Versuchsvorbereitung P1-13: Galvanometer

Kathrin Ender
Gruppe 10

4. November 2007

Inhaltsverzeichnis

0 Was ist ein Galvanometer?

Ein Galvanometer ist im Prinzip ein Strommessgerät. Es hebt sich jedoch dadurch hervor, dass es besonders empfindlich ist und bereits sehr niedrige Ströme messen kann.

Das Galvanometer besteht aus einer Spule die sich im Feld eines Permanentmagneten befindet. Fließt nun ein Strom durch das Galvanometer, bzw. durch die Spule so entsteht ein durch die Lorentzkraft hervorgerufenes Drehmoment. Die Spule ist außerdem an eine Feder (manchmal auch an einen Faden) gekoppelt, die der durch den Stromfluss hervorgerufenen Drehbewegung entgegenwirkt. So entsteht eine gedämpfte Schwingung, die sich in einer Gleichgewichtslage einpendelt. Die Lage der Gleichgewichtslage ist abhängig von der Stärke des Stroms. Da ein Lichtzeiger an die Spule angeschlossenen ist (bei manchen Galvanometern auch ein einfacher Zeiger) kann man auf einer Skala, durch über Ausschlag die Stromstärke bestimmen. Für das Galvanometer gilt folgende DGL:

$$\ddot{\varphi} + \frac{1}{\Theta}\left(\rho + \frac{G^2}{R_G + R_a}\right)\dot{\varphi} + \frac{D}{\Theta}\varphi = \frac{G}{\Theta}I$$

- D ist die Rückstellkonstante der Feder
- Θ ist das Trägheitsmoment des schwingenden Systems
- G ist die Galvanometerkonstante (sie lässt sich aus der Stärke des permanenten Magnetfeldes, der Fläche der Spule und ihrer Windungszahl berechnen)
- ρ ist die mechanische Dämpfungskonstante
- R_G und R_a sind der Innenwiderstand des Galvanometers und der Widerstand im äußeren Schließungskreis

Das Galvanometer schwingt um eine Gleichgewichtslage genauso ein wie um die Nulllage. Da dieses Problem eine homogene DGL liefert betrachten wir also das Einschwingen um die Nulllage und substituieren:

$$2\beta = \frac{1}{\Theta}\left(\rho + \frac{G^2}{R_G + R_a}\right) \qquad \omega_0^2 = \frac{D}{\Theta}$$

so erhält man die DGL:

$$\ddot{\varphi} + 2\beta\dot{\varphi} + \omega_0^2 = 0$$

Mit dem Lösungsansatz $exp(\lambda t)$ erhält man als Lösung:

$$\lambda_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}$$

Es kann also zwischen drei unterschiedlichen Fällen unterschieden werden:

- Schwingfall ($\beta^2 < \omega_0^2$): tritt bei großen Widerständen R_a auf; das System führt eine gedämpfte Schwingung aus; je größer R_a, desto länger braucht das System bis zur Ruhelage
- Kriechfall ($\beta^2 > \omega_0^2$): tritt bei kleinen Widerständen R_a auf; das System schwingt nicht, sondern kriecht langsam bis zur Ruhelage; je kleiner R_a, desto langsamer ist der Vorgang
- Grenzfall ($\beta^2 = \omega_0^2$): tritt beim Grenzwiderstand $R_{a,gr}$ auf; das System geht schnell bis zur Nulllage zurück.

1 Vorexperimente

Die Vorexperimente sind dazu gedacht, die Empfindlichkeit des Galvanometers und mögliche Fehlerquellen für die späteren Messungen zu verdeutlichen.

1.1 „Körperspannung“

Nimmt man die Zuleitungsstecker des Galvanometers jeweils in eine Hand, so ist zu erwarten, dass das Galvanometer zumindest ein wenig ausschlägt. Dies soll die Empfindlichkeit des Galvanometers verdeutlichen, da offensichtlich sogar die geringen Ströme, die durch statische Aufladung des Körpers bzw. der Kleidung entstehen, messbar sind.

1.2 Drehwiderstand

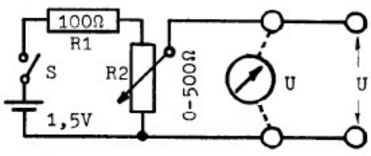
Auch wenn man das Galvanometer an einen Drahtdrehwiderstand anschließt (ohne Spannungsquelle) und diesen dann verändert, ist ein Ausschlag zu erwarten. Zum Verstellen des Drehwiderstandes wird nämlich ein Schleifkontakt verwendet. Verschiebt man diesen so werden durch Reibung Ladungen frei. Den so entstehenden Stromfluss, zeigt das Galvanometer an. Es kommt also nur zum Ausschlag während man den Widerstand verändert, danach sollte der Zeiger wieder auf Null gehen.

1.3 Ruhelage ohne/mit Drehwiderstand

Zwischen der Ruhestellung des Lichtzeigers bei offenen Galvanometer und bei angeschlossenen Drehwiderstand sollte an sich kein Unterschied auftreten. Es kann höchstens passieren, dass das Galvanometer kurz ausschlägt, beim Anschließen des Drehwiderstandes, da durch Reibung wieder Ladungen frei werden könnten.

2 Galvanometer im statischen Zustand

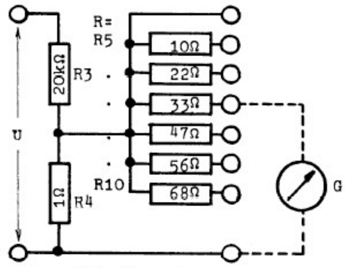
Die Versorgungsspannung U wird in den folgenden Aufgaben, dem Spannungsteiler aus Schaltung 1 entnommen.



Schaltung 1

2.1 Abhängigkeit des Galvanometerausschlag vom Vorwiderstand

Zu messen ist der Galvanometerausschlag, der bei Schaltung 2 auftritt für verschiedene Vorwiderstände R. Aus der durch die Auftragung von α^{-1} gegen R erhaltenen Ausgleichsgerade, kann man den Innenwiderstand des Galvanometers R_G und die statische Stromempfindlichkeit C_I bestimmen. Es gilt $\alpha = C_I I$. Um C_I ausrechnen zu können muss also I der Strom,



Schaltung 2

der durchs Galvanometer fließt berechnet werden. Hierzu berechnen wir zunächst den Gesamtstrom I_{ges}. R_4 kann gegenüber R_3 vernachlässigt werden, so dass gilt: $I_{ges} = \frac{U}{R_3}$. Aus der Knotenregel und aus der Maschenregel erhält man:

$$I_{ges} = I + I' \qquad I \cdot (R_G + R) = I' \cdot R_4$$
$$\Rightarrow I = \frac{U \cdot R_4}{R_3 \cdot (R_4 + R_G + R)}$$
$$\Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \underbrace{\frac{R_3}{R_4 U C_I} \cdot (R_4 + R_G)}_{=A} + \underbrace{\frac{R_3}{R_4 U C_I}}_{=B} \cdot R$$

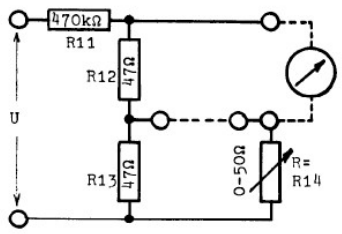
Trägt man also $\frac{1}{\alpha}$ gegen R auf, so erhält man durch Regression eine Gerade mit der Steigung B und dem y-Achsen Abschnitt A. Aus diesen lassen sich die gesuchten Größen ausrechnen:

$$C_I = \frac{R_3}{R_4 U B} \; und \; R_G = \frac{A}{B} - R_4$$

Die Spannungsempfindlichkeit lässt sich berechnen aus: [1]

$$C_U = \frac{\alpha}{U_G} = \frac{C_I}{R_G}$$

2.2 Brückenschaltung zur Bestimmung vom Innenwiderstand



Schaltung 3

Man kann den Innenwiderstand des Galvanometers auch auf andere Weise bestimmen. Mit einem üblichen Ohmmeter wäre dies allerdings nicht möglich, da die Stromstärken für das Galvanometer zu hoch wären[2]. Wir werden ihn daher nun mit Hilfe einer Wheatstoneschen Brücke bestimmen. Die Schaltung 3 stellt eine solche dar. Bei offener Brückendiagonalen, kann man wie in 2.1 eine linearisierte Auftragung finden:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{R_{11}}{U C_I \cdot (R_{12} + R_{13})} \cdot R + \frac{R_{11}}{U C_I \cdot (R_{12} + R_{13})} \cdot (R_{12} + R_{13} + R_G)$$

[1] Wie ergibt sich die statische Spannungsempfindlichkeit des Galvanometers?
[2] Warum kann man R_G nicht mit einem üblichen Ohmmeter messen?

Ist nun die Brücke geschlossen, so wird fast der gesamte Strom der durchs Galvanometer fließt über die Brücke abfließen, anstatt über den Widerstand R_{14}, der deshalb ignoriert werden kann. So erhält man für den Strom I durch das Galvanometer:

$$I = U\frac{R_{12}}{R_{11}\cdot(R_G+R_{12})} \qquad \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{R_{11}\cdot(R_{12}+R_G)}{UC_IR_{12}}$$

Durch Gleichsetzten dieser beiden Geradendarstellungen erhält man:

$$R_G = \frac{R_{12}}{R_{13}}\cdot R \approx R$$

Aus dem Schnittpunkt der beiden Graden lässt sich also R_G berechnen[3].

2.3 Ausschlag in Abhängigkeit von der Spannung

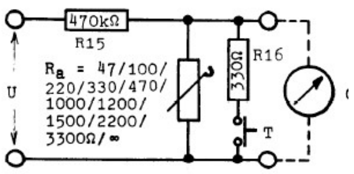
Bei Schaltung 4 soll in Abhängigkeit von der Spannung U für $R_a = \infty$ α gemessen werden. Den zugehörigen Strom I, der durch das Galvanometer fließt, kann man über $I = U/R_{15}$ berechnen. Hierbei würde genähert, dass R_G klein ist gegen R_{15}. Für die Stromempfindlichkeit C_I gilt:

$$C_I = \frac{\alpha}{I}$$

Trägt man also α gegen I auf so erhält man eine Gerade mit der Steigung C_I.

$$\alpha = C_I \cdot I$$

3 Galvanometer im dynamischen Zustand



Schaltung 4

Nun gehen wir vom statischen zum dynamischen Fall über. Der Ausschlag des Galvanometers wird jetzt nicht mehr bei einem konstanten Strom gemessen, stattdessen betrachtet man sein Verhalten nach dem Ausschalten des Stroms. Je nach Stärke der Dämpfung kommt es zu verschiedenen Schwingfällen, wie zu Beginn beschrieben (Schwingfall, Grenzfall, Kriechfall).

Das Dämpfungsverhältnis $k = \alpha_{n-1}/\alpha_n$ und die Periodendauer T ist in Schaltung 4 in Abhängigkeit vom Außenwiderstand R_a zu bestimmen, wobei um ein besseres Ergebnis zu erhalten über möglichst viele Schwingungen gemessen werden soll. Um den Einschwingvorgang zu beschleunigen kann man R_{16}, der nahe beim Widerstand für den Grenzfall liegt, über den Tastschalter dazuschalten [4]. Aus den Messwerten und den daraus errechneten Größen sollen folgende Größen bestimmt werden:

- Die Abklingkonstante

$$\beta_{R_a} = \frac{lnk}{T}$$

[3] Wieso ergibt sich bei Aufgabe 2.2 R_G als Schnittpunkt-R?

[4] Wozu könnte wohl der in Schaltung 4 zum Galvanometer parallelschaltbare 330Ω-Widerstand dienen?

Sie kann auch in Abhängigkeit von den Galvanometer-Kenngrößen G (Galvanometerkonstante), Θ (Trägheitsmoment des schwingenden Systems) und D (Rückstellkonstante der Trosionsaufhängung) dargestellt werden.

$$\beta = \frac{1}{2\Theta}\left(\rho + \frac{G^2}{R_G + R_a}\right) = \beta_\infty + \frac{G^2}{2\Theta \cdot (R_G + R_a)}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{\beta_{R_a} - \beta_\infty} = \underbrace{\frac{2\Theta R_G}{G^2}}_{A} + \underbrace{\frac{2\Theta}{G^2}}_{B} \cdot R_a$$

Trägt man also $1/(\beta_{R_a - \beta_\infty})$ gegen R_a auf so erhält man eine Geradengleichung.

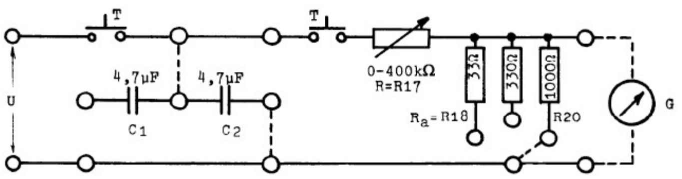
- Die Frequenz des ungedämpften Galvanometers

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_\infty^2 + \beta_\infty^2} = \sqrt{(2\pi/T_\infty)^2 + \beta_\infty^2}$$

- Der Außenwiderstand $R_{a,gr}$ für Grenzdämpfung. Dieser lässt sich aus der erstellten Regressionsgeraden ablesen, da im Grenzfall $\omega_0 = \beta_{R_a}$ gilt. Man muss also nur ablesen an welcher Stelle R_a den Wert $(\omega_0 - \beta_\infty)^{-1}$annimmt.
- Die Galvanometer-Kenngrößen Θ, G und D. Sie lassen sich aus $B = 2\Theta/G^2$; $\omega_0^2 = D/\Theta$ und $C_I' = G/D$ berechnen, wobei $C_I' = C_I/(2r)$.

$$\Theta = \frac{2}{BC_I'^2\omega_0^4} \qquad D = \frac{2}{BC_I'^2\omega_0^2} \qquad G = \frac{2}{BC_I'\omega_0^2}$$

4 Ballistisches Galvanometer



Schaltung 5

Es soll das Verhalten des Galvanometers bei kurzen Stromstößen untersucht werden. Diese Stromstöße werden durch Entladen eines Kondensators erzeugt (Schaltung 5). Da sich ein Kondensator aber exponentiell entlädt, also erst bei $t \to \infty$ vollständig entladen ist, rechnen wir mit $T_Q = 3RC$ als Stromstoßdauer. Nach dieser Zeit ist der Kondensator etwa zu 95% entladen. Nun soll die Stromstoßempfindlichkeit des Galvanometers gemessen werden bei:

- $R_a = \infty$, ballistische Empfindlichkeit bei minimaler Dämpfung
- $R_a = 1000\Omega$, ballistische Empfindlichkeit im Schwingfall
- $R_a = 330\Omega$, ballistische Empfindlichkeit nahe der Grenzdämpfung
- $R_a = 33\Omega$, fluxmetrische Empfindlichkeit im Kriechfall

Die ballistische Empfindlichkeit berechnet sich aus:

$$C_b = \frac{\alpha_{max}}{2rQ_G} \qquad Q_G = \frac{CU}{1+\frac{R_G}{R_a}} \qquad \frac{\alpha_{max}}{2r} = \varphi_{max}$$

Man muss beachten, dass nur die Ladung, die durch das Galvanometer fließt von Interesse ist und nicht die, die über R_a abfließt. Diese Ergebnisse sollen mit den theoretischen Werten verglichen werden, für die gilt:

- Kriechfall:
$$\varphi_{max} = \frac{R_G + R_a}{G} Q_G \Rightarrow C_b = \frac{R_G + R_a}{G}$$
- Grenzfall:
$$\varphi_{max} = \frac{GQ_G}{\Theta\omega_0 e} \Rightarrow C_b = \frac{G}{\Theta\omega_0 e}$$
- Schwingfall:
$$\varphi_{max} = \frac{GQ_G}{\Theta\omega_0} \Rightarrow C_b = \frac{G}{\Theta\omega_0}$$

Die Kenngrößen würden im vorherigen Versuch ermittelt.

Zu diesem Versuch des ballistischen Galvanometers kann man Parallelen zu ballistischen Versuchen in der Mechanik ziehen. Ein Beispiel für solch einen mechanischen Versuch ist der Schuss in den Pendelsack. Dabei ist man über den Ausschlag des Sackes bei Beschuss mit einem Geschoss in der Lage über die Energie- und Impulserhaltung eine Aussage über die Einschlagsgeschwindigkeit zu treffen. Bei unserem Versuch kann man über den Ausschlag etwas über die durch das Galvanometer geflossene Ladungsmenge aussagen[5].

[5]Welchen Sinn haben ballistische Messungen? Vergleichen Sie z.B, mit dem Mechanik-Versuch „Schuss in einen Pendelsack“.