**4. Die Wirkungen der Gleichstromschwankungen,
der elektrischen Schwingungen und der Elektro-
inductionsströme auf eine in einem constanten
Felde stehende Magnetnadel bez. einen Inductor
aus weichem Eisen;
von Max Hornemann.**

I. Teil.

Versuche.

Im Galvanoskope wird eine in der Nähe befindliche Magnetnadel unter dem Einfluss eines elektrischen Stromes aus ihrer gewöhnlichen Nord-Süd-Lage in gesetzmässiger Weise nach rechts oder links abgelenkt und bleibt so lange abgelenkt, als der Strom fliesst. Hört der Strom auf zu fließen, dann kehrt die Nadel in ihre Ruhelage zurück. Bei Einwirkung eines sehr kurze Zeit dauernden Stromes entstehen häufig nur sehr kleine und zuweilen keine deutlich wahrnehmbaren Ausschläge. Z. B. vermag auch der Entladungsstrom der Leydener Batterie die Nadel abzulenken, aber nur, wenn man die Entladung durch Einschalten eines geeigneten Widerstandes verlangsamt. Doch gelingt dieser Versuch nicht bei plötzlicher Entladung der Leydener Flasche, da die Dauer des Stromes zu kurz ist, als dass die Elektrizität einen merklichen Antrieb auf die Nadel ausüben könnte, ganz abgesehen davon, dass dieser Entladungsstrom aus einer Reihenfolge abwechselnd entgegengesetzter Ströme zusammengesetzt ist. Beim Einschalten eines Galvanometers in den Kreis eines Inductionsapparates beobachtet man nur einen Ausschlag nach der einen Seite, wenn die Unterbrechungen des Hauptstromes rasch aufeinander folgen: Die Nadel, die einmal nach der einen oder nach der anderen Seite vielleicht schon ein wenig abgelenkt ist, bleibt dann in dieser abgelenkten Stellung oder wird nach dieser Seite noch stärker abgelenkt (doppelsinnige Ablenkung der Nadel). Unter gewissen Bedingungen kommt, wie ich zeigen werde, diese regellos nach der einen oder anderen

Seite abgelenkt stehenbleibende Nadel in gesetzmässige Rotation, deren Geschwindigkeit sich dann noch durch Verstärkung des erdmagnetischen Feldes sehr erhöhen lässt. Setzt man nun an die Stelle der Nadel einen Inductor aus weichem Eisen (am zweckmässigsten von der Form einer kreisrunden Scheibe), dann bekommt man, besonders wenn wiederum das constante erdmagnetische Feld in geeigneter Weise verstärkt wird, in allen Fällen, selbst dann, wenn die Nadel keinen, einen geringen oder einen unsicheren Ausschlag macht, trotz des viel grösseren Gewichtes dieses Inductors (Ankers) sehr beträchtliche und vor allem stets gesetzmässige Drehbewegungen. An der Hand von Versuchen werde ich zeigen, welcher Art dieselben sind.

Die zur Ausführung dieser Versuche benutzten Apparate sind nach Art eines gewöhnlichen Horizontalgalvanoskopes construiert, bestehen also aus verschiedenen Drahtwicklungen, welche in einem magnetischen Felde passend aufgestellt werden, und einer Magnetnadel, bez. einem Inductor (Anker) aus weichem Eisen.

Als Nadel diene mir eine kleine Compassnadel von einer Länge = 2,2 cm, als Inductor eine kreisrunde, aus dünnem Blech hergestellte Scheibe aus weichem, mehrfach ausgeglühten Eisen mit einem Durchmesser von 4,5 cm, welche mittels eines oberhalb angelöteten Bügels auf eine senkrecht stehende Stahlspitze aufgesetzt, in der horizontalen Ebene leicht drehbar ist.

Die Drahtwicklungen, in deren Mitte die Nadel und der Anker von der Seite her hineingeschoben werden können, sind auf einem rechteckigen Holzrahmen (von einer Länge = 6 cm, einer Höhe = 1 cm, einer Breite = 2 cm) gewunden. Es kommen zur Verwendung: Drahtwicklung Nr. 1 (320 Windungen eines 50 m langen, 0,2 mm dicken Drahtes mit einem $W = 28$ Ohm), Drahtwicklung Nr. 2 (140 Windungen eines 22 m langen, 0,5 mm dicken Drahtes, dessen $W = 2$ Ohm ist,) und Drahtwicklung Nr. 3 (35 Windungen eines 6 m langen, 1 mm dicken Drahtes mit $W = 0,133$ Ohm). Diese Drähte werden nun in der Nord-Süd-Richtung eines constanten magnetischen Feldes aufgestellt.

Als magnetisches Feld dient entweder das erdmagnetische Feld, oder das Feld eines Stahlmagneten (gewöhnlich benutze ich einen 10 cm langen, 0,4 cm dicken Stabmagneten), oder

das Feld eines Elektromagneten, bez. das Feld eines Gleichstromes, der eine senkrecht zu den Versuchswicklungen gestellte Drahtwicklung dauernd durchströmt.

Je nach dem Verlauf der Kraftlinien des constanten Feldes und der Stromrichtung sind zwei Ausgangsstellungen zu unterscheiden. In der Ausgangsstellung *A* liegt, wenn wir den Apparat von der Ober-(Stirn-)seite ansehen, *S* des Magneten (bez. der gleichwirkende Nordpol der Erde, der aber der Einfachheit halber stets durch ein *S* bezeichnet werden soll) oben und der Nordpol des Magneten (bez. der gleichwirkende Südpol der Erde) unten (der Nordpol der Magnetnadel, bez. der inducirte Nordpol des Inductors liegt demgemäss oben, ihre Südpole unten), und der Strom fliesst an der Stirnseite des Apparates von unten nach oben (an der Unterseite entgegengesetzt). In der Ausgangsstellung *B* dagegen ist zwar wieder *S* des Magneten oben und *N* unten, dagegen fliesst der Strom an der Stirnseite von oben nach unten.

Auf der Nadel und auf dem Inductor ist eine deutlich sichtbare Marke angebracht. Unter Nadel und Inductor kommt eine Kreiseinteilung zu liegen, sodass also die Drehungswinkel leicht abgelesen werden können. Ein Ausschlag oder Drehung im Sinne des Uhrzeigers wird als Ausschlag nach rechts oder Rechtsdrehung bezeichnet und durch ein positives Vorzeichen (+) gekennzeichnet. Entgegengesetzte Bewegungen werden durch — (Links-drehung) markirt.

Die Stromschwankungen des Gleichstromes werden durch Schliessen und Oeffnen des Stromes erzeugt, welches an einer beliebig im Stromkreis gelegenen Stelle *U* vielfach mit der Hand oder durch eine automatische Unterbrechungsvorrichtung geschieht. Bei Benutzung von Wechselströmen eines Inductionsapparates werden beide Drahtenden unserer Wicklungen fest mit den zuführenden Drähten verbunden. Bei Entladungen Leydener Flaschen sind eine oder zwei Funkenstrecken einzuschalten.

Wenn möglich, sind in den Versuchen die Einzelwirkungen beim Schliessen, während des Fliessens des Stromes, bei der Stromöffnung und die Gesamtwirkungen eines einmaligen Schliessens und Oeffnens des Stromes, sowie wiederholter, rasch folgender Stromschwankungen auseinander gehalten.

Abschnitt I. Ablenkung und Drehbewegung der Nadel und des Inductors unter Einwirkung der Kräfte eines constanten Feldes (des Erdmagnetismus, bez. des permanenten Stabmagneten) und der Stromschwankungen eines Gleichstromes.

In den Versuchen 1—5 ist Ausgangsstellung *A* gewählt, bei welcher der Strom aufwärts fliesst.

Versuch 1: Wirkung eines Stroms mit kleiner elektromotorischer Kraft und geringer Stromstärke. Der Strom eines Flaschenelementes wird durch Drahtwicklung Nr. 1 geleitet. Dann ist

$$J = \frac{E}{W_i + W_e} = \frac{1,5}{0,2 + 28,0} = 0,053;$$

also wirken $320 \times 0,053 = 17$ Ampèrewindungen.

a) Die Nadel wird im erdmagnetischen Felde in bekannter Weise bei Stromschluss nach links rasch abgelenkt, bleibt während des Stromschlusses nach mehrfachem Hin- und Herpendeln um -90° abgelenkt stehen, und kehrt bei Stromöffnung langsam rechts herum um $+90^\circ$ in die Ausgangsstellung *A* zurück, in welcher sie nach einigen wenigen Pendelbewegungen stehen bleibt. Bei einmaligem, rasch folgenden Schliessen und Oeffnen erfolgt eine Ablenkung um durchschnittlich -45° und darauf sofortige rechtsseitige Rückkehr in die Ruhelage *A*. Bei rascher Folge von Stromschwankungen bleibt sie nach links abgelenkt stehen. Der Ablenkungswinkel ist um so grösser, je grösser die Dauer des jedesmaligen Stromschlusses und je kleiner die Zeit der Stromunterbrechung ist. In dem Felde meines permanenten Stabmagneten erfolgt ziemlich rasche Ablenkung um -60° , bez. sehr rasche Rückkehr in die Ruhelage.

b) Der Inductor macht unter denselben Bedingungen im Felde des Stabmagneten folgende Bewegungen: Beim Stromschluss dreht er sich langsam links herum; nach längerer Einwirkung des Stromes ist die Marke um durchschnittlich -60° gedreht; bei Stromöffnung dreht sich der Anker rechts herum, ungefähr um ebensoviel Grade ($+60^\circ$) zurück, sodass die Marke wieder in ihre ehemalige Lage kommt. Gewöhnlich ist aber diese bei Stromöffnung erfolgende Rechtsdrehung um 5° grösser als die Linksdrehung beim Stromschluss. Bei rascher

Folge von Stromschluss und -öffnung bleibt dann der Anker entweder ganz still stehen, aber oft dreht er sich auch um $+1^{\circ}$ bis $+5^{\circ}$ (rechtsherum) im Gegensatz zu der Nadel, welche ja stark links abgelenkt wird. Wiederholte Stromschwankungen lassen den Anker meist ganz unbeeinflusst, und nur selten beobachtet man eine sehr langsame, continuirliche Rechtsdrehung. Alle Bewegungen des Inductors geschehen in diesem Versuche äusserst langsam, daher der Inductor meist nur wenig über die Stellungen, in denen er nach Stromschluss bez. -öffnung schliesslich stehen bleibt, pendelnd hinauskommt. Wenn er z. B. bei Stromschluss und Andauer des Stromes um -60° abgelenkt stehen bleibt, so erreicht er diese Stellung erst durch eine linksseitige Drehung von -70° und Rückwärtsbewegung von $+10^{\circ}$, und ebenso erreicht er seine Ausgangsstellung bei Stromöffnung durch eine Rechtsdrehung um $+70^{\circ}$ und Rückwärtspendeln von -10° . Der Effect einer oder mehrerer rascher Stromschwankungen ist aber im allgemeinen $= 0$, d. h. der Anker kommt nicht von der Stelle, bleibt still stehen, während im Gegensatz hierzu die Nadel abgelenkt wird bez. abgelenkt bleibt. Im erdmagnetischen Felde erfolgen weder beim Stromschluss noch beim Oeffnen irgend welche nennenswerte Bewegungen des Ankers.

Versuch 2: Wirkungen eines Stromes mit etwas höherer elektromotorischer Kraft und Intensität. Durch die Wicklung Nr. 1 wird ein Strom eines Accumulators geschickt. Dann ist

$$J = \frac{E}{W_i + W_e} = \frac{6}{0,6 + 28,0} = 0,21.$$

Demgemäss sind $320 \times 0,21 = 67,2$ Ampèrewindungen wirksam.

a) Die Nadel wird im erdmagnetischen Felde ähnlich beeinflusst wie im Versuch 1. Die Ablenkung beim Stromschluss erfolgt nur etwas rascher und beträgt im Felde des Stabmagneten -77° . Bei Stromöffnung kehrt sie in die Ruhelage wie in Versuch 1 zurück.

b) Die Marke des Inductors dreht sich im Felde der Stabmagneten beim Schliessen und Andauer des Stromes links herum sehr langsam durchschnittlich um -10° ; bei Stromöffnung erfolgt eine ziemlich rasche Rechtsdrehung um durchschnittlich $+47^{\circ}$ (auch hier schiesst der Inductor zunächst

etwas weiter herum und macht dann eine linksseitige Rückwärtsdrehung); durch einmaliges Schliessen und Oeffnen ist also der Anker rechts herum um durchschnittlich $+37^\circ (= -10^\circ + 47^\circ)$

Fig. 1.

vorwärts gekommen. Folgt die Oeffnung zeitlich rasch dem Schluss, so kommt nach einer minimalen Linksdrehung, die wegen der kurzen Dauer des Stromschlusses nicht ihr Ende erreichen kann, sofort eine kräftige Rechtsdrehung zu stande; und bei wiederholter Einwirkung von Stromschwankungen kommt der Inductor in gleichmässige Rechtsrotation. Schon durch 6 malige Wiederholung der Stromunterbrechung im geeigneten Augenblicke kann man eine volle

Umdrehung des Inductors erzielen. Im erdmagnetischen Felde bewirkt eine Stromschwankung eine Rechtsdrehung um nur $+15^\circ$, daher die Rotation unter dem Einfluss wiederholter Stromschwankungen eine viel langsamere ist.

Versuch 3 (vgl. Fig. 1): Wirkung eines Stromes mit kleiner elektromotorischer Kraft, aber grosser Intensität. Der Strom des Flaschenelementes wird durch Wicklung Nr. 3 geleitet; es ist dann

$$J = \frac{E}{Wi + We} = \frac{1,5}{0,2 + 0,133} = 4,5;$$

daher $35 \times 4,5 = 150,5$ Ampèrewindungen.

a) Die Nadel verhält sich im erdmagnetischen Felde wie in Versuch 1; nur ist die Ablenkung bei Stromschluss sehr rasch erfolgt. Im Felde des Magnetstabes beträgt der Ablenkungswinkel -85° .

b) Im Felde des Stabmagneten verhält sich der Anker so: Bei Stromschluss und bei Andauer des Stromes wird der Inductor um $-5,5^\circ$ (links herum) gedreht, bei Stromöffnung dagegen sehr rasch um $+57^\circ$ rechts herum. Einmaliges Schliessen und Oeffnen dreht also den Inductor um $51\frac{1}{2}^\circ (= -5,5^\circ + 57^\circ)$ rechts herum (auch hier erfolgt bei Stromöffnung zunächst eine grössere Rechtsdrehung um durchschnittlich $+85^\circ$ und dann eine Rückkehr um -28°); schliesst man daher immer in dem

Augenblicke, in dem die maximale Rechtsdrehung gemacht ist, dann kommt der Inductor schon durch 5 Stromschlüsse einmal im Kreise herum.

Versuch 4: Wirkung eines Stromes von noch höherer elektromotorischer Kraft und noch grösserer Intensität: Geht der Accumulatorstrom durch Wicklung Nr. 3, dann ist

$$J = \frac{6}{0,6 + 0,133} = 8;$$

also sind $8 \times 35 = 280$ Ampèrewindungen wirksam.

a) Die Nadel erleidet bei Stromschluss eine enorm rasche Ablenkung um -90° und bleibt nach länger andauernden, zitternden Pendelbewegungen während des Stromschlusses um -90° abgelenkt stehen (im Felde des Stabmagneten um -85°). Unter Einwirkung rasch folgender Stromschwankungen bleibt auch hier die Nadel in starker Ablenkung nach links still stehen.

b) Der Inductor wird im Felde des Stabmagneten bei Stromschluss und Andauer des Stromes langsam um durchschnittlich $-3,5^\circ$ gedreht; bei Stromöffnung erfolgt rasche und ausgiebige Rechtsdrehung um durchschnittlich $+65^\circ$ (der maximale Ausschlag beträgt oft bis 100° , und durch Zurückpendeln geht er auf 65° zurück). Im erdmagnetischen Felde kommt der Inductor kaum von der Stelle. Der Strom eines stark entladene Accumulators dreht den Anker merkwürdigerweise schon beim Schliessen und während des Fliessens des Stromes rechts herum um $+15^\circ$ und beim Oeffnen weiter in derselben Richtung um $+35^\circ$ (zusammen also durch Schliessen und Oeffnen um $+50^\circ$).

Versuch 5a: Wenn wir den Strom des Flaschenelementes durch Drahtwicklung Nr. 2 gehen lassen, dann sind $98 (= 140 \times 0,7)$ Ampèrewindungen wirksam, und der Inductor macht Drehungen um -8° (beim Stromschluss) und um $+52^\circ$ (bei Stromöffnung), während die Nadel nur die bekannte negative Ablenkung zeigt, bez. in ihre Ruhelage zurückkehrt. 6—7 Stromschwankungen können eine Umdrehung bewirken.

Versuch 5b: Geht der Accumulatorstrom durch Wicklung Nr. 2, dann sind die Drehungen $= -3^\circ$ und $+63^\circ$, wobei $322 (= 2,3 \times 140)$ Ampèrewindungen in Betracht kommen.

Wählen wir nunmehr für die Versuche 6—10 als Ausgangsstellung die Stellung *B*, in welcher der Strom in entgegengesetzter Richtung fliesst, dann sind die Wirkungen des Stromes auf Nadel und Inductor denen in den Versuchen 1—5 genau entsprechende, nur mit dem Unterschiede, dass die Richtung eines jeden Ausschlages, bez. der Drehbewegung jedesmal die entgegengesetzte ist; hinsichtlich der Grösse des Ausschlages und der Geschwindigkeit des Ausschlages und der Drehung findet kein Unterschied statt. Es ist also immer nur das Vorzeichen umzukehren. Wenn wir also in den Versuchen 1—5 die Stromrichtung umkehren, dann bekommen wir

Versuch 6 (Umkehrung von Versuch 1): Im Felde des Stabmagneten macht der Inductor beim Schliessen des Stromes eine langsame Rechtsdrehung, die bei Stromandauer $= + 60^\circ$ ist; bei Stromöffnung kehrt er links herum um $- 60^\circ$ in die ursprüngliche Lage zurück; bei einmaligem Schliessen und Oeffnen, falls beide zeitlich nahe zusammenliegen, bleibt der Inductor fast gänzlich stillstehen im Gegensatz zu der Nadel, die einen deutlichen Ausschlag nach rechts machen würde.

Versuch 7 (Umkehrung von Versuch 2): Der Inductor dreht sich beim Schliessen und Fliessen des Stromes um $+ 10^\circ$, beim Oeffnen um $- 47^\circ$; continuirliche Stromschwankungen bringen den Anker in Linksrotation.

Versuch 8 (Umkehrung von Versuch 3): Drehung von $+ 5,5^\circ$ (beim Schliessen) und $- 57^\circ$ (beim Oeffnen des Stromes); bei Stromschwankungen continuirliche Linksrotation.

Versuch 9 (Umkehrung von Versuch 4): Wiederum Linksrotation des Inductors.

Versuch 10 (Umkehrung von Versuch 5): $+ 8^\circ$, bez. $+ 3^\circ$ beim Schliessen und $- 52^\circ$, bez. $- 63^\circ$ beim Oeffnen; der Inductor rotirt links herum unter Einfluss von Stromschwankungen.

Aus den Versuchen 1—10 ergibt sich nun ohne weiteres, dass der Inductor verschieden beeinflusst wird je nach der Zahl der Kraftlinien, die durch den Innenraum der Drahtwicklungen hindurchgehen; denn die Zahl der Kraftlinien ist proportional der Zahl der Ampèrewindungen. In Versuch 1 und 6 bleibt der Inductor in dem schwachen Stromfelde fast gänzlich unbeeinflusst, während er in den anderen Versuchen Drehbewe-

gungen macht, die um so ausgiebiger sind, je mehr Ampèrewindungen wirksam sind. Von Einfluss auf die Drehbewegungen ist aber auch, wie ich später ausführen werde, die Geschwindigkeit, mit der sich die Stromstärke in den Drahtwindungen ändert. Die plötzliche Aenderung der Stromstärke bringt einen anderen Effect hervor als die langsame. Erstere ist vorteilhaft, wenn man rasche Rotationen erzielen will.

Soll die Rotation des Inductors eine gleichmässige sein, so empfiehlt es sich, die Unterbrechungen auf mechanischem Wege vorzunehmen. Wird der Strom immer in dem Augenblicke unterbrochen, in welchem er gerade seine grösste Intensität erreicht hat, dann sind die Rotationsgeschwindigkeiten die grössten. Lässt man den Strom lange geschlossen, dann hemmt er die Rotationsbewegung, indem er bremsend wirkt. Die Zahl der Stromschwankungen kann eine beträchtliche sein; bei 80 Unterbrechungen in der Secunde gelangen die Rotationsbewegungen immer sehr gut. Aber es ist anzunehmen, dass die Zahl der Unterbrechungen beträchtlich grösser werden kann.

Es ergibt sich aus den Versuchen aber noch ein anderes Resultat, welches freilich der genauen Nachprüfung mittels feinerer Messungen, als ich sie ausführen konnte, bedarf. Dividirt man nämlich das Product aus der Zahl der Ampèrewindungen und der Zahl des Winkels beim Stromschliessen durch die Zahl des Ausschlagswinkels bei der Stromöffnung, dann kommt annähernd immer dieselbe Zahl 15 heraus.

	x Zahl der Ampère- windungen	Ausschlag bei		$\frac{xy}{z}$
		y Strom- schluss	z Strom- öffnung	
Versuch 1	17	60	65	$\frac{17 \cdot 60}{65} = 16$
„ 2	67	10	47	$\frac{67 \cdot 10}{47} = 15$
„ 5 a	98	8	52	$\frac{98 \cdot 8}{52} = 15$
„ 3	150	5,5	57	$\frac{150 \cdot 5,5}{57} = 15$
„ 4	280	3,5	65	$\frac{280 \cdot 3,5}{65} = 15$
„ 5 b	322	3	63	$\frac{322 \cdot 3}{63} = 15$

Abschnitt II. Drehbewegungen der Nadel und des Inductors unter der Einwirkung eines constanten Feldes und elektrischer Schwingungen, wie sie beim Entladen von Leydener Batterien entstehen.

Zu den Versuchen 11 und 12 eignete sich am besten die Wicklung Nr. 3, deren Isolirung meist genügte, ohne dass die Funken auf benachbarte Windungen überschlagen. Zuweilen ist aber auch Wicklung Nr. 1 von Vorteil, wenn nämlich nur minimale Elektrizitätsmengen in Betracht kommen. Auch hier legen wir die Ausgangsstellung *A* zu Grunde, indem wir annehmen, dass der von der positiven Belegung zur negativen Belegung überfliessende Strom an der Vorderseite der Drahtwicklung in der Richtung von unten nach oben zu geht. Bei Entladung einer Flasche ist nur eine Funkenstrecke nötig, bei Entladungen aus Influenzmaschinen bez. aus den damit verbundenen Flaschen lässt man die Funken entweder ebenfalls nur an einer Stelle oder, was zweckmässiger ist, an zwei Stellen (je in der Verbindung einer Flasche mit den Drahtenden des Galvanoskopes) überschlagen; eine Funkenlänge von 2—5 mm ergab die besten Resultate.

Versuch 11: Die Nadel wird im erdmagnetischen Felde durch eine einmalige Entladung einer Flasche nicht merklich beeinflusst. Lässt man aber von der Influenzmaschine zahlreiche Entladungen durch den Draht gehen, dann tritt eine anfänglich sehr langsame, allmählich aber mehr und mehr zunehmende Ablenkung nach rechts ein, und diese Rechtsdrehung geht dann auch nach Aussetzen der Entladungen von selbst weiter, bis die Nadel gerade $\frac{1}{2}$ Umdrehung (um $+180^\circ$) gemacht hat. Dabei ergiebt nun die Untersuchung der Nadel eine Aenderung ihres Eigenmagnetismus: Nach Einwirkung der ersten Entladungen ist die Nadel an ihren Enden weniger stark magnetisch; nach und nach wird sie magnetisch in der Richtung ihrer kleinen Axe, und zwar auf der linken Seite nordmagnetisch, auf der rechten Seite süd magnetisch; dadurch erfährt sie nun im Felde der Erde eine geringe rechtsseitige Ablenkung von $+5^\circ$ bis $+10^\circ$; wenn nun die Entladungen weiter wirken, dann wird sie an ihrem unteren Ende (das ursprünglich süd magnetisch war) schwach nord magnetisch und an ihrem oberen Ende schwach süd magnetisch; deshalb wird

die nunmehr ummagnetisirte Nadel auch nach Aussetzen der Entladungen unter Einfluss des Erdmagnetismus weiter in derselben Richtung (rechts herum) gedreht, bis $\frac{1}{2}$ Umdrehung vollendet ist. Setzt man die Entladungen erst aus, nachdem die Nadel um $+90^\circ$ sich gedreht hat, dann ist die ummagnetisirte Nadel in der Längsrichtung wieder sehr stark magnetisch geworden. Lässt man dann bei der weiteren Drehung über $+90^\circ$ hinaus die Entladungen weiter einwirken, dann wird die Nadel in der Längsrichtung wieder schwächer magnetisch, und nach Vollendung einer $\frac{1}{2}$ Umdrehung erfolgt die Weiterdrehung rechts herum viel leichter und schon durch viel weniger Entladungen als zu Beginn unseres Versuches, wo ja die Nadel noch in der Längsrichtung stark magnetisch war. Die Nadel kommt also, wenn sie zu Beginn des Versuches in der Längsrichtung kräftig magnetisch war, anfangs sehr schwer und sehr langsam in eine Rechtsdrehung; hat sie aber erst eine gewisse Ablenkung erfahren und ist die Ummagnetisirung erfolgt, dann läuft sie unter dem Einfluss des Erdmagnetismus und der elektrischen Schwingungen sehr leicht weiter und bekommt bald eine grosse Rotationsgeschwindigkeit. Verstärkt man dann noch das constante Feld durch Auflegen eines Stabmagneten, dann rotirt sie so rasch, dass man die Umdrehungszahl derselben nicht mehr mit dem Auge feststellen kann.

Versuch 12 (vgl. Fig. 2): Der Inductor wird nun im Felde des Stabmagneten schon durch Einwirkung einer einzigen Entladung kräftig und rasch rechts gedreht (je nach der Stärke der Entladung um wenige bis fast $+90^\circ$). Eine anfängliche Tendenz zu einer Linksdrehung ist auch hier nicht vorhanden. Schon der überspringende Funken einer geriebenen Siegellackstange bringt, wenn man Drahtwindung Nr. 1 benutzt, eine deutlich wahrnehmbare Drehung des Inductors hervor.

Beim Drehen der Influenzmaschine kann man den Inductor in sehr rasche Rotation versetzen. Untersucht man den Inductor nach Einwirken einer Entladung, während welcher er irgend-

Fig. 2.

wie angehalten wird, sodass er sich nicht drehen kann, dann zeigt er sich in seiner linken Hälfte schwach nordmagnetisch, in seiner rechten schwach süd magnetisch.

Verbindet man die Leiter der Influenzmaschine dauernd mit dem Galvanoskop (sodass also die Funkenstrecken wegfallen), dann bleiben Nadel und Inductor ganz still stehen. Verlangsamt man die Entladung einer Flasche durch eine eingeschaltete nasse Schnur, dann zeigt die Nadel die bekannte Ablenkung nach links.

Lässt man die Entladungsströme in entgegengesetzter Richtung durch die Drahtwicklung gehen (Ausgangsstellung *B*), dann sind alle Erscheinungen dieselben, bis auf das Vorzeichen der Drehbewegung, welches immer das entgegengesetzte ist.

Abschnitt III. Ablenkung und Drehbewegung der Nadel und des Inductors unter Einwirkung eines constanten Feldes und eines Wechselfeldes, bei welchem eine Richtung überwiegt.

In den Versuchen 13 und 14 erzeuge ich einen Wechselstrom, dessen elektromotorische Kraft in der einen Richtung stärker ist als in der anderen, dadurch, dass ich durch die Drahtwicklungen nacheinander den Strom eines Accumulators in der einen Richtung und dann den Strom eines Elementes in entgegengesetzter Richtung hindurchleite. Die Verbindung der Drahtwicklung mit diesen beiden Stromquellen wird so hergestellt, dass der Accumulatorstrom (6 Volt) aufwärts, der Elementenstrom (1,5 Volt) abwärts fließen würde.

Versuch 13: Setzt sich demgemäss zusammen aus den Versuchen 2 und 6, wenn wir Drahtwicklung Nr. 1 benutzen.

a) Die Nadel erfährt im erdmagnetischen Felde, wenn wir bald den Elementen-, bald den Accumulatorstrom benutzen, nur die bekannten Ablenkungen. Folgen die Stromschwankungen rasch hintereinander, so bleibt sie ein wenig nach links abgelenkt stehen infolge Ueberwiegen der Wirkung des Accumulatorstromes.

b) Der Inductor macht im Felde des Stabmagneten unter dem Einfluss dieses Wechselstromes folgende Bewegungen: Beim Schliessen des Elementenstromes *y* (vgl. Versuch 6) dreht er sich langsam um $+60^\circ$ (rechts herum), falls der Stromschluss geraume Zeit andauert; beim Oeffnen des Stromes *y* würde er, wenn nicht sofort der Accumulatorstrom geschlossen

wird, in seine Ausgangsstellung um ebensoviel Grade links herum zurückgedreht werden (Versuch 6). Schliesst man aber den Accumulatorstrom x sofort nach Ausschalten des Stromes y , dann erfolgt eine linksseitige Drehung nur um -10° (Versuch 2). Würde man den Strom x erst dann schliessen, nachdem der Inductor in seine Ausgangsstellung zurückgekehrt ist, dann würde er um $-60^{\circ} + -10^{\circ} (= -70^{\circ})$ zurückgedreht werden. Beim Oeffnen des Stromes x erfolgt nun wieder eine Rechtsdrehung um $+47^{\circ}$. Im ungünstigsten Falle, nämlich wenn zwischen Oeffnung des Stromes y und Schliessen des Stromes x eine geraume Zeit vergeht, bekommt man als Resultat der Beeinflussung dieses Wechselstromes eine Drehung von $+60^{\circ} - 60^{\circ} - 10^{\circ} + 47^{\circ} = +37^{\circ}$. Richtet man aber den Versuch so ein, dass man den Elementenstrom geraume Zeit, den Accumulatorstrom kurze Zeit schliesst und Schluss des Accumulatorstromes im Augenblicke der Oeffnung des Elementenstromes vornimmt, dann kommt theoretisch eine Rechtsdrehung von $+60^{\circ} - 10^{\circ} + 47^{\circ} = +97^{\circ}$ zu stande. Und in der That lässt sich durch viermaliges Einwirken dieses Wechselstromes unter Beobachtung der beschriebenen Maassregel eine volle Umdrehung des Inductors erzielen. Durch diesen Wechselstrom lässt sich der Inductor also schon bequem in Rotation versetzen.

Versuch 14: Benutzen wir in Versuch 13 statt der Wicklung Nr. 1 die Wicklung Nr. 3, dann setzt sich der Versuch zusammen aus den Versuchen 8 und 4. Im günstigsten Falle beträgt hier die Rechtsdrehung $+5,5^{\circ} - 3,5^{\circ} + 65^{\circ} = +67^{\circ}$. Vergrössert man aber den inneren Widerstand des Elementes dadurch, dass das Zink nicht tief eintaucht, dann dreht sich der Inductor beim Schliessen des Stromes y um $+25^{\circ}$, und man bekommt daher die noch günstigere Wirkung von $+25^{\circ} - 3,5^{\circ} + 65^{\circ} = +86,5^{\circ}$. Thatsächlich kann man dann durch viermaliges Einwirken dieses Wechselstromes eine volle Umdrehung des Inductors erzielen.

Keht man die Richtung beider Ströme um, dann kommen Linksrotationen zu stande; diese Versuche würden sich dann zusammensetzen aus den Versuchen 1, und 7 bez. 3 und 9.

In den Versuchen 15—17 verwende ich den sogenannten Primärstrom eines Inductionsapparates. Legt man die Drahtwicklung Nr. 1 nämlich in Nebenschluss zu einer Drahtwick-

lung Nr. 4 (welche dadurch hergestellt ist, dass ein 11 m langer, 1 mm dicker Draht in 150 Windungen auf ein 7 cm langes, 15 mm dickes Eisendrahtbündel gewickelt ist, und welche einen $W = 0,25$ Ohm hat), dann fliesst beim Schliessen des Elementes der Strom zum grössten Teil durch Nr. 4, zum kleinsten Teil durch Nr. 1, und beim Oeffnen des Stromes entsteht nun der Extrastrom in Nr. 4, der, da die Verbindung mit dem Element aufgehoben ist, die Wicklung Nr. 1 durchströmt und zwar in einer dem Hauptstrom entgegengesetzten Richtung. Dieser Extrastrom hat aber eine höhere elektromotorische Kraft als das Element und entsteht ausserdem in dem günstigsten Augenblicke, nämlich dann, wenn der die Wicklung Nr. 1 durchlaufende Teilstrom des Hauptstromes verschwindet. Es liegt also auf der Hand, dass unter dem Einfluss dieses Wechselstromes Wirkungen zu stande kommen, wie wir sie in Versuch 13 sahen. Dieser Strom übt aber, da die elektromotorische Kraft des Extrastromes eine sehr grosse ist, auch auf die Nadel starke Einwirkungen aus, die denen ähnlich sind, die wir bei den Entladungen der Influenzmaschinen beobachten konnten. Die Verbindung wird so hergestellt, dass der Hauptstrom abwärts, der Extrastrom aufwärts durch Wicklung Nr. 1 geht.

Versuch 15: Die im erdmagnetischen Felde stehende Nadel wird nämlich beim Schliessen des gesamten Hauptstromes um $+90^\circ$ (rechts herum) gedreht (Versuch 6) und bleibt so lange abgelenkt stehen, als der Stromschluss dauert. Oeffnet man den Hauptstrom, dann wird die um $+90^\circ$ abgelenkte Nadel ummagnetisirt durch den Extrastrom und sie wird daher unter dem Einfluss der Erde weiter um $+90^\circ$ gedreht, sodass sie also $\frac{1}{2}$ Umdrehung gemacht hat. Der Extrastrom wirkt also ähnlich wie eine Reihe von Entladungen in Versuch 11. Schliesst man wiederholt, dann kommt die Nadel in continuirliche Rechtsrotation, während der sie nach jeder halben Umdrehung ummagnetisirt wird. Wie in Versuch 13, so gelingt auch hier der Versuch am besten, wenn die Stromöffnung in einem geeigneten Momente erfolgt. Damit soll aber nicht gesagt sein, dass irgend welcher Synchronismus zwischen Rotationsgeschwindigkeit und den Unterbrechungen vorhanden sein muss. Denn einmal kommt die Nadel von selbst in immer raschere Drehung unter dem Einfluss des Wechsel-

stromes, der durch mechanische Unterbrechungsrichtungen erzeugt wird, und zweitens nimmt die Rotationsgeschwindigkeit sofort beträchtlich zu, sobald das erdmagnetische Feld durch Annähern des Stabmagneten verstärkt wird.

Ungünstig für das Zustandekommen einer Drehbewegung der Nadel sind:

a) Aeusserst kurze Dauer des Stromschlusses, die zur Folge haben kann, dass die Nadel während des Stromschlusses wegen zu kurzer Zeit nicht abgelenkt wird, und welche die Entwicklung des Stromes in der Wicklung Nr. 4 bis zur vollen Stromstärke verhindert, sodass kein wirksamer Extrastrom entstehen kann; es kann dann die Nadel still stehen bleiben.

b) Eine Stromquelle mit sehr kleiner elektromotorischer Kraft; dann wird die Nadel auch bei längerer Andauer des Stromes weniger stark abgelenkt und zweitens kommt, da die Stromstärke des durch Nr. 4 fliessenden Stromes sehr klein ist, ein nur mässig gespannter Extrastrom zu stande, welcher die Nadel nicht umzumagnetisiren vermag. Wenn man mit der Hand schliesst und öffnet, dann wird die Nadel nur nach rechts abgelenkt (Schliessen) und kehrt in ihre Ruhelage (Öffnen) links herum zurück. Erfolgen die Unterbrechungen mechanisch, z. B. durch den Wagner'schen Hammer, dann wird die Nadel einfach nach rechts abgelenkt und bleibt in dieser abgelenkten Stellung still stehen.

c) Ein allzustarkes constantes Feld, welches verhindert, dass die Nadel überhaupt aus der Nord-Süd-Richtung abgelenkt werden kann.

d) Eine unzuweckmässige Drahtwicklung, z. B. Nr. 3, durch welche beim Schliessen des gesamten Hauptstromes der grössere Teil desselben hindurch gehen würde, da sie nur 0,133 Ohm hat, daher die Stromstärke in der Wicklung Nr. 4 sinkt, der Extrastrom eine kleinere elektromotorische Kraft bekommt und dieser dann, da er nur durch 35 Windungen geht, nicht genügend ausgenutzt wird. Die Nadel bleibt daher auch hier in abgelenkter Stellung still stehen. Bei Benutzung der Wicklung Nr. 2 ist die Wirkung eine mittelgute; die Nadel rotirt, aber langsamer als bei Benutzung von Drahtwicklung Nr. 1.

e) Allmähliches Ausschalten des Hauptstromes, welches die Entstehung eines wirksamen Extrastromes verhindert.

Günstig für das Zustandekommen von Drehbewegungen der Nadel sind dagegen:

a) eine geeignete Dauer des Stromschlusses, wie sie durch mechanische Unterbrechungsvorrichtungen, z. B. den Neef'schen Hammer, erreicht wird, welche den Strom immer in dem Augenblicke öffnen, in welchem der Strom in der Wicklung Nr. 4 die grösste Stromstärke erreicht;

b) eine geeignete Stromquelle, die den Eisenkern in der Wicklung Nr. 4 ad maximum magnetisirt;

c) ein geeignetes magnetisches Feld, dessen Stärke erst zunimmt mit Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der Nadel;

d) eine geeignete Wicklung, die in einem zweckmässigen Verhältnis zu der Wicklung Nr. 4 steht, damit ein zweckmässiger Wechselstrom zu stande kommt;

e) plötzliche Stromöffnung.

Aenderung der Stromrichtungen des Wechselstromes bewirkt stets die entgegengesetzten Bewegungen der Nadel.

Versuch 16 (vgl. Fig. 3): Der Inductor macht unter Einwirkung des Primärstromes im Felde des Stabmagneten folgende Bewegungen: Beim geraume Zeit

Fig. 3.¹⁾

Beim geraume Zeit dauernden Schliessen des Stromes eines Flaschenelementes dreht er sich um durchschnittlich $+20^\circ$ rechts herum und beim Oeffnen weiter rechts herum um durchschnittlich $+40^\circ$. Einmalige Einwirkung des Wechselstromes bewirkt also Drehung um $+60^\circ$, daher die 6 malige Einwirkung eine volle Umdrehung. Ist die Stromquelle sehr geschwächt, dann bleibt der Anker beim Stromschluss fast ganz still stehen und dreht sich erst bei Stromöffnung rechts herum (um $+15^\circ$); aber selbst dann bringen mittels Neef'schen Hammers erzeugte Wechselströme den Anker in

rasche Umdrehung (200 pro Minute). Im erdmagnetischen Felde rotirt der Anker ebenfalls, aber viel langsamer. Auch für

1) Durch die Pfeile ist die Richtung des beim Oeffnen entstehenden Extrastromes angedeutet.

die Drehbewegung des Ankers giebt es günstige und ungünstige Bedingungen, die sich annähernd mit den unter Versuch 15 aufgezählten decken. Und mit Umkehr der Richtung der Wechselströme wird auch die Drehrichtung des Inductors umgekehrt.

Versuch 17: Wenn man in Versuch 15 die Nadel, statt sie in das Innere der Drahtwicklung zu bringen, seitlich davon in der Höhe des Innenraumes hält, so rotirt sie ebenfalls rechts herum, aber langsamer; und hält man sie über oder unter die Drahtwicklung, dann rotirt sie in entgegengesetzter Richtung, also links herum, und langsamer als die gleichzeitig im Innern rechts rotirende Nadel. Dasselbe gilt vom Inductor.

In den Versuchen 18 und 19 kommt der Secundärstrom eines Inductionsapparates zur Verwendung; es ist die Secundärrolle eines Inductoriums so mit der Drahtwicklung Nr. 1 verbunden, dass in letzterer der beim Schliessen des Hauptstromes entstehende Inductionsstrom abwärts, der bei Stromöffnung entstehende Inductionsstrom nach aufwärts fliesst.

Versuch 18: Beim Schliessen des primären Stromes wird die Nadel im erdmagnetischen Felde um + wenige Grade nach rechts abgelenkt und kehrt, da die Stromdauer eine kurze ist, sofort um — ebensoviel Grade in die Ruhelage zurück. Dieser positive Ausschlag ist bekanntlich ein Beweis dafür, dass ein Strom in der Richtung von oben nach unten die Wicklung durchflossen hat. Beim Oeffnen des Primärstromes erfolgt in schwächerem Grade eine gerade entgegengesetzte Ablenkung der Nadel, woraus wir schliessen, dass ein Strom in der Richtung nach oben geflossen ist. Oeffnet man aber den Hauptstrom in dem Augenblicke, wo die Nadel unter Einwirkung des Schlussinductionsstromes nach rechts abgelenkt ist, dann kann die Nadel durch einen starken Oeffnungsinductionsstrom ummagnetisirt werden, und dann dreht sie sich unter Einfluss der Erde so weit weiter rechts herum, dass gerade $\frac{1}{2}$ Umdrehung vollendet wird. Folgen nun neue Inductionsströme, so wiederholt sich der Vorgang: Die Nadel kommt also in Rechtsrotation, deren Geschwindigkeit wieder durch Verstärken des erdmagnetischen Feldes sehr beträchtlich erhöht werden kann. Sind die Inductinsströme zu schwach oder das magnetische Feld gleich von Anfang an zu stark, dann bleibt die Nadel in ihrer Ausgangsstellung still stehen

oder wird, wenn die Drahtwicklung nicht genau in der NS-Richtung stand, nach der Seite, nach der sie bereits ein wenig abgelenkt ist, noch etwas stärker abgelenkt und bleibt somit in abgelenkter Stellung regellos nach rechts oder links stehen (doppelsinnige Ablenkung der Nadel). Erteilt man ihr aber dann einen Stoss nach rechts, dann sieht man sie oft genug die begonnene Bewegung dauernd fortsetzen. Umkehr der Stromrichtung des Hauptstromes bewirkt Linksrotation.

Versuch 19 (vgl. Fig. 4): Der Inductor wird unter Einfluss des Secundärstromes im Felde des Stabmagneten so beeinflusst, dass er beim Schliessen des

Fig. 4.1)

primären Stromes meist ganz still stehen bleibt (wie in Versuch 6 bei kurzer Stromdauer), dagegen bei Oeffnung des Hauptstromes eine Rechtsdrehung um $+10^{\circ}$ bis $+15^{\circ}$ macht; einmalige Einwirkung des Wechselstromes dreht also den Anker schon kräftig rechts herum, und bei häufigen Unterbrechungen des primären Stromes gelangt er in rasche Rechtsrotation. Der Anker rotirt auch im erdmagnetischen Felde, aber sehr langsam. Mit Umkehr der Richtung des primären Stromes wird auch die Drehrichtung geändert. Damit die Rotationen gut gelingen, müssen in den beiden letzten Versuchen natürlich die Wicklungen des Inductoriums und des Galvanoskopes zu einander passen. Will man also Versuchsrolle Nr. 3 mit Erfolg benutzen, dann muss die Secundärrolle des In-

ductoriums aus einem kurzen und dicken Drahte bestehen. Auch der sogenannte combinirte Primär-Secundärstrom der Inductionsapparate kann zur Bewegung der Nadel und des Inductors Verwendung finden.

Da in den bisherigen Versuchen, bei denen Wechselströme benutzt worden sind, der Inductor (eventuell auch die

1) Die Pfeile deuten die Richtung der beim Oeffnen entstehenden Ströme an.

Fig. 5.

Nadel, falls sie überhaupt rotirt) stets rechts herum sich dreht, wenn die elektromotorische Kraft des aufwärts fließenden Stromes grösser ist, als die des abwärts fließenden Stromes, so können wir umgekehrt aus der Drehrichtung des Ankers auch auf die Richtung, in welcher der höher gespannte Strom fließt, schliessen. Wenn wir also Wechselströme durch Transformatoren leiten, und Drehbewegungen bekommen, dann können wir daraus schliessen, dass der Stromimpuls in der einen Richtung stärker ist als in der anderen, und wir können aus der Drehrichtung feststellen, in welcher Richtung der stärkere Impuls erfolgt.

In den Versuchen 20 und 21 kommen Transformationsströme zur Verwendung.

Versuch 20 (vgl. Fig. 5): Verbindet man die Secundärrolle eines Inductoriums mit einer ähnlichen Wicklung eines Transformators und dessen innere Wicklung mit der passenden Galvanoskopwicklung, dann erhält man tertiäre Wechselströme. Unter deren Einfluss zeigte die Nadel, wenn der primäre Gleichstrom langsam geschlossen und geöffnet wird, keine merklichen Ablenkungen im erdmagnetischen Felde an. Der Inductor dagegen blieb zwar beim Stromschluss ebenfalls still stehen, drehte sich aber bei Stromöffnung deutlich nach einer bestimmten Richtung, die mit Aenderung der Richtung des primären Hauptstromes umgekehrt wird, um einige wenige Grade (3° bis 5°). Bei rascher Folge der Unterbrechungen des primären Stromes kam er in gleichmässige Rotation (bis zu 150 Umdrehungen pro Minute); durch Transformiren der Tertiärströme erzeugte ich ferner Quartärströme, durch die ich bis 60 Umdrehungen des Inductors pro Minute erzielte; auch hier machte der Anker nur eine Drehbewegung, sobald der primäre Strom geöffnet wird. Die Nadel kam unter dem Einfluss der tertiären und quartären Wechselströme nicht von selbst in Drehung, setzte aber eine ihr künstlich erteilte Rotation fort unter Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit. Die Skizzen der Fig. 5 dienen dazu, die Drehrichtung des Inductors und die daraus geschlossene Richtung des kräftigeren Stromimpulses zu veranschaulichen.

Versuch 21: Auch die Ströme, die beim Entladen von Leydener Flaschen entstehen, habe ich mit Erfolg transformiren können (vgl. die Skizze der Fig. 6, aus der weiteres hervorgeht).

Einige weitere Versuche mittels Wechselströmen will ich nur kurz andeuten: Einmal habe ich in der Verbindung zwischen der Secundärrolle und dem Galvanoskope eine Unterbrechung hergestellt, sodass eine oder mehrere Funkenstrecken entstehen, wodurch die Drehrichtung unverändert bleibt, die Rotationsgeschwindigkeit erhöht wird. Sodann habe ich die Enden der Secundärrolle des Inductoriums mit den inneren Belegungen zweier Franklin'schen Tafeln, die Enden des Galvanoskopes mit den äusseren Belegungen verbunden; dann sind die Wirkungen verschieden, je nachdem eine oder keine Funkenstrecke zwischen den beiden inneren oder den beiden äusseren Belegungen eingeschaltet ist. Aehnliche Versuche sind auch mit der Influenzmaschine gemacht worden. Endlich habe ich in der Verbindung

Fig. 6.

zwischen Secundärrolle des Inductoriums und Galvanoskop ein Element eingeschaltet, sodass ein Dauerstrom durch die Versuchswicklungen geht und ein constantes Feld erzeugt, das senkrecht zu dem constanten Felde des Stabmagneten wirkt: Fliesst der Oeffnungsinductionsstrom in derselben Richtung als der Dauerstrom, dann bleibt der Inductor still stehen; schaltet man um, sodass der Oeffnungsinductionsstrom dem Elementenstrom entgegengesetzt wirkt, dann kommt der Inductor in langsame Rotation.

Abschnitt IV. A. Lage der Nadel und des Inductors im Galvanoskope. Die günstigste Position ist diejenige, in der die Mittelpunkte der Nadel bez. des Inductors und des Innenraumes der Drahtwicklung zusammenfallen. Je mehr man diese voneinander entfernt, um so schwächer werden Nadel und Inductor von den Strömen beeinflusst. Bringt man Nadel oder Inductor in den ober- oder unterhalb der Wicklung gelegenen Raum, dann kehren sich die Drehrichtungen um. Die Wicklung kann auch aus zwei Hälften bestehen, die dann seitlich rechts und links vom Mittelpunkt des Inductors zu liegen

kommen. Sie können auch auf einen Elektromagneten aufgewickelt sein, dessen Pole senkrecht wirken zu den Polen des Stabmagneten.

B. Formen des Inductors: 1. Die kreisrunde Scheibe bez. ein massiver oder ein aus Scheiben aufgebauter Cylinder wird stets am günstigsten beeinflusst. 2. Eine Nadel aus weichem Eisen giebt die ungünstigste Form ab: zwar rotirt sie, wenn einmal in Drehung begriffen, sehr gut und sehr rasch weiter, sie kommt aber oft nicht von selbst in Rotation; aber sie kommt immerhin leichter in Rotation als die stählerne Magnetnadel. 3. Hat der Anker eine Kreuzform, dann kommt er schon besser als der nadelförmige Anker, aber auch nicht immer, von selbst in Rotation, rotirt aber sehr rasch weiter. 4. In der Form eines Doppelkreuzes kommt er gut von selbst in Rotation, rotirt aber langsamer als die massive Scheibe. 5. Spiralen aus weichem Draht (bez. aus Draht gewickelte Gramme'sche Ringe) rotiren gut, gehen auch von selbst an. 6. Sind im Anker radiäre und circuläre Unterbrechungen vorhanden, so rotirt er, aber sehr langsam.

C. Lage und Bildung des magnetischen Feldes: Die günstigste Lage ist die, in welcher die Richtung der Drahtwicklung zusammenfällt mit der Richtung der Kraftlinien des constanten magnetischen Feldes. Dreht man die Wicklung des Galvanoskopes aus der NS-Richtung heraus, dann werden die Bewegungen geschwächt, und sie werden $= 0$, wenn die Drähte $\perp$ zur NS-Richtung gestellt werden. Fällt der Mittelpunkt der Verbindung beider Pole zusammen mit dem Mittelpunkt des Ankers und des Innenraumes des Galvanoskopes, so bekommt man die besten Bewegungen. Der Magnet kann aber auch seitlich oder auf und unter der Wicklung liegen. Als magnetisches Feld habe ich benutzt:

a) das erdmagnetische Feld, wobei zu beachten ist, dass der Erdnordpol süd magnetisch wirkt;

b) das magnetische Feld eines permanenten Stabmagneten oder eines Hufeisenmagneten;

c) das magnetische Feld eines Elektromagneten, der mit Gleichstrom erregt wird;

d) das magnetische Feld eines Gleichstromes, der eine $\perp$ über die Wicklung des Galvanoskopes geschobene Drahtwicklung dauernd durchfließt;

e) das magnetische Feld eines Elektromagneten, der durch einen der beschriebenen Wechselströme erregt wird und dessen Polarität durch die Richtung des Oeffnungsinductionsstromes bedingt wird. Wenn man z. B. ein geeignetes Drahtbündel **Z**förmig biegt und so auf die Drahtwicklung legt, dass das Mittelstück oberhalb, die beiden Endstücke im Innern der Wicklung zu liegen kommen, dann bildet sich unter Einfluss des kräftig magnetisirenden aufwärts fließenden Oeffnungsinductionsstromes oben ein Nord-, unten ein Südpol, und der Anker läuft links herum; er würde aber auch bei Umkehr der Richtung des Inductionsstromes links herum laufen; würde das Eisenstück aber **Σ**förmig sein, dann würde er rechts herum rotiren.

D. Zahl der Wicklungen und der magnetischen Felder: Gewöhnlich habe ich eine Wicklung und ein magnetisches Feld benutzt. Wenn ich zwei Wicklungen benutzte, diese parallel stellte und den Strom in beiden in entgegengesetzten Richtungen hindurchschickte, musste ich, um Rotationen zu erhalten, auch zwei constante magnetische Felder in Anwendung bringen; und bei Benutzung von drei Wicklungen, die unter einem Winkel von 120° sich kreuzen oder ein Dreieck bilden, musste ich drei constante magnetische Felder benutzen. Die Zahl der constanten Felder muss also der Zahl der schwingenden Felder entsprechen.

II. Teil.

Theoretische Betrachtungen.

Lässt man die Stromschwankungen eines Gleichstromes, die Entladungen der Leydener Flasche oder die beim Schliessen und Oeffnen des Gleichstromes entstandenen Wechselströme durch den Draht eines in der Nord-Südrichtung eines magnetischen Feldes stehenden Galvanoskopes gehen, dann beobachtet man, dass ein kreisrunder Inductor aus weichem Eisen gewöhnlich leicht in Drehung kommt, während die Magnetnadel oft nur Ablenkungen macht, oft still stehen bleibt und zuweilen in Rotation kommt. Man überzeugt sich leicht, dass die Ursache dieser verschiedenartigen Wirkung der genannten Ströme auf die Nadel und den Inductor theils in der ver-

schiedenen Form, teils in dem verschiedenen Material beider liegt. Denn wenn wir sehen, dass der nadelförmige Inductor aus weichem Eisen schwer oder überhaupt nicht in Rotation kommt, der kreisrunde Inductor dagegen leicht, so liegt es auf der Hand, dass hierbei die Form von Einfluss ist. Wenn wir ferner sehen, dass ein nadelförmiger Inductor aus weichem Eisen eine begonnene Rotation leichter fortsetzt als die stählerne Nadel, die sogar zuweilen wieder, nachdem künstlich in Drehung versetzt, zum Stillstand kommt, so müssen wir annehmen, dass das verschiedene Material ungleich beeinflusst wird. Die stärkere Coercitivkraft und der grössere magnetische Widerstand des Stahles hemmen die Rotation. Erst wenn die magnetischen Kräfte des Stromes so beschaffen sind, dass die Coercitivkraft des Stahles mit Leichtigkeit überwunden, der Eigenmagnetismus der Nadel geändert wird, rotirt die Nadel trotz verschiedener Form und verschiedenem Material ebenso und oft viel rascher als der kreisrunde Inductor. In denjenigen Fällen, in denen die Nadel nur abgelenkt wird, ändert sich ihr Eigenmagnetismus nicht oder nicht wesentlich, wogegen in den Fällen, in denen sie rotirt, eine fortwährende Ummagnetisirung zu stande kommt. Die magnetische Axe behält also in den ersteren Fällen ihre Lage zu einer Marke auf der Nadel bei, in den letzteren Fällen verschiebt sich die magnetische Axe fortwährend zur Marke, und zwar entgegengesetzt der Rotationsbewegung der Nadel. Unter dem Einfluss des Stromes wird daher die Nadel bald in toto gedreht, bald werden nur die Molecüle gedreht. Dieselben Vorgänge spielen sich auch in dem Inductor aus weichem Eisen ab; nur werden in ihm die Molecüle viel leichter gedreht, und darum sehen wir auch viel häufiger Drehbewegungen zu stande kommen. An der Hand der Versuche lässt sich nun leicht feststellen, unter welchen Bedingungen eine Drehung des Eisens in toto unter Erhaltung der Lage der magnetischen Axe zu einer Marke und eine Drehung der Molecüle im Eisen, also eine Drehung der magnetischen Axe gegen eine Marke, zu stande kommt.

Nadel und Anker stehen in unseren Versuchen unter dem Einflusse zweier Kräfte, einmal wirkt auf sie dauernd das constante magnetische Feld der Erde oder des Stabmagneten — ich ziehe der Einfachheit halber nur das letztere in den

Kreis dieser Betrachtungen —, welches die Nadel in die Nord-Südrichtung zu zwingen sucht und auf den Anker so wirkt, dass auch er in der Nord-Südrichtung eine magnetische Axe aufweist. Zweitens wirkt auf Nadel und Anker vorübergehend das Stromfeld, und zwar in der West-Ostrichtung. Die magnetischen Kräfte, welche in einem bestimmten Raume wirken, z. B. in der horizontalen Mittelebene des Galvanoskopes, in der sich die Nadel oder der Inductor befinden, kann man sich auf verhältnismässig einfache Weise bildlich darstellen, um eine Vorstellung von der Richtung und Dichtigkeit der Magnetkraftlinien zu gewinnen. Zu Fig. 7 sind diese Kraftlinien, nicht in unbegrenzter Zahl, sondern nur in einem passenden Verhältnis gezeichnet: Die magnetische Axe des constanten Feldes verläuft also in der Zeichnung senkrecht, die des Stromfeldes horizontal, die des combinirten Magnetstromfeldes schräg oder vielmehr **S**-förmig. Diese **S**-Form ist natürlich verschieden stark ausgeprägt zu denken je nach dem Verhältnis der Stärke des Magnetfeldes zu der des Stromfeldes, und wenn der Strom in entgegengesetzter Richtung fliessen würde, so würde diese Linie das Spiegelbild eines **S** darstellen.

Wenn der Strom geschlossen wird, dann dreht sich die magnetische Axe des constanten magnetischen Feldes, die in der Ausgangsstellung durch die gerade Linie $N_1 S_1$ gekennzeichnet ist, links herum und bekommt einen **S**-förmigen Verlauf; und gleichzeitig nimmt die Zahl der Kraftlinien beträchtlich zu. Der umgekehrte Vorgang findet bei der Stromöffnung statt. Die Magnetnadel, welche gewöhnlich in der Richtung ihrer grossen Axe magnetisch ist, stellt sich in einem magnetischen Felde immer so ein, dass ihre magnetische Axe mit der Axe dieses Feldes möglichst zusammenfällt: um also im Gleichgewicht zu sein, folgt sie in den Versuchen 1—5 den Bewegungen des magnetischen Feldes durch die bekannte Ablenkung nach links beim Schliessen des Stromes und rechtsseitige Rückkehr in die Ruhelage bei Stromöffnung. Da der Eigenmagnetismus der Nadel hierbei nicht wesentlich geändert wird, so zeigt uns die Ablenkung der Nadel gewissermaassen den Verlauf der magnetischen Axe des auf sie wirkenden Feldes an, und wir bekommen aus dem Grade der Ablenkung einen Ueberblick über das Verhältnis der Stärke des Strom-

feldes zu der des constanten Feldes; aus der Zahl der Schwingungen und Oscillationen, die die Nadel jedesmal macht, ehe sie zum Stillstand kommt, können wir ferner einen Schluss auf die jedesmalige Stärke des auf sie wirkenden Feldes machen.

Fig. 7.

Der Inductor aus weichem Eisen wird nun in diesen Fällen anders beeinflusst als die Nadel. Ist er frisch ausgeglüht, so zeigt er zunächst keinen Eigenmagnetismus; in das Feld des Stabmagneten gebracht erhält er bei N_1 und S_1

Pole, die er aber, aus dem Felde wieder herausgenommen, in nur sehr schwachem Grade beibehält. Hat er aber einmal in einem Versuche unter Einfluss eines kräftigen Stromfeldes gestanden, dann zeigt er an zwei gegenüberliegenden Stellen etwas stärkere Polarität und zwischen denselben eine magnetische Axe, die er in dem erdmagnetischen Felde dauernd behalten würde. Seitlich von dieser Axe lagern sich die Molecüle in gekrümmten Bahnen, die zum Teil geschlossene Kreise darstellen. Ein solcher Inductor stellt sich daher, wenn er in das Feld des Stabmagneten gebracht wird, infolge des Vorhandenseins von remanentem Magnetismus in ganz bestimmter Stellung ein, und verhält sich insofern wie die Magnetnadel mit ihrem stark ausgeprägten Eigenmagnetismus. Da er, auch wenn man ihn immer wieder künstlich aus dieser Stellung herausdreht, in dieselbe zurückkehrt, so ist anzunehmen, dass er seine magnetische Axe in dem Felde des Stabmagneten im grossen und ganzen beibehält, und nur die seitlich gelegenen Molecüle mehr oder weniger verschoben werden: eine Verschiebung der magnetischen Axe gegen eine Marke am Anker findet dabei fast gar nicht statt. Sie findet daher auch nicht statt (oder doch nur partiell, und diese partielle Verschiebung können wir unberücksichtigt lassen), wenn der Inductor, dessen magnetische Axe während des Stromschlusses schräg zwischen der horizontalen und verticalen Linie $N_1 S_1$ und $N_2 S_2$ in der Richtung $N_3 S_3$ verläuft, nach Stromöffnung sich rechts dreht wie die Nadel und sich so stellt, dass seine Axe in der Richtung $N_1 S_1$ verläuft. Anders liegen die Verhältnisse beim Schliessen des Stromes. Während die Nadel mit jedem folgenden Versuche immer stärker abgelenkt wird, da das Stromfeld der Reihe nach an Stärke zunimmt, sehen wir, dass der Inductor der Reihe nach immer schwächer gedreht wird. In Versuch 1 dreht er sich nach Schliessen des Stromes und bei längerer Andauer desselben um annähernd ebensoviel (60) Grade links herum als die Nadel, und bei Stromöffnung kehrt er um annähernd ebensoviel Grade nach rechts zurück, ein wesentliches Verrücken der magnetischen Axe innerhalb des Inductors (gegen eine Marke) kann daher nicht stattgefunden haben. In den folgenden Versuchen ist der Drehungswinkel bei Stromöffnung grösser als der Drehungswinkel beim Stromschliessen:

hier muss also eine Verschiebung der magnetischen Axe des Inductors gegen die Marke stattgefunden haben; diese Verschiebung ist um so grösser, je stärker das Stromfeld wird, das auf den Inductor einwirkt. Gleichzeitig dreht sich aber auch die Marke selbst links herum, und zwar um so mehr, je weniger Ampèrewindungen wirksam werden.

Es könnte nun auffallen, dass in den Versuchen 2—5 der Inductor nicht um ebensoviel Grade rechts gedreht wird beim Oeffnen des Stromes wie die Nadel, und in den Versuchen 2, 3 und 5 der Drehungswinkel bei Stromöffnung kleiner ist als in Versuch 1. Wir haben bisher nicht berücksichtigt, dass durch das Eisen des Inductors der Verlauf der Kraftlinien der Felder geändert wird, indem das Eisen die Kraftlinien concentrirt. Sobald das Stromfeld so stark ist, dass es die Molecüle des Eisens in beträchtlichem Grade richtet, dann wird das Eisen gewissermaassen selbst zu einem Magneten, und der Verlauf der Kraftlinien sowie ihre Dichtigkeit wird nun bestimmt durch das Magnetfeld, das Stromfeld und das Feld des Elektromagneten. Da die Kraftlinien des Magnetstromfeldes am dichtesten in den Zonen zwischen N_1 und N_3 bez. S_1 und S_3 verlaufen, so bekommt der Inductor seine stärkste Polarität nicht bei N_3 und S_3 , sondern zwischen N_1 und N_3 bez. S_1 und S_3 , also etwa bei N_4 und S_4 und die gemeine Axe aller drei Felder würde dann etwa die Linie sein, die von S durch N_4MS_4 nach N geht. Der Winkel, den also diese magnetische Axe gegen die Verticale SN bildet, würde also im Versuch 2 gleich 47° , in Versuch 3 gleich 52° etc. sein. Die Lage der Molecüle zu einer Marke hier näher festzustellen, würde zu weit führen und auch nicht gut ohne zahlreiche Abbildungen möglich sein.

Schliesst man in Versuch 1 den Strom nur sehr kurze Zeit, dann bleibt der Inductor oft ganz still stehen. Infolge seiner Trägheit kann er den raschen Bewegungen der Kraftlinien beim Schliessen und Oeffnen nicht folgen. In den anderen Versuchen findet dagegen eine immer stärkere Einwirkung auf die Molecüle statt; diese werden in sehr kurzer Zeit gerichtet und gedreht. Bei kurzer Dauer des Stromschlusses kommt daher gleich eine Rechtsdrehung des Inductors zu stande, indem die anfängliche Bewegung in der entgegengesetzten

Richtung, die nur während längerer Dauer des Stromschlusses zu stande kommen würde, wegen der kurzen Zeit des Stromschlusses nicht zu Ende geführt wird. Verzögern wir dagegen z. B. in Versuch 3 die gewöhnliche rasche Drehung und Dichtigkeitszunahme der Kraftlinien des Feldes, in welchem der Inductor sich befindet, dadurch, dass wir vor Beginn des Versuches einen grossen Widerstand in den Stromkreis eingeschaltet haben und diesen dann allmählich ausschalten, dann kommt die Richtung und Drehung der Molecüle im Eisen so langsam zu stande, dass der Inductor in toto dieser Bewegung folgen kann. Er dreht sich dann, während die Stromstärke allmählich zunimmt, links herum um etwa 75° (also annähernd so weit wie die kleinere Nadel); es behält dann seine magnetische Axe annähernd ihre Lage zur Marke bei, und bei Stromöffnung dreht er sich wieder um ebensoviel Grade zurück. Wenn also im Inductor eine Verschiebung seiner magnetischen Axe gegen eine Marke zu stande kommen soll, muss das Stromfeld nicht nur genügend stark werden, sondern es muss dieses auch innerhalb einer bestimmten Zeit geschehen: die Drehung der magnetischen Axe des Feldes muss mit einer gewissen Geschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit) vor sich gehen. Wie gross dieselbe sein muss, lässt sich leicht feststellen, indem wir das Stromfeld ersetzen durch das Feld eines permanenten Hufeisenmagneten, dessen Pole in der West-Ostrichtung wirken, und der nun, während er in der Richtung des Stabmagneten hin und her pendelt, den Inductor immer vorübergehend beeinflusst. Bewegt er sich sehr langsam am Inductor vorbei, dann dreht sich dieser bei der Annäherung des Hufeisenmagneten links herum und bei der Entfernung des Magneten gleich stark rechts herum; bei immer rascherer Bewegung wird die Linksdrehung dagegen immer kleiner, während die Grösse der Rechtsdrehung dieselbe bleibt, und der Inductor kommt schliesslich, wenn der Magnet immer wieder vorbeipendelt, in Rechtsrotation.

Hinsichtlich der Versuche 6—10 ist nichts Neues zu erwähnen; sie sind nur die Spiegelbilder der ersten fünf Versuche.

In Versuch 12 sehen wir, dass der Inductor nach Einwirkung einer Entladung der Leydener Flasche sofort eine kräftige und ziemlich rasche Rechtsdrehung macht um wenige

bis fast 90° , je nach der Stärke der Entladung. Wir müssen daher annehmen, dass sich die magnetische Axe des Inductors unter dem Einfluss der Entladung links herum gedreht hat und dass auch die seitlich davon gelegenen Molecüle in grosser Zahl parallel zu dieser Axe gerichtet sind; denn der Inductor muss ziemlich kräftig magnetisch geworden sein, damit er sich rasch rechts herum dreht. Eine anfängliche Linksdrehung ist hierbei nicht zu beobachten und ist auch bei der äusserst kurzen Dauer des Stromes nicht zu erwarten. Die molecularrichtende und moleculardrehende Kraft ist hier nun so gross, dass selbst die Coercitivkraft der Magnetnadel überwunden werden kann. Aus diesem Grunde sowohl wie auch infolge der kurzen Dauer des Stromes reagirt die Nadel in dem Versuch 11 nicht mehr durch eine linksseitige Ablenkung, sondern sie hat, wie der Inductor, gleich von vornherein die Tendenz sich rechts zu drehen, da ihr Eigenmagnetismus sich geändert hat. Sie wird jetzt mehr in der Richtung ihrer kleinen Axe magnetisch. In dieser Richtung nimmt sie starken Magnetismus ungleich schwerer an als in der Richtung der grossen Axe, daher gehören mehrere und kräftigere Entladungen dazu, um sie in dieser Richtung so kräftig zu magnetisiren, dass sie sich in dem Felde der Erde oder des Stabmagneten richtig einstellen würde. Sie kommt daher anfänglich sehr schwer in Rechtsdrehung. Ist sie aber erst einmal ein wenig aus ihrer Anfangsstellung herausgedreht und wirken dann weitere Entladungen ein, dann drehen sich die Molecüle weiter links herum, und die Nadel bekommt dann wieder in der Längsrichtung Magnetismus und dreht sich nunmehr rascher weiter. Wollen wir die bekannte Ablenkung der Nadel nach links erhalten, dann müssen wir verhindern, dass ihre Molecüle gedreht werden, und für längere Stromdauer sorgen, was wir z. B. durch Einschalten einer nassen Schnur erreichen können. Wenn die Nadel und der Anker unter Einfluss der Entladungen rechts herum rotirt, dann drehen sich dabei fortwährend die Molecüle in entgegengesetzter Richtung gerade so, wie dies beim Anker in den Versuchen 2, 3, 4 und 5 der Fall war. Der Inductor verhält sich in dieser Hinsicht wie der Anker eines Gleichstrommotors, dessen Molecüle sich entgegen der Drehrichtung des Ankers herumdrehen.

Bisher hatten wir den Anker bald unter Einfluss des constanten Feldes des permanenten Magneten mit der Axe $N_1 S_1$, bald unter Einfluss des combinirten Magnetstromfeldes mit der **S**-förmig gekrümmten Axe gesehen und gefunden, dass diesen Bewegungen der Axe bald der Inductor im ganzen, bald nur seine Molecüle folgen. Lassen wir nun durch den Draht des Galvanoskopes einen Wechselstrom gehen, dann würden die Axen der hierbei in Betracht kommenden Felder bald **S**-förmig, bald vertical, bald umgekehrt **S**-förmig verlaufen. Hat dieser Wechselstrom in der einen Richtung eine höhere elektromotorische Kraft als in der anderen, dann werden sich die Erscheinungen des Versuches 1 (bez. 6) mit denen der folgenden Versuche combiniren. In Versuch 13 kommt beim Schliessen des Elementenstromes zunächst das verhältnismässig schwache Magnetstromfeld zu stande, welches das Spiegelbild des Feldes in Versuch 1 darstellt, und dessen Axe etwa von S über N_5 , MS_5 nach N (diese Linie ist in Fig. 7 nicht ausgezeichnet worden) verlaufen würde. In diesem Felde dreht sich nun der Inductor einfach rechts herum; die Lage seiner magnetischen Axe zur Marke bleibt annähernd erhalten. Beim Oeffnen des Elementenstromes würde er sich um ebensoviele Grade wieder links herum drehen. Wird aber der Accumulatorstrom geschlossen gleich nach Ausschalten des Elementenstromes, dann kommt das verhältnismässig starke Magnetstromfeld des Versuches 2 mit der **S**-förmigen Axe zu stande, welches ja den Inductor in toto nur sehr wenig links herum dreht, dagegen aber die Molecüle im Innern des Eisens sehr stark beeinflusst, die magnetische Axe im Eisen also sehr stark gegen die Marke verschiebt. Dass auch hier eine geringe Tendenz des Inductors zur Linksdrehung vorhanden ist, habe ich in dem Versuche erwähnt. Aber diese Linksdrehung fällt aus, wenn die Dauer des Schliessens des Accumulatorstromes eine kurze ist. Wir sehen daher, wenn die Oeffnung des Accumulatorstromes dem Schliessen desselben rasch folgt, wiederum nur eine Rechtsdrehung des Inductors zu stande kommen.

Einen Wechselstrom von dieser Beschaffenheit bekommen wir aber sehr leicht auch aus einem Element, wenn wir nämlich im Nebenschluss zu der Wicklung des Galvanoskopes eine

Spirale mit Eisenkern legen. Bei Benutzung des sogenannten Primärstromes einer Spirale fallen eben Oeffnung des schwachen abwärts fließenden Stromes, Entstehen und Verschwinden des aufwärts fließenden starken Extrastromes zeitlich sehr nahe zusammen. Die Verhältnisse liegen bei diesem Wechselstrom so günstig, dass sogar die Nadel trotz grosser Coercitivkraft leicht in Rotation kommt.

Den Curven des Primärstromes ähnlich sind aber auch die Curven der Secundärströme. Hier ist nur der zeitliche Verlauf des Inductionsschliessungsstromes ein kürzerer, der Effect derselben ist daher meist gleich Null; dagegen werden durch den Oeffnungsinductionsstrom die Molecüle des Eisens sehr stark beeinflusst. Derselbe wirkt dann ähnlich wie der Entladungsstrom der Leydener Flasche. Infolge der kürzeren Dauer des Schliessungsstromes wird die Magnetnadel oft gar nicht oder nur sehr gering nach rechts abgelenkt, und es erfolgt daher beim Oeffnen des Stromes die Ummagnetisirung der Nadel zunächst in der Richtung ihrer kleinen Axe. Wie ich schon bei Betrachtung der Entladungen der Leydener Flasche ausführte, hat die Nadel dann wenig Neigung, sich richtig in dem Felde des Stabmagneten einzustellen. Sie kommt daher durch den Secundärstrom von selbst schwerer in Rotation als unter Einfluss des Primärstromes, der die Nadel bei Stromschluss schon hinreichend stark ablenkt, so dass ihre Ummagnetisirung bei Stromöffnung in der Richtung ihrer grossen Axe erfolgen kann. Ist sie aber einmal in Bewegung, so rotirt sie unter Einfluss des Secundärstromes sehr gut weiter. Benutzen wir endlich tertiäre oder quartäre oder noch weiter transformirte Ströme, so sehen wir ebenfalls Rotationen zu stande kommen. Die jedesmalige Drehrichtung des Anker erlaubt es dann gleichzeitig, einen Schluss hinsichtlich der Richtung des stärkeren Stromimpulses zu machen.

Halle, im December 1900.

(Eingegangen 6. December 1900.)