

10. *Ein absolutes Induktionsdynamometer¹⁾; von A. Semiller.*

1. Glühlampenamperemeter.

Hr. Orlich hat die Vergleichung von Wechselstrom mit Gleichstrom auf photometrischem Wege vorgeschlagen. Die Methode läßt sich so gestalten, daß sie bis zu den höchsten Frequenzen einwandfrei ist.

Eine kleine 2 Volt-Osmiumlampe L (Fig. 1) ist ihrer Messingteile beraubt und in einen Hochfrequenzstromkreis eingeschaltet. Sie beleuchtet den Gipsschirm G_1 eines Martensschen Beleuchtungsmessers. Die Flächenhelle von G_1 wird

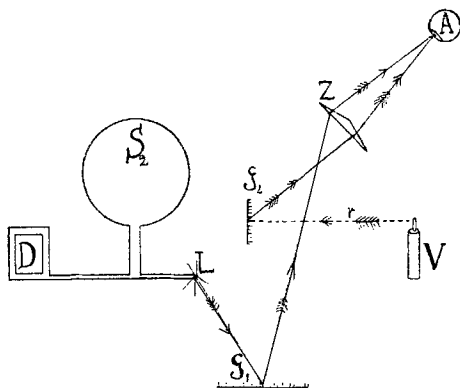


Fig. 1.

vom Auge A des Beobachters mit Hilfe des Zwillingsprismas Z mit der Flächenhelle des Gipsschirmes G_2 verglichen. G_2 wird von einer r cm entfernten Benzinkierze V beleuchtet; r kann meßbar geändert werden. Durch passende Abblendung ist dafür gesorgt, daß G_1 nur durch L , G_2 nur durch V beleuchtet wird.

1) Berliner Dissertation 1909, gekürzt.

Die Spule S_2 besteht aus wenigen Windungen und wird gekoppelt mit der Selbstinduktion S_1 eines Poulson'schen Schwingungskreises (vgl. Fig. 2; Cu Kupfer-, Co Kohleelektrode der Poulsonlampe, C Drehkondensator). Durch Annäherung von S_2 an S_1 kann die Stromstärke in S_2 um das Mehrfache größer gemacht werden als in S_1 .

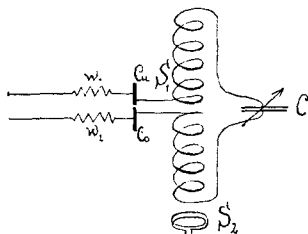


Fig. 2.

Die Wechselstromstärke in dem Kreis $S_2 L D$ (Fig. 1) bewirkt eine gewisse Helligkeit der Lampe L ; r wird so eingestellt, daß die beiden Vergleichsfelder des Photometers gleich hell erscheinen. Darauf wird die Glühlampe L in einen anderen Stromkreis eingeschaltet, der Gleichstromquelle, Präzisionsamperemeter und Widerstand enthält; der Widerstand wird reguliert, bis wieder die Vergleichsfelder gleich hell erscheinen; die vom Amperemeter angezeigte Gleichstromstärke J_p ist dann gleich der früheren Wechselstromstärke.

Die Wellenlänge der Hochfrequenzschwingung wird mit einem der in der drahtlosen Telegraphie üblichen Wellenmesser, und zwar dem Hahnemannschen, gemessen.

2. Hitzdrahtamperemeter.

Mit dem beschriebenen Glühlampenamperemeter wurde ein neues Hitzdrahtamperemeter von Hartmann & Braun mit einem Meßbereich bis 5 Amp. verglichen. Als Lichtquelle L dienten eine bzw. zwei parallel geschaltete 2 Volt-Osmiumlampen.

In Tab. 1 sind die Resultate einiger Versuche zusammengestellt: λ ist die Wellenlänge der Schwingung ($= \infty$ bei Gleichstrom); J_h die Anzeige des Hitzdrahtamperemeters; J_p die photometrisch ermittelte Stromstärke.

Bei Gleichstrom zeigt das Hitzdrahtamperemeter gute Übereinstimmung, während seine Angaben für Wechselstrom sehr erheblich — bis zu 30 Proz. — von den photometrisch konstant gehaltenen Stromwerten abweichen.

Tabelle 1.

λ in m	Eine Glühlampe		λ in m	Zwei Glühlampen	
	J_h in Amp.	J_p in Amp.		J_h in Amp.	J_p in Amp.
∞	0,790	0,792	∞	1,51	1,50
3800	0,695	0,792	3800	1,345	1,50
3550	0,680	0,792	3550	1,32	1,50
3240	0,670	0,792	3240	1,30	1,50
2615	0,650	0,792	2615	1,27	1,50
2300	0,640	0,792	2300	1,25	1,50
1940	0,625	0,792	1940	1,225	1,50
1740	0,615	0,792	1740	1,21	1,50
1600	0,605	0,792	1600	1,185	1,50
1330	0,600	0,792	1330	1,17	1,50

Auf welchem Umstand diese Abweichung des Hitzdraht-amperemeters beruht, wurde, als ohne Belang für die vorliegende Arbeit, nicht näher untersucht.

3. Historisches über Induktionsdynamometer.

Heinrich Hertz¹⁾ benutzte als erster ein Induktionsdynamometer zum Nachweis der magnetischen Schwingung elektrischer Drahtwellen.

In einem quadratischen Glasgehäuse (vgl. Fig. 3) hängt ein Ring R aus Al-Draht, welcher nahe seiner Mitte ein Spiegelchen S und einen kleinen Magneten M trägt. Die Ebene des Ringes bildet einen Winkel von 45° mit der Ebene der beiden parallelen Drähte A und B , längs welcher sich die elektrischen Wellen fortpflanzen. Sind A und B Stellen maximaler Stromschwankung, so werden in den Seiten des Ringes elektromotorische Kräfte bzw. Ströme erzeugt, die um 90° bzw. 180°

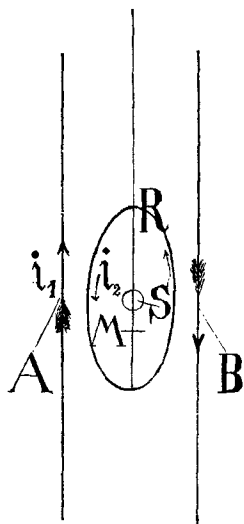


Fig. 3.

1) H. Hertz, Wied. Ann. 42. p. 407. 1891.

in der Phase gegen die erregenden Ströme verschoben sind. Die beiden in der Phase um 180° verschobenen Ströme i_1 und i_2 haben stets entgegengesetzte Richtung, stoßen sich also ab; d. h. der Ring sucht sich senkrecht zur Ebene der Parallel-drähte einzustellen.

J. A. Fleming¹⁾ konstruierte ein Induktionsdynamometer, dessen beweglicher Teil (vgl. Fig. 4) aus einem flachen Metallring 2 besteht; die Ebene von Spule 1 und Ring 2 bilden einen Winkel von 45° miteinander. Versuche mit dem Instrument stellte G. W. Pierce²⁾ an.

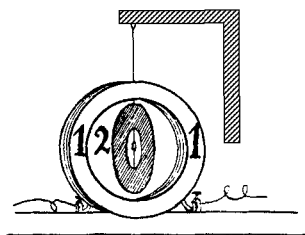


Fig. 4.

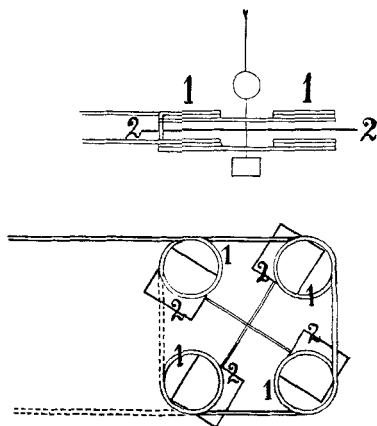


Fig. 5.

C. V. Boys, A. E. Briscoe und W. Watson³⁾ suchten ähnliche Prinzipien zur Messung elektromagnetischer Wellen in freier Luft zu verwenden, doch mit geringem Erfolg.

N. Papalex⁴⁾ beschreibt ein Instrument, bei welchem vier feststehende Schleifen 1 (vgl. Fig. 5), vier zu 1 parallele Schleifen 2 abstoßen; er zeigt theoretisch und mit Bolometer, daß die Ausschläge bei regelmäßig wiederholter Kondensator-entladung i_1^2 proportional sind, ohne den Einfluß der Frequenz in Betracht zu ziehen.

1) J. A. Fleming, *Electrician* 18. p. 561. 1887. — J. Zenneck, *Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie*. Stuttgart bei Enke, 1905. p. 267.

2) G. W. Pierce, *Phys. Rev.* 20. p. 226. 1905.

3) C. V. Boys, A. E. Briscoe u. W. Watson, *Phil. Mag.* (5) 31. p. 44. 1891.

4) N. Papalex, *Ann. d. Phys.* 14. p. 756. 1904.

4. Neues absolutes Induktionsdynamometer.

Die erwähnten Induktionsdynamometer sind keine absoluten Instrumente, d. h. es lassen sich die Stromstärken

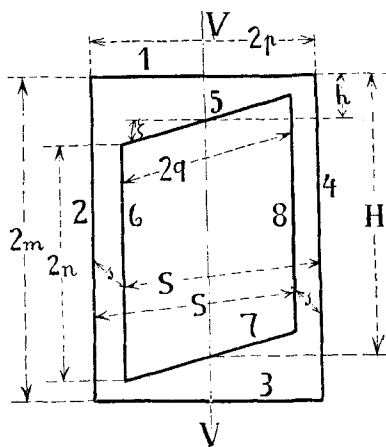


Fig. 6.

nicht aus den Ausschlägen und den Dimensionen der Apparate berechnen. Dies ist der Fall bei Verwendung des in Fig. 6 dargestellten Prinzips, bei welchem zwei Rechtecke aufeinander wirken. Das eine Rechteck 1 (in der Fig. 6 mit den Seiten 1, 2, 3, 4) steht fest und wird von dem zu untersuchenden Wechselstrom durchflossen; das andere Rechteck 2 (mit den Seiten 5, 6, 7, 8) ist drehbar aufgehängt. Die Konstruktion des benutzten Instrumentes geht aus Fig. 7 hervor.

Auf einer mit drei Stellschrauben versehenen Schieferplatte *A* ist ein Holzgehäuse *BCDE* aufgesetzt. Die Holzplatten *EDCD* bilden einen Rahmen, der vorn und hinten durch je eine Spiegelglasplatte verschlossen werden kann. Die beiden horizontalen Platten *C* und *E* des Gehäuses sind zentrisch durchbohrt. Die Bohrung in *C* dient zur meßbaren Drehung des äußeren Stromkreises 1; der mit 1 festverbundene Teilkreis *H* liegt unter *C*. Die untere horizontale Seite des Rechtecks 1 ist in der Mitte aufgeschnitten und trägt hier zwei Zuleitungen, welche dicht nebeneinander in der Drehungsachse liegen. Die Verbindung zwischen diesen beiden Zuleitungen und den feststehenden, den Wechselstrom zu- bzw. abführenden Drähten ist durch einen Quecksilbernapf und eine Quecksilberrinne auf dem Hartgummiklotz *J* hergestellt.

Die Bohrung in *E* trägt ein Glasrohr *F* mit Torsionskopf *G*. Oberhalb von *G* sind zwei Backen verschiebbar angeordnet; jede der Backen trägt einen der beiden Kokonfäden, an welchen der bewegliche innere Stromkreis 2 aufgehängt ist. In der

Ebene des Bügels 2 ist eine Glimmerscheibe mit einem Hohlspiegel in der Mitte angebracht.

Zur Dämpfung des Systems 2 dienen zwei Glasrohrbügel mit aufgesteckten Gummischläuchen *K*; durch Druck auf einen

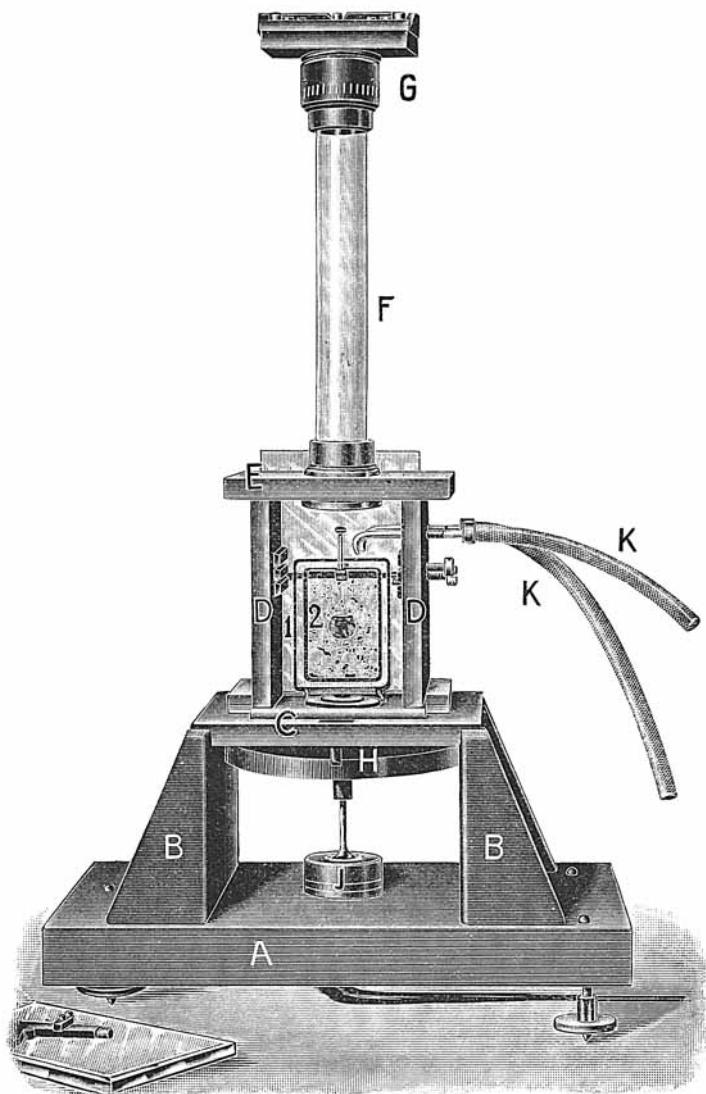


Fig. 7.

der beiden Schläuche wird ein Luftstrom schräg nach unten auf die vordere oder hintere Seite der Glimmerplatte geblasen, wodurch das System 2 schnell in seine Ruhelage eingestellt werden kann.

Der bewegliche Bügel 2 kann durch einschiebbare Messingplatten arretiert werden; dieselben werden beim Gebrauch des Apparates entfernt.

Die rechteckigen Bügel 1 und 2 sind aus möglichst reinem Silberdraht mit einem Durchmesser von 0,145 cm hergestellt. Sie sind poliert und durch Bestreichen mit Schellack gegen Oxydation geschützt.

5. Theorie des neuen Induktionsdynamometers.

Es seien:

1 bzw. 2 die feststehende bzw. bewegliche Stromschleife;
 ξ der Winkel zwischen den Ebenen von 1 und 2;
 i_1 bzw. i_2 die momentanen Stromstärken in 1 bzw. 2;
 J_1 bzw. J_2 die effektiven Stromstärken in 1 bzw. 2;
 n die Frequenz des Wechselstromes (oder Periodenzahl in 1 Sek.);
 $\omega = 2\pi n$ die Periodenzahl in 2π Sek. oder die Winkelgeschwindigkeit;

J_m die maximale Stromstärke im Stromkreise 1;

$\delta_1 = \frac{r_1}{L_{11}}$ bzw. $\delta_2 = \frac{r_2}{L_{22}}$ die Dämpfungen in 1 bzw. 2;

r_1 bzw. r_2 die Ohmschen Widerstände von 1 bzw. 2;

L_{11} bzw. L_{22} die Selbstinduktionskoeffizienten von 1 bzw. 2;

L_{12} der gegenseitige Induktionskoeffizient von 1 auf 2;

$2p$ die Länge der horizontalen Seiten des Bügels 1;

$2q$ die Länge der horizontalen Seiten von 2;

$2m$ die Länge der vertikalen Seiten von 1;

$2n$ die Länge der vertikalen Seiten von 2;

$F = \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi} \frac{1}{\vartheta} \int_0^{\vartheta} i_1 i_2 dt$ der zeitliche Mittelwert des treibenden Dreh-

moments während der Zeit ϑ ;

ξ_0 der Winkel zwischen 1 und 2 in der Ruhelage des Systems;

$\xi' = \xi - \xi_0$ der Ausschlagswinkel des Systems aus der Ruhelage;

D die Direktionskraft der beweglichen Schleife 2.

Ist der Momentanwert des Stromes im Kreise 1

$$(1) \quad i_1 = J_m \cdot e^{-\delta_1 t} \sin \omega t,$$

dann ist die momentane Stromstärke im Kreise 2:

$$(2) \quad \left\{ \begin{aligned} i_2 = - \frac{L_{12}}{L_{22}} \frac{J_m}{\omega^2 + (\delta_2 - \delta_1)^2} & \left[e^{-\delta_1 t} \{ [\omega^2 - \delta_1 (\delta_2 - \delta_1)] \sin \omega t \right. \\ & \left. + \delta_2 \omega \cos \omega t \} - \delta_2 \omega e^{-\delta_2 t} \right]. \end{aligned} \right.$$

(2) folgt aus der Differentialgleichung

$$L_{22} \frac{di_2}{dt} + L_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 = 0$$

und der Grenzbedingung, daß $i_2 = 0$ für $t = 0$.

Für den zeitlichen Mittelwert F des treibenden Drehmomentes zwischen 1 und 2 während der Zeit ϑ erhält man

$$\begin{aligned} F &= - \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi} \frac{1}{\vartheta} \frac{L_{12} J_m^2 \Sigma}{L_{22} [\omega^2 + (\delta_2 - \delta_1)^2]}; \\ \Sigma &= \frac{\omega^2 - \delta_1 (\delta_2 - \delta_1)}{4 \delta_1 (\omega^2 + \delta_1^2)} \{ \omega^2 - e^{-2 \delta_1 \vartheta} [\omega^2 + 2 \delta_1^2 \sin^2 \omega \vartheta + \omega \delta_1 \sin 2 \omega \vartheta] \} \\ &+ \frac{\delta_2 \omega}{4 (\omega^2 + \delta_1^2)} \{ \omega - e^{-2 \delta_1 \vartheta} [\delta_1 \sin 2 \omega \vartheta + \omega \cos 2 \omega \vartheta] \} \\ &- \frac{\delta_2 \omega}{\omega^2 + (\delta_2 + \delta_1)^2} \{ \omega - e^{-(\delta_2 + \delta_1) \vartheta} [(\delta_2 + \delta_1) \sin \omega \vartheta + \omega \cos \omega \vartheta] \}. \end{aligned}$$

Ist der durch 1 geschickte Wechselstrom rein sinusförmig, ist also $\delta_1 = 0$ und ist ferner die Periodendauer $1/n$ dieses Stromes verschwindend klein gegen die Zeit ϑ , so ist einfach

$$(3) \quad (F)_{\delta_1=0} = - \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi} \cdot \frac{L_{12} \cdot J_1^2}{L_{22} \left[1 + \left(\frac{r_2}{\omega L_{22}} \right)^2 \right]}.$$

Durch den Strom J_1 werde die Schleife 2 dauernd um den Winkel ξ' abgelenkt; dann ist das zurücktreibende Drehmoment $D \xi'$ gleich dem treibenden F . Es ergibt sich also für die effektive Stromstärke

$$(4) \quad J_1 = \sqrt{\frac{-D}{L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi}}} \sqrt{L_{22} \left[1 + \left(\frac{r_2}{\omega L_{22}} \right)^2 \right] \sqrt{\xi'}}.$$

In dieser Gleichung sind der Winkel ξ' in Bogenmaß, der Widerstand r_2 in elektromagnetischen Einheiten zu messen.

6. Konstante des Induktionsdynamometers.

Das stillstehende Rechteck 1 ist 7 cm hoch, 5 cm breit; das bewegliche Rechteck 2 ist 6 cm hoch, 4 cm breit; also ist $p = 2,5$; $q = 2,0$; $m = 3,5$; $n = 3,0$ cm.

Die Direktionskraft D wurde nach zwei Methoden bestimmt:

1. aus der Schwingungsdauer des bifilar aufgehängten Systems und seinem Trägheitsmoment;

2. aus dem Gewicht des Systems, dem unteren und oberen Horizontalabstand der beiden Fadenenden und der Fadenlänge.

Nach 1 fand sich $D = 16,21$; nach 2 $D = 16,37$. Der Mittelwert ist $16,29 \text{ [g cm}^2\text{]}$.

Aus dem gemessenen Widerstand des verwendeten Silberdrahtes und den Dimensionen des beweglichen Rechteckes 2 berechnet sich der Gleichstromwiderstand $r_2 = 2,26 \cdot 10^6$ elektromagnetischen Einheiten.

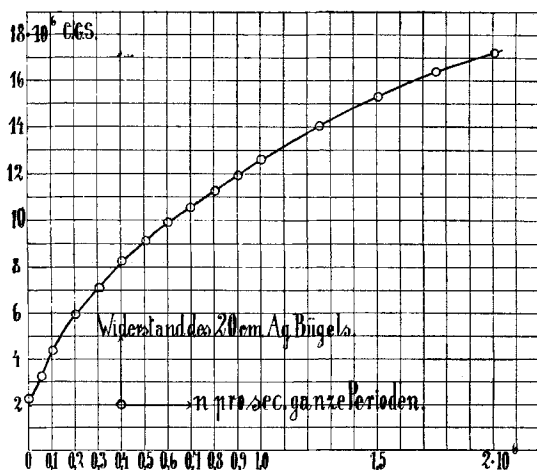


Fig. 8.

Der Durchmesser des Drahtes ist 0,145 cm. Hieraus und aus dem gemessenen Leitvermögen wurde nach J. Zenneck, p. 993, das Verhältnis von Wechselstromwiderstand zu Gleichstromwiderstand berechnet. Die Figg. 8 und 9 geben den so

gefundenen Widerstand des Silberbügels 2 als Funktion der Periodenzahl an.

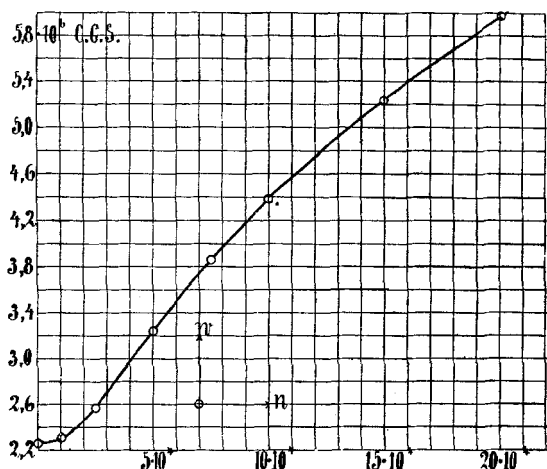


Fig. 9.

Die von dem magnetischen Felde im Innern des Drahtes herrührende Selbstinduktion sei L_i , die vom Felde außerhalb des Drahtes herrührende L_R ; dann berechnet sich

$$(5) \quad L_{22} = L_R + L_i.$$

L_i berechnet sich nach Zenneck, p. 999. Die Figg. 10 und 11 geben L_i als Funktion der Periodenzahl.

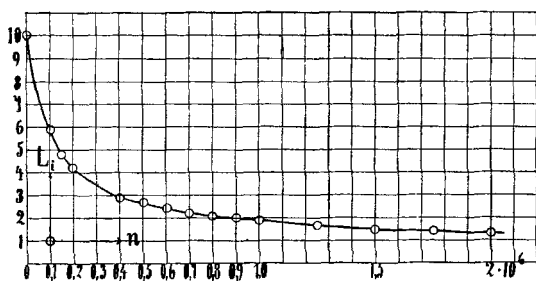


Fig. 10.

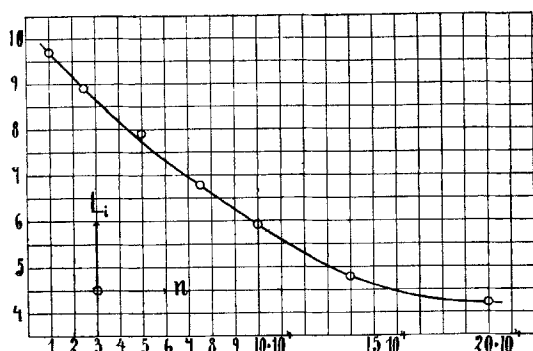


Fig. 11.

Für ein Rechteck $2m \times 2p$, dessen Seiten aus dünnem Rohr vom Durchmesser 2ρ gebildet sind, hat Hr. Martens den Wert L_R berechnet:

$$(6) \quad \begin{cases} L_R = 8 \left\{ (m + p) \ln \frac{4p}{\rho} + \frac{4}{\pi} \rho + B \right\} \\ B = 2 \sqrt{m^2 + p^2} - m \left[\ln \frac{\sqrt{m^2 + p^2} + m}{m} + 2 \right] \\ \quad - p \left[\ln \frac{\sqrt{m^2 + p^2} + p}{m} + 2 \right]. \end{cases}$$

Der Ausdruck unterscheidet sich von den bekannten (vgl. z. B. F. Kohlrausch, Praktische Physik) außer der Bezeichnungsweise nur durch das Korrektionsglied $4\rho/\pi$. Für das bewegliche Rechteck ist hiernach $L_R = 137,60$ cm. Für ganz langsamen Wechselstrom ergibt sich aus Fig. 10 $L_{22} = 147,60$ cm.

Die Werte L_{12} und $\partial L_{12}/\partial \xi$ der Gleichung (4) hat Hr. Martens¹⁾ für die beiden benutzten Rechtecke berechnet und zwar für beliebige Winkel ξ' zwischen den Ebenen der beiden Rechtecke. In der nachstehenden Fig. 12 sind die Werte L_{12} $\partial L_{12}/\partial \xi$ graphisch aufgetragen.

$L_{12} \partial L_{12}/\partial \xi$ ist von $\xi = 10$ bis $\xi = 14^\circ$ praktisch konstant, und zwar -4280 . Zu Strommessungen wird man daher

1) F. F. Martens, Ann. d. Phys. 29. p. 959—970. 1909.

zweckmäßig den festen Bügel 1 so drehen, daß er mit 2 einen Winkel von $10,5^\circ$ bildet.

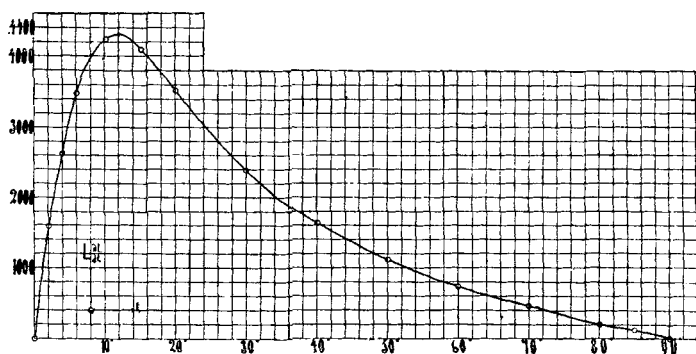


Fig. 12.

Im vorstehenden Abschnitt sind die Konstanten der Formel (4) angegeben worden. Von diesen sind D und $L_{12} \partial L_{12} / \partial \xi$ von ω unabhängig, während r_2 und L_{22} von ω abhängig sind. Für bekannte beliebige Werte von ω kann man also nach Formel (4) aus dem gemessenen Ausschlag ξ' die effektive Stromstärke J_1 berechnen.

7. Versuche.

Zunächst wurden Versuche angestellt, um zu prüfen, ob die Martensschen Werte für $L_{12} (\partial L_{12}) / \partial \xi$ richtig sind. Die Versuche sind mit der Wellenlänge 2400 m angestellt. Hier ist

$$1 + \left(\frac{r_2}{\omega L_{22}} \right)^2 = 1,00187,$$

so daß praktisch statt (4) gesetzt werden kann

$$(7) \quad J_1 = \sqrt{\frac{-D L_{22}}{L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi}}} \sqrt{\xi'} = \text{Const.} \sqrt{\xi'}.$$

Es ist $D = 16,29$, $L_{22} = 137,6 + 5,2 = 142,8$ (für $n = 12,5 \cdot 10^4$, vgl. Fig. 11). Die Schaltung war die in den Figg. 1 und 2 dargestellte. Durch Variieren der Koppelung von S_2 und S_1 wurde die Stromstärke J_1 photometrisch konstant gehalten, und zwar war $J_1 = 1,50 \text{ Amp.} = 0,150 \text{ elektromagn. Einh.}$

Der Winkel ξ_0 , den die beiden Bügel in der Ruhelage miteinander bilden, wird durch Drehen des mit Bügel 1 fest verbundenen Teilkreises H (vgl. Fig. 7) eingestellt und gemessen. Der Ausschlagswinkel ξ' beim Einschalten des Stromes wird mit Fernrohr und Skale gemessen. $L_{12} \partial L_{12} / \partial \xi$ ist abhängig von $\xi = \xi_0 + \xi'$.

Tabelle 2.

ξ	arc ξ'	$-L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi}$		ber.-beob. ber.
		ber. aus (5)	ber. von Martens	
0°	0	0	0	
1,5	0,0081	838	1280	
2,4	0,0149	1542	1900	
3,7	0,0211	2182	2530	
5,05	0,0272	2813	3100	
5,2	0,0291	3010	3140	+4,3 Proz.
6,4	0,0336	3476	3560	+2,4
7,5	0,0351	3630	3870	+6,6
8,8	0,0401	4148	4100	-1,2
9,8	0,0406	4200	4220	+0,5
10,9	0,0421	4355	4300	-1,3
11,9	0,0421	4355	4310	-1,0
12,9	0,0421	4355	4300	-1,3
13,9	0,0416	4303	4230	-1,7
14,9	0,0406	4200	4130	-1,7
16,7	0,0381	3940	3920	-0,5
18,6	0,0367	3796	3680	-3,1
20,5	0,0339	3508	3440	-1,9
22,3	0,0311	3218	3230	+0,3
24,2	0,0301	3114	3000	-3,7
26,1	0,0279	2886	2800	-3,0
29,9	0,0241	2492	2400	-3,7
34,6	0,0191	1976	2000	+1,2
39,5	0,0169	1748	1670	-4,5
49,1	0,0111	1143	1160	+1,0
58,9	0,0076	786	790	+0,5
68,8	0,0049	507	500	-1,4
78,6	0,0021	217	260	

Die Werte für $L_{12} \partial L_{12} / \partial \xi$ sind bei kleinem ξ nur schwer zu messen, weil dann bei geringer Veränderung von ξ der Wert $L_{12} \partial L_{12} / \partial \xi$ bedeutend schwankt, was auch aus dem steilen Verlauf der Kurve geschlossen werden kann. Für die genauere Untersuchung zugänglichen Werte von $\xi > 5^\circ$ zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den beobachteten und berechneten Werten von $L_{12} \partial L_{12} / \partial \xi$. Hieraus folgt, daß die von Martens berechneten Werte richtig sind.

Tabelle 3.

$$J_1 = 1,51 \text{ Amp.} \quad \xi = 10,5^\circ. \quad D = 16,29. \quad L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi} = -4280.$$

λ in m	n	r_2	L_{22}	arc ξ'	$1 + \left(\frac{r_2}{\omega L_{22}}\right)^2$	J_1 nach (4)
3800	$7,88 \cdot 10^4$	$3,94 \cdot 10^5$	144,2	0,0417	1,0035	1,516
3390	8,86	4,15	143,9	0,0421	1,00268	1,520
2580	11,6	4,68	143,0	0,0422	1,00202	1,518
2400	12,5	4,84	142,8	0,0423	1,00187	1,518
2130	14,1	5,10	142,4	0,0424	1,00164	1,519
1970	15,2	5,28	142,4	0,0425	1,00151	1,520
1860	16,1	5,42	142,1	0,0425	1,00142	1,518
1695	17,7	5,64	142,0	0,0425	1,00128	1,517

Tabelle 4.

$$J_1 = 0,787 \text{ Amp.} \quad \xi = 10,5^\circ. \quad D = 16,29. \quad L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi} = -4280.$$

λ in m	n	r_2	L_{22}	arc ξ'	$1 + \left(\frac{r_2}{\omega L_{22}}\right)^2$	J_1 nach (4)
1050	$28,6 \cdot 10^4$	$7,0 \cdot 10^5$	141,1	0,0116	1,00076	0,789
950	31,6	7,3	140,9	0,0116	1,00068	0,789
900	33,4	7,55	140,8	0,0116	1,00065	0,789
800	37,5	7,95	140,6	0,0116	1,00057	0,788
700	42,8	8,5	140,4	0,0116	1,00051	0,788
600	50,0	9,15	140,2	0,0117	1,00043	0,791
550	54,5	9,5	140,2	0,0117	1,00039	0,791
500	60,0	9,9	140,1	0,0117	1,00035	0,790
495	60,7	9,94	139,9	0,0117	1,00035	0,790
400	75,0	10,9	139,9	0,0117	1,00028	0,790
350	85,7	11,63	139,6	0,0117	1,00023	0,789

Die weiteren Versuche haben den Zweck, den durch Formel (4) ausgedrückten Einfluß der Winkelgeschwindigkeit ω zu prüfen. Bei diesen Versuchen wurde $\xi_0 = 10,5^\circ$ gewählt. Das Dynamometer und der photometrische Strommesser waren stets nach Fig. 1 geschaltet. Die Wellenlängen zwischen 4000 und 350 m wurden mit dem Poulsonschen Schwingungskreis (vgl. Fig. 2) erzeugt. Die vorstehenden Tabb. 3 und 4 geben die Resultate an; J_1 ist aus Formel (4) berechnet.

Die aus (4) berechneten Werte J_1 der effektiven Stromstärke stimmen mit den photometrisch konstant gehaltenen hinreichend überein. Man erkennt ferner, daß in dem ganzen Hochfrequenzbereich $\lambda < 4000 \text{ m}$ $1 + \left(\frac{r_2}{\omega L_{22}}\right)^2$ praktisch = 1 gesetzt werden kann, so daß in diesem Bereich statt (4) die einfachere Formel (5) zur Berechnung der Stromstärken dienen kann.

Die weit größeren Wellen, deren Untersuchung Tab. 4 angibt, sind erhalten, indem statt des Drehkondensators mit der Maximalkapazität 12 m ein Plattenkondensator mit der Maximalkapazität 64 m benutzt wurde. Auch wurde außerdem die im Verein mit dem Drehkondensator stets benutzte Spule von etwa 4 Millihenry ersetzt durch Spulen von etwa 16 bzw. 64 Millihenry. Die Wellenlänge bzw. Periodenzahl ist aus Kapazität und Selbstinduktion berechnet. Tab. 5 gibt die Messungsergebnisse an. Die nach (4) berechneten Stromwerte stimmen gut mit den photometrisch konstant gehaltenen überein.

Tabelle 5.

$$J_1 = 0,799 \text{ Amp.} \quad \xi = 10,5^\circ. \quad D = 16,29. \quad L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi} = -4280.$$

λ in m	n	r_2	L_{22}	$\text{arc } \xi'$	$1 + \left(\frac{r_2}{\omega L_{22}}\right)^2$	J_1 ber. nach (4)
19000	$1,58 \cdot 10^4$	$2,38 \cdot 10^3$	147,0	0,0118	1,0267	0,802
32700	0,917	2,30	147,4	0,0107	1,0735	0,794

Als Wechselstromquelle für langsamen Wechselstrom (G in Fig. 13) diente ein 5 KW. Drehstromgenerator, der durch einen 8,5 PS. Gleichstrommotor getrieben wird. Die Tourenzahl des letzteren kann bei nahezu gleicher Leistung in weiten Grenzen

variiert werden. Der Wechselstrom durchfließt einen induktionsfreien Widerstand $W = 3,00$ Ohm und das Induktionsdynamometer D . An W liegt ein Präzisionsvoltmeter V mit einem Meßbereich bis 150 Volt bei 1790 Ohm Widerstand, ferner ein Resonanzfrequenzmesser F mit 11200 Ohm Widerstand. Ist v die von V angezeigte Spannung, so berechnet sich mit genügender Annäherung

$$(8) \quad J_1 = \frac{v}{W}.$$

Wie die nachstehende Tab. 6 zeigt, ist $(r_2/\omega L_{22})^2$ so groß, daß 1 dagegen vernachlässigt werden kann. L_{22} ist praktisch konstant und hat denselben Wert, als wenn der Querschnitt des Drahtes ganz gleichmäßig vom Strom erfüllt ist. Man kann deshalb (4) in der Form schreiben:

$$(9) \quad J_1 = \frac{\sqrt{\xi'}}{n} \left\{ \frac{r_2}{2\pi} \sqrt{\frac{-D}{L_{22} L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi}}} \right\} = \frac{\text{Const.} \sqrt{\xi'}}{n}.$$

Tabelle 6.

$$L_{22} = 147,6. \quad r_2 = 2,26 \cdot 10^6. \quad D = 16,29. \quad L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \xi} = -4280.$$

$$\text{Const.} = 1828.$$

n	$\text{arc } \xi'$	$\left(\frac{r_2}{\omega L_{22}} \right)^2$	$\sqrt{\xi'}$	J ber. nach (7)	J ber. nach (6)
30	0,0020	6420	0,0447	27,2	24,1
34	0,0020	5150	0,0447	24,0	24,1
34	0,0031	5150	0,0557	29,9	27,0
35	0,0026	4870	0,0510	26,6	24,7
36	0,0017	4600	0,0413	21,0	22,5
37,5	0,0038	4230	0,0617	30,1	29,3
40,0	0,0058	3820	0,0762	34,8	31,0
43,0	0,0070	3220	0,0836	35,5	32,3
44,5	0,0062	3010	0,0788	32,8	29,3
49,5	0,0065	2430	0,0806	29,8	24,3
52,5	0,0037	2250	0,0608	21,2	18,3
55,0	0,0022	1970	0,0469	15,6	13,7
56,0	0,0014	1900	0,0374	12,2	10,0

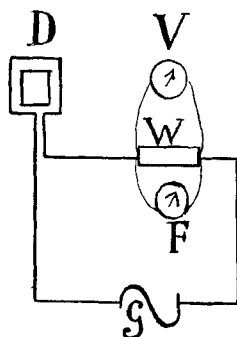


Fig. 13.

Die mit Induktionsdynamometer und mit Präzisionsinstrument gemessenen Stromstärken stimmen so gut überein, wie man bei der Kleinheit der Ausschläge des Dynamometers erwarten kann. Damit ist Gleichung (9) für Periodenzahlen unter 60 bestätigt; für diese Periodenzahlen ist also der Ausschlag des Dynamometers dem Quadrate der Periodenzahl proportional. Auffällig ist die geringe Empfindlichkeit des Dynamometers für Wechselstrom geringer Periodenzahl.

8. Schluß.

In vorliegender Arbeit ist ein absolutes Induktionsdynamometer beschrieben; es ist gezeigt, wie man unter Zuhilfenahme der Martensschen Berechnung von Induktionskoeffizienten das Verhalten des Instrumentes für alle Periodenzahlen berechnen kann.

Zur Eichung von Strommessern für hochfrequente Wechselströme eignet sich das in vorliegender Arbeit beschriebene photometrische Strommeßverfahren.

Die Angaben eines der üblichen Hitzdrahtamperemeter haben sich für Gleich- und langsamen Wechselstrom als recht genau gezeigt, weisen aber für hochfrequente Ströme recht erhebliche Abweichungen auf.

Für die genannten Untersuchungen hat sich die Anwendung konstanter sinusförmiger Ströme und die Beobachtung von dauernden Ausschlägen des Dynamometers als zweckmäßig erwiesen. In der Dissertation des Verfassers sind außerdem folgende Fälle behandelt worden: 1. das Dynamometer ist dauernd in einen Schwingungskreis geschaltet, in dem sich ν Funken in der Sekunde entladen; 2. das Dynamometer schlägt ballistisch aus, wenn es die kurze Zeit \mathcal{T} hindurch von konstantem Hochfrequenzstrom durchflossen wird; 3. wenn sich ein Kondensator oszillatorisch durch das Instrument entladet.

Hrn. Prof. Martens ist der Verfasser für vielfache Unterstützung bei Ausführung der vorliegenden Arbeit zu herzlichem Danke verpflichtet.

Berlin, Physik. Inst. d. Handelshochschule, Juli 1910.

(Eingegangen 8. Juli 1910.)
