

12. *Ueber ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme; von Ferdinand Braun.*

1. Die im Folgenden beschriebene Methode benutzt die Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen durch magnetische Kräfte. Diese Strahlen wurden in Röhren erzeugt, von deren einer ich die Maasse angebe, da mir diese die im allgemeinen günstigsten zu sein scheinen (Fig. 1). *K* ist die Kathode aus Aluminiumblech, *A* Anode, *C* ein Aluminiumdiaphragma; Oeffnung des Loches = 2 mm. *D* ein mit phosphorescirender Farbe überzogener Glimmerschirm. Die Glaswand *E* muss möglichst gleichmässig und ohne Knoten, der phosphorescirende Schirm

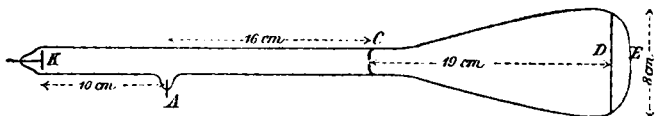


Fig. 1.

so angebracht sein, dass man durch das Glas und den Glimmer hindurch den von den Kathodenstrahlen hervorgebrachten Fluoreszenzfleck sehen kann. — Für manche Versuche ist es zweckmässig, den Glimmerschirm unter 45° gegen die Rohraxe zu stellen. — Es empfiehlt sich, um das Rohr in der Nähe des Diaphragmas Stanniol zu wickeln, welches zur Erde geleitet ist (besser noch würde voraussichtlich directe Ableitung des Diaphragmas wirken)¹⁾.

Die Röhren hatte Hr. Franz Müller (Dr. Geissler's Nachfolger) in Bonn die Freundlichkeit in bekannter vorzüglicher Weise herzustellen und können solche von ihm bezogen werden.

Die Kathodenstrahlen wurden erzeugt meist mit einer 20plattigen Töpler'schen Influenzmaschine; für viele Versuche genügt auch ein rasch spielender Inductionsapparat. Eine in den Kreis geschaltete variable Funkenstrecke gestattet die je günstigste Entladungsart aufzusuchen.

1) Hat sich nicht bewährt.

Schiebt man an das Rohr in der Nähe des Diaphragmas eine kleine Magnetisirungsspule, welche *Indicatorsspule* genannt werden soll, ihre Axe etwa senkrecht zur Rohraxe gestellt, und lässt dieselbe von Strom durchfliessen, so wird der Lichtfleck wie bekannt abgelenkt. Ein Wechselstrom versetzt ihn in Schwingungen.

Man wird bei diesem Verfahren sicher frei von Eigenschwingungen des anzeigenden Apparates und voraussichtlich auch von Trägheit. Wenigstens ist, bis zum Beweis des Gegentheiles — welches nachzuweisen sehr interessant wäre — anzunehmen, dass letztere sich höchstens in Zeiträumen geltend machen könne, die sich bemessen aus Lichtgeschwindigkeit und linearen Dimensionen des Rohres. Ein sehr grosser Vorthail ist ausserdem die gleichmässige Beweglichkeit des Kathodenstrahles nach allen Richtungen einer Ebene. Ein Nachtheil liegt in der Intermittenz der Kathodenstrahlen. Dieser letztere haftet den von Fröhlich ¹⁾ (Telephonmembranen) und Puluj ²⁾ (elastische Stäbe) angegebenen Methoden nicht an; aber das Vertrauen, welches man ohne weitere Discussion von Fehlerquellen zu den Angaben des hier vorgeschlagenen Verfahrens haben kann, ist für manche wissenschaftliche Zwecke doch von grossem Vorthail.

Ich beschreibe einige Versuche.

Schwingungsform von Strömen.

Die Curven sind nach dem Aussehen im rotirenden König'schen Spiegel gezeichnet.



Fig. 2a gibt die Schwingungsform des Wechselstromes der Strassburger Centrale (50 ganze Schwingungen pro Secunde). Der Strom wurde nach Abschwächung auf ein halbes Ampère (mittels vorgeschalteter Glühlampe) durch eine Spirale von 50 mm Länge, 22 mm äusserem, 10 mm innerem Durchmesser

1) Fröhlich, *Electrotechn. Zeitschr.* 8. p. 210. 1887; 10. p. 65. 1889.
2) Puluj, *Electrotechn. Zeitschr.* 14. p. 686. 1893.

mit eingeschobenem Eisenkern geleitet. Die Spule liegt horizontal; ihre Axe, senkrecht zur Rohraxe, schneidet das Diaphragma. Amplitude der Curven 2—4 cm; nach Belieben auch darüber.

Die Curve ist überraschend sinusartig; Fig. 2 *b* gibt die von einer Stimmgabel geschriebene, entsprechend vergrösserte, Curve. Sie ist als punktirte noch in 2 *a* fortgesetzt.

Fig. 3 und 4 beziehen sich auf einen ebenso gestellten kleinen Inductionsapparat mit Platinunterbrecher (Länge der Spule 75 mm).

Fig. 3 *a* gibt die Schwingungsform des primären Kreises (secundärer Kreis offen). Der aufsteigende Ast $\alpha\beta$ wird so

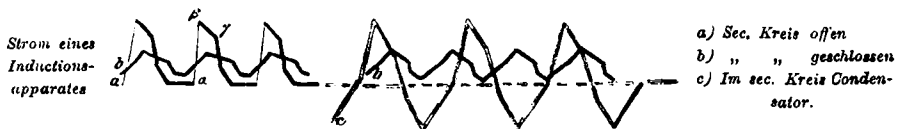


Fig. 3.

rasch zurückgelegt, dass er wegen zu geringer Lichtstärke schwer erkennbar ist. $\beta\gamma$ ist offenbar der Theil des Oeffnungsstromes, während dessen der Oeffnungsfunken noch Contact



Fig. 4.

gibt. Die horizontale, hellste Strecke entspricht der Stromlosigkeit.

Fig. 3 *b* zeigt die Schwingungsform, wenn der secundäre Kreis metallisch geschlossen ist, der dann gleichzeitig auf den Kathodenstrahl wirkt. Die Amplitude wird etwa $2\frac{1}{2}$ mal kleiner, die Schwingungsform sinusartiger.

Fig. 3 *c* erläutert die electricischen Vorgänge, wenn der secundäre Kreis durch einen Paraffinpapiercondensator (wie er in grösseren Inductionsapparaten sich befindet) geschlossen ist. Seine Capacität habe ich nicht bestimmt. Ein Urtheil über dieselbe ergibt sich daraus, dass beim Laden mit dem

(120 voltigen) Wechselstrom der Centrale eine eingeschaltete Glühlampe auf dunkle Rothgluth sich erhitzt.

Die Figuren zeigen die relative Lagerung der Curven. Es ergibt sich aus ihr: Bei ungeschlossenem secundärem Kreise wird der Eisenkern des Inductionsapparates nach jeder Unterbrechung wieder unmagnetisch; metallische Schliessung des secundären Kreises bewirkt, dass der Kern dauernd magnetisch bleibt; Einschalten des Condensators, dass derselbe durch den Entladungsstrom des letzteren ummagnetisirt wird.

3. *Lissajous'sche Curven*. — Der Wechselstrom geht durch eine vertical über das Diaphragma gestellte Spule; unterhalb der Röhre wird ein kleiner Magnetstab (100 mm lang, 14 mm breit, 6 mm dick) in einer Horizontalebene in Rotation versetzt. Mit wachsender Rotationsgeschwindigkeit beschreibt der leuchtende Punkt die verschiedensten Lissajous'schen Curven; doch sind nur einige derselben hinreichend ruhig, um befriedigend zu erscheinen (z. B. 2:1). Auf unisono konnte ich

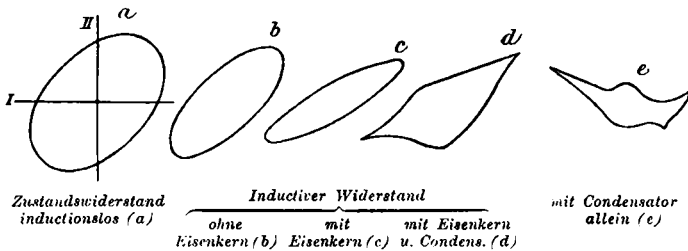


Fig. 5.

die Rotationsgeschwindigkeit des Magneten mit meiner Vorrichtung nicht bringen.

4. Erläuterung von *Phasenverschiebung* des Stromes gegen die electromotorische Kraft infolge von *Induction* und *Condensatorwirkung*.

Der Wechselstrom der Centrale durchläuft 1—6 parallel geschaltete Glühlampen, um seine Stärke zwischen 0,5 und 3 Amp. variiren zu können. Er fließt ferner durch eine Indicatorspule, welche den Kathodenstrahl horizontal schwingen lässt (Richtung I der Fig. 5) und endlich durch den primären Kreis des erwähnten kleinen Ruhmkorff, dessen Unterbrecher

festgestellt ist. Der secundäre Kreis des Apparates versorgt eine feindrätige Spule (70 mm lang, 30 mm Durchmesser) mit eingelegtem Eisendrahtbündel, die als zweite Indicatorspule dient und den Lichtzeiger in verticaler Richtung oscilliren lässt (vgl. die ähnliche Anordnung Fig. 6 *d*); er geht dann zu einem Umschalter, welcher gestattet entweder die Spule eines Helmholtz'schen Schlittenapparates oder einen gleich grossen inductionsfreien Widerstand einzuschalten. (Die Versuchsbedingungen würden besser so gewählt sein, dass als Indicatorspulen zwei gleiche und von zwei gleichen secundären Spulen gleichphasig gespeiste Rollen benutzt würden.)

Fig. 5 *a* zeigt die Phasenverschiebung des secundären Kreises gegen den primären Wechselstrom. Eingeschaltet ist ausser den unumgänglichen zwei Spulen ein inductionsfreier Widerstand von 353 Ω .

Fig. 5 *b* giebt die Phasenänderung, wenn der inductionslose Widerstand durch einen inductiven von gleichem Ohm'schen Widerstand ersetzt ist. Die Constanten desselben waren:

$$\begin{aligned} \text{Ohm'scher Widerstand} &= 353 \Omega, \\ \text{Selbstinductionscoefficient} &= 0,83 \cdot 10^9 \text{ cm}, \\ \text{Schwingungszahl des Stromes} &= 50 \text{ sec}^{-1}, \\ \text{daher die Inductanz} &= 258 \Omega \\ \text{und der scheinbare Wider-} & \\ \text{stand (Impedanz)} &= 437 \Omega. \end{aligned}$$

Wird in den inductiven Widerstand ein Eisendrahtbündel eingeschoben, so entsteht die Curve 5 *c*; Fig. 5 *d*, wenn nun noch dem inductiven Widerstand der früher erwähnte Condensator parallel geschaltet wird; Fig. 5 *e*, wenn die Spule entfernt ist und nur der Condensator sich im Kreis befindet. Sie zeigt ausser der Phasenverschiebung die Ueberlagerung einer etwa dreimal schnelleren Condensatorschwingung.

5. *Phasenverschiebung durch Polarisation.*¹⁾ Der auf 0,5 Amp. reducirte Wechselstrom gabelt sich in zwei gleiche

1) Vgl. F. Kohlrausch, Pogg. Ann. Jubelband p. 290. 1874; Oberbeck, Wied. Ann. 19. p. 213. 1883, 21. p. 139. 1884; Winkelmann, Wied. Ann. 20. p. 91. 1883.

Indicatorspulen der sub 1 angegebenen Maasse. Sie sind senkrecht gegeneinander gestellt.

Man schiebt die Spulen nach Einschalten von gleichen Ballastwiderständen in beiden Zweige so, dass die Lissajous'sche Figur in eine gerade Linie unter 45° Neigung gegen den Horizont übergeht.

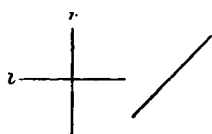
Fig. 6 giebt einige Resultate; l bez. r in Fig. 6 a geben die Bewegung des Punktes durch die im linken, bez. rechten Zweig gelegene Spule (Fig. 6 d); im linken Zweig kann durch eine Wippe entweder ein unpolarisirbarer $ZnSO_4$ -Widerstand oder der gleich grosse eines SH_2O_4 -Voltameters mit blanken Platinplatten eingeschaltet werden.

Fig. 6 b zeigt: rechts 2Ω ; links $ZnSO_4$ von 2Ω .

Fig. 6 c: rechts 2Ω , links das Voltameter. Die Ellipse

Phasendifferenz durch Polarisation.

Fig. 6 a. Fig. 6 b. Fig. 6 c.



in r 2Ω Metall
 „ l 2Ω $ZnSO_4$



in 2Ω Metall
 „ 2Ω H_2SO_4

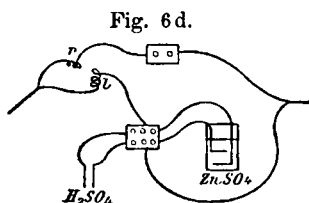


Fig. 6 d.

zieht sich beim theilweisen Herausheben der Electroden unter Aenderung der Axenlage stärker elliptisch aus.

Wird das Voltameter durch ein Kohlrausch'sches Widerstandsgefäss mit platinirten Platinelectroden und verdünnter SH_2O_4 gefüllt ersetzt, so geht die Curve wieder in eine gerade Linie über, genau wie beim $ZnSO_4$.

6. Endlich will ich von Versuchen über die *Fortpflanzungsgeschwindigkeit magnetischer Erregung* durch Eisen hindurch einen beschreiben.

Ein Eisenstab von 1,2 m Länge und 9 mm Durchmesser liegt horizontal und senkrecht zur Rohrxaxe, sein eines Ende dem Diaphragma möglichst nahe. Auf dem Stab lässt sich eine kleine Magnetisirungsspule verschieben; eine zweite ebensolche ist einer Verticalebene! gleichfalls senkrecht zum Rohr angeordnet, so dass unter der gleichzeitigen Einwirkung eines

Wechselstroms in beiden Spulen der Lichtfleck eine Curve beschreibt, welche wesentlich durch die dem Diaphragma am nächsten befindlichen Pole bedingt ist. Beide Spulen werden vom gleichen Wechselstrom durchlaufen.

Verschiebt man auf dem langen Stabe die Spule, so ändert sich Gestalt und Orientirung der Schwingungsellipse, und wenn die Spulenmitte etwa 42 cm vom Ende des Stabes entfernt ist, zeigt sie eine Phasendifferenz von $\pi/2$ an (unabhängig von der Stärke des Stromes); aus der Schwingungszahl (50) des Wechselstroms ergiebt sich damit eine „Fortpflanzungsgeschwindigkeit“ der magnetischen Erregung von 86 (m/sec), ein Werth, welcher mit dem von Oberbeck¹⁾ unter ähnlichen Versuchsbedingungen gefundenen (88,7 m für einen 8,7 mm dicken Eisenstab und die Schwingungszahl 133) gut übereinstimmt.

Es handelt sich bei diesem Vorgang, wie bekannt, um complicirte Erscheinungen²⁾; in der That zeigten mir Versuche, dass ein eingehenderes Studium erforderlich sein wird, um die Einzelheiten der Beobachtungen zu deuten.

Die magnetische Kraft, welche vom freien Ende des langen Stabes ausgeht, nimmt mit zunehmender Entfernung der Spule ausserordentlich stark ab und zwar viel stärker für Wechselstrom als für constanten Strom.

Dies mag durch die folgenden Zahlen erläutert werden:

	Ablenkung durch constanten Strom	Halbe Ablenkung durch Wechselstrom
Spule am Ende des Stabes ³⁾	32 mm	31 mm
„ verschoben um 10 cm	26 „	23 „
„ „ „ 20 „	16 „	6 „
„ „ „ 30 „	9 „	4 „
„ „ „ 40 „	6 „	1 „

7. Eine Trägheit des Kathodenstrahles ist mir nicht aufgefallen. Jedenfalls folgt er den Schwingungen der Ent-

1) Oberbeck, Wied. Ann. 22. p. 81. 1884.

2) Vgl. Oberbeck, l. c. u. Wied. Ann. 21. p. 672. 1884.

3) Ihr nächstes Ende ist 6 cm vom Diaphragma entfernt.

ladung einer einzigen Leydener Flasche. Auch wenn sie sich ohne Funkenstrecke durch die secundäre Spule eines ganz kleinen (als Indicatorspule benutzten) Inductionsapparates entlud, wurde der Lichtfleck bald nach oben, bald nach unten um 1 bis 1,5 cm aus der Ruhelage herausgeworfen. Die Methode verlangt, wenigstens bei der bis jetzt benutzten rohen Beobachtungsform ziemlich starke Kräfte, doch darf ihr Zeitintegral warscheinlich recht klein sein.

Strassburg, i. Els., Physikal. Institut.
