

Zeitschrift für Instrumentenkunde.

Kuratorium:

Prof. Dr. H. Krüss, Vorsitzender, Prof. Dr. A. Raps, geschäftsführendes Mitglied, Prof. Dr. R. Straubel.

Schriftleitung: Prof. Dr. F. Göpel in Charlottenburg-Berlin.

XXXVIII. Jahrgang.

Januar 1918.

Erstes Heft.

Ein Vibrationsgalvanometer mit elektromagnetischer Abstimmung für niedrige Frequenzen.

Von

H. Schering und R. Schmidt.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Das Vibrationsgalvanometer hat in den letzten Jahren in steigendem Maße Verwendung für Messungen bei niedrigen technischen Frequenzen gefunden. Eine Anzahl verschiedenartigster Formen von Vibrationsgalvanometern sind besonders für diesen Zweck ausgearbeitet; vom Spulengalvanometertyp sind die Instrumente von Campbell¹⁾ (50—700 per/s), Schering und Schmidt²⁾ (25—120 per/s), Zöllich³⁾ (15—30, 25—60, 50—500 per/s), vom Nadelgalvanometertyp das Instrument von Tinsley⁴⁾ (45—55 per/s) zu nennen. Bei den drei ersteren wird die Abstimmung der Eigenfrequenz des Instrumentes auf die Stromfrequenz durch mechanische Änderung der Direktionskraft bewirkt, bei letzterem ist die Direktionskraft eine vorwiegend magnetische, die Abstimmung wird durch einen magnetischen Nebenschluß zu dem Dauermagneten erzielt.

Ist eine Reihe aufeinanderfolgender Messungen bei verschiedenen Frequenzen vorzunehmen, so ist die Abstimmung durch Hantieren am Instrument selbst etwas unbequem und zeitraubend, zumal wenn dabei das Spaltbild aus dem Gesichtsfeld des Fernrohrs, oder bei objektiver Ablesung von der Mattscheibe fortwandert.

Die Möglichkeit der Abstimmung durch elektromagnetische Betätigung vom Beobachtungsplatze aus ist ein großer Vorteil, leider ist die Brauchbarkeit des Instruments von Tinsley, bei dem die Abstimmung elektromagnetisch anstatt durch einen magnetischen Nebenschluß möglich wäre, stark dadurch beeinträchtigt, daß die erforderliche Empfindlichkeit nur auf Kosten der Dämpfung erreicht ist, die Resonanzkurve ist so spitz, daß bei der geringsten Änderung der Stromfrequenz die Abstimmung gestört wird und das Erreichen des Endausschlages nach einer Änderung der Stromstärke sehr lange Zeit dauert.

Im folgenden wird ein Vibrationsgalvanometer beschrieben, welches bei großer Empfindlichkeit und guter Dämpfung sich in einem weiten Frequenzgebiet von sehr niedrigen Frequenzen an elektromagnetisch abstimmen läßt.

¹⁾ Campbell, *Phil. Mag.* **14.** S. 494. 1907 (Referat in *dieser Zeitschr.* **27.** S. 354. 1907).

²⁾ Schering u. Schmidt, *Arch. f. Elektrotechnik* **1.** S. 254. 1913.

³⁾ Zöllich, *Arch. f. Elektrotechnik* **3.** S. 369. 1915.

⁴⁾ Tinsley, *The Electrician* **69.** S. 939. 1912.

I. Grundlagen der Bauart.

In seiner Bauart lehnt sich das neue Instrument an das Rubenssche¹⁾ Vibrationsgalvanometer mit einer Nadel in gekreuzten Magnetfeldern an. Bei dem Rubensschen Instrument ist die Nadel auf einer ausgespannten Saite befestigt, durch deren Torsionskraft im wesentlichen die Direktionskraft gegeben ist. Zu beiden Seiten der Nadel sind zwei Dauermagnete aufgestellt, welche die Nadel stark magnetisieren, ohne ihr eine wesentliche Richtkraft zu geben; ist die Nadel lang, so würde sogar ohne die Richtkraft des Aufhängefadens die Nullage der Nadel im Felde labil sein; durch Annähern der Magnete wird daher die Eigenfrequenz der Nadel etwas herabgesetzt, wodurch die Abstimmung in engen Grenzen möglich ist, während die grobe Abstimmung durch Änderung der Länge und der Spannung der Saite erzielt wird. Um die 4 Polschuhe der Magnete ist die Wechselstromwicklung gelegt; diese erzeugt pulsierende Magnetfelder senkrecht zu dem Gleichfelde und versetzt die Nadel in Schwingungen. Macht man die Nadel groß, die Torsionskraft der Saite sehr schwach, so kann man durch starkes Nähern der Magnete auf Eigenfrequenzen von 12 per/s herunterkommen, jedoch ist die Nadel dann so labil, daß sie bei einem größeren Ausschlage umschlägt.

Bei dem neuen Instrument sind zwei U-förmige Polschuhe aus Eisen von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ Querschnitt zwischen den Polen eines U-förmigen Gleichstrom-Elektromagneten angeordnet. Die Schenkel der Polschuhe tragen die Wechselstromwicklung; die 4 Endflächen der etwas zugespitzten Polschuhe sind kreisförmig angeordnet und stehen sich in 14 mm Abstand gegenüber. An einer schwachen vertikalen koaxialen Saite ist die Nadel aus dünnem rechteckigen Eisenblech, auf das ein Spiegelchen geklebt ist, befestigt.

Durch Erregen des Gleichstrommagneten wird die Nadel stark magnetisiert. Das Gleichstromfeld gibt einer langen Nadel nur eine geringe Richtkraft oder macht sie sogar labil; einer kurzen Nadel dagegen gibt es eine erhebliche Richtkraft. Die Eigenfrequenz der Nadel ist proportional der Wurzel aus dem Quotienten der Richtkraft und des Trägheitsmomentes. Das Trägheitsmoment ist annähernd der dritten Potenz der Länge und der ersten Potenz der Dicke der Nadel proportional. Die Wirkung der Felder der Polschuhwicklungen auf die Nadel nimmt aber mit der Länge der Nadel zu.

Es mußte also durch Versuche die geeignete Abmessung der Nadel gefunden werden, bei welcher durch Änderung der Gleichstromerregung ein weites Frequenzgebiet bei möglichst großer Wechselstrom-Empfindlichkeit umspannt wird. Hierbei war zu berücksichtigen, daß die Wechselstromempfindlichkeit eines Vibrationsgalvanometers bei Abstimmung auf die Frequenz des Wechselstromes stark von der Dämpfung des schwingenden Systems abhängt. Mit dem üblichen Verfahren, die Dämpfung aus der Resonanzkurve zu ermitteln, wäre die Erprobung der günstigsten Nadelabmessung eine nicht zu bewältigende Arbeit gewesen.

Aus der Theorie des Vibrationsgalvanometers ergab sich ein einfacherer Weg. Die erzwungene Schwingung des Vibrationsgalvanometers ist unter anderem von Wenner²⁾ und in besonders übersichtlicher Form von Zölllich³⁾ mathematisch dargestellt worden. Durch einfache Rechnungen ergaben sich die untenstehenden Formeln,

¹⁾ Rubens, *Wied. Ann.* **56**. S. 27. 1895.

²⁾ Wenner, *Bull. of the Bureau of Standards* **6**. S. 347. 1910.

³⁾ Zölllich, *l. c.*

die zwar teilweise nicht allgemein streng gültig, aber für so geringe Dämpfungen, wie sie bei Vibrationsgalvanometern gebraucht werden, richtig sind.

Im folgenden ist eine Zusammenstellung des Einflusses der Dämpfung auf die wichtigsten Eigenschaften des Vibrationsgalvanometers gegeben, die zur Wahl einer geeigneten Dämpfung dienlich sein wird.

Bezeichnungen.

- f_* Eigenfrequenz der Galvanometernadel,
- f Frequenz des Wechselstroms,
- i_0 Gleichstromempfindlichkeit, einseitiger Ausschlag in mm/A,
- i_* Wechselstromempfindlichkeit bei Abstimmung, $f = f_*$, Spaltbildverbreiterung in mm/A,
- Λ Natürliches logarithmisches Dämpfungskrement; $\Lambda < 0,1$.

$a = \frac{f - f_*}{f_*}$ Resonanzbreite, diejenige relative Abweichung der Wechselstromfrequenz von der Galvanometerfrequenz, bei der die Empfindlichkeit auf die Hälfte der Resonanzempfindlichkeit herabgeht,

ϑ die Zeit, in der ein Ausschlag auf den hundertsten Teil abklingt, nachdem der Strom ausgeschaltet ist.

Der Widerstand im Wechselstromkreise sei so groß, daß eine Dämpfung des Vibrationsgalvanometers durch den Schließungskreis nicht merklich ist.

Es ist dann:

1. Die Wechselstromempfindlichkeit bei Abstimmung

$$i_* = \frac{\pi \sqrt{2}}{\Lambda} i_0 = 4,44 \frac{i_0}{\Lambda}, \quad \Lambda = 4,44 \frac{i_0}{i_*}.$$

2. Die Empfindlichkeit gegen Oberschwingungen n -ter Ordnung

$$i_n = i_0 \frac{2\sqrt{2}}{n^2 - 1}, \quad \frac{i_*}{i_n} = \frac{(n^2 - 1)}{2} \frac{\pi}{\Lambda},$$

$n = 3$

$$i_n = i_0 \cdot 0,35, \quad \frac{i_*}{i_n} = \frac{12,5}{\Lambda}.$$

3. Die Resonanzbreite

$$a = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \Lambda = 0,55 \Lambda = 2,45 \frac{i_0}{i_*}.$$

4. Die Abklingzeit eines Ausschlages auf den hundertsten Teil

$$\vartheta = \frac{2,30}{\Lambda f_*} = \frac{1,26}{a f_*} \text{ s.}$$

Die Formeln unter 1 besagen, daß die Wechselstromempfindlichkeit bei Abstimmung in einfachster Weise nur von der Gleichstromempfindlichkeit und der Dämpfung abhängt. Die Dämpfung wird, wie später erörtert wird, künstlich auf den gewünschten Betrag eingeregelt. Zur Ermittlung der günstigsten Abmessungen der Nadel war somit nur die Gleichstromempfindlichkeit und die Eigenfrequenz der Nadeln für die verschiedenen Gleichfelderregungen zu bestimmen. Infolge der Einfachheit dieser Messungen konnte eine große Zahl von Nadeln untersucht werden. Als günstigste Abmessungen der Nadel ergeben sich

Länge	6 mm	4 mm
Dicke	0,18 mm	0,06 mm
Höhe	4 mm	4 mm
Frequenzbereich	8—76 per/s	30—160 per/s.

Die Höhe der Nadel ist von verhältnismäßig geringem Einfluß. Durch weitere Herabsetzung der Länge und der Dicke der Nadel kommt man nicht mehr zu wesentlich höheren Frequenzen. Die ganze Bauart des Instrumentes ist ja auch auf niedrige Frequenzen zugeschnitten.

Betrachten wir nun den Einfluß der Dämpfung auf das Verhalten des Vibrationsgalvanometers. Eine schwache Dämpfung ist erwünscht, um eine möglichst große Wechselstromempfindlichkeit bei Abstimmung, Gl. 1, zu erhalten, gegenüber der die Empfindlichkeit für Oberschwingungen, Gl. 2, stark zurücktritt. Gerade bei niedriger Frequenz wird es sich nicht selten um Messungen an Spulen mit Eisen handeln. Die Hysteresis des Eisens verzerrt die Stromkurve so, als wenn der Grundwelle eine Oberwelle der dritten Ordnung überlagert sei, für welche die Brücke dann nicht abgeglichen ist. Bei sehr schwacher Dämpfung ist aber andererseits die Resonanzbreite, Gl. 3, sehr klein; wenn die Frequenz des Wechselstromes nicht sehr unveränderlich ist, wird die Abstimmung dauernd gestört. Auch die Abklingzeit eines Ausschlages, Gl. 4, wird bei sehr schwacher Dämpfung und bei niedriger Frequenz sehr groß, die Brückenverstellung kann dann nur langsam erfolgen, sonst fährt man leicht über die Nulleinstellung hinweg.

Bei einer Resonanzbreite des Vibrationsgalvanometers $a = 1\%$ konnten wir mit dem Wechselstrom aus der städtischen Zentrale Charlottenburg Messungen mit derselben Schärfe ausführen, wie mit Wechselstrom völlig konstanter Frequenz. Diese Resonanzbreite dürfte durchschnittlich die geeignete sein. Für $a = 1\%$ ist bei jedem Vibrationsgalvanometer die Wechselstromempfindlichkeit bei Abstimmung

244 mal größer als die Gleichstromempfindlichkeit und 865 mal größer als die Empfindlichkeit gegen die 3te Oberschwingung. Die Abklingzeit eines Ausschlages auf den hundertsten Teil bei Abstimmung auf 50 per/s beträgt 2,5 s.

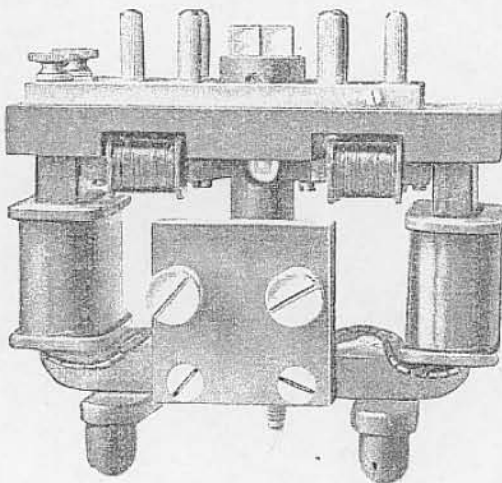


Fig. 1.

72 mm. Auf jeden Schenkel ist eine Spule von 30 mm Höhe aufgesteckt. Die Spule hat etwa 670 Windungen aus 0,22 mm starkem Emailedraht von 26 Ω

II. Beschreibung des Instrumentes¹⁾.

Der Gleichstrom-Elektromagnet ist aus Flacheisen von $30 \times 10 \text{ mm}^2$ gebogen (Fig. 1), die Schenkellänge, innen gemessen, beträgt 45 mm, der lichte Abstand der Schenkel

¹⁾ Die Anfertigung des Vibrationsgalvanometers hat die Firma Hartmann & Braun A.-G. in Frankfurt a. M. übernommen.

Widerstand. Jede Spule kann mit $\frac{1}{4}$ A belastet werden. Die Enden dieser Erregerspulen, mit Glasperlen isoliert, führen zu einem Klemmstück, das an der Basis des Elektromagneten befestigt ist. Letzterer ruht auf zwei festen Füßen und auf einem Schraubfuß, welcher das Instrument nach vornüber zu neigen gestattet.

Auf die Stirnflächen der beiden Schenkel ist eine Brücke aus Isolierstoff aufgeschraubt, welche auf der Unterseite (Fig. 2) die beiden U-förmigen Polstücke aus massivem Eisen trägt und in der Mitte ein Loch von 16 mm Durchmesser hat. Die Polstücke sind zur Herabsetzung der Erdkapazität der Wechselstromwicklung durch einen Spalt von etwa 1 mm von den Schenkeln getrennt. Um die Wechselstromwicklung bequem aufbringen zu können, ist jedes dieser U-förmigen Polstücke von 5×5 mm² Querschnitt aus zwei gleichen Hälften hergestellt, die in einer Stahlleere gefeilt wurden.

Die Wechselstromwicklung jeder der vier Polstückhälften hat 1000 Windungen aus 0,22 mm starkem Emaillendraht von 18 Ω Widerstand. Bei dem abgebildeten Instrument sind die Enden der Spulen zu Kontaktstücken geführt, die auf der Oberseite (Fig. 3) der Brücke aus Isolierstoff befestigt sind; die Kontaktstücke können durch Schraubstöpsel in geeigneter Weise verbunden werden, so daß

- a) alle vier Spulen in Reihe,
- b) alle vier Spulen parallel,
- c) je zwei Spulen in Reihe und diese beiden Gruppen parallel geschaltet werden können.

Bei den zierlichen Abmessungen dieser Schaltvorrichtung schienen uns Schraubstöpsel geeigneter zu sein als Konusstöpsel, welche einen beträchtlichen seitlichen Druck auf die Kontaktstücke ausüben.

Bei einem zweiten Instrument wurde die Schaltvorrichtung fortgelassen und die vier Spulen in Reihe an zwei Klemmen geführt. Ist einmal ein geringerer Widerstand des Instrumentes erwünscht, so kann man dem Instrument einen Wandler mit geeignetem Übersetzungsverhältnis vorschalten. In das Loch der Brücke aus Isolierstoff wird ein Einsatz mit der Nadel gesteckt. Der Einsatz besteht aus einem Blechrahmen $53 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ äußeren und $29 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ lichten Abmessungen bei 1 mm Stärke. In dem Rahmen ist durch Einlöten in zwei Nuten oben und unten ein Phosphorbronzedraht von 0,02 mm Dicke gespannt, auf diesen Draht ist das die Nadel bildende Eisenblech (die Abmessungen siehe S. 4) mit alkoholischer Schellacklösung aufgeklebt, auf dieselbe Seite des Eisenblechs ist dann ein dünnes Spiegelchen von 2 mm Höhe und 1 mm Breite geklebt. Mit dem Rahmen sind zwei Holzbacken verschraubt, welche im unteren Teil sich zu einem Zylinder von 14 mm Durchmesser, im oberen Teil zu einem Zylinder von 18 mm Durchmesser ergänzen. Der verstärkte Absatz am oberen Ende hält den Einsatz beim Einstecken in das Instrument in der richtigen Höhe fest, so daß die Nadel zwischen die Polstücke zu stehen kommt.

In der Höhe der Nadel sind die Holzbacken durchbohrt, der Durchmesser des

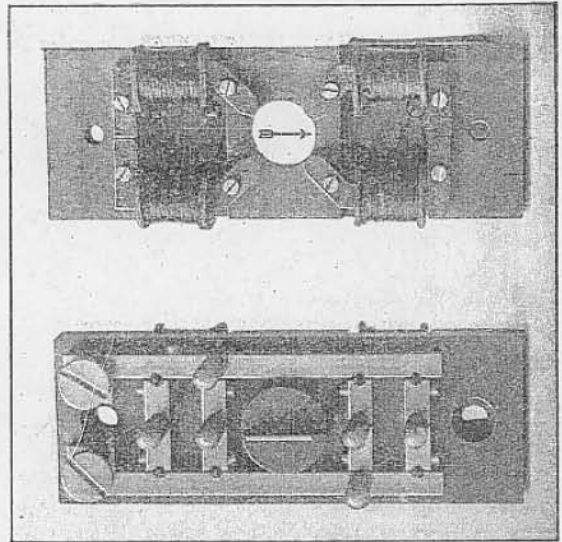


Fig. 2 und 3.

Loches ist 8 mm. In das Loch der vorderen Holzbacke ist ein Stück Brillenglas von 1 mm Brennweite für objektive Ablesung eingekittet, in das Loch der hinteren Holzbacke ist ein kurzer kupferner Gewindebolzen mit Schnitt eingeschraubt, der sich durch Drehen mit einem Schraubenzieher der Nadel nähern läßt und deren Dämpfung verstärkt.

Bei starker Gleichfelderregung ist der Einfluß der Richtkraft des Aufhängefadens auf die Nadel verschwindend, nur bei schwacher Erregung macht sie sich bemerkbar. Es ist daher zweckmäßig, bei voller Erregung das von dem Spiegel der Nadel entworfene Spaltbild durch Drehen des ganzen Instrumentes auf die Mitte der Mattscheibe zu bringen und dann die Erregung zu schwächen; wandert dabei das Spaltbild nach der Seite, so führt man es durch Drehen des Einsatzes allein wieder zurück. Es bleibt dann das Spaltbild für alle Erregungen in der Mitte der Mattscheibe.

In der Regel, wenn die Spiegelchen glatt auf die Eisenbleche geklebt sind, erscheint beim Einstecken eines anderen Einsatzes bei starker Erregung das Spaltbild sogleich auf der Mattscheibe.

Die Möglichkeit, den Einsatz zu wechseln und zu einem anderen Frequenzbereich überzugehen, ohne Verbindungen lösen oder das Spaltbild suchen zu müssen, ist eine große Annehmlichkeit.

Trotz des dünnen Aufhängedrahtes ist das bewegliche System wegen seiner Leichtigkeit sehr widerstandsfähig selbst gegen heftige Stöße. Eine versehentlich starke Wechselstrombeanspruchung schadet ihm nichts.

Der Einfluß von Erschütterungen auf die Ruhelage ist abgesehen von ganz schwacher Erregung verhältnismäßig gering. Eine sehr gute erschütterungsfreie Aufstellung erhält man, wenn man zwischen zwei etwa 2 cm starke Eisengußplatten drei pralle Gummibälle (Tennisbälle), für die entsprechende Vertiefungen in den Platten vorgesehen sind, legt und das Instrument auf die obere Platte stellt. Für eine bleibende Aufstellung des Instrumentes empfiehlt es sich, ein kurzes Eisen in eine Wand einzugipsen und darauf die untere Gußplatte mit einer Schraube zu befestigen.

Der Strom für die Gleichfelderregung kann, wie im Abschnitt „Erdkapazität“ erörtert wird, unbedenklich aus einer stationären Batterie entnommen werden oder auch aus einem Gleichstromnetz, wenn dessen Spannung genügend konstant ist. Stärkere Spannungsschwankungen stören natürlich die Abstimmung. Will man den Strom einer tragbaren Batterie entnehmen, so empfiehlt es sich, um mit einer geringen Zahl von Elementen auszukommen, die Gleichfeldspulen aus dickeren Drähten herzustellen — Wickelraum steht ja genügend zur Verfügung — und sie parallel zu schalten. Zum Regeln des Erregerstroms werden zweckmäßig zwei Gleitwiderstände mit verschieden starker Bewicklung benutzt, der eine bewirkt die Grob-, der andere die Feinregelung. Um nicht dauernd einen Strommesser im Erregerkreis festzulegen, empfiehlt es sich, an dem Grobwiderstand einen Anschlag für die höchste Stromstärke anzubringen, so daß die Feldspulen nicht überlastet werden können. An dem Grobwiderstand kann man eine Teilung in Frequenzen anbringen; um sich von dem Einfluß der Remanenz des Magnetgestelles auf die Teilung freizumachen, muß man diese von der höchsten Erregung anfangend aufnehmen und ebenso vor der Benutzung des Instrumentes und bei jedem Einstellen einer stärkeren Erregung als der vorhergehenden den Schieber des Grobwiderstandes erst einmal an den Anschlag für die höchste Stromstärke bringen.

III. Messungen.

Die Wechselstromempfindlichkeit wurde in folgender Weise bestimmt: Ein Wechselstrom von 0,20 A durchfloß einen induktionsfreien Strommeßwiderstand von 1 Ω , parallel zu diesem Widerstand war das Vibrationsgalvanometer mit in Reihe geschalteten Spulen unter Vorschaltung eines Kurbelwiderstandes von einigen 10000 Ω gelegt. Der Strommeßwiderstand war an der Klemme geerdet, welche dem Instrument benachbart war. Bei allen Wechselstrommessungen mit einem Nullinstrument muß dieses auf niedrige Spannung gegen Erde gebracht werden, sonst können durch Kapazitätseinflüsse starke Störungen vorkommen. Der Kurbelwiderstand wurde so eingestellt, daß bei Abstimmung die Spaltbildverbreiterung in 1 m Abstand vom Instrument 60 mm betrug.

Zur Bestimmung der Gleichstromempfindlichkeit wurde das Instrument an eine Gleichspannung von 2 V gelegt unter Vorschaltung des Kurbelwiderstandes, der so eingestellt wurde, daß der einseitige Ausschlag 30 mm betrug. Aus den beiden Stromempfindlichkeiten ergibt sich nach Formel 4 die Resonanzbreite. Bei dem ersten Instrument waren die Polstücke aus geblätterttem legierten Eisen hergestellt, die Resonanzbreite war bei der Frequenz 50 per/s außerordentlich gering. Es erübrigte sich, die Polstücke aus geblätterttem legierten Eisen zu machen, durch massive schmiedeeiserne Polstücke wurde die Dämpfung, also die Resonanzbreite, von vornherein größer; bei denselben war ohne den Dämpferbolzen $a = 0,33\%$ bei 50 per/s. Durch Heranschrauben des kupfernen Bolzens kann man Resonanzbreiten bis zu 4% bei 50 per/s erzielen.

Zum Nachweis, daß die Bestimmung der Resonanzbreite a aus der Gleich- und der Wechselstromempfindlichkeit richtig ist, wurde die Resonanzbreite a auch einmal direkt gemessen, indem die Frequenz soweit gesteigert und gemindert wurde, daß die Empfindlichkeit auf die Hälfte der Einstimmempfindlichkeit herabging. Um von einer etwaigen Ungenauigkeit in der Proportionalität zwischen Stromstärke und Ausschlag unabhängig zu sein, wurde nicht bei konstanter Stromstärke durch Änderung der Frequenz des Wechselstromes auf die halbe Bildverbreiterung eingestellt, sondern der Widerstand des Galvanometerkreises wurde auf den halben Wert gebracht, so daß die Stromstärke im Galvanometer verdoppelt wurde, und auf die ursprüngliche Bildverbreiterung von 60 mm durch Herabsetzung der Frequenz eingestellt. Zur Bestimmung der Frequenzänderung wurde dann im Galvanometer über den Betriebswechselstrom ein anderer Wechselstrom gelagert, der von einer magnetisierten schwingenden Stimmgabel in einer zwischen die Zinken gesetzten Spule mit Eisenkern erzeugt wurde. Die Stimmgabel war auf die Eigenfrequenz der Galvanometernadel abgestimmt, die beiden im Galvanometer überlagerten Wechselströme von etwas verschiedener Frequenz erzeugten dann Schwebungen der Nadel: die Dauer t' von m' Schwebungen wurde mit der Stoppuhr gemessen. Die Messungen wurden wiederholt bei einer Einstellung durch Steigerung der Frequenz. Aus diesen Messungen und dem Wert der Abstimmfrequenz f_* , welche mit einem technischen Zungenfrequenzmesser genügend genau bestimmt werden kann, ergibt sich die Resonanzbreite nach der Formel

$$a = \frac{1}{2} \frac{1}{f_*} \left(\frac{m'}{t'} + \frac{m''}{t''} \right).$$

Bei einer solchen Messung ergab sich

$$f_* = 49,5.$$

$$\begin{array}{l}
 i_0 = 3,56 \times 10^4 \text{ mm/A} \\
 i_* = 9,9 \times 10^6 \text{ mm/A} \\
 a = 0,88 \% \\
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \frac{m'}{l} = \frac{8}{16,2} \text{ s} \\
 \frac{m''}{l''} = \frac{6}{17,2} \text{ s} \\
 a = 0,85 \%
 \end{array}
 \right.$$

Die Bestimmung der Resonanzbreite aus den beiden Stromempfindlichkeiten ist also hinreichend genau.

In den nebenstehenden beiden Kurvenbildern Fig. 4 und 5 ist für die beiden Nadelgrößen dargestellt:

- i_* die Wechselstromempfindlichkeit in mm/A Spaltbildverbreiterung in Abhängigkeit von der Frequenz f_* ,
- i_0 die Gleichstromempfindlichkeit in mm/A einseitigen Ausschlag bei der gleichen Erregung. Die erregende Gleichstromstärke I_m in den beiden hintereinander geschalteten Spulen ist als besondere Teilung unterhalb der Frequenz eingetragen.

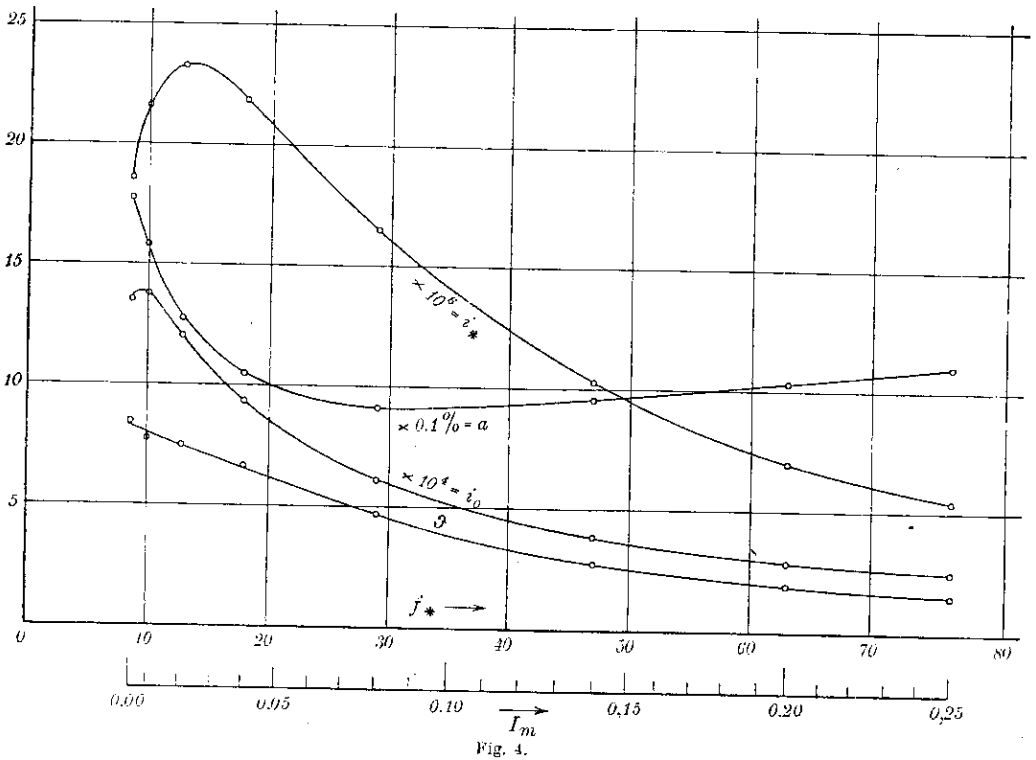


Fig. 4.

Aus diesen gemessenen Größen ist berechnet:

a die Resonanzbreite,

θ die Abklingzeit eines Ausschlages auf den hundertsten Teil in s.

Die Kurven sind von hohen Werten der Gleichstromerregung anfangend aufgenommen¹⁾.

Die Gleichstromempfindlichkeit steigt mit abnehmender Felderregung, es überlagern sich hierbei zwei Wirkungen: Die Abnahme der Empfindlichkeit infolge der Abnahme der Magnetisierung der Nadel und die Zunahme der Empfindlichkeit infolge der

¹⁾ Siehe Abschnitt II letzter Absatz.

Schwächung ihrer Richtkraft; die letztere Wirkung überwiegt, die Richtkraft ist dem Quadrat der Frequenz und, wie aus der doppelten Teilung der Abszisse in Frequenzen und Erregerstromstärken zu sehen ist, auch (abgesehen von schwachen Erregungen) angenähert dem Quadrat der Erregerstromstärke proportional, während die Magnetisierung annähernd der ersten Potenz der Stromstärke proportional ist. Mit dem Verschwinden des Erregerstroms fällt die Gleichstromempfindlichkeit etwas, aber nur wenig, da infolge der Remanenz das Feld nicht verschwindet.

Das Verhalten der Wechselstromempfindlichkeit ist im wesentlichen dem der Gleichstromempfindlichkeit ähnlich. Das Verhältnis von Gleichstromempfindlichkeit zur Wechselstromempfindlichkeit ist gegeben durch das natürliche logarithmische Dämpfungsdekrement. Die Dämpfung setzt sich aus zwei Teilen zusammen, der kleinere Teil rührt von der Luftdämpfung, der größere von der Wirbelstromdämpfung her; letztere hängt ab von der Nadelmagnetisierung. Die Dämpfungskonstante nimmt also mit der Nadelmagnetisierung, d. h. mit der Frequenz ab. Bei unveränderlicher

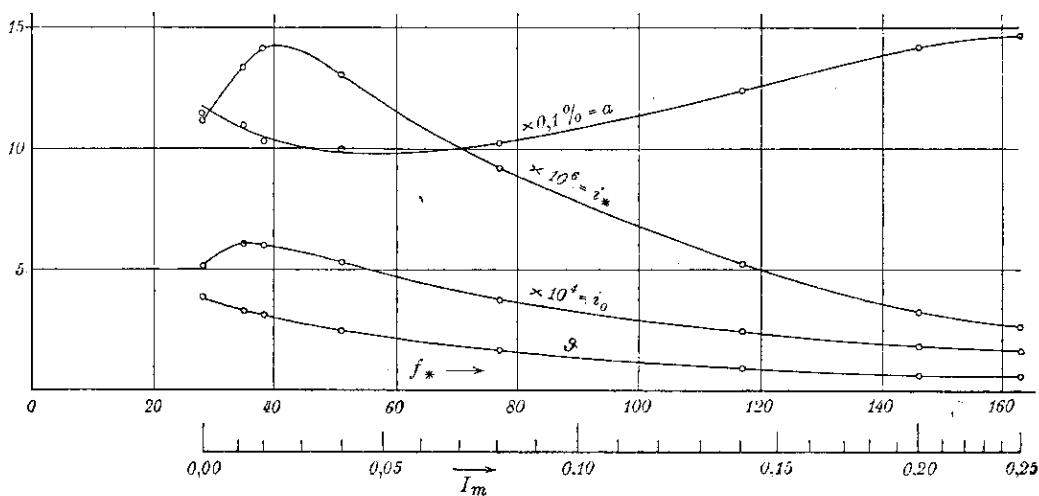


Fig. 5.

Dämpfungskonstante ist das Dämpfungsdekrement umgekehrt proportional der Frequenz, es nimmt zu, wenn letztere abnimmt. Es überlagern sich somit auch hier zwei Wirkungen. Die Resonanzbreite, die dem Dämpfungsdekrement proportional ist, nimmt daher, wie aus den Kurven hervorgeht — von starker Erregung angefangen — zunächst mit der Frequenz ab, steigt dann aber an. Bei dem Einsatz für die niedrigste Frequenz heben sich die beiden Wirkungen in dem Bereich von 20 bis 70 per/s nahezu auf, so daß hier die Resonanzbreite nahezu konstant ist.

Die Bildverbreiterung für 1 Mikroampere bei 50 per/s beträgt bei dem Einsatz für das niedrigste Frequenzbereich 10 mm, bei dem anderen Einsatz 13 mm, die Wechselstromempfindlichkeit ist also die gleiche wie bei unserem Langsaiten-Vibrationsgalvanometer¹⁾.

Bei Kurzschluß des Instrumentes nimmt die Resonanzbreite nur um etwa $14,0\%$ bei 50 per/s zu, sie ist also von dem Widerstande des äußeren Schließungskreises sehr wenig abhängig. Die Spannungsempfindlichkeit bei Kurzschluß beträgt bei 50 per/s und dem Einsatz für das niedrigste Frequenzbereich $6,5 \times 10^4$ mm/V oder eine

¹⁾ Schering & Schmidt, Arch. f. Elektrotechnik 1. S. 254. 1913.

Spannung von $1,5 \times 10^{-5}$ Volt gibt eine Bildverbreiterung von 1 mm. Die vier Spulen sind dabei wie bisher hintereinander geschaltet.

Bei 50 per/s hat das Instrument ohne Einsatz einen Wirkwiderstand von 82 Ω , gegenüber einem Gleichstromwiderstand von 72 Ω , und eine Induktivität von 0,23 H. Wirkwiderstand und Induktivität sind nicht merklich abhängig von der Stärke der Gleichstromerregung. Infolge der großen Luftspalte im Eisenschluß des Gleichstrommagneten ist die Magnetisierungskurve so gestreckt, daß die für das übergelagerte Wechselstromfeld geltende Ganssche reversible Permeabilität von der Gleichstrommagnetisierung nicht merklich abhängig ist.

Bei eingestecktem Einsatz für das niedrigste Frequenzbereich mit einer Resonanzbreite von etwa $1\frac{0}{0}$ und Abstimmung auf 50 per/s betrug der Wirkwiderstand 89 Ω , die Induktivität 0,25 H, der Scheinwiderstand also 118 Ω . Bei Verringerung der Resonanzbreite durch Heranschrauben des Kupferdämpfers steigt der Wirkwiderstand weiter an. Die Stromstärke im Instrument betrug bei diesen Messungen etwa $0,5 \times 10^{-4}$ A.

Der Scheinwiderstand des Instrumentes ist etwa 5 mal größer als der unseres Langsaitengalvanometers. In Brückenarrangements mit kleinen Widerständen ist daher das Instrument, auch wenn man es mit entsprechend parallel geschalteten Spulen benutzt, nicht ganz so empfindlich wie jenes bei gleicher Dämpfung. Die Empfindlichkeit ist aber meist völlig ausreichend. Falls die Empfindlichkeit einmal nicht ausreichen sollte, kann man sie durch Verringerung der Dämpfung steigern; man wird dann allerdings mit einem Wechselstrom größerer Konstanz der Frequenz arbeiten müssen, als sie ein Wechselstromnetz bietet.

IV. Einfluß äußerer Felder.

Während Vibrationsgalvanometer der Spulentype von Streuwechselfeldern der Einstimmfrequenz ziemlich unabhängig sind, ist das bei Instrumenten der Nadelttype nicht der Fall. Der Grad der Beeinflussbarkeit hängt aber von der Bauart ab.

Das Instrument wurde in die Mitte einer Spule aus 414 Windungen von 63 cm Durchmesser gesetzt, so daß die Spulenchse senkrecht auf der Nadel stand. Bei einer Stromstärke von 1 A in der Spule herrscht in ihrer Mitte ein Feld von 8 Gauß. Die Spule wurde mit Wechselstrom von 50 per/s beschickt, das Instrument mit der Nadel für das niedrige Frequenzbereich auf diese Frequenz abgestimmt und der Ausschlag gemessen. Danach ist der Ausschlag berechnet, der sich ergeben würde, wenn das Wechselfeld zwischen den Scheitelwerten von ± 1 Gauß pendelte. Ferner wurde einmal eine gußeiserne Kappe von 2 cm Wandstärke und 10 kg Gewicht, danach ein aus legiertem Blech gewickelter Mantel mit einem Deckel aus gleichem Material von 1,2 cm Eisendicke und 6,2 kg Gewicht über das Instrument gestülpt und die Schutzwirkung ermittelt. Es ergab sich

ohne Schutz	2200 mm/Gauß
mit Gußkappe	180 „
mit legierter Kappe	78 „

Der Einfluß der Streufelder wird also durch die Gußkappe auf den 12. Teil, durch die legierte Kappe auf den 28. Teil herabgesetzt. Die größere Schutzwirkung des legierten Eisens gegenüber dem Gußeisen trotz der geringeren Wandstärke beruht auf der wesentlich größeren Anfangspermeabilität dieses Materials. Leider war es unter den augenblicklichen Umständen nicht möglich, eine Kappe aus Dynamoeisen gegossen zu erhalten.

Derartig starke — nicht wie hier konzentrierte — Streufelder von 1 Gauß würden aber auch Messungen mit einem Vibrationsgalvanometer der Spulentyper wegen der Streuung in die unvermeidlichen Leitungsschleifen unmöglich machen. Die praktisch vorkommenden Streufelder sind im allgemeinen von wesentlich geringerem Betrage. Es konnten z. B. mit dem durch eine Gußkappe geschützten Instrument ohne Störung Stromwandler mit 1000 Ampere geprüft werden, wenn das Instrument etwa 2 m von den Starkstromleitungen entfernt war. Den etwaigen Einfluß einer von der eigenen Meßanordnung herrührenden oder einer fremden konstanten Streuung kann man übrigens stets in einfacher Weise eliminieren, indem man die Galvanometerzuleitungen vertauscht und das Mittel der beiden Brückeneinstellungen nimmt.

V. Erdkapazität.

Um zu vermeiden, daß durch den Anschluß des Gleichstrommagneten an eine Batterie oder an ein Lichtnetz die Erdkapazität des Instrumentes stark vermehrt wird, sind die Polstücke, welche die Wechselstromwicklung tragen, von den Magnetschenkeln durch 1 mm breite Schlitze getrennt. Herr Geheimrat Jäger hatte die Freundlichkeit, die Erdkapazität unseres Instrumentes nach der Maxwellschen Methode mit dem rotierenden Unterbrecher von Giebe zu messen. Das Instrument stand frei im Raum auf einem Holztisch. Statt eine Batterie an den Elektromagneten anzuschließen, wurde das Magnetgestell direkt geerdet.

Die Erdkapazität der Wechselstromwicklung war ohne Zuleitung,

nichts geerdet $5,7 \times 10^{-12}$ F,

Magnetgestell geerdet 13,3 " "

mit 2 m langer frei gespannter Zuleitung,

nichts geerdet $21,0 \times 10^{-12}$ F,

Magnetgestell geerdet 30,9 " "

Der Zuwachs der Erdkapazität durch Erden des Magnetgestells ist nicht schwerwiegend, der Hauptanteil von der sehr kleinen Erdkapazität kommt auf die Zuleitung.