sich in folgender Regel zusammenfassen: Blickt man in der Richtung des elektrischen Stromes (in unserm Falle von oben nach unten), so bewegt sich der Nordpol im Sinne des Uhrzeigers.

Nach Umkehrung der Stromrichtung erfolgt die Rotation entgegengesetzt wie vorhin, also wieder unserer Regel entsprechend. Steckt man die Stricknadel mit ihrem Nordpol in die federnde Hülse, so daß der Südpol frei neben dem Leiter liegt, so ist die Rotation entgegengesetzt wie die des Nordpols.

Es ist nur noch der Nachweis zu liefern, daß ein freier Magnetpol keinen mit der Stromrichtung parallelen Bewegungsantrieb erhält. Zu dem Zwecke hängt man eine Stricknadel, ähnlich wie bei dem vorigen Versuche, in einer aus Messingdraht gebogenen federnden Hülse vertikal auf, doch so, daß sie nur in einer Ebene schwingen kann. Man befestigt die Drahhülse an zwei Fäden, die über zwei an der Decke in einem Abstände von ungefähr 1 m voneinander angebrachten Haken befestigt sind. Die Aufhängung ist also bifilar. Die Nadel kann nur in einer Ebene schwingen, die zur Ebene der bifilaren Aufhängung senkrecht ist.

In der Schwingungsebene der Magnetnadel wird wagerecht auf dem Tische der Leitungsdraht ausgespannt, dem wieder ein starker Strom zugeführt werden kann. Es empfiehlt sich hier, wie bei allen elektrischen Versuchen, in die Stromleitung einen Ausschalter einzuschalten, um jederzeit bequem den Stromschluß herstellen oder lösen zu können.

Nachdem man die Länge der Aufhängefäden so geregelt hat, daß das untere Ende der aufgehängten magnetisierten Stricknadel dicht über dem Leitungsdraht hängt, schließt man den Strom. Es tritt nicht die geringste Bewegungstendenz in der Richtung des Stromes ein. Bei mangelhafter bifilarer Aufhängung kann man höchstens ein geringes Zucken der Nadel

in einer Ebene senkrecht zum Stromleiter beobachten. Diese Bewegung ist durch den vorigen Versuch aber schon untersucht. Man kann ferner zeigen, daß auch dann, wenn der Magnetpol der Nadel seitlich neben dem Drahte hängt, keine Bewegung parallel der Richtung des Drahtes erfolgt.

§ 2. Quantitative Untersuchung des Magnetfeldes.

Ein blanker, kupferner Leitungsdraht wird mit dem einen Ende an einem Deckenhaken befestigt. Das andere Ende wird durch ein Bleigewicht so beschwert, daß der Draht genau vertikal geradlinig von der Decke

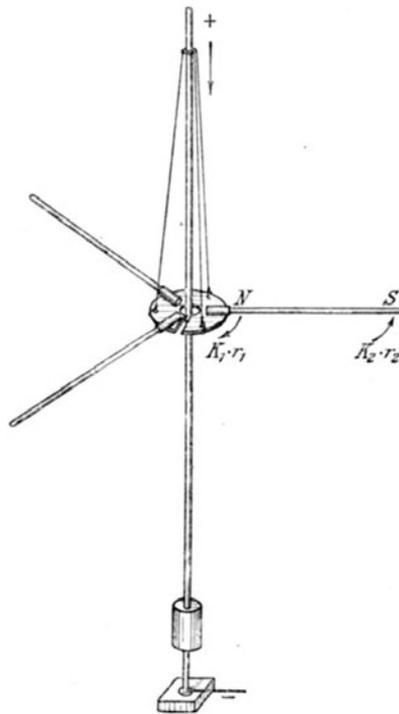


Fig. 5.

herabhängt. Der Kupferdraht wird hierbei am besten direkt durch das Bleigewicht zentral hindurchgeführt (Fig. 5). Man kann auch das Bleigewicht an dem hindurchgehenden Kupferdraht festlöten. Das untere Ende des belasteten Drahtes taucht in einen mit Quecksilber gefüllten Napf, durch den die Zuleitung des elektrischen Stromes von dem einen Pol einer Akkumulatorenbatterie unter Zwischenschaltung eines Ausschalters erfolgt. An das obere Ende des vertikalen Kupferdrahtes wird ein Leitungsdraht angeschlossen, der zuerst an der Decke bis zu einer Wand entlangläuft, dann hier heruntergeführt und mit dem andern Pole der Batterie verbunden wird. In der Nähe des oberen Endes des vertikalen Kupferdrahtes werden drei dünne Fäden von gleicher Länge angeknüpft, an deren unteren Enden eine kreisförmige Messingscheibe mit zentraler Bohrung genau wgerecht befestigt ist. Die Messingscheibe kann einen radialen Schlitz haben, damit man sie

noch zentral am Kupferdraht anbringen kann, wenn der Draht schon aufgehängt ist. Auf die kreisförmige Messingscheibe sind drei rohrförmige Hülsen von solcher Weite aufgelötet, daß magnetisierte Stricknadeln bequem, aber fest hineingesteckt werden können.

Es werden nun entweder drei gleichartige Stricknadeln mit ihren Nordpolen in die Hülsen gesteckt, so daß daher diese Pole dem vertikalen Draht sehr nahe sind, während die Südpole etwa 22 cm entfernt sind, oder man kann, wenn man nur eine Stricknadel verwenden will, diese in die eine Hülse stecken, während in die beiden andern Hülsen zwei Messingdrähte von dem Gewichte der Stricknadeln zum Ausbalancieren hineingesteckt

werden¹⁾. Schließt man den elektrischen Strom, so tritt nicht die geringste Bewegungstendenz der drei oder der einen Stricknadel ein. Obgleich also der Nordpol dicht neben dem Drahte ist, ist das auf ihn wirkende Drehmoment nur ebensogroß wie das auf den entfernten Südpol im entgegengesetzten Sinne wirkende Drehmoment. Da sich die Nadel nur um den vertikalen Draht als Achse drehen kann, so haben die beiden Kraftmomente den Wert $K_1 \cdot r_1$ und $K_2 \cdot r_2$, wobei K_1 und K_2 die auf den Nord- und Südpol wirkenden Kräfte, r_1 und r_2 die Abstände der beiden Pole von der Achse, also vom vertikalen Drahte, bedeuten. Aus dem Fehlen jeder Bewegungstendenz trotz der leichten Aufhängung der Nadel folgt

$$K_1 r_1 = K_2 r_2,$$

d. h. es verhält sich $K_1 : K_2 = r_2 : r_1$, in Worten: Die auf zwei Magnetpole gleicher Größe wirkenden magnetischen Kräfte, die von einem geradlinig ausgespannten Drahte ausgehen, sind der ersten Potenz der Entfernung der Magnetpole umgekehrt proportional. Daraus folgt, daß auch die magnetische Feldstärke der Entfernung vom geradlinigen Stromleiter umgekehrt proportional ist.

Die magnetischen Kraftlinien geben durch ihre Richtung die Richtung der Kraft an. Sollen sie durch ihre Zahl und ihre Dichtigkeit die Größe der Kraft andeuten, so müssen sie in doppelter Entfernung des Drahtes nur halb so dicht sein als in einfacher Entfernung, wobei die Mitte des Drahtes als Zentralachse des Magnetfeldes anzusehen ist. Eine unmittelbare Betrachtung des in Fig. 2 dargestellten magnetischen Feldes stimmt insofern qualitativ mit unserm jetzigen Nachweis überein, als die Kraftlinien in der Nähe des Drahtes am besten ausgebildet sind. Im Anschluß hieran sei bemerkt, daß die Potentialniveauflächen, die in jedem Punkte senkrecht auf den Kraftlinien stehen müssen, Ebenen sind, die alle durch die Achse des Drahtes gelegt sind. Der Abstand zweier benachbarter Ebenen ist an jeder Stelle der Kraftgröße umgekehrt proportional, was mit der geometrischen Anschauung auch hier in vollkommener Übereinstimmung ist.

§ 3. Das Magnetfeld eines kreisförmigen Leiters.

Man macht in ein Brett, das auf mehreren Holzklötzen wagerecht auf dem Tische aufgestellt ist, zwei Löcher dicht nebeneinander und biegt einen blanken Kupferdraht zu einem fast vollständig geschlossenen, kreisförmigen Ringe zusammen. Die Enden des Kupferdrahtes werden senkrecht zur Ebene des Kreises umgebogen und durch die Löcher des Brettes hindurchgesteckt, so daß der Draht nun mit seiner ganzen Fläche auf dem Brette ruht. Die beiden durch das Brett hindurchragenden Enden des Drahtes werden

¹⁾ Siehe Fig. 57 S. 121 in Ebert, Magnetische Kraftfelder, 2. Aufl.

mit den Polen einer Elektrizitätsquelle verbunden, so daß der Draht von einem Strome von etwa 15 bis 20 Ampere durchflossen wird. Legt man nun ein Stück Papier auf den Ring und streut Eisenfeilicht darauf, so ordnen sich die Späne unmittelbar über dem Drahte zu kurzen, senkrechten Linien. Es entsteht das durch Figur 6 dargestellte Bild. Jetzt stellt man nach Unterbrechung des Stromes eine kurze Magnetnadel auf das Brett an irgend einer Stelle auf und schließt den Strom aufs neue. Man sieht, wie sich innerhalb

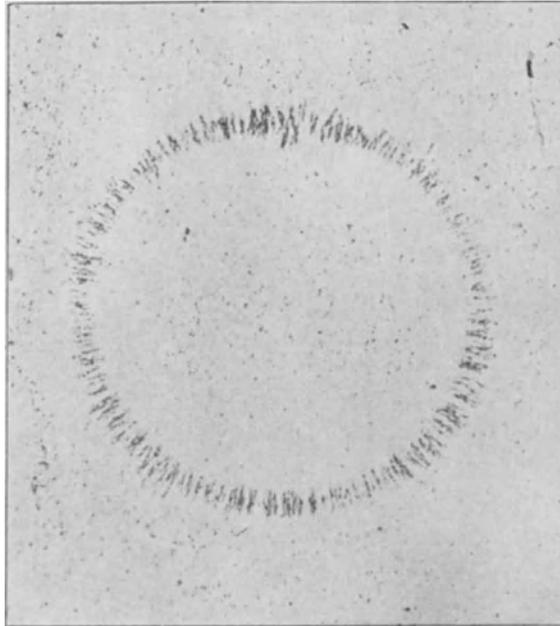


Fig. 6.

des Drahringes der eine Pol der Magnetnadel, z. B. der Nordpol, senkt, während der Südpol gehoben wird. Verwendet man eine Magnetnadel, die sich in vertikaler Ebene drehen kann, z. B. eine Inklinationsnadel, die man aber so belastet hat, daß sie in indifferenter Gleichgewichtslage ist, so stellt sie sich innerhalb des vom Draht umschlossenen Gebietes nahezu vertikal, über der Peripherie des Drahtes nahezu horizontal und außerhalb des Drahringes wieder vertikal, jedoch ist der Pol, der innerhalb des Drahringes nach unten gerichtet war, außerhalb des Drahringes nach oben gerichtet.

In dasselbe wagerecht aufgestellte Brett macht man zwei Löcher in etwa 5 cm Abstand voneinander, führt einen Kupferdraht durch das eine Loch nach oben, durch das andere nach unten zurück und biegt ihn nun wieder zu einem Kreise, dessen Durchmesser mit der Verbindungslinie der beiden Löcher zusammenfällt. Ein Stück Papier ist schon, bevor der Draht durch die Löcher gezogen wurde, auf das Brett gelegt; es wird Eisenfeilicht darauf gestreut, während ein Strom von 15 Ampere den Draht durch-

fließt. Die Eisenfeilspäne ordnen sich an, wie Fig. 7 zeigt. Man erkennt aus dem Bilde, daß die magnetischen Kraftlinien in den in der Ebene des Ringes liegenden Punkten senkrecht zur Ebene des Ringes verlaufen, daß ferner die eine, durch den Mittelpunkt des Ringes hindurchgehende Kraftlinie eine gerade Linie ist, während sich die seitlich liegenden Kraftlinien zu geschlossenen Kurven um die Drähte des Ringes anordnen. Man erkennt endlich an der Art der Ausbildung der Kraftlinien, daß das magnetische Feld in der Mitte des Ringes annähernd gleichförmig ist, daß es aber in der Nähe des Drahtes stärker wird.

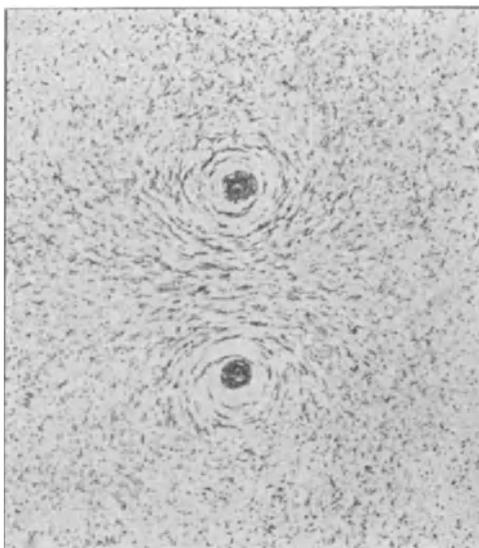


Fig. 7.

Um messende Versuche über die Stärke des magnetischen Feldes auszuführen, verwendet man die durch Figur 8 dargestellte Versuchsanordnung. Ein aus 2mal 5 Drahtwindungen bestehender kreisförmiger Ring von 10 cm Radius wird auf einigen Holzstützen, die auf einem Grundbrette befestigt und an ihren oberen Enden mit Einschnitten zur Aufnahme des Ringes versehen sind, wagerecht in solcher Höhe aufgestellt, daß eine in der Polwage steckende Stricknadel unmittelbar unter der Ebene des Drahttringes liegt. Der Drahttring besteht aus zwei getrennten Stromkreisen von je 5 Windungen, deren vier Enden durch vier auf dem Grundbrette sitzende Klemmschrauben verbunden sind. Nachdem die Stricknadel ausbalanciert ist, leitet man einen elektrischen Strom durch den Drahttring. Man wählt die Richtung des

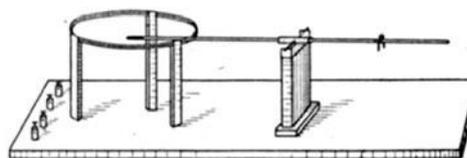


Fig. 8.

Stromes so, daß der Nordpol der Nadel nach unten bewegt wird. Durch Belastung des Wagebalkens durch Reitergewichte kann man die Stärke der abstoßenden Kraft messen. Man beobachtet, daß, wenn der Pol in der Mitte des Drahringes ist, eine geringe Verschiebung aus der Mitte keine wesentliche Veränderung der Kraftgröße erzeugt, daß aber die Kraft um so mehr zunimmt, je näher man sich mit dem Pole der Peripherie des Drahringes nähert. Dieser Versuch, der natürlich auch zahlenmäßig durchgeführt werden kann, steht in voller Übereinstimmung mit den aus dem Feilspanbilde gezogenen Folgerungen.

Im besonderen wird mittels der Versuchsanordnung noch nachgewiesen, daß bei Verdoppelung der Stromstärke die magnetische Kraft im Mittelpunkte ebenfalls verdoppelt wird. Das geschieht in der Weise, daß man den Strom zuerst durch die eine Gruppe, dann durch die zweite Gruppe von 5 Drahtwindungen getrennt leitet und endlich denselben Strom durch die beiden hintereinander geschalteten Drahtwindungsgruppen, also durch 10 Drahtwindungen, hindurchleitet.

Uns interessiert besonders das magnetische Feld in der Mitte des Drahringes, und wir untersuchen die Abhängigkeit der Stärke des Feldes von dem Radius des Ringes durch folgende Versuchsanordnung (Fig. 9): Ein Brett

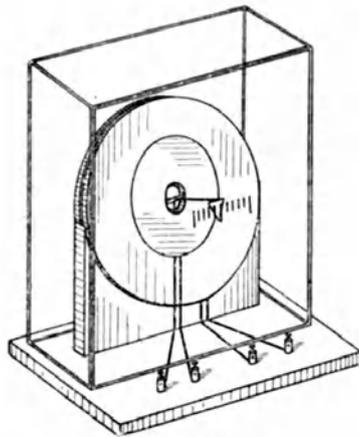


Fig. 9.

aus Laubsägeholz wird kreisförmig (Radius 10 cm) ausgesägt. Dann wird ein konzentrischer Kreisring, dessen innerer Radius 49 mm, dessen äußerer 51 mm ist, ausgesägt. Endlich wird noch in der Mitte ein kreisförmiges Loch von 15 mm Radius mit der Laubsäge hergestellt. Man erhält so zwei kreisförmige Bretter, die mit einem Zwischenraum von 2 mm ineinander passen. Nun wickelt man um das kleinere Brett einen mit einer dünnen Umwicklung versehenen Kupferdraht von 2 mm Dicke einmal herum und biegt die zusammenstoßenden Teile der Windung aus der Ebene des Brettes heraus. Der äußere Holzring

wird nun darüber geschoben. Mit einigen kleinen, provisorisch aufgenagelten Holzklötzchen werden die beiden Bretter in ihrer gegenseitigen Lage zusammengehalten. Dann wickelt man von demselben Draht zwei nebeneinander liegende Windungen um die Peripherie des größeren Brettes und biegt die Drahtenden wieder aus der Ebene des Drahringes heraus. Auf jede Seite des so weit hergestellten Apparates werden zwei größere, in der Mitte mit einem Loch versehene Bretter aus Laubsägeholz mit Hilfe einiger Messingschrauben aufgeschraubt. Man schneidet diese Deckbretter (die Deckbretter sind in der Figur nicht mit abgebildet, da sie unwesentlich sind) in der oberen Hälfte so aus, daß sie sich der Form

der mittleren Bretter anschließen, aber so weit überstehen, um den äußeren Drähten einen genügenden seitlichen Halt zu geben. In der unteren Hälfte werden die Deckbretter geradlinig abgeschnitten und auf einem Grundbrette mit einigen seitlichen Leisten, die entweder festgeleimt oder mit Messingschrauben versehen sind, befestigt. Die vier Drahtenden werden mit vier auf dem Grundbrette befestigten Klemmschrauben verbunden. In das mittlere Loch kommt ein kleiner Einsatz mit einer Nähnadelspitze, auf die eine kurze Magnetnadel aufgesetzt wird. Die Magnetnadel wird mit einem senkrecht zu ihr stehenden leichten Aluminiumzeiger verbunden, dessen dem Beschauer zugewandtes Ende mit einer weithin sichtbaren Papiermarke versehen ist. Das andere Ende des Aluminiumzeigers wird so belastet, daß die Nadel frei schwingt. Über den ganzen Apparat kommt ein Glaskasten, auf dessen Vorderseite außer einer Nullmarke einige von der Mitte gleich weit abstehende Strichmarken mit weißer Farbe aufgemalt sind.

Stellt man den Apparat so auf, daß die Ebene des Drahttringes im magnetischen Meridian liegt, oder sorgt man durch einen auf dem Tische liegenden Magnetstab dafür, daß die Magnetnadel in der Ebene der Drahttringe liegt, daß also der Papierzeiger mit der Nullmarke zusammenfällt, und schickt man nun durch den mittleren Drahttring einen Strom von etwa 0,1 Ampere, so erfährt die Magnetnadel infolge des durch den elektrischen Strom erzeugten magnetischen Feldes eine gewisse, an der Marke abzulesende Ablenkung. Nun schickt man denselben Strom durch den äußeren doppelten Drahttring und beobachtet eine Ablenkung von derselben Größe wie vorhin. Endlich schickt man den Strom gleichzeitig durch die innere und die äußeren Drahtwindungen, die so hintereinander geschaltet werden, daß die Stromrichtung im äußeren Stromkreise der Stromrichtung im inneren entgegengesetzt ist. Man beobachtet jetzt keine Ablenkung. Man kann den Strom beliebig verstärken, bis 15 Ampere und mehr, so weit es der Draht ohne nachteilige Erwärmung aushält, ohne daß die Magnetnadel abgelenkt wird.

Da die Stromstärke im äußeren Drahtkreise, den er ja zweimal durchläuft, im ganzen doppelt so groß ist wie im inneren, da andererseits der Radius des äußeren Stromkreises doppelt so groß ist wie der des inneren, so folgt, daß die Feldstärke im Inneren eines kreisförmigen Leiters konstant ist, wenn der Quotient aus Stromstärke und Radius konstant ist. In Formeln ausgedrückt heißt das

$$K = f \cdot \frac{i}{r},$$

wo K die Feldstärke, i die Stromstärke, r der Radius des Kreises und f ein noch näher zu bestimmender Faktor ist.

Es wäre nach dem Ausfall des letzten Versuchs auch denkbar, daß die magnetische Kraft im Mittelpunkt des Stromkreises irgend einer Funktion des Quotienten $\frac{i}{r}$ proportional wäre, also z. B. auch ausgedrückt würde durch die Gleichung

$$K = f \cdot \left(\frac{i}{r}\right)^n.$$

Dem steht aber die früher gewonnene Erfahrung gegenüber, daß die Feldstärke verdoppelt wird, wenn die Stromstärke verdoppelt wird. Es muß also die Feldstärke der ersten Potenz der Stromstärke proportional sein. Daher kann nur die Gleichung bestehen

$$K = f \cdot \frac{i}{r},$$

d. h.: Die Feldstärke im Mittelpunkte eines kreisförmigen, vom Strome durchflossenen Leiters ist der Stromstärke direkt, dem Radius des Kreises umgekehrt proportional.

§ 4. Die Einheit der elektrischen Stromstärke.

In dem Ausdrücke für die Feldstärke im Mittelpunkte eines kreisförmigen Leiters

$$K = f \cdot \frac{i}{r}$$

kommt der einstweilen noch unbestimmte Faktor f vor, über den wir durch passende Wahl der Einheit der Stromstärke verfügen können, da in dieser Gleichung die Einheit der Kraft und die Einheit der Entfernung schon bestimmt ist. Es wirken auf den kreisförmigen Leiter alle einzelnen Kreisbogenelemente in genau übereinstimmender Weise auf den Mittelpunkt ein. Das Kraftfeld im geometrischen Mittelpunkte eines halbkreisförmigen Leiters ist nur halb so stark wie das im Mittelpunkte des vollständigen Kreisleiters von demselben Radius. Lassen wir nur einen Kreisbogen von der Länge b auf den Kreismittelpunkt einwirken, so muß das von diesem herrührende Kraftfeld im Mittelpunkte durch den Ausdruck

$$K = f \cdot \frac{b}{2\pi r} \cdot \frac{i}{r} = \frac{f}{2\pi} \cdot b \cdot \frac{i}{r^2}$$

bestimmt sein. Wir wählen nun die Einheit der Stromstärke so, daß, wenn wir für den Bogen b und den Radius r als Längeneinheit 1 cm, für K als Kräfteinheit 1 Dyn annehmen, der Zahlenfaktor $\frac{f}{2\pi}$ den Wert 1 erlangt, so daß sich also unter dieser Annahme der vorige Ausdruck reduziert auf

$$K = b \cdot \frac{i}{r^2}.$$

Hieraus ergibt sich folgende Definition für die Einheit der Stromstärke: Ein elektrischer Strom hat die Stromstärke 1, wenn er, in einem kreisbogenförmigen Leiter von der Länge 1 cm und dem Radius 1 cm fließend, im Mittelpunkte des Kreises das magnetische Feld von der Stärke 1 erzeugt, wenn er also auf einen magnetischen Einheits-

pol senkrecht zur Ebene des kreisbogenförmigen Leiters mit der Kraft von 1 Dyn wirkt.

Mit Hilfe der magnetischen Polwage läßt sich der Einheitsstrom experimentell nachweisen, wenn die Polwage eine geringe konstruktive Änderung erfährt (Fig. 10). An Stelle der Stricknadel kommt ein Messingdraht von 20 cm Länge, an dessen äußerem Ende eine Hülse zur Aufnahme der Stricknadel angebracht ist. Mit Hilfe der Hülse kann die Stricknadel, vertikal stehend, an dem Ende des Wagebalkens befestigt werden, nachdem man vorher die Polstärke der Stricknadel gemessen hat. Sie betrage beispielsweise 20 magnetische Einheiten. Ferner ist ein Kupferdraht so gebogen, daß dieser Teil einem Kreise von 1 cm Radius angehört. Die freien Enden des Kupferdrahtes sind, unter scharfem rechten Winkel geknickt, senkrecht zur Ebene des Kreises nach abwärts gebogen und dann mit ihren unteren Enden auf einem Grundbrette in solcher Höhe befestigt, daß der bogenförmige Teil des Kupferdrahtes genau in gleicher Höhe mit dem Pole der in der Polwage befindlichen Stricknadel steht. Zwei an die unteren Enden der Kupferdrähte angeschlossene Klemmschrauben vermitteln die Zuleitung des elektrischen Stromes zum Kupferdraht. Die Polwage und der Kupferdraht werden nun so zueinander aufgestellt, daß sich der Nordpol der Stricknadel gerade im Mittelpunkte des kreisbogenförmigen Leiters befindet, wenn

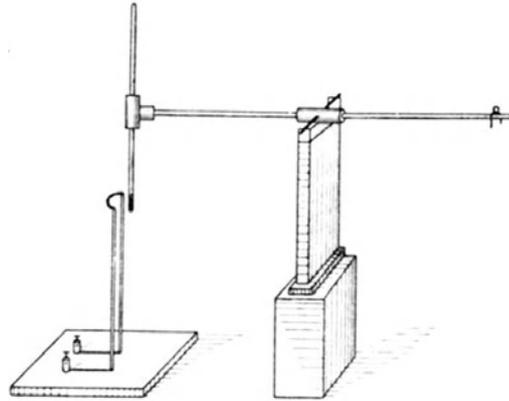


Fig. 10.

die Polwage durch das an dem oberen Ende befindliche Laufgewicht oder durch aufgesetzte Papierreiterchen ins Gleichgewicht gebracht ist. (In Fig. 10 ist die ganze Anordnung schematisch abgebildet.) Nun schickt man durch den Kupferdraht einen elektrischen Strom; der Magnetpol der Stricknadel wird aus seiner Gleichgewichtslage gebracht. Man wählt die Richtung des Stromes passend so, daß sich der Nordpol der Stricknadel nach abwärts bewegt. Um die Polwage wieder in ihre ursprüngliche Gleichgewichtslage zu bringen, setzt man auf das Reiterlineal in 20 cm Entfernung ein Reitergewicht von der Größe 20 Dyn auf und regelt durch einen in die Stromleitung eingeschalteten Widerstand die Stromstärke so, daß das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Der nun den Kupferdraht durchfließende Strom hat die Einheit der Stromstärke.

Es wirkt nämlich auf den Magnetpol nur der kreisbogenförmige Teil des Kupferdrahtes ein; denn durch die Art der Aufhängung kann sich der Pol nur senkrecht nach abwärts bewegen. Wir haben früher erfahren, daß

ein vom Strome durchflossener Draht in bezug auf einen in der Nähe befindlichen Magnetpol keine Kraftkomponente parallel zum Drahte hat. Die senkrecht nach abwärts gerichteten Teile des Kupferdrahtes sind also ohne Einfluß auf die Gleichgewichtslage oder auf die Bewegung des Magnetpoles. Die Kraft, die der kreisbögenförmige Leiter auf den Magnetpol (von der Stärke von angenommen 20 magnetischen Einheiten) ausübt, beträgt 20 Dyn, da sie ja durch das am gleichen Hebelarme wirkende Reitergewicht von 20 Dyn im Gleichgewichte gehalten wird. Auf die Polstärke 1 wirkt daher der Strom mit der Kraft von 1 Dyn. Der Strom hat also die auf Grund der Definition bestimmte Einheit der Stromstärke.

Wenngleich durch diese Versuchsanordnung kein hoher Grad der Genauigkeit der Stromstärkemessung erhalten wird, so hat sie doch den großen Wert, daß sie die elektromagnetische Einheit der Stromstärke auf Grund der wissenschaftlichen Definition darzustellen gestattet. Es bekommt dadurch die Stromstärkeeinheit im Unterricht eine greifbare Gestalt. Sie verliert das abstrakt Theoretische, das ihr sonst gar zu leicht anhaftet.

Die Definition der praktischen Stromstärkeeinheit von 1 Ampere als dem zehnten Teile der absoluten Stromstärkeeinheit ist dann leicht auszuführen. Empfehlenswert ist es, wenn man gleich in den Stromkreis der vorhin beschriebenen Versuchsanordnung ein Amperemeter irgend welcher Konstruktion einschaltet und an diesem abliest, daß der benutzte Strom die Stärke von 10 Ampere hatte.

Durch die angegebene Wahl der Stromstärkeeinheit bekommt der Zahlenfaktor $\frac{f}{2\pi}$ den Wert 1. Hieraus folgt, daß der Faktor f allein den Wert $f = 2\pi$ erhält. Die Feldstärke im Mittelpunkte eines geschlossenen kreisförmigen Leiters beträgt daher, wenn wir die Stromstärke in absoluten elektromagnetischen Einheiten messen,

$$K = \frac{2\pi i}{r}.$$

Messen wir die Stromstärke nach der Einheit Ampere, also nach dem zehnten Teil der absoluten Einheit, so beträgt die Feldstärke im Mittelpunkte des Kreisleiters

$$K = \frac{2\pi i}{10r} = \frac{\pi i}{5r} \quad (i \text{ in Ampere gemessen}).$$

Nimmt man statt des einfachen Kreisleiters eine größere Anzahl, z. B. n Kreiswindungen, die möglichst eng aneinander liegen, so daß man annehmen kann, daß sie alle denselben Mittelpunkt und denselben Radius haben, so summieren sich die magnetischen Felder der einzelnen Windungen, und die gesamte Feldstärke wird ausgedrückt durch

$$K = \frac{n\pi i}{5r}.$$

§ 5. Das homogene magnetische Feld.

Ein vollkommen homogenes magnetisches Feld läßt sich praktisch nicht herstellen. Trotzdem kann man bis zu einer, den jeweiligen Zwecken entsprechenden Annäherung auf räumlich begrenztem Gebiete die Homogenität erreichen.

Die unmittelbare Anschauung des Feilspanbildes Fig. 7, das im Innern eines kreisförmigen, vom elektrischen Strome durchflossenen Leiters erzeugt ist, zeigt uns, daß in der Ebene des Kreisleiters längs eines verhältnismäßig

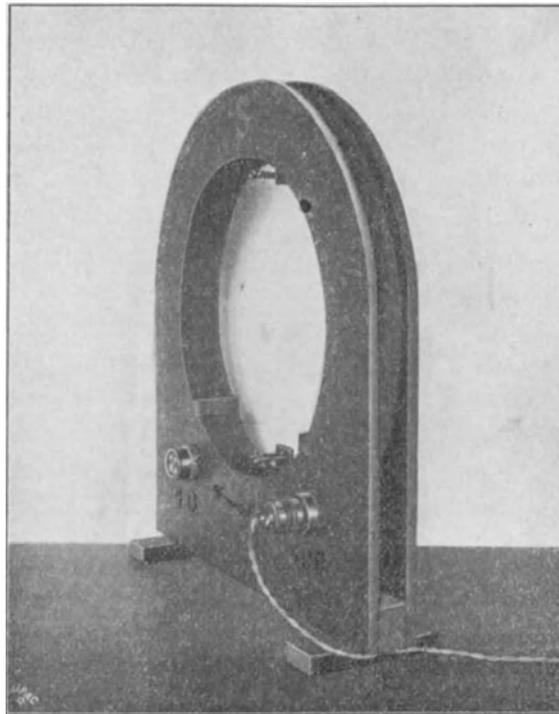


Fig. 11.

großen Gebietes um den Mittelpunkt herum das Feld annähernd homogen ist. In der Nähe der Peripherie des Kreisleiters drängen sich die Kraftlinien allerdings enger zusammen. Wählt man daher einen Kreisleiter von hinreichend großen Dimensionen, so kann man auch das Gebiet der angenäherten Homogenität entsprechend weit ausdehnen, wenn man in der Ebene des Kreisleiters bleibt.

Ich benutze eine Drahtspirale von 10 Drahtwindungen, die auf einen Holzrahmen von passenden Dimensionen aufgewickelt ist. Fig. 11 zeigt die Ansicht des vertikal stehenden Holzrahmens. Man sieht hier auch eine Schicht von 10 Windungen des Drahtes. 10 solcher Windungsschichten liegen

übereinander. Der wohlisolierte Draht ist von solcher Dicke, daß er eine Stromstärke bis zu 15 Ampere ohne schädliche Erwärmung aushält, wenn man den Strom nur kürzere Zeit gebraucht. Bei Benutzung einer Stromstärke von 5 Ampere kann man den Strom stundenlang hindurchgehen lassen, ohne daß der Draht zu stark erwärmt wird. Der mittlere Radius der Windungsgruppe beträgt $R = 31,4$ cm. Die Enden der ganzen Drahtleitung führen zu einer mit 100 bezeichneten Ansteckdose, die in Fig. 11 rechts mit einer Stromzuleitung in Verbindung gebracht ist. Die Zahl 100 bedeutet, daß 100 Drahtwindungen eingeschaltet sind. Eine der mittleren Windungsgruppen ist außerdem mit ihren Enden an die in Fig. 11 auf der linken Seite mit 10 bezeichnete Ansteckdose angeschlossen. Man ist also imstande, nach Belieben entweder die ganze Drahtlänge oder nur den zehnten Teil in den Stromkreis einzuschalten. Leitet man unter Benutzung sämtlicher 100 Windungen, also unter Benutzung der Ansteckdose rechts, den Strom von 5 Ampere durch den Draht, so ist die Feldstärke im Mittelpunkt

$$K = \frac{\pi i}{5 r} \cdot n = \frac{\pi \cdot 5}{5 \cdot 31,4} \cdot 100 = 10 \text{ magnetische Einheiten.}$$

Unter Benutzung von nur 10 Drahtwindungen beträgt bei derselben Stromstärke die magnetische Feldstärke 1 Einheit. Wenn man das unter Benutzung von 10 Windungen entstehende magnetische Feld von der Stärke 1 für genau messende Versuche verwenden will, so hat man dafür Sorge zu tragen, daß die Ebene des Kreisleiters in die Ebene des magnetischen Meridians fällt, da sonst die entsprechende Komponente des Erdmagnetismus noch hinzuzufügen ist. Man kann natürlich, wenn man genau messende Versuche machen will, bei jeder Stellung der Elektromagnetspule auch durch passende Wahl der Stromstärke dafür sorgen, daß genau die Feldstärke 1 oder 10 oder bei größerer Stromstärke eine noch größere Feldstärke erreicht wird. Für die im Unterricht zu verwendenden Demonstrationen genügt es meistens, unter Verwendung der 100 Drahtwindungen den Erdmagnetismus zu vernachlässigen, besonders dann, wenn man sich vorher davon überzeugt hat, daß diese Komponente innerhalb unserer modernen Gebäude infolge der vielfachen Eisenkonstruktionen nur gering ist. Der Raum, der innerhalb der kreisförmigen Windungen bei den folgenden Demonstrationen als homogen angesehen wird, ist eine Kreisfläche von $R = 17,8$ cm Radius. Diese Kreisfläche hat die Größe $F = \pi R^2 = 1000$ qcm. Bei der Feldstärke $\mathfrak{H} = 10$ m. E. gehen demnach durch diese Fläche $10000 = 10^4$ magnetische Kraftlinien hindurch.

Der Holzrahmen kann, wie aus der Figur ersichtlich ist, sowohl in vertikaler wie in horizontaler Stellung benutzt werden. An der einen Seite des Holzrahmens sind zwei Messinglappen (in Fig. 11 oben und unten) angebracht, auf oder an die passende Hilfsapparate mittels Schrauben befestigt werden können.

§ 6. Die ponderomotorische Wirkung des magnetischen Feldes.

Es soll untersucht werden, mit welcher Kraft ein vom Strome durchflossener geradliniger Leiter senkrecht zu den Kraftlinien bewegt wird.

Die Untersuchung wird in zweierlei Weise ausgeführt:

1. An dem oberen Messinglappen des vorher beschriebenen Apparates wird ein Ansatz mit einem Torsionskopf so festgeschraubt, daß die Drehungsachse des Torsionskopfes durch den Mittelpunkt des Kreisleiters geht (Fig. 12).

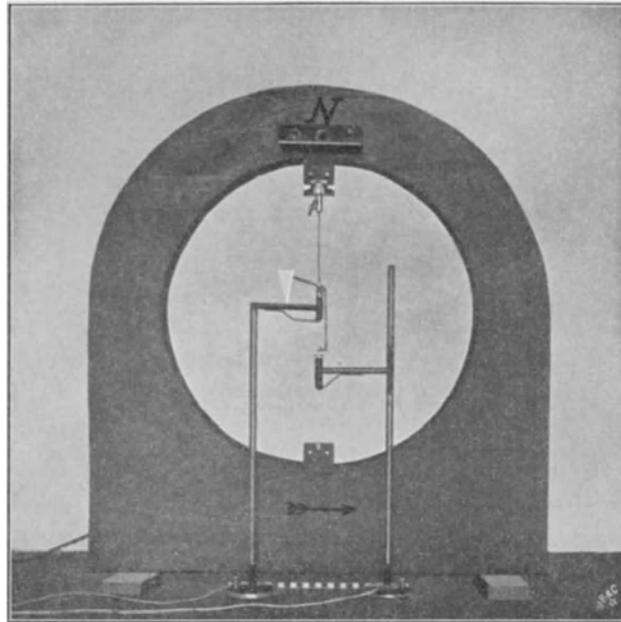


Fig. 12.

An das untere Ende des Torsionskopfes wird mit einer Klemmschraube ein dünner, etwa 10 cm langer Draht festgeklemmt, an dessen unteres Ende ein kurzer, mit einem Gewinde versehener Messingstift angelötet wird. Das Torsionsmoment dieses Drahtes muß durch einen Vorversuch bestimmt werden oder vielmehr, es wird die Drahtlänge von vornherein so bemessen, daß das Torsionsmoment eine leicht in die Rechnung einzuführende Größe darstellt¹⁾. Bei dem dieser Beschreibung zugrunde liegenden Apparate betrug das ganze

¹⁾ Das Torsionsmoment des Aufhängedrahtes wird in der Weise bestimmt, daß man den an dem unteren Draht angelöteten, mit Gewinde versehenen Messingstift achsial in ein zylindrisches Messingstück von 1 cm Grundflächenradius einschraubt, dessen Höhe so abgeglichen ist, daß die Masse genau 100 g beträgt. Das Trägheitsmoment eines um seine Achse als Rotationsachse gedrehten Zylinders von der Masse m ist nun gerade so groß, als ob die halbe Masse $m/2$ in einem Abstände von der Rotationsachse vereinigt wäre, die dem

Torsionsmoment 500 dyn. cm. Der untere Stift wird mit dem Gewinde in ein in Fig. 13 abgebildetes, rechteckiges Stück Kupferdraht eingeschraubt. Derselbe besteht aus einem vertikalen Teile von 10 cm Länge, an das sich zwei horizontale Enden von je 5 cm Länge anschließen. Dann sind die horizontalen Enden wieder nach unten gebogen

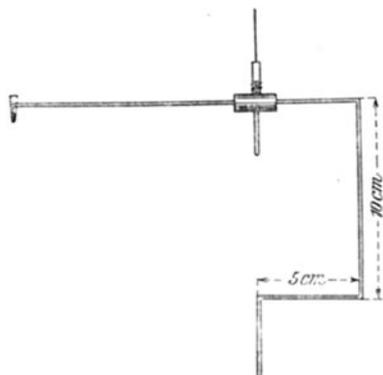


Fig. 13.

und so fähig gemacht, gleichzeitig in zwei kleine Quecksilbernäpfe einzutauchen. In der Verlängerung des oberen horizontalen Drahtendes ist ein Zeiger aus Aluminiumdraht angebracht, der das an dem Torsionsdrahte hängende Drahtstück wieder ins Gleichgewicht bringt, und zwar so, daß die vertikal nach unten gehenden Enden in die geradlinige Verlängerung des Torsionsdrahtes fallen. Das äußerste Ende des Aluminiumzeigers ist mit einer dreieckigen Papiermarke versehen.

Wenn der Kupferdraht am Torsionsdraht aufgehängt ist (s. Fig. 12), wenn also die beiden nach abwärts gerichteten Drahtenden vertikal hängen, werden ihnen von unten zwei an zwei getrennten Stativen angebrachte kleine Quecksilbernäpfe so weit genähert, daß die Drähte in das Quecksilber eintauchen. An den Füßen der Stative sind Klemmschrauben zur Zuleitung des elektrischen Stromes angebracht. Man dreht den Torsionskopf so, daß die horizontalen Enden des kupfernen Leitungsdrahtes in die Richtung der magnetischen Kraftlinien fallen. Dann kann der vertikale Teil des Kupferdrahtes eine Bewegung senkrecht zu den Kraftlinien ausführen. Man schaltet nun in die Drahtspirale den Strom von 5 Amp. ein, stellt also ein

Radius des Zylinders gleich ist, mit andern Worten, das Trägheitsmoment unseres Zylinders mit dem Radius 1 cm beträgt 50 g.

Das obere Ende des Aufhängedrahtes wird mit dem daran befestigten Stift in einem Stativ festgeklemmt; nun läßt man den Zylinder Torsionsschwingungen ausführen. Mit Hilfe der Formel

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\mathfrak{J}}{\Delta}},$$

wo \mathfrak{J} das Trägheitsmoment und Δ das Torsionsmoment ist, läßt sich das Torsionsmoment Δ bestimmen, wenn die Schwingungszahl T gemessen ist. Es ergibt sich

$$\Delta = \frac{4\pi^2 \cdot \mathfrak{J}}{T^2}.$$

Es wird nun die Länge des Aufhängedrahtes so weit abgeglichen, daß die Zeit einer vollständigen Schwingung 1,987 Sek. beträgt, d. h. also, daß zu 76 Schwingungen 151 Sek. erforderlich sind. Für Beobachtungen mit genügender Annäherung reicht es aus, die Schwingungszeit zu $T = 2$ Sek. zu bestimmen. Hat man genügende Zeit zur Verfügung, so ist natürlich eine genauere Bestimmung wünschenswert. Unter Benutzung der Werte $T = 1,987$ Sek. und $\mathfrak{J} = 50$ g berechnet sich das Torsionsmoment zu $\Delta = 500$ dyn. cm.

magnetisches Feld von der Feldstärke 10 m. E. her und führt dem beweglich aufgehängten vertikalen Drahte durch die Klemmen an den Stativfüßen einen elektrischen Strom von 10 Amp. zu. Im Augenblicke des Stromschlusses erfolgt eine Drehung des Drahtes, die am Papierzeiger sichtbar gemacht wird. Durch Drehen des Torsionskopfes in entgegengesetzter Richtung führt man den Leitungsdraht wieder in seine Anfangsstellung zurück. Um diese zu markieren, kann man die Stellung des Papierzeigers an einem in einem passenden Holzstativ befestigten Stück Draht (in Fig. 12 nicht abgebildet), den man dem Papierzeiger von unten nähert, festlegen. Man hat dann den Torsionskopf wieder so weit zu drehen, daß der Papierzeiger wieder über dem als Index dienenden Messingdraht steht.

Wir wissen, daß ein von der absoluten elektromagnetischen Stromstärke, also von der Stromstärke 10 Amp., durchflossener Leitungsdraht von 1 cm Länge im magnetischen Felde $\mathfrak{H} = 1$ m. E. mit der Kraft von 1 Dyn bewegt wird, wenn, wie ja nach dem Prinzip der Gleichheit von Aktion und Reaktion selbstverständlich ist, die vom Magneten auf den Stromleiter ausgeübte Kraft dieselbe ist wie die vom Stromleiter auf das Magnetfeld ausgeübte Kraft. Daher muß die Kraft, mit der der 10 cm lange Leitungsdraht in dem magnetischen Felde 10 m. E. bewegt wird, gleich 100 Dyn sein. Da die Aufhängungsachse von dem vertikalen Teile des Kupferdrahtes den Abstand 5 cm hat, so ergibt sich als Kraftmoment der Wert 500 dyn·cm. Ist das Torsionsmoment des dünnen Aufhängedrahtes vorher bestimmt, so läßt sich die Richtigkeit dieser Berechnung erweisen, indem man das Torsionsmoment des Aufhängedrahtes mit dem in Bogenmaß auszudrückenden, am Torsionskopf abgelesenen Torsionswinkel multipliziert. Bei dem der Beschreibung zugrunde liegenden Apparate betrug das Torsionsmoment des Aufhängedrahtes 500 dyn·cm, der Torsionskopf mußte um $57,3^\circ$ gedreht werden. Die Richtigkeit des Versuchsergebnisses bestätigt die Richtigkeit der Überlegung.

Die zweite Art, die ponderomotorische Wirkung des magnetischen Kraftfeldes auf einen vom Strome durchflossenen Leitungsdraht zu bestimmen, wird mit der Anordnung Fig. 14 u. 15 ausgeführt. Die das magnetische Feld erzeugende Drahtspirale wird wagerecht auf den Tisch gelegt. Sie ruht auf drei Ansätzen, so daß zwischen Tisch und Unterfläche ein genügend großer Raum bleibt, um ein passend eingerichtetes Brett dazwischen schieben zu können. Auf die vorhin schon beschriebenen Messinglappen, die sich im Innern der Spirale befinden, wird ein großer fester Bügel aus starkem Messingblech aufgesetzt, auf dessen oberem Querteile in der Mitte eine zylindrische Hülse für die Aufnahme eines Torsionskopfes angebracht ist. Der Torsionskopf ist in der Mitte durchbohrt und mit einer Klemmschraube versehen, die einen starken vertikalen Messingdraht zentrisch festklemmt. An das untere Ende des Messingdrahtes ist wieder ein dünner Aufhängedraht (Torsionsdraht) angelötet, an dessen unterem Ende ein dickerer Messingstift angebracht wird. Der Torsionsdraht ist von denselben Dimensionen wie

beim vorigen Versuche. Das Torsionsmoment kann ebenso wie vorhin durch die Torsionsschwingungen des angehängten Messingkörpers vom Trägheitsmoment 50 g zu 500 dyn. cm bestimmt werden. Mittels einer passenden Klemmvorrichtung wird ein wagerechter, an den beiden Enden rechtwinklig nach unten umgebogener Kupferdraht, dessen wagerechter Teil $35,4 \text{ cm}$ lang ist, in der Mitte befestigt. Direkt unter der Klemmvorrichtung ist noch ein vertikal nach unten gehender Kupferdraht eingeschraubt.

Um die Einrichtung besser sichtbar zu machen, ist in Figur 15 die Drahtspule entfernt, und der Messingbügel, der in Wirklichkeit in der Drahtspule festgeschraubt ist, steht in der Figur frei. Das vorhin schon erwähnte

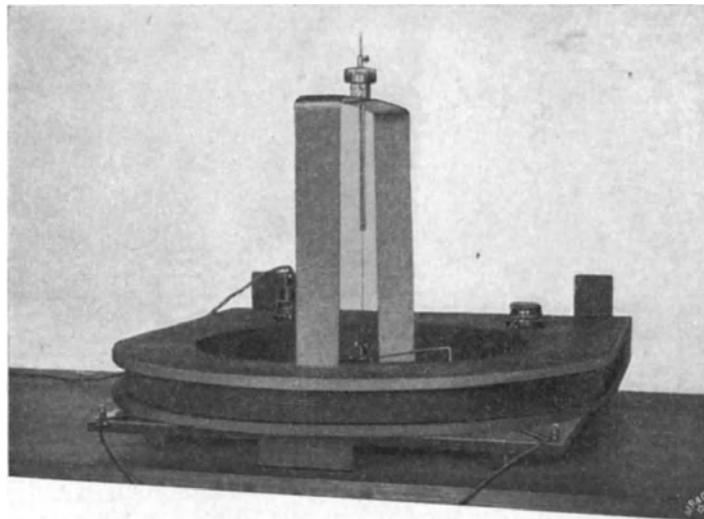


Fig. 14.

untergeschobene Brett ist an dem Rande mit einer etwa 1 cm hohen aufgeleimten Leiste versehen, um das etwa im Innern verschüttete Quecksilber aufzufangen. Innerhalb des so gebildeten Quecksilbernapfes ist eine kreisförmige Quecksilberrinne, deren mittlerer Radius $17,7 \text{ cm}$ ist, dadurch hergestellt, daß zwei kreisförmig ausgeschnittene Bretter auf das Grundbrett aufgeleimt sind. Endlich ist in der Mitte ein Quecksilbernapf durch Aufleimen eines ringförmigen Brettes hergestellt. Sowohl die kreisförmige Rinne als auch der mittlere Quecksilbernapf sind durch Drähte, die unterhalb des Brettes geführt sind, mit zwei an den Ecken des Brettes aufgeschraubten Klemmschrauben leitend verbunden. Der an dem Aufhängedraht hängende Kupferbügel taucht mit seinen beiden äußeren Enden in die Quecksilberrinne ein; der mittlere Teil taucht in den Quecksilbernapf in der Mitte. Werden nun die Klemmschrauben mit den Polen irgend einer Stromquelle leitend verbunden, so fließt durch die beiden Teile des Kupferbügels ein elektrischer Strom von der Mitte nach den beiden äußeren Enden. Diese beiden Teil-

ströme sind offenbar gleichwertig einem einzelnen von der Mitte nach der Peripherie fließenden Strome von der Gesamtstärke. Nur mechanische Gleichgewichtsgründe veranlaßten mich zu der Teilung des Stromes nach beiden Seiten. Sowohl das untere Quecksilberbrett wie auch der drehbare Kupferdraht sind bei dem vollständigen Apparate von der Drahtspirale in Figur 14 fast vollständig verdeckt. Es soll sich ja der Draht in der Ebene des Kreisleiters drehen. Beim Unterricht kann man aber den Apparat so tief stellen, daß die Schüler die Bewegung des Drahtes von ihren Plätzen aus sehen, wenn man nicht vorzieht, sie an den Tisch herantreten zu lassen, damit sie in der Nähe die Beobachtungen machen.

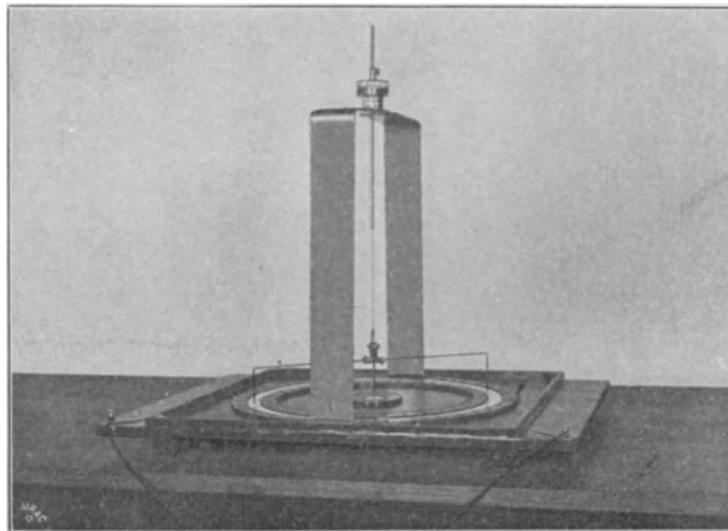


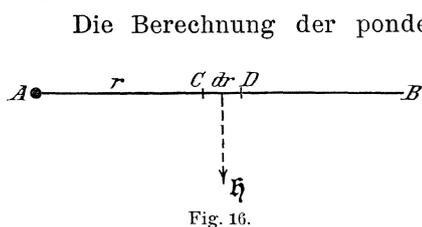
Fig. 15.

Um die Drehung des wagerechten Drahtes messen zu können, ist auf die beiden ringförmigen Bretter, die die äußere kreisförmige Quecksilberrinne bilden, eine von 5 zu 5° gehende Teilung mit roter Farbe aufgezeichnet. Diese Teilung ist in der Figur nur undeutlich zu erkennen.

Man stellt nun zur Ausführung der Messung den Apparat genau waagrecht auf, füllt die Quecksilberrinne und den mittleren Quecksilbernapf mit Quecksilber, schaltet in die mit der Zahl 100 versehene Ansteckdose den Strom ein, dessen Stärke man auf 5 Ampere regelt, so daß also das magnetische Feld von 10 magnetischen Einheiten entsteht. Ferner schaltet man durch die Verbindung der auf dem Quecksilberbrette befindlichen Klemmen einen Strom von der absoluten Stromstärkeeinheit, also von 10 Ampere, ein. Man beobachtet sofort eine Drehung des Kupferbügels. Die Größe der Drehung läßt sich entweder an der auf der kreisförmigen Quecksilberrinne angebrachten Teilung ablesen, oder man dreht den Torsionskopf so weit zurück, bis der Bügel wieder in seine Anfangslage zurückkehrt. In beiden

Fällen zeigt die Beobachtung, daß eine Drehung um 180° wieder Gleichgewicht herstellt.

Ich hebe noch hervor, daß man das Quecksilber in die Quecksilberrinne erst unmittelbar vor Ausführung der Beobachtung einzufüllen hat, wenn sich der Kupferdraht frei bewegen soll. Schon nach wenigen Minuten überzieht sich die Quecksilberoberfläche mit einer feinen Oxydschicht, die aber so stark hemmend auf die Bewegung des Kupferdrahtes einwirkt, daß eine genaue Messung kaum noch ausgeführt werden kann. Hat man das Quecksilber zu früh eingegossen, so daß es zur Bildung dieser Oxydschicht gekommen ist, ehe man die Messung ausführte, so kann man zur Not die Schicht wenigstens zum größten Teile dadurch entfernen, daß man zwei Stücke Papier in beide Hände nimmt und nun, von einem Punkte ausgehend, das Papier nach entgegengesetzten Richtungen über die Quecksilberoberfläche hinweg bewegt, bis die Papierstücke am entgegengesetzten Ende wieder zusammenstoßen, hier hat man dann die zusammengesobene Oxydschicht aus der Rinne herauszuheben.



auf den Stromleiter geschieht in folgender Weise: In Figur 16 sei A die Achse des in wagerechter Ebene gedrehten Drahtes AB , dessen Länge $AB = a$ ist. Durch C und D wird das Leiterelement dr , das von A den Abstand r hat, begrenzt.

Durch das Feld von der Stärke \mathfrak{H} wird das Leiterelement das vom Strome i durchflossen wird, senkrecht zur Drahtrichtung bewegt mit der Kraft

$$dK = \mathfrak{H} \cdot i \cdot dr.$$

Diese Kraft erzeugt um die Achse A das Drehmoment

$$d\Delta' = \mathfrak{H} \cdot i \cdot r \cdot dr.$$

Hieraus folgt durch Integration

$$\Delta' = \int_0^a \mathfrak{H} \cdot i \cdot r \cdot dr$$

$$\Delta' = \frac{\mathfrak{H} \cdot i \cdot a^2}{2}.$$

Es bietet natürlich gar keine Schwierigkeiten, die Berechnung auch ohne Benutzung des Integrals auszuführen.

Setzen wir in die letzte Gleichung die bei dem Versuche benutzten Werte $\mathfrak{H} = 10$ magnetische Einheiten, $i =$ Einheit des elektrischen Stromes, $a = 17,7$ cm ein, so folgt

$$\Delta = \frac{10 \cdot 1 \cdot 17,7^2}{2} \text{ dyn} \cdot \text{cm} = 1566 \text{ dyn} \cdot \text{cm}.$$

Da nun das Torsionsmoment des Aufhängerdrahtes $\Delta = 500$ dyn · cm beträgt, so ergibt sich, daß der wagerechte Kupferdraht um den Betrag von

$\frac{1566}{500} = 3,13$ gedreht werden muß. Das entspricht aber dem Drehungswinkel $\varphi = 180^\circ$, für den $\text{arc } \varphi = \pi$ ist. Denselben Wert hat der Versuch ergeben.

Durch den Versuch ist die Richtigkeit des Satzes, daß die ponderomotorische Kraft des magnetischen Feldes auf einen von einem Strome durchflossenen Leiter, senkrecht zu den Kraftlinien ausgeübt, durch das Produkt von Feldstärke, Stromstärke und Leiterlänge bestimmt ist, nachgewiesen.

§ 7. Die elektro-magnetische Induktion (qualitativ).

Die qualitative Einführung in die Induktionserscheinungen geschieht wohl am einfachsten durch die Umkehrung des folgenden Versuchs, der noch einmal die ponderomotorische Wirkung zwischen Strom und magnetischem Felde zur Darstellung bringt: Ein kräftiger Elektromagnet, dessen beide Pole einander zugekehrt sind, und der demnach ein starkes magnetisches Feld zwischen sich bildet, wird nach der Anordnung von Figur 17 auf den Tisch gestellt. Zwei Fußklemmen werden in einer Entfernung von etwa 1 m voneinander in passender Höhe aufgestellt, so daß eine leicht bewegliche Leitungs-

schnur, die lose zwischen den Fußklemmen hängt, sich mit ihrem mittleren Teil zwischen den Polen des Elektromagneten befindet. Dann wird durch Anschluß an einige Akkumulatoren mit dazwischengeschaltetem Ausschalter ein starker Strom von etwa 10—20 Ampere durch die wagerechte Leiterschnur geschickt. Im Augenblicke des Stromschlusses wird die vom Strome durchflossene Leiterschnur nach oben aus dem Felde herausgeschleudert, wenn für einen in der Richtung der magnetischen Kraftlinien schauenden Beobachter der Strom von rechts nach links fließt. Will man nun die Leiterschnur wieder zwischen die Pole bringen, so empfindet man einen starken Widerstand. Es ist so, als ob sich eine unsichtbare, elastische Feder der Bewegung entgegengesetzte. Man muß daher, um den Leiter zwischen die Pole zu bringen, eine gewisse Arbeit leisten.

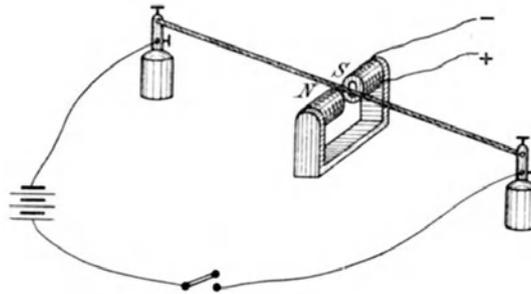


Fig. 17.

Die Umkehrung dieses Versuchs erfolgt in der Weise, daß man die Akkumulatorenbatterie und den Ausschalter entfernt und statt dessen ein Galvanoskop in den Leiterkreis einschaltet. Für die Wahl des Galvanoskops ist zu beachten, daß sein Widerstand möglichst klein ist, denn es gilt auch hier wie bei allen elektrischen Erscheinungen die Tatsache, daß die Wir-

Die Umkehrung dieses Versuchs erfolgt in der Weise, daß man die Akkumulatorenbatterie und den Ausschalter entfernt und statt dessen ein Galvanoskop in den Leiterkreis einschaltet. Für die Wahl des Galvanoskops ist zu beachten, daß sein Widerstand möglichst klein ist, denn es gilt auch hier wie bei allen elektrischen Erscheinungen die Tatsache, daß die Wir-

kung am größten ist, wenn der Widerstand am Galvanoskop dem Widerstande in dem Stromerreger (und das ist in diesem Falle der Teil des ausgespannten Drahtes, der sich zwischen den Magnetpolen befindet) möglichst gleich ist. Wenn man nun die zwischen den Fußklemmen hängende Leiterschnur von oben nach unten zwischen den Polen des Elektromagneten hindurchbewegt, so daß die Kraftlinien geschnitten werden, so erfolgt ein Ausschlag des Galvanoskops. Der Sinn des Ausschlages deutet auf den Strom, der für einen in der Richtung der Kraftlinien schauenden Beobachter bei der Abwärtsbewegung des Drahtes von links nach rechts fließt.

Um den Sinn des Ausschlages des Galvanoskops zu untersuchen, verwende ich ein kleines Polbestimmungselement. Dieses besteht aus einer Kupfer- und einer Zinkplatte von etwa 2:4 cm Größe, die an die beiden Drähte an dem einen Ende einer Doppelleitungsschnur angelötet und hier mit Isolierband befestigt sind. Die beiden Drahtenden an dem andern Ende der etwa 1 m langen Doppelleitungsschnur sind mit Farbe bezeichnet, und zwar ist das Ende, das mit der Kupferplatte verbunden ist, rot, das, welches mit der Zinkplatte verbunden ist, blau angemalt. Die beiden Platten werden nun einfach in ein mit gewöhnlichem Leitungswasser gefülltes kleines Becherglas hineingehalten, während die beiden freien Enden an die Pole des Galvanoskops bzw. in den Teil des Stromleiters eingeschaltet werden, in dem die Stromrichtung untersucht werden soll. Ein solches Polbestimmungselement ist in der Handhabung sehr einfach. Der Strom ist so schwach, daß er auch einem empfindlichen Galvanoskop nicht schadet, und die beiden Metallplatten können nach Gebrauch sofort mit einem Handtuche abgetrocknet werden. Ist der erzeugte Strom nicht stark genug, so genügt es, in das im Becherglase befindliche Wasser einige Tropfen verdünnter Schwefelsäure zu gießen, um den Ausschlag des Galvanoskops zu vergrößern.

Nimmt man die zwischen den Fußklemmen von Figur 17 ausgespannte Leiterschnur fort, und verbindet man die Fußklemmen mit den freien Drahtenden des Polbestimmungselements, so erfolgt dann am Galvanoskop ein Ausschlag in demselben Sinne, wie er beim Induktionsversuche erfolgte, wenn die rechts stehende Fußklemme mit dem positiven, die links stehende mit dem negativen Pole verbunden war. Auf diese Weise läßt sich die Richtung des Induktionsstromes oder, was dasselbe sagt, die Polarität der Potentialdifferenz beim Induktionsversuche bequem feststellen. Es entsteht rechts ein positives, links ein negatives Potential.

Bei der Bewegung der zwischen den Fußklemmen ausgespannten Schnur von unten nach oben ist der Ausschlag am Galvanoskop dem vorigen entgegengesetzt. Die Stromrichtung verläuft also jetzt von rechts nach links.

Die durch den Versuch nachgewiesenen Tatsachen lassen sich zu dem Lenzschen Gesetze zusammen fassen, daß bei der Bewegung eines Leiters im magnetischen Felde ein Strom von einer Richtung induziert wird, die der Richtung desjenigen Stromes entgegengesetzt ist,

durch den die Bewegung des Leiters selbst im magnetischen Felde hervorgerufen wurde.

Wie schon oben angedeutet, kommt es bei der Wahl des Galvanoskops darauf an, den Widerstand des Galvanoskops möglichst dem Widerstande des Stromerregers gleich zu machen. Hierbei ist zum Widerstande des Galvanoskops auch noch der Widerstand der Zuleitungsdrähte zu rechnen. Bei den gebräuchlichen Versuchsanordnungen bilden aber schon die Zuleitungsdrähte einen so großen Widerstand, daß man die beabsichtigte Gleichmachung nur in sehr unvollkommenem Maße erreichen kann. Dies veranlaßte mich zur Konstruktion eines einheitlichen Apparates, der sowohl den im magnetischen Felde bewegten Leiter wie auch das Galvanoskop zugleich enthält. Es liegen dann die beiden Teile nur so weit voneinander entfernt, daß die direkte Einwirkung des Feldmagneten auf die Magnetnadel des Galvanoskops entweder vollständig verschwindet oder durch einen kleinen Kompensations-

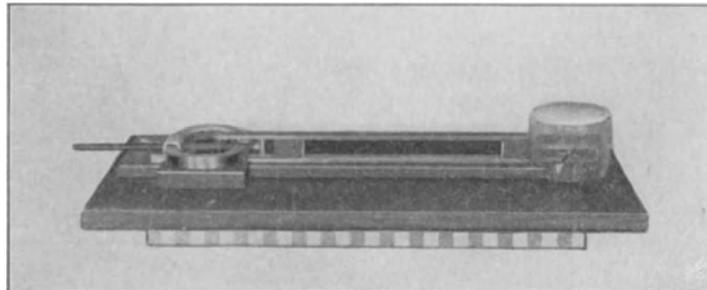


Fig. 18.

magneten, z. B. eine magnetisierte Nähnaedel, ausgeglichen wird. Der ganze Apparat ist in Fig. 18 abgebildet: Auf einem Grundbrette von der Größe 35 : 15 cm ist ein Stahlmagnet (in der Figur auf der linken Seite) befestigt, der die Form eines mit einem schmalen Schlitz versehenen Ringes hat (ein sog. geschlitztes Toroid). Um den geschlitzten Ring stark magnetisieren zu können, besteht er aus zwei getrennten Teilen, die aber durch eine kräftige Eisenklammer, die einen guten magnetischen Schluß bietet, auf der einen Seite so zusammengehalten werden, daß zwischen den freien Polen nur der schon erwähnte Abstand von 1 cm bleibt. Zwischen diesen freien Polen entsteht ein wenig ausgedehntes, aber kräftiges magnetisches Feld. Der übrige Teil des Apparates ist ein Kupferstab von 5 mm Dicke und 20 mm Breite, der in der aus der Figur ersichtlichen Weise so zusammengebogen ist, daß seine freien Schenkel längs einer Strecke von etwa 20 cm in einem gegenseitigen Abstände von 2 cm parallel übereinander liegen. Der Teil des Kupferstreifens, der der Biegung am nächsten ist, ist noch stärker zusammengebogen, so daß seine beiden Teile nur etwa 8 mm Abstand voneinander haben. Zwischen diesen beiden Teilen ist eine kurze, auf einem Achathütchen schwebende Magnetnadel auf einer Spitze leicht drehbar auf-

gehängt. Senkrecht zur Achse der Magnetnadel sind zwei leichte Aluminiumzeiger von je 4 cm Länge an der Nadel befestigt; die Enden sind umgebogen und mit weithin sichtbaren, dreieckigen Papiermarken versehen. Diese Papiermarken schweben über einer zylindrischen Teilung aus schwarzem Papier, auf der einige Teilstriche mit weißer Farbe aufgezeichnet sind. Dieser Teil bildet das Galvanoskop. Es ist mit einer gegen Luftströmungen schützenden Glasglocke bedeckt. Die äußersten Enden der wagerechten Schenkel des Kupferstabes sind mit einem 4 mm breiten Schlitz von 4 cm Länge versehen. Mit diesem Teile greifen sie über die Pole des Feldmagneten. Ein kurzer, dicker, an seinen Enden federnd aufgeschlitzter Kupferstab kann mittels eines an demselben befestigten Hartgummistabes, der durch ein Loch in dem Joche des Magneten hindurchgesteckt ist, hin und her bewegt werden. Zur Herstellung der bestleitenden Verbindung werden vor Ausführung des Induktionsversuches sowohl die Gleitflächen in dem Schlitze der Kupferschienen wie auch die dazwischen gleitenden Flächen des Verbindungsstückes amalgamiert.

Man stellt den Apparat auf und regelt durch eine oder mehrere auf das Grundbrett gelegte magnetische Nähnadeln die Einstellung der Magnetnadel so, daß die Papiermarken über der Nullmarke der Teilung liegen. Man achtet ferner darauf, daß die Magnetnadel nur ganz langsame Schwingungen ausführt, woraus hervorgeht, daß sie sich dann in einem sehr schwachen magnetischen Felde befindet. Nun bewegt man das Gleitstück einmal zwischen den Polen des Feldmagneten hindurch und erhält einen Ausschlag von etwa 20° . Eine Bewegung des Gleitstückes in entgegengesetzter Richtung erzeugt eine Ablenkung der Magnetnadel im entgegengesetzten Sinne.

Der Grund dafür, daß dieser einfache Apparat einen solch starken Induktionsstrom erzeugt, liegt in dem außerordentlich geringen Widerstande des ganzen Apparates, wodurch bewirkt wird, daß trotz der geringen induzierten Potentialdifferenz ein Strom von genügender Stärke entsteht. Es ist die auch hier nach dem Ohmschen Gesetze zu berechnende Stromstärke $J = E/W$ deshalb so groß geworden, weil W so klein gemacht ist.

Die Wirkungsweise des Apparates kann man nun sofort in zweierlei Weise deuten, entweder nämlich, indem man sagt, die Induktionsspannung oder der Induktionsstrom entsteht dadurch, daß der bewegliche Leiter magnetische Kraftlinien schneidet, oder indem man sagt, die Zahl der den geschlossenen Leiter durchsetzenden Kraftlinien ist bei der Bewegung des einen Leiterteiles größer oder kleiner geworden.

Meines Erachtens kommt durch diesen Apparat die Beziehung zwischen dem magnetischen Felde, dem bewegten Leiter und dem induzierten Strome in vollkommenster Klarheit zum Ausdruck.

§ 8. Die elektromagnetische Induktion (quantitativ).

Die Größe der durch das Schneiden der Kraftlinien erzeugten Induktionsspannung läßt sich mit Hilfe der in Fig. 19 dargestellten Versuchsanordnung in einfacher Weise messen:

In der Mitte des schon mehrfach benutzten magnetischen Feldes wird eine kreisförmige Holzscheibe befestigt, um deren Peripherie ein Messingstreifen so gelegt wird, daß er die Holzscheibe um etwa 5 mm nach der Vorderseite überragt (bei den Versuchen liegt der in der Figur stehend dar-

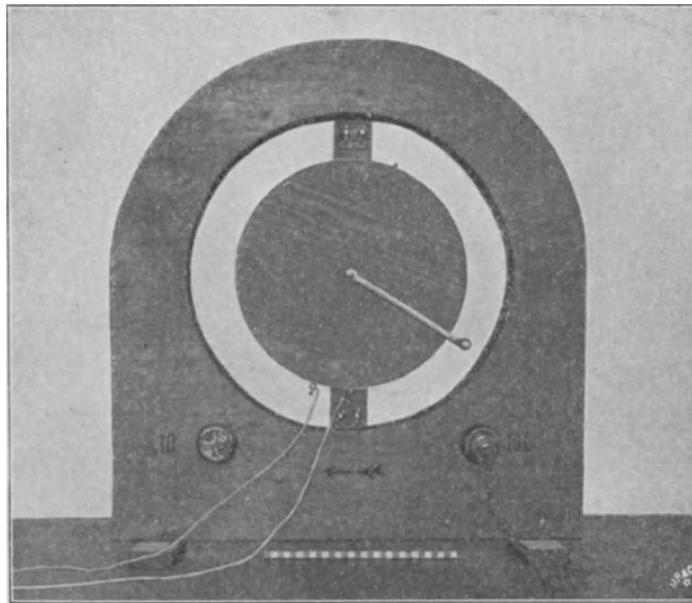


Fig. 19.

gestellte Apparat flach auf dem Tische). Der Durchmesser dieses Messingstreifens beträgt $2R = 35,7$ cm. Die von dem Messingringe eingeschlossene Fläche hat also den Flächeninhalt 1000 qcm. Da das magnetische Feld dann die Feldstärke $\mathfrak{H} = 10$ magnetische Einheiten hat, wenn der in die mit 100 bezeichnete Ansteckdose geleitete Strom die Stärke von 5 Ampere besitzt (siehe S. 18), so wird die von dem Messingringe eingeschlossene kreisförmige Fläche von 10000 magnetischen Kraftlinien senkrecht durchsetzt. In der Mitte des kreisförmigen Brettes ist eine Achse für einen aus einem Messingstabe gebildeten drehbaren Radius angebracht, dessen äußerstes Ende mit einem Holzgriffe versehen ist. Beim Drehen des Messingstabes um die Achse wird sein Ende schleifend gegen den vorstehenden Rand des kreisförmigen Messingringes gedrückt. Ferner sitzt auf dem Ringe eine Klemmschraube, und endlich ist, mit der Mitte der Achse durch einen Draht verbunden, auf

dem das Holzbrett tragenden vertikalen Querstab eine Klemmschraube isoliert angebracht. Man verbindet die eben beschriebenen Klemmschrauben mit den Klemmen eines empfindlichen Galvanometers von geringem Widerstand. Dreht man nun den Radius um seine Achse, während man ihn gleichzeitig fest auf den vorstehenden Rand schleifend drückt, so werden die durch die Kreisfläche gehenden Kraftlinien immer in demselben Sinne geschnitten, und zwar ergibt sich leicht durch die Anschauung auf Grund des Versuchs Seite 26, daß das Ende des Messingstabes, das auf dem Kreisringe schleift, ein positives Potential haben muß, wenn der Radius im Sinne des Uhrzeigers gedreht wird. Der Vergleich des durch dieses Potential erzeugten Ausschlags am Galvanometer mit dem durch das Polbestimmungselement erzeugten bestätigt die Richtigkeit. Man beobachtet bei entgegengesetzter

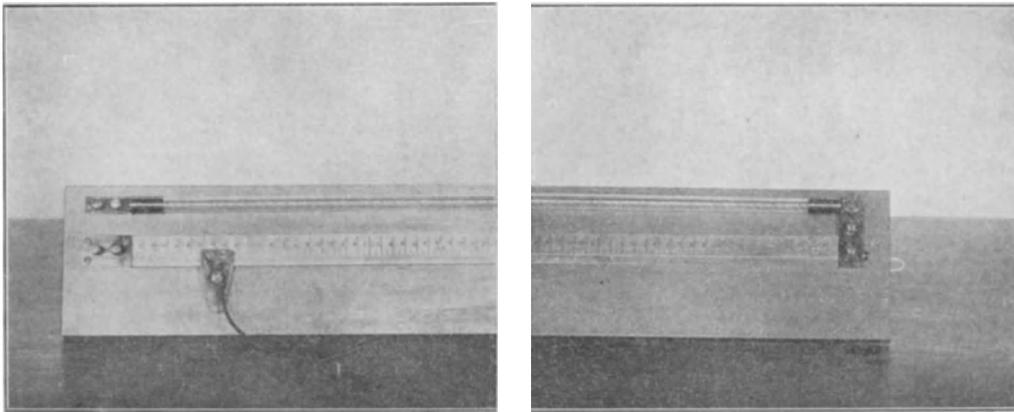


Fig. 20.

Drehung einen Ausschlag am Galvanometer in entgegengesetztem Sinne. Ferner beobachtet man, daß der Ausschlag um so größer wird, je rascher die Drehung erfolgt.

Hat man das Galvanometer geeicht, so daß man unmittelbar ablesen kann, wie viele Millivolt dem Ausschlage von einem Skalenteile entsprechen, so kann man das erzeugte Potential sofort ablesen. Hierbei ist aber auf den Widerstand der Zuleitungsdrähte Rücksicht zu nehmen. Ist das Galvanometer nicht geeicht, so kann man mittels eines einfachen Kompensationsverfahrens, am bequemsten unter Anwendung des in Fig. 20 abgebildeten Apparates, die Messung des Potentials vornehmen.

Dieser Hilfsapparat besteht aus einem Brette von etwa 110 cm Länge und 15 cm Breite. Auf der in der Figur dem Beschauer zugewandten Seite ist über einem Metermaßstabe ein Nickelindraht von 1 m Länge ausgespannt. Es ist passend, den Durchmesser des Drahtes zu 0,8 mm zu wählen, da dann der Widerstand annähernd 1 Ohm ist, wengleich es auf die absolute Größe des Widerstandes nicht ankommt. Parallel zu diesem Draht ist, in einer

schützenden Glasröhre eingeschlossen, ein dünner, spiralförmiger Nickelindraht, dessen Widerstand 199mal so groß ist wie der des ausgespannten Drahtes, befestigt. Die beiden Enden der den Draht einschließenden Röhre sind mit 2 Messingkappen verschlossen, von denen die Messingkappe rechts durch einen Messingstreifen leitend mit dem Ende des ausgespannten Drahtes verbunden ist. Auf dieser Verbindung ist noch eine Klemmschraube angebracht. Die linke Seite sowohl des ausgespannten Drahtes wie auch des Spiraldrahtes ist je mit einem Messingklotz, der auf dem Grundbrette befestigt ist, leitend verbunden; auf jedem Messingklotz befinden sich 2 Klemmschrauben. Verbindet man je eine der beiden Klemmschrauben mit einem Akkumulator, an dessen Klemmen die Potentialdifferenz von 2 Volt herrscht, so findet auf dem aus den beiden Teilen zusammengesetzten Leiter ein Potentialabfall statt. An den Enden des ausgespannten Drahtes herrscht die Potentialdifferenz von 0,01 Volt. Hieraus folgt, daß, wenn man 2 um 1 cm voneinander abstehende Punkte auf dem ausgespannten Messingdraht wählt, an diesen eine Potentialdifferenz von 10^{-4} Volt herrscht.

Die beiden noch freien Klemmschrauben links können mit einem geeichten Voltmeter versehen werden. Das ist besonders dann nötig, wenn man keinen großen Akkumulator verwendet oder auf irgend eine andere Stromquelle angewiesen ist, bei der man durch einen passenden Vorschaltwiderstand die Spannung so zu regeln hat, daß an den Zuleitungsklemmen auf dem Meßbrette die Spannungsdifferenz von 2 Volt herrscht. Die auf der verbindenden Messingschiene rechts sitzende Klemmschraube hat ebenfalls den Zweck, entweder das Verhältnis der Widerstände zwischen den beiden Leiterteilen zu bestimmen oder die an den Enden des ausgespannten Meßdrahtes herrschende Potentialdifferenz, die dann 0,01 Volt betragen muß, mit einem geeichten Voltmeter zu messen.

Um nun bequem die an 2 um 1 cm voneinander abstehenden Punkten herrschende Potentialdifferenz von 10^{-4} Volt abzunehmen, dient ein kleiner Aufsatz aus Messing (in Fig. 21 besonders abgebildet), der ungefähr die Form eines liegenden, gleichschenkligen Dreiecks hat, auf dessen Basisseite ein Stück Hartgummi angesetzt ist. Hier hindurch gehen zwei Messingstäbchen, deren untere Enden zu feinen Schneiden, die möglichst genau 1 cm Abstand voneinander haben, zugeschärft sind. Auf die Schneiden ist ein dünner Platindraht gelötet. Die oberen Enden der beiden Messingstäbchen sind mit einer Doppelleitungsschnur verbunden, deren beide andere Enden dann mit einem Galvanometer verbunden werden können.

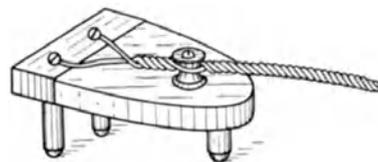


Fig. 21.

Dieser Hilfsapparat ist sehr bequem, um sich eine kleine Potentialdifferenz zu verschaffen. Ich benutze ihn auch wohl zur Eichung eines Galvanometers. Natürlich kann man dem Ausschlage des Galvanometers nur

dann die abgelesene Spannungsdifferenz zuordnen, wenn der Widerstand des Galvanometers im Vergleich zu dem zwischen den Schneiden liegenden Nickelindraht und den durch die Leiterschnur gebildeten Zuleitungsdrähten sehr groß ist. Im andern Falle ändert sich ja bekanntlich die Potentialdifferenz durch den benutzten Nebenschluß.

Für unsern Zweck schalten wir den Induktor, also die Kreisscheibe mit dem drehbaren Radius, und die Abzweigung des eben beschriebenen Hilfsapparates und das Galvanometer in einen Stromkreis hintereinander, und zwar so, daß die im Induktor erzeugte Potentialdifferenz entgegengesetzt der in der Abzweigung erzeugten Potentialdifferenz ist. Ist nun der drehbare Radius des Induktors in Ruhe, so zeigt das Galvanometer den Ausschlag an, der von der Abzweigung herrührt, der also einer Potentialdifferenz von 10^{-4} Volt entspricht. Nun drehen wir den Radius, auf dem Messingringe schleifend, während das magnetische Feld mit 10 magnetischen Einheiten hergestellt ist. Wir beobachten, daß bei der Drehung im einen Sinne der Ausschlag des Galvanometers wächst, bei der im andern Sinne aber abnimmt. In diesem letzteren Sinne drehen wir weiter, und zwar so rasch, daß das Galvanometer wieder auf Null zurückgeht.

Ich verfare im Unterrichte so, daß ich einen Teil der Schüler nach dem Galvanometer sehen lasse, während ich so rasch drehe, daß das Galvanometer auf Null zeigt. Der andere Teil der Schüler sieht nach der Uhr. Von dem Augenblicke an, wo die Nullstellung des Galvanometers erreicht ist, zähle ich laut die Anzahl der Umdrehungen. Ich mache die Schüler darauf aufmerksam, daß sie die Zeit, die zu 30 Umdrehungen erforderlich ist, an der Uhr ablesen sollen. Es stellt sich jedesmal heraus, daß gerade 30 Sekunden für 30 Umdrehungen erforderlich sind, daß also eine Umdrehung in 1 Sekunde erfolgt. Hieraus ist zu schließen: Wenn in einer Sekunde von einem Leiter 10^4 Kraftlinien geschnitten werden, so entsteht an den Enden dieses Leiters die Potentialdifferenz von 10^{-4} Volt. Hieraus folgt dann weiter, daß beim Schneiden von einer Kraftlinie in einer Sekunde die Potentialdifferenz von 10^{-8} Volt entsteht. Man nennt die durch Schneiden einer Kraftlinie in einer Sekunde erzeugte Potentialdifferenz die elektromagnetische Einheit der Potentialdifferenz. Es ist demnach $1 \text{ Volt} = 10^8$ elektromagnetische Einheiten.

Bei der Ausführung des Versuches ist wohl zu beachten, daß man nicht schon durch die Berührung des drehbaren Radius mit der Achse oder mit dem Messingstreifen eine Potentialdifferenz verursacht, die entweder elektrochemischen oder thermo-elektrischen Einflüssen zuzuschreiben ist. Man hat daher für größte Reinheit der Kontaktflächen zu sorgen, sowie ferner dafür, daß nicht thermische Differenzen vorhanden sind. Man muß also insbesondere den Apparat lange genug in dem Beobachtungsraume stehen haben, damit vor Ausführung des Versuches etwaige thermische Differenzen ausgeglichen sind. Ferner hat man dafür zu sorgen, daß der Querbalken, der die Kreis-

scheibe in der Mitte des magnetischen Feldes hält, isoliert auf den Haltern festgeklemmt wird, denn die durch das Holz hindurchgehenden, vagabondierenden Ströme, die bei der immerhin hohen Spannung, die der das magnetische Feld erzeugende Strom hat, wenn die Stromstärke von 5 Ampere hindurchgeht, erzeugen gar zu leicht in dem Holze eine Spannungsdifferenz, die der beobachteten Spannung gleich ist oder sie gar übertrifft. Deshalb sind die Löcher, durch die die Befestigungsschrauben für den Querbalken hindurchgehen, mit Hartgummi ausgefüttert. Bei sorgfältiger Vermeidung der bezeichneten Fehlerquellen ist die beobachtete Potentialdifferenz der zu erwartenden Größe vollkommen gleich.

Es ist natürlich leicht, noch durch das Experiment den Nachweis zu führen, daß bei einem Felde von doppelter Stärke, das ja durch einen Strom von 10 Ampere zu erzeugen ist, bei gleicher Umdrehungszeit die doppelte Spannung entsteht, oder daß, wenn man die einfache Spannung haben will, man zu jeder Umdrehung des drehbaren Radius 2 Sekunden gebraucht.

In dem zuletzt beschriebenen Versuche ist auch die Begründung dafür enthalten, weshalb die Dimensionen der benutzten Apparate so groß sein müssen, denn nur so kommt man auch bei dem Induktionsversuche zu Spannungsgrößen, die innerhalb des für Unterrichtszwecke brauchbaren Meßbereichs liegen. Verzichtet man auf diesen Versuch, der m. E. einer der wichtigsten ist, so kommt man für die früheren Versuche auch mit Spulen von geringeren Dimensionen aus.

§ 9. Die Widerstandseinheit.

Wenn zwar bei der Ausführung der Versuche in den vorigen Paragraphen schon oft die Widerstände zur Regelung der Stromstärke benutzt sind, so bedarf die Einführung der Widerstandseinheit noch einer kurzen Besprechung. Man geht aus von der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes, das auf irgend eine Weise vorher experimentell abgeleitet ist, und definiert die Widerstandseinheit als denjenigen Widerstand, an dessen Enden die elektromagnetische Einheit der Potentialdifferenz herrschen muß, wenn in dem Leiter die elektromagnetische Stromstärkeeinheit fließen soll. Hieraus ergibt sich dann sofort für die praktische Widerstandseinheit die Definition: Ein Ohm ist der Widerstand, an dessen Enden die Potentialdifferenz 1 Volt herrschen muß, damit in demselben der Strom von 1 Ampere fließt. Da nun

$$J = \frac{E}{W}, \text{ also } W = \frac{E}{J}, \text{ also } 1 \text{ Ohm} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampere}}$$

ist, und da ferner

$$\begin{aligned} 1 \text{ Volt} &= 10^8 \text{ elektromagnetische Potentialeinheiten,} \\ 1 \text{ Ampere} &= 10^{-1} \text{ elektromagnetische Spannungseinheiten} \end{aligned}$$

ist, so folgt

$$1 \text{ Ohm} = \frac{10^8}{10^{-1}} = 10^9 \text{ elektromagnetische Widerstandseinheiten}$$

oder, anders ausgedrückt,

$$1 \text{ elektromagnetische Widerstandseinheit} = 10^{-9} \text{ Ohm.}$$

Es ist nun praktisch, sich von dieser Größe einen Begriff zu machen: Ein Kupferdraht von 1 m Länge und 0,45 mm Durchmesser hat den Widerstand 0,1 Ohm. Da der Widerstand dem Querschnitte, also dem Quadrate des Durchmessers umgekehrt proportional ist, so muß ein Kupferdraht, der den Widerstand von einer elektromagnetischen Widerstandseinheit haben soll, bei 1 m Länge einen Durchmesser haben, der 10^4 mal so groß ist wie der angegebene, d. h. er müßte einen Durchmesser von 450 mm, also fast von $\frac{1}{2}$ m besitzen. Man erkennt hieraus, daß diese Widerstandseinheit weit außerhalb der praktisch brauchbaren Größenordnung liegt, weshalb es berechtigt ist, ein solch großes Vielfaches (nämlich 10^9) der absoluten Widerstandseinheit als praktische Widerstandseinheit einzuführen.

§ 10. Die Einheit der Elektrizitätsmenge (Benutzung des ballistischen Galvanometers).

Man wird wohl im Unterrichte kaum die Theorie des ballistischen Galvanometers im einzelnen rechnerisch verfolgen können. Trotzdem hat man oft den Wunsch, dasselbe anzuwenden, besonders bei Induktionsversuchen, wenn es sich z. B. darum handelt, Messungen über die in der sekundären Spule eines Induktionsapparates bewegten Elektrizitätsmengen beim Öffnen und Schließen auszuführen, wobei ja bekanntlich das Resultat entsteht, daß beim Öffnen und Schließen des primären Stromes dieselbe Elektrizitätsmenge bewegt wird, obgleich wegen des rascheren Verlaufs des Öffnungsstromes die momentan auftretende Potentialdifferenz hier eine bedeutend größere ist.

Mit Hilfe unseres großen meßbaren, magnetischen Feldes ist die Eichung des ballistischen Galvanometers unschwer auszuführen. Ich verwende als ballistisches Galvanometer ein Spiegelgalvanometer in der von WEINHOLD angegebenen Form (siehe WEINHOLD, *Demonstrationen*, III. Aufl., S. 714), bei der ich die Luftdämpfung durch Zurückziehen der in dem unteren Teile befindlichen Querschleibewände möglichst beseitige. Es ist zwar auch dann noch etwas gedämpft, doch schadet das nichts. Vielmehr muß man bei Unterrichtsversuchen eine gewisse Dämpfung beibehalten, weil man sonst zu lange warten muß, ehe der Apparat wieder zur Ruhe kommt.

In die das magnetische Feld erzeugende Drahtspule, Fig. 11, wird an die beiden Befestigungsklemmen ein Querbalken befestigt, der in seinem mittleren Teile eine leicht auswechselbare flache Drahtspule von 100 Drahtwindungen kon-

zentrisch mit der äußeren Drahtspule trägt. Der mittlere Durchmesser dieser Spule beträgt $2R = 11,3$ cm. Die Leiterfläche hat also die Größe von 100 qcm. Die beiden Drahtenden sind mit zwei auf der Spule angebrachten Klemmschrauben verbunden. Diese beiden Klemmschrauben werden mit denjenigen Klemmen des WEINHOLDSchen Spiegelgalvanometers verbunden, die an die dickdrähtigen Spulen angeschlossen sind. Bei dem von mir benutzten Spiegelgalvanometer beträgt der Widerstand der dickdrähtigen Spule 0,2 Ohm. Der Widerstand der Induktionsspule betrug 3,5 Ohm, der der Zuleitung 0,3 Ohm, so daß der Gesamtwiderstand des aus Induktionsspule, Zuleitung und Galvanometerspule bestehenden Stromkreises 4 Ohm betrug. Schaltet man in den äußeren, das Feld erzeugenden Stromkreis den Strom von 5 Ampere ein, so wird die von der inneren Spule umschlossene Leiterfläche von 1000 Kraftlinien durchsetzt. Man läßt das Galvanometer zur Ruhe kommen und schaltet nun plötzlich den Strom aus. Man beobachtet am Lichtzeiger des Galvanometers einen Ausschlag von beispielsweise 10 Skalenteilen (die Anzahl der Skalenteile richtet sich sowohl nach der Teilung der Skala wie nach ihrer Entfernung vom Spiegel des Galvanometers; sie läßt sich besonders durch Variieren ihrer Entfernung vom Spiegel so einrichten, daß sie eine praktische Größe erhält). Beim plötzlichen Einschalten des Feldstromes erhält man denselben Ausschlag nach der andern Seite. Schaltet man nun den das magnetische Feld erzeugenden Strom langsamer aus oder ein, indem man stufenweise einen Vorschaltwiderstand ein- oder ausschaltet, so ändert das, wenn man nicht allzu langsam verfährt, an der Größe des Ausschlages nichts. Natürlich darf man nicht so langsam einschalten, daß die Nadel des Galvanometers schon wieder auf dem Rückwege begriffen ist, während man die Schaltung vornimmt. Wir können nun die Einschaltung so vornehmen oder so vorgenommen denken, daß zum Einschalten gerade 1 Sekunde erforderlich ist, wobei die Stromstärke, also auch das magnetische Feld ganz gleichmäßig zunimmt. Dann haben wir innerhalb einer Sekunde die den inneren Leiterkreis durchsetzende Kraftlinienzahl von 0 auf 1000 vermehrt. Wir haben also dauernd, unter der Voraussetzung, daß wir im Innern nur eine einzige Windung hätten, die Spannung von 10^3 elektromagnetischen Spannungseinheiten erzeugt. Da aber die Spule 100 Windungen besitzt, so ist das erzeugte Potential gleich $E = 10^5$ elektromagnetische Einheiten. Der Widerstand unseres gesamten Stromkreises betrug 4 Ohm oder, da $1 \text{ Ohm} = 10^9$ absolute Widerstandseinheiten ist, ist $W = 4 \cdot 10^9$ absolute Widerstandseinheiten. Folglich ist die während einer Sekunde herrschende Stromstärke (da auch hier das Ohmsche Gesetz gilt)

$$J = \frac{10^5}{4 \cdot 10^9} = 2,5 \cdot 10^{-5}$$

absolute Stromstärkeeinheiten. Da nun endlich diese Stromstärke 1 Sekunde lang fließt, so ist die beförderte Elektrizitätsmenge $2,5 \cdot 10^{-5}$ elektromagne-

tische Einheiten. Eine elektromagnetische Einheit der Elektrizitätsmenge ist aber gleich 10 Ampere-Sekunden oder 10 Coulomb, folglich entspricht unser beobachteter Ausschlag des Galvanometers der Elektrizitätsmenge von $2,5 \cdot 10^{-4}$ Coulomb.

Dieser Berechnung liegen natürlich die angegebenen bestimmten Zahlenwerte zugrunde; das Resultat hängt in erster Linie vom Widerstande des Galvanometers und des übrigen Schließungskreises, der leicht bestimmt werden kann, ab, so daß auch für jeden besonderen Fall die Berechnung nach dem angegebenen Muster durchgeführt werden muß.

Wenn wir nun die Feldstärke des benutzten magnetischen Feldes, also die Anzahl der Kraftlinien, die die Leiterfläche der Induktionsspule durchsetzen, verdoppeln, so wird auch die erzeugte Potentialdifferenz verdoppelt, also wird auch die bewegte Elektrizitätsmenge, da ja am Widerstande des Kreisleiters nichts geändert ist, verdoppelt. Wir beobachten nun, daß der Ausschlag des ballistischen Galvanometers doppelt so groß ist wie vorhin. Es wird der Ausschlag des ballistischen Galvanometers auf die Hälfte reduziert, wenn die das magnetische Feld erzeugende Stromstärke, also auch die Feldstärke selbst nur halb so groß gewählt wird wie beim ersten Versuch. Natürlich lassen sich auch andere Zahlenverhältnisse zu dem Versuche heranziehen. Das Resultat ist: Der Ausschlag des ballistischen Galvanometers ist der bewegten Elektrizitätsmenge direkt proportional.

Wie schon angegeben, ist die in der Mitte des magnetischen Feldes befestigte Spule leicht auswechselbar. Sie wird durch einen einfachen Vorreiber in einer in dem vertikalen Querbalken angebrachten Vertiefung festgehalten.

Außer der schon beschriebenen Spule verwende ich noch solche von 10 und von 25 Windungen sowohl aus dickem wie aus dünnem Draht. Auch der Durchmesser der Spule kann von anderen Dimensionen gewählt werden, um die Richtigkeit der Beobachtung mit andern Größenverhältnissen zu untersuchen.

Zur Kontrolle dafür, daß die oben ausgeführte Überlegung und Berechnung richtig ist, kann man noch die Entladung eines großen Kondensators durch das ballistische Galvanometer ausführen. Ich habe zu dem Zwecke einen großen Paraffinkondensator mit der Kapazität 2,5 Mikrofarad benutzt, den ich so in den Nebenschluß der elektrischen Starkstromleitung anschließe, daß ein zugleich mit eingeschaltetes Voltmeter die Spannung von 100 Volt anzeigt. Zwischen der Elektrizitätsmenge Q , dem Potential V und der Kapazität C des Kondensators besteht die Beziehung

$$Q = C \cdot V.$$

Bei den den Versuchen zugrunde gelegten Verhältnissen war $C = 2,5$ Mikrofarad, $V = 100$ Volt; folglich beträgt die Ladung des Kondensators $Q =$

$2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ Coulomb. Als die Entladung des Kondensators durch das ballistische Galvanometer erfolgte, erhielt ich ebenfalls den früher beobachteten Ausschlag von 10 Skalenteilen. Die hierbei benutzte Zuleitung erfolgt nach Anweisung von Figur 22: Eine aus einem Paraffinklotz von 10.10 cm Größe, der mit 6 mit Quecksilber gefüllten Vertiefungen versehen ist, hergestellte Wippe W vermittelt die Verbindung von Kondensator C , ballistischem Galvanometer B und Starkstromleitung.

Hierbei werden die beiden mittleren Löcher der Wippe mit dem Kondensator C dauernd verbunden, die beiden Löcher rechts liegen an dem Nebenschluß NN der Starkstromleitung D , die beiden Löcher links an den

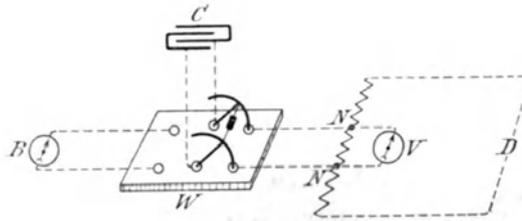


Fig. 22.

Klemmen des ballistischen Galvanometers B . Liegt die Wippe nach rechts herum, so wird der Kondensator geladen; wird sie dann nach links herumgelegt, so entlädt sich der Kondensator in das ballistische Galvanometer.

§ 11. Magnetische Permeabilität. Hysteresis.

Zur Einführung des Begriffes der magnetischen Permeabilität und zur Messung dieser Größe benutze ich ebenfalls die im vorigen Paragraphen beschriebene Induktionsspule, doch wird senkrecht zu der Fläche derselben durch ihre Mitte ein unmagnetischer Eisenstab von 1 qcm Querschnitt und etwa 1 m Länge hindurchgesteckt.

Wenn man nun wieder die Feldstärke $\mathfrak{H} = 10$ herstellt und die Induktionsspule mit dem ballistischen Galvanometer verbindet, so zeigt das Galvanometer beim Einschalten des das Feld erzeugenden Stromes einen bedeutend größeren Ausschlag als ohne den Eisenstab. Bei dem von mir benutzten Eisenstabe wuchs der Ausschlag auf 100 Skalenteile. Hieraus geht hervor, daß die nun durch das Galvanometer entladene Elektrizitätsmenge 10mal so groß ist wie bei dem Induktionsversuche ohne den Eisenstab. Das erklärt sich leicht so, daß durch das Einfügen des Eisenstabes in das magnetische Feld die Kraftlinienzahl auf das Zehnfache gewachsen ist. Da nun aber an der Feldstärke des Luftraumes keine Änderung eintritt, so muß die Zunahme der Kraftlinien auf eine Zunahme derselben in dem Eisenstabe zurückzuführen sein. Es müssen also durch den Eisenstab nunmehr rund 900 Kraftlinien hindurchgehen, während vorhin nur eine Kraftlinie durch denselben Querschnitt hindurchging, als er mit Luft gefüllt war. Hieraus folgt, daß, wenn man in ein magnetisches Feld von der Feldstärke 10 einen Eisenstab von 1 qcm Querschnitt in der Richtung der Kraftlinien hineinbringt, dann dieser Eisenstab 900mal so viele Kraftlinien aufzunehmen vermag als die Luft. Dieses Verhältnis der Zahl der Kraftlinien in Eisen und

der Zahl der Kraftlinien in Luft ist die „magnetische Permeabilität“ des Eisens; sie wird mit μ bezeichnet.

Auch die Tatsache, daß die magnetische Permeabilität keine Konstante ist, läßt sich nachweisen, wenn man die äußere Feldstärke ändert. Bei dem von mir benutzten Eisenstabe betrug sie bei der Feldstärke $\mathfrak{H} = 5$ m. E. nur $\mu = 650$, bei der Feldstärke $\mathfrak{H} = 15$ m. E. $\mu = 800$, für $\mathfrak{H} = 20$ $\mu = 670$.

Voraussetzung ist dabei, daß der Eisenstab vor jedem Versuch unmagnetisch gemacht war.

Es ist auffallend, daß der Ausschlag des Galvanometers geringer beim Ausschalten ist als beim ersten Einschalten, daß er aber auch beim zweiten Einschalten nicht wieder denselben großen Wert erlangt wie beim ersten Einschalten, bei Wiederholung des Ein- und Ausschaltens aber dann stets denselben kleineren Wert beibehält. Der Grund liegt darin, daß beim Ausschalten des Stromes noch ein magnetischer Rest im Eisen zurückbleibt, daß also nicht alle Kraftlinien aus dem Eisen verschwinden. Das kann man auch dadurch zeigen, daß man, nachdem der Strom schon ausgeschaltet war, nun den Eisenstab aus der Induktionsspule herauszieht. Es erfolgt wegen der jetzt eintretenden Verminderung der Kraftlinienzahl auf Null ein Ausschlag des Galvanometers.

Wir haben also hiermit zugleich den Begriff der magnetischen Hysterese eingeführt. Besonders auffallend, aber durch die Hysterese erklärlich ist es, daß, wenn man den Strom ausgeschaltet hat und ihn nun in entgegengesetzter Richtung einschaltet, ein größerer Ausschlag des Galvanometers erfolgt als beim ersten Einschalten, denn es wird der noch vorhandene Rest der Kraftlinien im Eisen vernichtet, und dann werden außerdem neue Kraftlinien von entgegengesetztem Richtungssinn in annähernd derselben Zahl wie beim ersten Versuch (bei unmagnetischem Eisen) erzeugt; die Zahl der Kraftlinien wird also um beträchtlich mehr verändert als beim ersten Versuch.

Es bietet keinerlei Schwierigkeiten, die genaue Hysteresisschleife auf die angegebene Weise messend zu verfolgen, doch mögen die gemachten Angaben hier genügen.

§ 12. Der Wechselstrom.

Das schon wiederholt benutzte berechenbare große homogene magnetische Feld bietet Gelegenheit, die Form des reinen, sinusartig verlaufenden Wechselstromes aus seinen Elementen aufzubauen.

Wenn ein ebener Leiter, der die Leiterfläche F umschließt, unter dem Winkel α gegen die Kraftlinien eines homogenen magnetischen Feldes mit der Feldstärke \mathfrak{H} geneigt ist, so gehen durch die Fläche $n = F \cdot \mathfrak{H} \cdot \cos \alpha$ Kraftlinien hindurch. Die Spannung an den Enden des Stromleiters, der mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um eine Achse im magnetischen Felde gedreht wird (§ 8), ist der Größe $\frac{dn}{d\alpha}$ proportional, woraus folgt, daß

die Spannung auch dem Differentialquotienten des Cosinus, also dem Sinus proportional ist. Ich verzichte hier auf die einfache elementare Herleitung (ohne Differentiation), doch glaube ich, daß es interessant ist, die Proportionalität der Spannung bei konstanter Winkelgeschwindigkeit mit dem Sinus des Neigungswinkels experimentell zu prüfen. Das ist nun leicht ausführbar, wenn man nicht die Spannung selbst mißt, sondern die bei einer bestimmten Winkeldrehung im Leiter bewegte Elektrizitätsmenge, die der Spannung proportional ist, mit Hilfe des ballistischen Galvanometers.

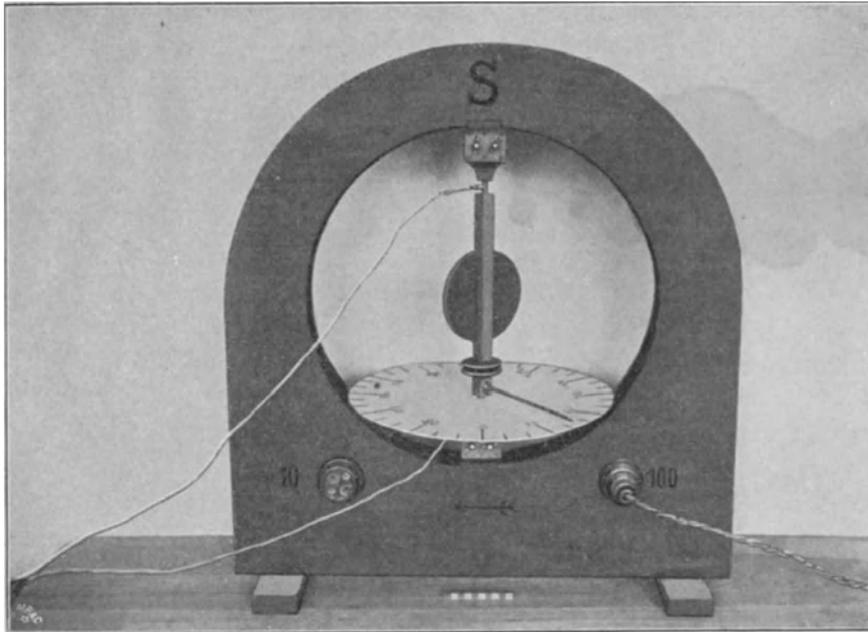


Fig. 23.

Zu dem Zwecke befestigen wir innerhalb des großen magnetischen Feldes an die schon mehrfach benutzten Messinglappen zwei hölzerne Ansätze, die einander zugekehrte kurze, mit einer Klemmschraube versehene Messingrohrenden tragen, die als Achsenlager für eine drehbare flache kreisförmige Induktionsspule dienen (Fig. 23). Die auf einer flachen Holzspule aufgewickelte Induktionsspule hat 100 Windungen umsponnenen Kupferdrahtes. Die Drahtenden sind zu zwei Messingzapfen geführt, die in die messingenen Achsenlager hinein passen. Die von den Kreiswindungen der Induktionsspule umflossene Fläche hat den Flächeninhalt 100 qcm; es gehen also, wenn die Kraftlinien die Fläche senkrecht durchsetzen, und das magnetische Feld mit der Stromstärke 5 Ampere erregt ist, 1000 Kraftlinien hindurch. Es ist in diesem Falle erwünscht, die Feldstärke möglichst zu steigern, deshalb benutze ich die Stromstärke von 15 Ampere und erhalte so als Kraftlinien-

zahl 3000. Da die Induktionsspule 100 Windungen hat, so ist die zur Berechnung kommende Kraftlinienzahl $N = 300\,000 = 3 \cdot 10^5$.

Auf den unteren Teil des Achsenlagers ist eine von 10° zu 10° gehende, weithin sichtbare Kreisteilung auf Pappe aufgeschoben, ferner ist an die Achse der Induktionsspule in eine kurze Rohrtülle ein starker Messingstab so angesetzt, daß er gleichzeitig als Handhabe für die Drehung der Induktionsspule und als Zeiger für die Kreisteilung benutzt wird. Man verbindet nun die Klemmschrauben, die an die Enden der Induktionsspule durch Vermittelung der Achse angeschlossen sind, mit den Polen des ballistischen Galvanometers und dreht die Spule von 10° zu 10° weiter, wobei man jedesmal den Ausschlag des ballistischen Galvanometers beobachtet.

Der Zeiger steht auf Null, wenn die Achse der Induktionsspule mit der Richtung der magnetischen Kraftlinien zusammenfällt. Um die Induktionswirkung in dieser Lage bei der Drehung zu messen, dreht man von -10° bis $+10^\circ$ und hat den Ausschlag des Galvanometers als Induktionswirkung zu notieren. Dann dreht man von $+10^\circ$ bis $+30^\circ$ und notiert den Galvanometerausschlag als Induktionswirkung für die mittlere Lage 20° . Die Drehung von $+30^\circ$ bis $+50^\circ$ gilt für die Induktionswirkung bei 40° . Ebenso dreht man weiter von 50° bis 70° , von 70° bis 90° . Nun geht man bis auf 0° zurück und dreht der Reihe nach von 0° bis 20° , dann bis 40° , 60° , 80° , 100° . So erhält man für jede der Lagen von 0° bis 90° in Intervallen von 10° zu 10° die Induktionswirkung bei einer Winkeldrehung um 20° .

Das Resultat der Beobachtung ist in folgender Tabelle zusammengeschrieben. Hier bedeutet die erste Kolumne α die mittlere Stellung und die zweite d den beobachteten Ausschlag des ballistischen Galvanometers.

α	d	$\sin \alpha$	$\frac{d}{\sin \alpha}$
0°	0	0,000	—
10	3,5	0,174	20
20	7	0,342	20
30	10	0,500	20
40	13	0,643	20
50	15	0,766	20
60	17	0,866	20
70	18	0,940	19
80	19	0,985	19
90	20	1,000	20

In der dritten Kolumne ist der Sinus der mittleren Stellung und in der vierten der berechnete Quotient aus dem Ausschlag und dem Sinus der mittleren Stellung zusammengestellt.

Aus der letzten Kolumne ergibt sich, daß der Quotient konstant ist, daß also der beobachtete Ausschlag dem Sinus der mittleren Stellung pro-

portional ist. Hieraus folgt nun, daß die bei einer Winkeldrehung um 20° bewegte Elektrizitätsmenge, also bei konstanter Winkelgeschwindigkeit auch die Stromstärke und wegen des unveränderten Widerstandes auch die erzeugte Potentialdifferenz dem Sinus des Winkels proportional ist, den die Achse der Induktionsspule mit der Richtung der Kraftlinien einschließt.

Im Unterricht wird man passend den beobachteten Ausschlag in graphischer Darstellung zur Konstruktion einer Kurve auftragen, bei der die Ausschläge die Ordinaten und die Winkel die Abszissen sind, um so die Übereinstimmung mit der Sinuskurve klar darzutun.

Wenn man nun zum Schluß die Klemmen der Induktionsspule mit einem astatischen Voltmeter von geringer Trägkeit verbindet und die Induktionsspule im magnetischen Felde dreht, so erhält man in jedem Augenblicke den dem Sinus des Stellungswinkels entsprechenden Ausschlag des Voltmeters. Beobachtet man den Lichtzeiger des Voltmeters in einem um eine horizontale Achse langsam rotierenden Spiegel, oder photographiert man den Lichtzeiger auf einer vertikal von oben nach unten mit gleichmäßiger Geschwindigkeit bewegten photographischen Platte, so erhält man direkt die Sinuskurve des Wechselstromes.

Schlusswort.

Es geht über die Aufgabe des vorliegenden Aufsatzes hinaus, den letzten Versuch noch weiter für die Herleitung des Prinzips der Gleichstrommaschine auszubauen, doch bietet auch das nicht die geringsten Schwierigkeiten. Ich habe den Apparat noch mit einem einfachen Kommutator versehen, um den pulsierenden Gleichstrom demonstrieren zu können. In derselben Weise kann man auch den Ringanker, den Trommelanker, den Mehrphasenstrom u. a. m. demonstrieren, wenn man in das homogen magnetische Feld die entsprechenden Anker einschaltet.

Es lag mir daran, im vorliegenden Aufsatz zu zeigen, wie man die elektromagnetischen Einheiten und Grundbegriffe auf Grund ihrer wissenschaftlichen Definition in wahrer Größe einführen kann. Es ist natürlich, daß man wohl selten imstande sein wird, alle vorliegenden Demonstrationen mit einer oder mit jeder Schülergeneration auszuführen, doch soll dieser Aufsatz eine Anregung dazu bieten, auch scheinbar ganz abstrakte Größen anschaulich und experimentell im Unterricht einzuführen.

Verlag von Julius Springer in Berlin.

Die Radioaktivität.

Von **E. Rutherford**, D.Sc., F.R.S., F.R.S.C.,
Professor der Physik an der McGill-Universität zu Montreal.

Unter Mitwirkung des Verfassers ergänzte autorisierte deutsche Ausgabe von Professor Dr. E. Aschkinass,
Privatdozent an der Universität Berlin.

Preis M. 16,—; in Halbleder gebunden M. 18,50.

Ergebnisse und Probleme der Elektronentheorie.

Von **Prof. H. A. Lorentz**.

Zweite, durchgesehene Auflage. — Preis M. 1,50.

Die neueren Wandlungen der elektrischen Theorien einschließlich der Elektronentheorie.

Zwei Vorträge

von **Dr. Gustav Holzmüller**.

Mit 22 Textfiguren, — Preis M. 3,—.

Theorie des Potentials

und ihre Anwendung auf

Elektrostatik und Magnetismus.

Von **Émile Mathieu**,

Professor der Mathematik zu Nancy.

Autorisierte deutsche Ausgabe von H. Maser.

Preis M. 10,—.

Gesammelte Abhandlungen zur Lehre von der Elektrizität und dem Magnetismus.

Von **William Thomson**.

Autorisierte deutsche Ausgabe von Dr. L. Levy und Dr. B. Weinstein.

Mit 59 Textfiguren und 3 Tafeln. — Preis M. 14,—; in Leinwand gebunden M. 15,20.

Experimental-Untersuchungen über Elektrizität.

Von **Michael Faraday**.

Deutsche Übersetzung von Dr. S. Kalischer.

3 Bände. Mit vielen Textfiguren und Tafeln. — Preis M. 36,—; in Leinwand gebunden M. 39,60.

Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus.

Von

James Clerk Maxwell, M. A.

Autorisierte deutsche Übersetzung von Dr. B. Weinstein.

2 Bände. Mit zahlreichen Holzschnitten und 21 Tafeln. — Preis M. 26,—; in Leinwand geb. M. 28,40.

Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus.

Von

E. Mascart,

und

J. Joubert,

Professor am Collège de France,
Direktor des Bureau central météorologique,

Professor am Collège Rollin.

Autorisierte deutsche Übersetzung von Dr. Leopold Levy.

2 Bände. Mit 264 Textfiguren. — Preis M. 30,—; gebunden M. 32,40

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.