



SS/WS 20.11./...12

Praktikum: (P1/P2) (Mo/Di/Mi/Do) Gruppe-Nr: 10

Name: Leonhard Vorname: Tobias

Name: Vetter Vorname: Andreas

Versuch: Galvanometer (mit/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Stefan Heitz Durchgeführt am: 8.11.11

Abgabe am: 15.11.11

Rückgabe am:

Begründung:

2. Abgabe am:

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / ~~nein~~

Datum: 16.11.11

Handzeichen: SA

Bemerkungen:

- Die Einheit "Wb" aus eurem Kopf streichen !!!
- Auf geltende Ziffern achten
- super Protokoll



Obwohl es heute Geräte gibt, die bei mindestens gleicher Leistung eine viel bequemere Ablesung ermöglichen (z.B. volltransistorisierte Digitalanzeigergeräte), ist das Galvanometer besonders im Praktikum ein sehr nützliches Messinstrument. Es ist besonders geeignet, weil es ein überschaubares und leicht verständliches Gerät ist, an dem viele grundlegende physikalische Effekte elektrischer und mechanischer Natur auftreten. So zum Beispiel Kraftwirkungen auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld, Induktionserscheinungen und Schwingungsvorgänge. Beachten Sie bitte bei allen Aufgabenteilen, dass das Galvanometer äußerst empfindlich und daher sorgsam zu behandeln ist.

Schaltungen bitte sorgfältig kontrollieren. Stets mit kleinster angelegter Spannung beginnen (Regler R2 in Schaltung 1). In keinem Fall wird das Galvanometer direkt an den Ausgang von Schaltung 1 angeschlossen!

Wegen der unvermeidlichen Nullpunktsdrift des Galvanometers muss die Null-Lage häufig kontrolliert werden. (Besser notieren oder korrigieren?) Gestellte Fragen sollen schon bei der Vorbereitung beantwortet werden. Bei der Auswertung nicht die Diskussion vernachlässigen, z.B. zu unterschiedlichen Ergebnissen bei verschiedenen Messverfahren.

Aufgaben:

1.) Machen Sie zunächst einige Vorexperimente, die Ihnen die hohe Galvanometerempfindlichkeit und mögliche Ursachen für Fehlmessungen vor Augen führen.

1.1 Nehmen Sie einen Zuleitungsbananenstecker in die linke, den anderen in die rechte Hand, und beobachten Sie den Lichtzeiger-Ausschlag des angeschlossenen Galvanometers.

1.2 Schließen Sie das Galvanometer (ohne Spannungsquelle!) nur an einen Drahtdrehwiderstand (z.B. 100Ω) an und beobachten Sie den Lichtzeiger, während Sie den Schleifer des Drehwiderstandes hin- und herbewegen.

1.3 Vergleichen Sie die Ruhstellung des Lichtzeigers bei offenem Galvanometer mit der bei angeschlossenem Drehwiderstand.

Versuchen Sie, die beobachteten Effekte zu erklären.

2.) Entnehmen Sie die Versorgungsspannung U für die folgenden Aufgaben einem Spannungsteiler, der in Schaltung 1 dargestellt ist. Beginnen Sie bei allen Aufgaben mit kleinsten U -Werten und steigern Sie die Spannung nur bei Beobachtung des Lichtzeigers. Stellen Sie den Nullpunkt normalerweise mittels der verschieblichen Skala ein. Falls ein Drehen am Justierknopf notwendig sein sollte, dann diesen nur um extrem kleine Winkel verdrehen!

2.1 Messen Sie in Schaltung 2 den Galvanometerausschlag α in Abhängigkeit vom Vorwiderstand R bei geeigneter Spannung U . Tragen Sie α^{-1} über R auf, berechnen Sie die Ausgleichsgerade durch die Messpunkte und bestimmen Sie aus deren Parametern: -(a) den Galvanometer-Innenwiderstand R_G und -(b) die statische Stromempfindlichkeit C_I (in m/A, nicht in °/A o.ä.)

2.2 Messen Sie in Schaltung 3 den Galvanometerausschlag α in Abhängigkeit von R : -(a) bei offener Brückendiagonale und -(b) bei kurzgeschlossener Brückendiagonale.

Tragen Sie für beide Fälle α^{-1} über R auf, bestimmen Sie den Schnittpunkt und damit den Innenwiderstand des Galvanometers R_G .

2.3 Messen Sie in Schaltung 4 bei $R_a = \infty$ den Ausschlag α in Abhängigkeit von der Spannung U , berechnen Sie die zugehörigen Ströme I und tragen Sie α über I auf. Berechnen Sie die Ausgleichsgerade durch die Messpunkte und damit die statische Stromempfindlichkeit C_I .

3.) Messen Sie in Schaltung 4 in Abhängigkeit vom Außenwiderstand R_a (schaltbar; $1k\Omega$ bis ∞ wählen) beim Rückschwingen um den Nullpunkt: -(a) das Dämpfungsverhältnis α_{n-1} / α_n und -(b) die Schwingungsdauer T . Nutzen Sie dabei jeweils optimal viele Schwingungen aus.

Ermitteln Sie folgende Größen:

- (a) Die **Abklingkonstante** β_{Ra} und tragen Sie $(\beta_{Ra} - \beta_{\infty})^{-1}$ über R_a auf. Ein zusätzlicher Punkt in diesem Diagramm ist $(-R_G, 0)$. Berechnen Sie die Ausgleichsgerade durch die Punkte.
- (b) Die **Frequenz des ungedämpften Galvanometers**, $\omega_0 = \sqrt{(2\pi / T_{\infty})^2 + \beta_{\infty}^2}$.
- (c) Den **Außenwiderstand $R_{a,gr}$** für Grenzdämpfung, der bei $(\omega_0 - \beta_{\infty})^{-1}$ abzulesen ist. Verifizieren Sie mit Hilfe der Schaltung 4, dass etwa bei diesem Widerstand der Grenzfall vorliegt.
- (d) Die **Galvanometer-Kenngrößen G , Θ und D** mit Hilfe der drei Gleichungen $m = 2\Theta / G^2$; $\omega_0^2 = D / \Theta$; $C_I' = G / D$ (m = Steigung der Geraden; G = Galvanometerkonstante; Θ = Trägheitsmoment des schwingenden Systems; D = Rückstellkonstante der Torsionsaufhängung.) Dabei ist zu beachten, dass C_I' als Drehwinkel im Bogenmaß von Spule bzw. Drehspiegel, geteilt durch den entsprechenden Strom, genommen werden muss, während C_I bei den Aufgaben 2.1 und 2.3 auch anders angegeben wurde.

4.) Bei den Aufgaben 2.1 und 2.3 (C_I -Bestimmung) floss der Messstrom mindestens solange, bis sich die neue Gleichgewichtslage eingestellt hatte. Jetzt wird die Wirkung von kürzeren Stromstößen untersucht. Der Einfachheit wegen werden die Stromstöße $\int I dt = Q = C \cdot U$ durch Entladung eines Kondensators erzeugt (Schaltung 5), obwohl der exponentielle Stromverlauf keine scharfe Angabe der Stromstoßdauer T_Q erlaubt. Es ist aber vernünftig, z.B. die Zeit $T_Q = 3RC$ anzugeben, nach der etwa 95% der Ladung abgeflossen ist. Da die Stromstoßquelle den Innenwiderstand ∞ hat, müssen bei Messungen mit größeren Dämpfungen als β_{∞} Widerstände zum Galvanometer parallel geschaltet werden. Dann ist $Q_G < C \cdot U$ zu beachten, denn die Empfindlichkeiten sind auf Q_G , den über das Galvanometer abfließenden Ladungsanteil, zu beziehen.

4.1 Bestimmen Sie bei sehr kurzer Stromstoßdauer T_Q (R klein) die Stromstoßempfindlichkeiten des Galvanometers, mit $R_a = \infty$ (ballistische Empfindlichkeit bei minimaler Dämpfung), mit $R_a = 1000\Omega$, mit $R_a = 330\Omega$ (ballistische Empfindlichkeit nahe der Grenzdämpfung) sowie mit $R_a = 33\Omega$ ('fluxmetrische Empfindlichkeit' im Kriechfall).

4.2 Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den theoretischen Werten, die Sie unter Benutzung der in den Aufgaben 2 und 3 ermittelten Kenngrößen G , R_G , Θ , ω_0 sowie R_a berechnen können.

4.3 Überzeugen Sie sich durch etliche Messungen mit größeren R-Werten davon, dass nur für $T_Q \ll T$ die Stromstoßempfindlichkeiten nahezu unabhängig von T_Q sind.

Fragen:

Warum kann man R_G nicht mit einem der üblichen Ohmmeter messen?

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

Wie ergibt sich die statische Spannungsempfindlichkeit C_U des Galvanometers?

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

Welchen Sinn haben ballistische Messungen? Vergleichen Sie z.B. mit dem Mechanik-Versuch 'Schuss in einen Pendel-Sandsack'.

Zubehör:

Spiegelgalvanometer [$T \approx 5s$; $R_G \approx 30\Omega$; $C_I \approx 10^5$ rad/A; Abstand Spiegel-Skala $A = (250 \pm 3)mm$]

In mehreren Schaltkästchen die Schaltungen 1 bis 5 mit Bananenbuchsen [Liste für Messwerte der Bauelemente beachten! In Schaltung 5 ist zusätzlich zu R18 bis R20 noch R21 (500Ω , regelbar) vorhanden.]

Drehspulmessinstrument (1% SKE) mit Vorwiderständen für 0,25V; 1V und 2,5V;

zusätzliche Geräte für Sonderaufgaben (z.B. Induktionsspulen und Rechteckimpuls-Generator).

Literatur:

Westphal: Physikalisches Praktikum

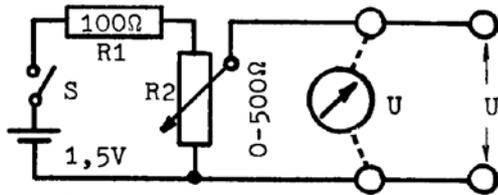
Schlosser, Winterling: Galvanometer

Walcher: Praktikum der Physik

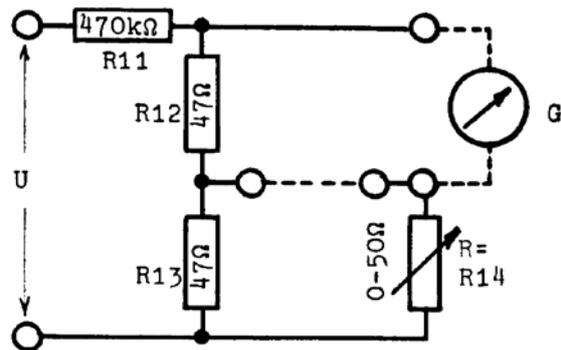
Mayer, Moerder: Spiegelgalvanometer und Lichtzeigerinstrumente

Beljankin et al.: Physikalisches Praktikum

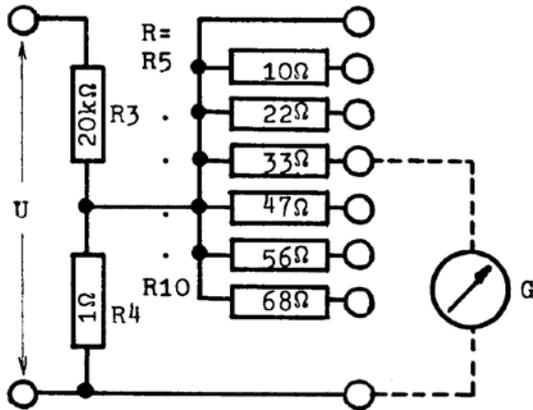
Jüngst: Vorbereitungshilfe 'Galvanometerformeln' (1985)



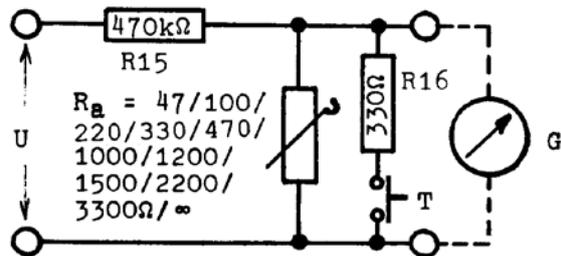
Schaltung 1



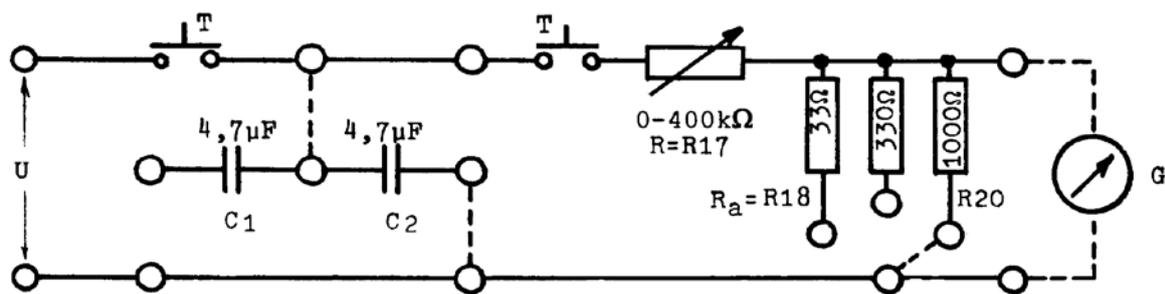
Schaltung 3



Schaltung 2



Schaltung 4



Schaltung 5

Die als Schaltkästchen mit Bananenbuchsen vorhandenen Schaltungen 1 bis 5

Messwerte ($\pm 1,5\%$) der Widerstände und Kapazitäten in den Schaltungen zu den Galvanometerversuchen, bei denen in den Skizzen nur Richtwerte angegeben sind:

Schaltung	Bezeichnung	Richtwert	Wert bei P1-13	Wert bei P1-14	Wert bei P1-15
2	R3	20k	19,95k	14,9k	14,9k
2	R4	1	1,04	0,70	0,70
2	R5	10	10,1	10,1	10,0
2	R6	22	20,4	22,0	21,2
2	R7	33	29,8	33,1	33,0
2	R8	47	38,8	47,1	46,8
2	R9	56	50,3	55,8	56,0
2	R10	68	61,8	67,6	67,6
3	R11	470k	474k	477k	479k
3	R12	47	43,0	47,0	47,3
3	R13	47	43,0	47,0	46,9
3	R14	0-50	0-49,8	0-50,0	0-49,1
4	R15	470k	506k	474k	474k
4	Ra-1	47	47,8	47,0	47,0
4	Ra-2	100	99,8	99,0	100
4	Ra-3	220	221	221	219
4	Ra-4	330	329	331	329
4	Ra-5	470	477	472	470
4	Ra-6	1000	1026	1001	1000
4	Ra-7	1200	1484	1194	1200
4	Ra-8	1500	1986	1500	1500
4	Ra-9	2200	2500	2260	2240
4	Ra-10	3300	3010	3300	3300
5	C1	4,7□	4,12□	5,45□	5,30□
5	C2	4,7□	4,12□	5,52□	5,15□
5	R18	33	33,0	33,0	32,8
5	R19	330	341	332	334
5	R20	1000	999	999	998

Verwenden Sie bei Ihrer Versuchsbeschreibung möglichst die vorgegebenen Bezeichnungen der Bauteile.

Versuchsvorbereitung **Galvanometer**

Tobias Leonhard Gruppe Di-10, Matrikelnummer 1604726

8. November 2011

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen des Versuchs	8
2 Aufgabe 1: Vorexperimente	10
3 Aufgabe 2	10
4 Aufgabe 3	13
5 Aufgabe 4	15
6 Literatur	16
7 Grundlagen des Versuchs	18
8 Aufgabe 1: Vorexperimente	21
9 Aufgabe 2: Messungen in Schaltung 2-4	21
10 Aufgabe 3: Ermittlung charakteristischer Größen	24
11 Aufgabe 4: Wirkung von Stromstößen	26
12 Literatur	27
13 Aufgabe 1: Vorexperimente	33
14 Aufgabe 2: Messungen in Schaltung 2-4	33
15 Aufgabe 3: Ermittlung charakteristischer Größen	40
16 Aufgabe 4: Wirkung von Stromstößen	44
17 Literatur	47

1 Grundlagen des Versuchs

Ein Galvanometer mit Spiegelablesung besteht aus einem permanenten Magneten und einer drehbar gelagerten Spule mit Eisenkern. Fließt durch die Spule ein Strom, bewirkt die Lorentzkraft ein Drehmoment auf die Spule. Diese ist an einem dünnen Draht, bzw. einer Feder befestigt, die für das rücktreibende Drehmoment zur Ruhelage aufkommt. Ein Spiegel projiziert die Auslenkung dann auf einen Schirm; es ist darauf zu achten, dass sich dadurch der Auslenkwinkel verdoppelt (Reflexion). Ein Galvanometer eignet sich also hervorragend, um Schwingungen zu untersuchen, die elektrisch erzeugt werden und dann in mechanische umgewandelt werden. Die Schwingungen, die das System ausführt, lassen sich mit folgender Differentialgleichung beschreiben:

$$\Theta\ddot{\varphi}(t) + \varrho\dot{\varphi} + D\varphi = GI_{ges} \quad (1)$$

Dabei ist $\Theta\ddot{\varphi}$ das Trägheitsdrehmoment, $\varrho\dot{\varphi}$ das Dämpfungsdrehmoment (ohne elektrische Dämpfung), $D\varphi$ das Torsionsdrehmoment, GI_{ges} das von außen erregende elektromagnetische Drehmoment der Lorentzkraft.

Der Strom I_{ges} ist die Summe von Messtrom $I_{außen} = \frac{U}{R_G + R_a}$ und dem induzierten Strom in der Spule $I_{ind} = \frac{U_{ind}}{R_G + R_a}$. Dieser Induktionsstrom wirkt seiner Ursache entgegen und kann so beschrieben werden:

$$U_{ind} = -n \cdot A \cdot B \cdot \dot{\varphi} = -G \cdot \dot{\varphi} \quad (2)$$

daraus folgt:

$$I_I = \frac{U_{ind}}{R_a + R_G} = -\frac{G}{R_a + R_G} \cdot \dot{\varphi} \quad (3)$$

Nimmt man in die Gleichung den Induktionsstrom der Drehspule mit auf, verändert sich das System zu:

$$\ddot{\varphi} + \frac{1}{\Theta} \left(\varrho + \frac{G^2}{R_G + R_a} \right) \dot{\varphi} + \frac{D}{\Theta} \varphi = \frac{G}{\Theta} I \quad (4)$$

G ist die Galvanometerkonstante, R_G der Galvanometerwiderstand, R_a der Widerstand im äußeren Schließungskreis, Θ das Trägheitsmoment der Spule, ϱ die mechanische Dämpfungskonstante (ohne elektrische Dämpfung) und D die Rückstellkonstante der Torsionsaufhängung.

Diese Darstellung lässt sich noch zu

$$\ddot{\varphi} + 2\beta\dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = \frac{G}{\Theta} I \quad (5)$$

vereinfacht umschreiben.

$$(\omega_0^2 = \frac{D}{\Theta}, 2\beta = \frac{1}{\Theta} (\varrho + \frac{G^2}{R_G + R_a}))$$

Das System des Galvanometers hat also einerseits eine mechanische Dämpfung durch die Feder, bzw. den Luftwiderstand, andererseits auch einen Anteil an elektrodynamischer Dämpfung durch den Induktionsstrom.

Ungedämpfte (gedämpfte) Schwingung

Gelöst wird die Gleichung mit dem Ansatz $\varphi = ce^{\lambda t}$ bei $\frac{G}{\Theta}I = 0$ und hat die Lösung

$$\lambda_{1,2} = \beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \quad (6)$$

Es treten drei mögliche Lösungen auf:

- Schwingfall: $\beta < \omega_0$, d.h. die Lösung ist komplex. Das System schwingt mit schwacher Dämpfung und wird beschrieben durch:

$$\varphi(t) = e^{-\beta t} \cdot (A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t}) \quad (7)$$

oder

$$\varphi(t) = e^{-\beta t} C \cos(\omega t + \psi) \quad (8)$$

- Kriechfall: $\beta > \omega_0$, die Lösung ist reel:

$$\varphi(t) = e^{-\beta t} (C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t}) \quad (9)$$

Das System ist stark gedämpft und hat maximal einen Durchgang durch die Ruhelage.

- Aperiodischer Grenzfall: $\beta = \omega_0$, die Auslenkung kehrt am schnellsten in die Ruhelage zurück ohne zu schwingen.

$$\varphi(t) = (D + Et)e^{-\beta t} \quad (10)$$

Erzwungene Schwingungen

Ist $\frac{G}{\Theta}I \neq 0$ erhält man die Lösung der Gleichung durch Addition der partikulären Lösung zur homogenen:

$$\varphi(t) = \varphi_{hom}(t) + \varphi_{part}(t) = A_1 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \psi) + A_2 \cos(\Omega t + \Psi) \quad (11)$$

$(A_1, A_2, C_1, C_2, D, E)$ aus Anfangsbedingungen.

Durch den äußeren Schließkreis kann die Dämpfung β geregelt werden.

2 Aufgabe 1: Vorexperimente

Um sich mit der Apparatur und der hohen Empfindlichkeit des Galvanometers vertraut zu machen sollen hier einige Versuche durchgeführt und erklärt werden.

Kurzschluss durch den Körper

Schließt man das System mit dem Körper kurz, indem man beide Zuleitungsbananenstecker mit den Händen verbindet, muss man am Galvanometer einen Ausschlag feststellen. Dieser geht zum einen auf die statische Aufladung des Körpers zurück, zum anderen auf Ionenverschiebungen bei Stoffwechselfvorgängen und Nervenimpulsen.

Anschluss an Drehwiderstand

Durch Drehen am Drehwiderstand kommt es durch Reibung zur Ladungstrennung und damit zu Strömen, die an der Apparatur zu beobachten sind. Es hat allerdings keine Auswirkungen auf die Position des Lichtzeigers, ob der Drehwiderstand angeschlossen ist oder nicht - die Auslenkungen werden durch Ladungsverschiebung oder -trennung hervorgerufen.

3 Aufgabe 2

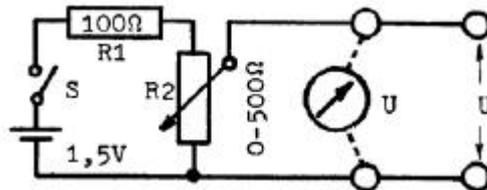


Abbildung 1: Schaltung 1 mit Potentiometer

Mit dem Spannungsteiler (Potentiometer) wird die Spannung U in Schaltung 1 von der Spannungsquelle abgegriffen und von 0V-1,25V geregelt. Schaltung 1 wird in den folgenden Versuchen den anderen Schaltungen vorgeschaltet.

Schaltung 2

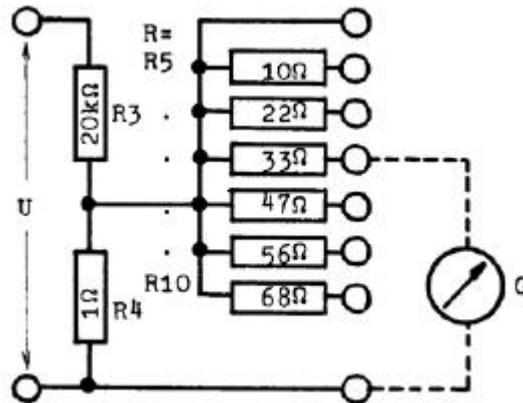


Abbildung 2: Schaltung 2

Mit der Kirchhoffschen Knoten- und Maschenregel lassen sich die nachfolgenden Beziehungen aufstellen:

$$I_{ges} = \frac{U}{R} = U \cdot \left(\frac{1}{R_3 + R_4} \right) \approx \frac{U}{R_3} \quad (12)$$

, da $R_3 \gg R_4$

$$I_G + I_{R_4} = I_{ges} \quad (13)$$

$$(R + R_G)I_G - R_4 I_4 = 0 \quad (14)$$

Daraus erhält man für I_G

$$I_G = \frac{UR_4}{R_3(R + R_G + R_4)} \quad (15)$$

Möchte man nun den Galvanometerausschlag α ermitteln, untersucht man den statischen Fall, d.h.

$\ddot{\varphi} = \dot{\varphi} = 0$ und $\varphi = \alpha$. Die Differentialgleichung wird dann zu :

$$D\alpha = GI_G \Rightarrow \alpha = \frac{GI_G}{D} = C_I I_G \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{C_I I_G} \quad (16)$$

mit $C_I = \frac{G}{D}$, statische Stromempfindlichkeit.

Dieses Ergebnis macht es nun einfach die Ausgleichsgerade von α^{-1} über R zu bestimmen. Dazu setzt man das Ergebnis aus (15) in (16):

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{R_3(R + R_G + R_4)}{R_4 U C_I} = \frac{R_3}{R_4 U C_I} R + \frac{R_3(R_G + R_4)}{R_4 U C_I} \quad (17)$$

$\frac{R_3}{R_4 U C_I}$: Steigung m der Geraden $\frac{R_3(R_G + R_4)}{R_4 U C_I}$: Achsenabschnitt c der Geraden
 Aus dieser Geraden sollen nun durch lineare Regression der Galvanometer-
 Innenwiderstand R_G und die statische Stromempfindlichkeit C_I ermittelt
 werden. Es gilt:

$$R_G = \frac{c}{m} - R_4 \quad (18)$$

und

$$C_I = \frac{R_3}{m R_4 U} \quad (19)$$

Zum Vergleich können die angegebenen Werte herangezogen werden $R_G \approx 30 \Omega$
 und $C_I \approx 10^5 \text{ rad/A}$

R_G kann nicht mit einem üblichen Ohmmeter gemessen werden, weil dazu
 Stromstärken benötigt werden, die über die Grenzstromstärke des Galvano-
 meters hinausgehen und diesen schädigen (Antwort zu Frage 1).

Die statische Spannungsempfindlichkeit C_U ergibt sich aus:

$$C_U = \frac{\alpha}{U} = \frac{C_I}{R_G} \quad (20)$$

(Antwort auf Frage 3)

Schaltung 3

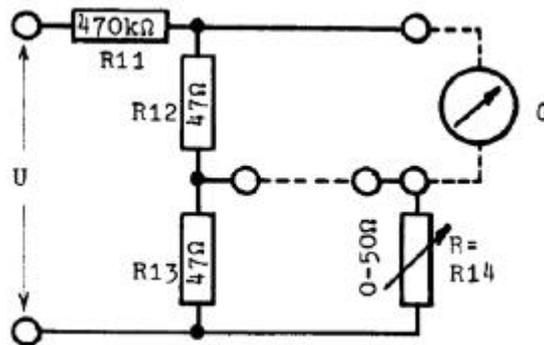


Abbildung 3: Schaltung 3

Schaltung 1 ist eine Wheatstone-Brückenschaltung, mit der nun der Gal-
 vanometerausschlag α bei offener und kurzgeschlossener Brückendiagonalen
 gemessen werden soll. Trägt man für beide Fälle α^{-1} über R auf und schnei-
 det die beiden Geraden, erhält man den Innenwiderstand des Galvanometers
 R_G . Für die offene Brücke gilt:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{R_{11}(R + R_G + R_{12} + R_{13})}{R_{12} + R_{13} \cdot U C_I} \quad (21)$$

mit $R_{12} = R_{13}$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{R_{11}(R + R_G + 2R_{12})}{2R_{12}UC_I} \quad (22)$$

und für die geschlossene:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{R_{11}(R_G + R_{12})}{R_{12}UC_I} \quad (23)$$

Setzt man zur Bestimmung des Schnittpunktes die Geradengleichungen gleich, erhält man das Ergebnis:

$$R = R_G \quad (24)$$

Schaltung 4

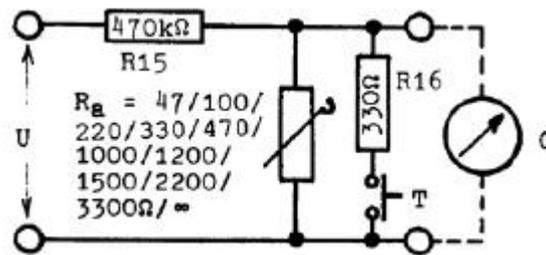


Abbildung 4: Schaltung 4

In der Schaltung kann R_a verschiedene Werte annehmen, R_{16} dient dazu, den Schwingvorgang schnell einzudämpfen (Antwort auf Frage 2). Ziel ist es bei $R_a = \infty$ den Ausschlag α in Abhängigkeit von U und die zugehörigen Ströme I zu messen.

$$I_G = \frac{U}{R_{15} + R_G} = \frac{U}{R_{15}} \quad (25)$$

mit $R_{15} \gg R_G$, kann der Strom I_G berechnet werden.

Aus der Geradengleichung $\alpha = C_I \cdot I_G$ kann direkt die statische Stromempfindlichkeit C_I abgelesen werden. (C_I entspricht der Steigung)

4 Aufgabe 3

Wir verwenden weiterhin die Schaltung 4, um das Dämpfungsverhältnis $\frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}$ und die Schwingungsdauer T (in Abhängigkeit von R_a) beim Rückschwingen durch den Nullpunkt zu bestimmen. Es ist zu beachten, dass ausreichend viele Schwingungen untersucht werden, damit man ein aussagekräftige Ergebnis erhält. Man soll folgende Größen ermitteln:

- Die Abklingkonstante β_{Ra} wird durch

$$\beta_{Ra} = \ln \frac{k}{T} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}\right)}{T} \quad (26)$$

und die Gleichung (s.o)

$$\beta_{Ra} = \frac{1}{2\Theta} \left(\varrho + \frac{G^2}{R_G + R_a} \right) = \beta_\infty + \frac{G^2}{2\Theta(R_G + R_a)} \quad (27)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\beta_{Ra} - \beta_\infty} = \frac{2\Theta}{G^2} \cdot R_a + \frac{2\Theta R_G}{G^2} \quad (28)$$

bestimmt. Damit erhalten wir eine Geradengleichung mit der Steigung $m_{Ra} = \frac{2\Theta}{G^2}$ und dem Achsenabschnitt $c = \frac{2\Theta R_G}{G^2}$ und können wie in der Aufgabe gefordert $(\beta_{Ra} - \beta_\infty)^{-1}$ über R_a auftragen.

- Die Frequenz des ungedämpften Galvanometers:

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{T_\infty}\right)^2 + \beta_\infty^2} \quad (29)$$

- Der Außenwiderstand $R_{a,gr}$ für die Grenzdämpfung ($\beta_{Ra} = \omega_0$). Das tritt ein beim aperiodischen Grenzfall und man kann den Punkt an der Geraden $(\beta_{Ra} - \beta_\infty)^{-1}$, wo $\beta_{Ra} = \omega_0$ ist, ablesen. Die Abzisse dieses Punktes ist der gesuchte Wert für $R_{a,grenz}$.
- Die Galvanometer-Kerngrößen G , Θ und D
Diese Größen lassen sich unter den drei Gleichungen beschreiben:

$$m = \frac{2\Theta}{G^2} \quad (30)$$

$$\omega_0^2 = \frac{D}{\Theta} \quad (31)$$

$$C'_I = \frac{G}{D} \quad (32)$$

hier ist $C'_I = \frac{\text{Drehwinkel}}{\text{Strom}}$.

Mit der Geradengleichung aus (28) sind die Kerngrößen:

$$G = \frac{2}{m R_a \omega_0^2 C'_I} \quad (33)$$

$$\Theta = \frac{2}{m R_a \omega_0^4 C_I'^2} \quad (34)$$

$$D = \frac{2}{m R_a \omega_0^2 C_I'^2} \quad (35)$$

5 Aufgabe 4

In diesem Versuch wird die Auswirkung von kurzen Stromstößen untersucht. Das System hat in diesem Fall keine Gelegenheit sich einzuschwingen. Durch das Entladen des Kondensators ist es möglich, diese erforderli-

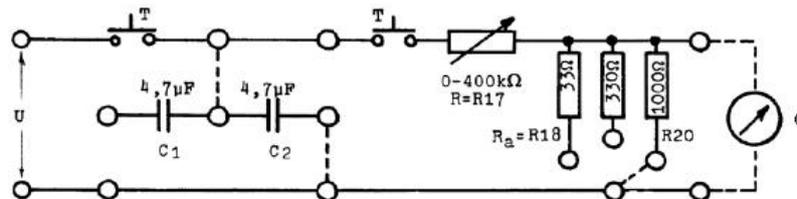


Abbildung 5: Schaltung 5 mit Kondensator

chen Stromstöße zu erzeugen, allerdings muss die Stromstoßdauer geschickt gewählt werden, weil der exponentielle Stromverlauf keine genaue Aussage darüber erlaubt. Bei $T_Q = 3RC$ ist 95% der Ladung abgeflossen. Es gilt noch zu beachten, dass aufgrund des hohen Innenwiderstands der Stromstoßquelle (von ∞), bei Messungen mit größeren Dämpfungen Widerstände parallel dazu geschaltet werden müssen. Die Ladung muss man dabei auf den Galvanometeranteil beziehen, also $Q_G < C \cdot U$.

Bestimmung der Stromstoßempfindlichkeiten bei kurzer Stromstoßdauer

Die Stromstoßempfindlichkeit ist definiert als:

$$C_b = \frac{\alpha}{Q_G} = \frac{\alpha}{U_G C} = \frac{R_G + R_a}{R_a} \cdot \frac{\alpha}{UC} \quad (36)$$

Wir betrachten unterschiedliche Dämpfungen:

- $R_a = \infty$ ballistische Empfindlichkeit bei minimaler Dämpfung
- $R_a = 1000\Omega$ ballistische Empfindlichkeit im Schwingfall
- $R_a = 300\Omega$ ballistische Empfindlichkeit nahe der Grenzdämpfung
- $R_a = 33\Omega$ fluxmetrische Empfindlichkeit im Kriechfall

Vergleich der theoretischen Werten

Aufgabe ist es die experimentell erhaltenen Werte mit den theoretischen zu vergleichen. Dazu werden die Werte aus der Tabelle der Vorbereitungsmappe verwendet. Es gilt:

$$C_{b,\infty,1000} = \frac{G}{\omega_0 \Theta} \quad (37)$$

$$C_{b,330} = \frac{G}{\omega_0 \Theta_e} \quad (38)$$

$$C_{b,33} = \frac{R_a + R_G}{G} \quad (39)$$

Unabhängigkeit der Stromstoßempfindlichkeit von T_Q

Ziel des Versuchs ist es, sich durch mehrere Messungen mit großen R-Werten davon zu überzeugen, dass die Stromstoßempfindlichkeit nur für $T_Q \ll T$ nahezu unabhängig von T_Q sind.

Das Besondere an ballistischen Experimenten ist die Impuls- und Energieübertragung, die in kurzer Zeit stattfindet. Betrachtet man einen Sandsack an einer Schnur, in den z.B. eine Gewehr- kugel einschlägt, bleibt die Kugel im Sand stecken und lenkt den Sack aus. Durch die maximale Auslenkung kann man die Geschwindigkeit des Geschosses bestimmen. Überträgt man diesen Versuch auf das Galvanometer, ist der Stromstoß vergleichbar mit dem Projektil. Kennt man die Empfindlichkeit des Galvanometers und ist es möglich die Auslenkung der Schwingung zu messen, kann daraus die Ladung des entladenen Kondensators errechnet werden.

(Antwort zu Frage 5).

6 Literatur

- **Praktikum der Physik**, von Wilhelm Walcher, 8. Auflage
- **Musterprotokoll**, von Steven Weitemeyer und Holger Drees
- **Das Neue Physikalische Grundpraktikum**, von H. J. Eichler, H.-D. Kronfeldt und J. Sahn, 2. Auflage
- **Vorbereitungshilfe Galvanometer**, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe

Versuchsvorbereitung **Galvanometer**
Andreas Vetter Gruppe Di-10, Matrikelnummer 1602491
8. November 2011

7 Grundlagen des Versuchs

Ein **Galvanometer** ist ein elektromechanisches Strommessgerät. In der praktischen Anwendung sind Galvanometer-Messgeräte durch digitaler Messtechnik ersetzt worden. Jedoch wird das Prinzip auch als Galvanometerantrieb zur Ansteuerung von CD- und DVD-Laufwerken oder in Lasershow-Geräten verwendet. Das Spiegelgalvanometer selbst besteht aus einer drehbar gelagerten Spule mit Kern, die sich in einem äußeren Permanent-Magnetfeld befindet. Die Aufhängung an einem Draht sorgt dafür, dass die Spule ein Drehmoment hin zur Ruhelage erfährt. Außerdem kann an die Spule eine Spannung angelegt werden.¹ Bei Stromfluss durch die Spule bewirkt die

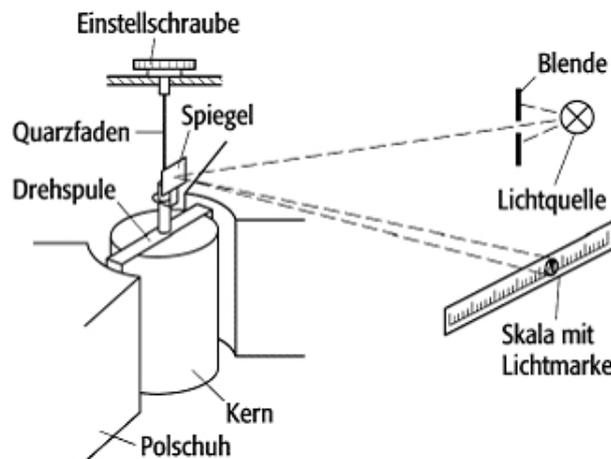


Abbildung 6: Spiegelgalvanometer

Lorentzkraft ein Drehmoment und die Spule verdreht sich gegenüber der Ausgangslage, wobei die Torsion des Fadens ein rückstellendes Drehmoment bewirkt. Für ein genaues Messen der Verdrehung wird ein Lichtstrahl an einem Spiegel, der mit der Spule starr verbunden ist, reflektiert und an einer Skala abgelesen. Zu beachten ist dabei, dass sich der Auslenkwinkel verdoppelt.

Betrachten wir nun die wirkenden Drehmomente. Es wirken ein

- rückstellendes Drehmoment durch den Faden: $M_F = -D \cdot \varphi$
- dämpfendes, geschwindigkeitsproportionales (Dämpfungskonstante ρ) Drehmoment durch mechanische Reibung: $M_R = -\rho \cdot \dot{\varphi}$
- äußeres Drehmoment durch die Lorentzkraft: $M_a = n \cdot A \cdot B \cdot I_{ges} = G \cdot I_{ges}$ mit Galvanometerkonstante $G = nAB =$ *Gesamte Windungsfläche der Spule* · *Magnetfeldstärke* und $I_{ges} =$ *Summe aus Messstrom und induziertem Strom*

¹Bildquelle: techniklexikon.net/images/f1232_galvanometer.gif

- Trägheitsdrehmoment: $M_{tr} = \Theta \cdot \ddot{\varphi}$

Die Summe der Drehmomente führt zur Schwingungsdifferentialgleichung des Galvanometers:

$$\Theta \ddot{\varphi} + \rho \dot{\varphi} + D\varphi = GI_{ges} \quad (40)$$

Der Gesamtstrom setzt sich wie oben erwähnt aus zwei Komponenten zusammen:

1. Messstrom

Eine äußere Spannung U lässt einen Strom I_{aussen} durch die Spule fließen. Mit dem Ohmschen Gesetz folgt für den Strom

$$I_{aussen} = \frac{U}{R_G + R_a} \quad (41)$$

mit dem Widerstand R_G des Galvanometers und dem Widerstand im äußeren Schließungskreis R_a .

2. induzierter Strom

Da sich die Spule im Magnetfeld dreht, wird eine Spannung U_i induziert. Es gilt:

$$U_i = -n \cdot A \cdot B \cdot \dot{\varphi} = -G \cdot \dot{\varphi} \quad (42)$$

Nun folgt wie oben mit dem Ohmschen Gesetz:

$$I_i = \frac{U_i}{R_G + R_a} = -\frac{G}{R_G + R_a} \cdot \dot{\varphi} \quad (43)$$

Dabei ist zu beachten, dass der induzierte Strom dem Messstrom entgegenwirkt. Die Summe aus beiden Strömen ergibt nun den Gesamtstrom und damit das äußere Drehmoment

$$M_a = G \cdot I_{ges} = G \cdot I - \frac{G^2}{R_G + R_a} \cdot \dot{\varphi} \quad (44)$$

Einsetzen in die Gleichung (40), Division durch das Trägheitsmoment Θ der Spule und Sortieren liefert:

$$\ddot{\varphi} + \frac{1}{\Theta} \left(\rho + \frac{G^2}{R_G + R_a} \right) \dot{\varphi} + \frac{D}{\Theta} \varphi = \frac{G}{\Theta} I \quad (45)$$

Man erkennt die Analogie zur Schwingungsdifferentialgleichung

$$\ddot{\varphi}(t) + 2\beta\dot{\varphi}(t) + \omega_0^2\varphi(t) = f(t) \quad (46)$$

Die Lösung der Differentialgleichung erhält man durch den Ansatz $\varphi(t) = Ae^{-\lambda t}$. Einsetzen und umformen ergibt

$$\lambda_{1,2} = \beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \quad (47)$$

und

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (48)$$

Die allgemeine Lösung lautet nun

$$\varphi(t) = A_1 e^{-\beta t + \lambda_1 t} + A_2 e^{-\beta t + \lambda_2 t} \quad (49)$$

Dabei unterscheidet man nun drei Fälle:

Schwingfall: $\beta^2 < \omega_0^2$

Da die Wurzel in Gleichung (43) negativ wird, ergeben sich für $\lambda_{1,2}$ komplexe Lösungen und die allgemeine Lösung der Differentialgleichung lautet

$$\varphi(t) = e^{-\beta t} (B_1 e^{i\omega t} + B_2 e^{-i\omega t}) \quad (50)$$

bzw.

$$\varphi(t) = e^{-\beta t} C \cos(\omega t + \alpha) \quad (51)$$

mit B_1 , B_2 und C aus den Anfangsbedingungen.

Kriechfall: $\beta^2 > \omega_0^2$

Die Wurzel in Gleichung (43) ist reell, somit sind auch die λ reelle Zahlen. Die Dämpfung ist so stark, dass keine Schwingung des Pohlischen Rades mehr erfolgt. Bei anfänglicher Auslenkung kriecht es in die Ruhelage zurück. Die Lösung für die Differentialgleichung lautet:

$$\varphi(t) = e^{-\beta t} (C_1 e^{\omega t} + C_2 e^{-\omega t}) \quad (52)$$

aperiodischer Grenzfall: $\beta^2 = \omega_0^2$

Man erhält den schnellsten Kriechfall, d.h. das System klingt ab, ohne zu schwingen. Dafür lautet die Lösung der Differentialgleichung:

$$\varphi(t) = D(1 + Et)e^{-\beta t} \quad (53)$$

Erzwungene Schwingungen

Um die Lösung der Differentialgleichung für $f(t) \neq 0$ zu erhalten, wird zu der homogenen Lösung (49) noch eine spezielle inhomogene (partikuläre) Lösung φ_{part} addiert. Für eine periodische äußere Kraft $f(t) = \frac{M_0}{\Theta} \cos(\Omega t)$ ergibt sich die Lösung zu

$$\varphi_{ges}(t) = A_1 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha) + A_2 \cos(\Omega t + \Psi_1) \quad (54)$$

Dabei lässt sich die Dämpfung β über den Widerstand im äußeren Schwingkreis regeln.

8 Aufgabe 1: Vorexperimente

Bei dieser Aufgabe soll man sich mit dem Messaufbau vertraut machen und die hohe Galvanometerempfindlichkeit sowie mögliche Fehlerquellen kennenlernen. Dazu nimmt man die Anschlussklemmen in je eine Hand und beobachtet den Ausschlag des Galvanometers. Dabei werden sehr kleine Ströme im Körper nachgewiesen.

Wird nun ein Drahtdrehwiderstand mit beispielsweise $R = 100\Omega$ (ohne Spannungsquelle) angeschlossen und ein wenig gedreht, so schlägt das Galvanometer ebenfalls aus. Kleine Ladungsunterschiede lassen Ströme auftreten, die nachgewiesen werden.

Auch kleine Ladungsverschiebungen beim Anschließen der Stromleiter führen zu Ausschlägen.

9 Aufgabe 2: Messungen in Schaltung 2-4

Die Spannungsversorgung wird von einer Batterie übernommen, die 1,5 Volt liefert. Um eine regelbare Spannung zu erhalten, wird Schaltung 1 dazwischengeschaltet. Über den Widerstand R_2 kann die Spannung am Galvanometer zwischen 0 und 1,25 Volt stufenlos geregelt werden.

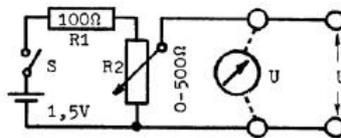


Abbildung 7: Schaltung 1

1. **Schaltung 2** Für die Schaltung 2 gilt:

$$I_{ges} = \frac{U}{R} = \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \cdot U \approx \frac{U}{R_3}, \quad (55)$$

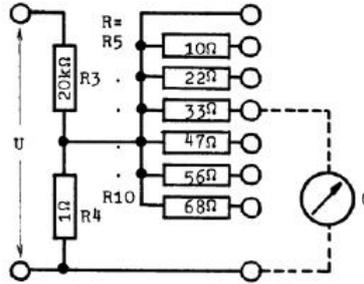


Abbildung 8: Schaltung 2

da R_4 gegenüber R_3 vernachlässigt werden kann. Aus der Maschenregel folgt

$$(R + R_G) \cdot I_G - R_4 I_{R_4} = 0, \quad (56)$$

und aus der Knotenregel erhält man noch

$$I_G + I_{R_4} = I_{ges}. \quad (57)$$

Ersetzen von I_{ges} und umformen dieser drei Gleichungen führt zu einer Formel für den Galvanometerstrom:

$$I_G = \frac{U R_4}{(R + R_G + R_4) R_3}. \quad (58)$$

Nun betrachten wir den statischen, eingeschwungenen Fall, und dabei vereinfacht sich die Differentialgleichung (40) erheblich, da nun $\ddot{\varphi} = \dot{\varphi} = 0$ und $\varphi =: \alpha$.

$$\varphi = \frac{G}{D} I = C_I I =: \alpha \quad (59)$$

mit der statischen Stromempfindlichkeit C_I .

Nun soll nach Aufgabenstellung α^{-1} über R aufgetragen werden. Hierfür gilt:

$$\alpha^{-1} = \frac{1}{C_I \cdot I_G} = \frac{R_3(R + R_G + R_4)}{R_4 U C_I} = \frac{R_3}{R_4 U C_I} R + \frac{R_3(R_G + R_4)}{R_4 U C_I}, \quad (60)$$

d.h. es ergibt sich eine Gerade mit der Steigung $m := \frac{R_3}{R_4 U C_I}$ und dem Offset $c := \frac{R_3(R_G + R_4)}{R_4 U C_I}$. Durch lineare Regression werden die beiden Parameter ermittelt und dann daraus die gesuchten Größen bestimmt:

- Galvanometer-Innenwiderstand R_G
Es stellt sich in der Frage 1, warum man den Innenwiderstand nicht mit einem sonst zur Messung üblichen Ohmmeter bestimmt werden kann. Der Grund ist, dass das Ohmmeter den Widerstand über eine Strommessung feststellt und die verwendete Stromstärke ist für das Galvanometer zu groß und würde es zerstören.

$$R_G = \frac{c}{m} - R_4 \quad (61)$$

- Stromempfindlichkeit C_I

$$C_I = \frac{R_3}{mR_4U} \quad (62)$$

In Frage 3 ist noch nach der statischen Spannungsempfindlichkeit C_U gefragt. Sie ist definiert als

$$C_U = \frac{\alpha}{U} = \frac{C_I}{R_G}. \quad (63)$$

Beide Werte werden nun mit den gegebenen Richtwerten $R_G \approx 30 \Omega$ und $C_I \approx 10^5 \frac{\text{rad}}{\text{A}}$ verglichen.

2. Schaltung 3

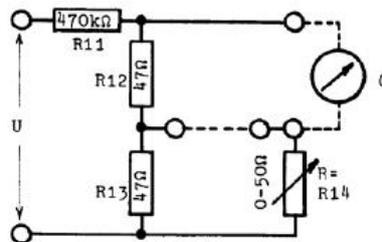


Abbildung 9: Schaltung 3

Mit der Schaltung 3, einer Wheatstone-Brückenschaltung, soll nun ebenfalls der Innenwiderstand des Galvanometers bestimmt werden, und zwar bei offener und geschlossener Brücke. Gemessen wird wieder der Galvanometerausschlag α . Es gilt bei **offener Brücke** und $R_{12} = R_{13}$:

$$\alpha^{-1} = \frac{(R_G + R + R_{12} + R_{13})R_{11}}{(R_{12} + R_{13}) \cdot U \cdot C_I} = \frac{(R_G + R + 2R_{12})R_{11}}{2R_{12} \cdot U \cdot C_I} \quad (64)$$

Bei **geschlossener Brücke** gilt Folgendes:

$$\alpha^{-1} = \frac{(R_G + R_{12}) \cdot R_{11}}{R_{12} \cdot U \cdot C_I} \quad (65)$$

Für den Schnittpunkt beider Geraden gilt dann

$$\frac{(R_G + R + 2R_{12})R_{11}}{2R_{12} \cdot U \cdot C_I} = \frac{(R_G + R_{12}) \cdot R_{11}}{R_{12} \cdot U \cdot C_I} \Rightarrow R = R_G \quad (66)$$

Dies ist auch die Antwort auf die Frage 4.

3. Schaltung 4

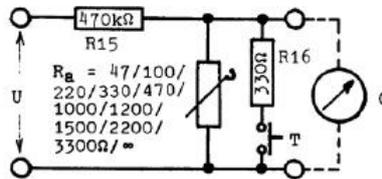


Abbildung 10: Schaltung 4

Für R_a kann man verschiedene Widerstände einstellen. Bei dieser Aufgabe soll man nun für $R_a = \infty$ den Ausschlag α in Abhängigkeit von der Spannung U und dem zugehörigen Strom I messen und α über I_G auftragen.

Es gilt nach dem Ohmschen Gesetz und $R_G \ll R_{15}$:

$$I_G = \frac{U}{R_{15} + R_G} \simeq \frac{U}{R_{15}} \quad (67)$$

Bei der Gerade $\alpha = C_I \cdot I_G$ entspricht die Stromempfindlichkeit der Steigung.

10 Aufgabe 3: Ermittlung charakteristischer Größen

Hierfür wird wieder Schaltung 4 verwendet, allerdings bei verschiedenen Außenwiderständen R_a . Dabei ermittelt man aus den Schwingungen des Galvanometers

- das Dämpfungsverhältnis $\frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}$ und
- die Schwingungsdauer T ,

wobei möglichst viele Schwingungen betrachtet werden. Hier dient nun der Widerstand $R_{16} = 330 \Omega$ und der Taster T dazu, die Schwingung zu dämpfen, sodass der Einschwingvorgang schneller abläuft (Frage 2). Aus diesen Messungen können nun die folgenden charakteristischen Größen bestimmt werden:

- **Abklingkonstante β_{R_a}** Es gilt:

$$\beta_{R_a} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}\right)}{T} \quad (68)$$

Außerdem gilt nach der Differentialgleichung (6) bzw. (7):

$$\beta_{R_a} = \frac{1}{2} \frac{1}{\Theta} \left(\rho + \frac{G^2}{R_G + R_a} \right) = \beta_\infty + \frac{G^2}{2\Theta(R_G + R_a)} \quad (69)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\beta_{R_a} - \beta_\infty} = \frac{2\Theta}{G^2} \cdot R_a + \frac{2\Theta R_G}{G^2}, \quad (70)$$

was wieder einer Geradengleichung mit der Steigung $m_{R_a} = 2 \frac{\Theta}{G^2}$ und dem Offset $c_{R_a} = 2 \frac{\Theta R_G}{G^2}$ entspricht. Nun wird $(\beta_{R_a} - \beta_\infty)^{-1}$ über R_a aufgetragen.

- **Frequenz des ungedämpften Galvanometers**

Es gilt:

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{T_\infty}\right)^2 + \beta_\infty^2} \quad (71)$$

- **Außenwiderstand $R_{a,gr}$ für Grenzämpfung**

Beim aperiodischen Grenzfall gilt $\beta_{R_a} = \omega_0$, d.h. es wird der Punkt auf der Geraden $(\beta_{R_a} - \beta_\infty)^{-1}$ gesucht, an dem $\beta_{R_a} = \omega_0$ ist. An der Abzisse kann nun leicht der Wert für R_a abgelesen werden.

- **Galvanometer-Kenngrößen G, Θ und D**

Zur Berechnung dieser drei Größen sind auf dem Aufgabenblatt drei Formeln gegeben:

$$m = \frac{2\Theta}{G^2} \quad \omega_0^2 = \frac{D}{\Theta} \quad C'_1 = \frac{G}{D} \quad (72)$$

Aus der Gleichung (99) ergeben sich die gesuchten Kenngrößen zu

$$G = \frac{2}{m_{R_a} \omega_0^2 C_I} \quad \Theta = \frac{2}{m_{R_a} \omega_0^4 C_I^2} \quad D = \frac{2}{m_{R_a} \omega_0^2 C_I^2}. \quad (73)$$

11 Aufgabe 4: Wirkung von Stromstößen

Bei dieser Aufgabe soll nun der Messstrom nicht solange fließen, bis sich die Gleichgewichtslage eingestellt hat (siehe Aufgabe 2), sondern es wird die Wirkung von kürzeren Stromstößen, ausgelöst durch die Entladung eines Kondensators, untersucht.

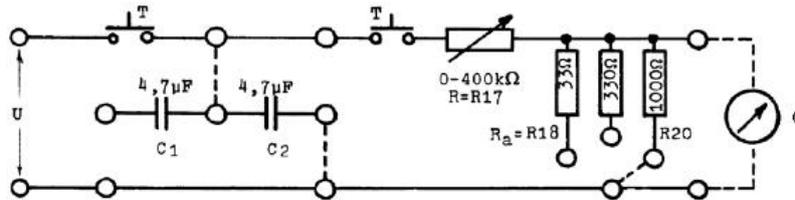


Abbildung 11: Schaltung 5

Da der exponentielle Stromverlauf keine scharfe Angabe der Stromstoßdauer T_Q erlaubt, gibt man die Zeit $T_Q = 3RC$ an, nach der circa 95% der Ladung abgeflossen ist.

Die Stromstoßquelle hat den Innenwiderstand ∞ , deshalb müssen bei Dämpfungen größer als β_∞ Widerstände parallel zum Galvanometer geschaltet werden. Diese Widerstände haben die Werte $R_{18} = 33 \Omega$, $R_{19} = 330 \Omega$ und $R_{20} = 1000 \Omega$. Nun muss man beachten, dass auch Ladungen über diese Widerstände abfließen, und es gilt $Q_G < C \cdot U$.

- **Bestimmung der Stromstoßempfindlichkeiten bei sehr kurzer Stromstoßdauer**

Die Stromstoßempfindlichkeit ist folgendermaßen definiert:

$$C_b = \frac{\alpha}{Q_G} = \frac{\alpha}{U_G C} = \frac{R_G + R_a}{R_a} \cdot \frac{\alpha}{UC} \quad (74)$$

Dabei wird nun auch berücksichtigt, dass ein Teil der Ladung nicht durch das Galvanometer fließt.

Es werden verschiedene Dämpfungen betrachtet:

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

- **Vergleich mit theoretischen Werten**

Die gemessenen Werte können mit theoretischen Ergebnissen vergli-

chen Werten, die aus Resultaten der Aufgaben 2 und 3 berechnet werden können (s. Vorbereitungshilfe Seite 3). Es gilt:

$$C_{b\infty,1000} = \frac{G}{\omega_0\Theta} \quad C_{b330} = \frac{G}{\omega_0\Theta e} \quad C_{b33} = \frac{R_a + R_G}{G} \quad (75)$$

$$C_{b\infty,1000} = \quad C_{b330} = \quad C_{b33} = \quad (76)$$

- **Unabhängigkeit der Stromstoßempfindlichkeiten von T_Q**

Durch mehrere Messungen mit großen R-Werten sollen wir uns noch davon überzeugen, dass die Stromstoßempfindlichkeiten nur für $T_Q \ll T$ beinahe unabhängig von T_Q sind.

Bleibt noch die Beantwortung der Frage 5. Ballistische Messungen werden durchgeführt, um beispielsweise die Geschwindigkeit von Projektilen zu bestimmen. Dabei wird ein Sandsack an einem Faden aufgehängt und das Geschoss in den Sandsack geschossen. Es bleibt dort stecken und lenkt ihn aus. Aus der Pendelauslenkung (maximale Amplitude) lässt sich dann die Geschwindigkeit berechnen.

Ähnlich kann man hier den Stromstoß als das 'Geschoss' betrachten. Wenn die Empfindlichkeit des Galvanometers bekannt ist, kann man die Auslenkung messen und daraus beispielsweise die Ladung des entladenden Kondensators bestimmen.

12 Literatur

- **Praktikum der Physik**, von Wilhelm Walcher, 8. Auflage
- **Musterprotokoll**, von Steven Weitemeyer und Holger Drees
- **Das Neue Physikalische Grundpraktikum**, von H. J. Eichler, H.-D. Kronfeldt und J. Sahn, 2. Auflage
- **Vorbereitungshilfe Galvanometer**, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe
- **Schaltskizzen** vom Aufgabenblatt
- **Wikipedia zum Thema ballistisches Pendel** de.wikipedia.org/wiki/Ballistisches_pendel, Stand: 29. Oktober 2011

Galvanometer

$$U = 0,8 \text{ V}$$

x/mm	R/Ω
12,5	$R_5 = 10$
11	$R_6 = 21,2$
9,5	$R_7 = 33,0$
8,5	$R_8 = 46,8$
7,5	$R_9 = 56,0$
7	$R_{10} = 67,6$

$$\begin{aligned} 0 &= 0 \Omega \\ 10 &= 49,1 \Omega \end{aligned}$$

R/Ω	$R/0-10$	offen / mm	geschlossen / mm
	0	21	16,5
2,455	0,5	20	
4,91	1	20	16,5
7,365	1,5	19,5	
9,82	2	19,5	16,5
12,275	2,5	19	
14,73	3	19	16,5
17,185	3,5	18,5	
19,64	4	18,5	16,5
22,095	4,5	18,5	
24,55	5	18	16,5
27,005	5,5	18	
29,46	6	18	16,5
31,815	6,5	17,5	
34,37	7	17,5	16,5
36,8	7,5	17,5	

R/Ω	$R/0-10$	α offen /mm	α geschlossen /mm
39,28	8	17,5	16,5
41,74	8,5	17	
44,19	9	17	16,5
46,6	9,5	17	
49,1	10	17	16,5

2.3

u/V	$I/\mu A$	α/mm
0	0	0
0,1	0,21	4,5
0,2	0,42	9,5
0,3	0,63	14
0,4	0,84	19
0,5	1,05	23,5
0,6	1,27	28
0,7	1,48	32,5
0,8	1,69	37
0,9	1,9	42
1	2,1	46,5

$$R_{15} = 474k\Omega$$

$$= 474000\Omega$$

$$I = \frac{U}{R}$$

SA

Periodezahl n	α	α	α	α	α	α
	∞, mm $\Delta t = 3 \text{ s}$	2300 $\Delta t = 6,9$	2240 $\Delta t = 6,65$	1500 $\Delta t = 4,5$	1200 $\Delta t = 4,75$	1000 $\Delta t = 4,7$
0	37	36	36	36	35,5	35
0,5	- 34	- 28	- 24	- 21	20	16
1	23	20	18	13	10	7
1,5	- 30	- 15	- 10	- 8	5	4
2	28	11	9	5	3	2
2,5	- 26	- 9	- 5			
3	25	7	4			
3,5	- 24	- 5				
4	22	4				
4,5	- 20					
5	19					
5,5	- 18					
6	17					
6,5	- 16					
7	15					
7,5	- 14					
8	13					
8,5	- 12					
9	11					
9,5	- 10					
10	10					
10,5	- 9					
11	9					
11,5	- 8					
12	8					
12,5	- 7					
13	7					
13,5	- 6					

2,4

2,2

~~2,4~~

4) 1/2 neue Spannung: $U = 0,2V$

	∞ α_{max}	998Ω	334Ω	$32,8 \Omega$
1	62	43	28	4
2	63	44	28	4
3	62	44	27	5
4	62	45	28	4
5	63	44	28	5

$32,8 \Omega$ bei $U = 0,6V$ | bei $1V$

1	13	23
2	13	22
3	14	22
4	13	22
5	13	22

$R_{19} = 334 \Omega$ $0,4V$ $R_{17max} = 400 k\Omega$

R_{17}	$\alpha: 334 \Omega$	$\alpha: 998 \Omega$	$32,8 \Omega$
0	56	46	18
40 k Ω	47	39	14
80 k Ω	41	32	11
120 k Ω	37	27	11
160 k Ω	33	26	11
200 k Ω	30	25	11
240 k Ω	28	24	11
280 k Ω	26	23	11
320 k Ω	24	22	11
360 k Ω	22	21	11
400 k Ω	20	20	11
	18	19	11
	16	18	11
	15	17	11
	15	16	11
	15	15	11
	15	14	11
	15	13	11
	15	12	11
	15	11	11
	15	10	11

SA

Versuchsauswertung **Galvanometer**

Tobias Leonhard, Andreas Vetter Gruppe Di-10

8. November 2011

Zu der Auswertung ist zu sagen, dass die Bauelemente, vor allem die Widerstände, kleine Abweichungen von den in der Schaltskizze abgebildeten Richtwerten aufweisen. Deshalb werden im kompletten Protokoll die korrigierten Messwerte (ganz rechte Spalte auf Seite 4 des Aufgabenblatts) verwendet.

Für die Spannungsmessung wurde ein Voltmeter verwendet, dessen Messbereich 1 V beträgt. Dabei geht die Skala von 0 bis 50, Vollausschlag bei 50 entspricht dann also 1 V. Es handelt sich um eine fein unterteilte Skala, somit ist der systematische Fehler bei der einmal gemessenen Größe "Spannung" $\pm 0,5 \cdot (\text{Intervallbreite}) \Rightarrow \pm 10 \text{ mV}$. Die Nulllage am Galvanometer wurde zu Beginn und nach Abschluss jeder Messung kontrolliert; dabei musste sie nicht korrigiert werden.

Außerdem ist festzustellen, dass unser Galvanometer durch unsachgemäße Bedienung bleibende Schäden davongetragen hat, sodass auftretende Schwingungen sehr stark gedämpft sind. In der Auswertung wird nochmals explizit darauf hingewiesen.

Das Plotten der Graphen und die Anpassung durch lineare Regression wurden mit dem Programm *Origin* durchgeführt. Eine ausführliche Fehlerrechnung für die Aufgabe 2 wird auch erstellt.

Fehlerrechnung

Dazu werden die auftretenden Größen betrachtet und statistische bzw. systematische Fehler unterschieden. Der Ablesefehler $\Delta\alpha$ beträgt 1 mm. Das Endergebnis wird folgendermaßen angegeben:

$$A = \text{Bestwert} \pm \text{statistischer Fehler} \pm \text{systematischer Fehler} \quad (77)$$

13 Aufgabe 1: Vorexperimente

Zu Beginn werden Experimente durchgeführt, um die Funktionsweise und die Empfindlichkeit des Galvanometers kennenlernen. Wenn man beide Anschlussklemmen in die Hand nimmt, schlägt das Galvanometer sehr deutlich aus. Damit werden kleinste Ströme im menschlichen Körper nachgewiesen. Ebenfalls kann man ohne Spannungsversorgung ein Drehpotentiometer anschließen und es drehen. Dabei tritt auch ein Ausschlag auf, allerdings viel geringer als zuvor. Hier führen kleine Ladungstrennungen zu Potentialunterschieden. Auch beim manuellen Dämpfen der Schwingung mit Schaltung 4 treten Ausschläge auf.

14 Aufgabe 2: Messungen in Schaltung 2-4

Hier soll mit verschiedenen Methoden der Galvanometer-Widerstand R_G und die statische Stromempfindlichkeit C_I ermittelt werden. Die Spannungsversorgung wird von einer Batterie übernommen, die 1,5 Volt liefert. Um eine regelbare Spannung zu erhalten, wird Schaltung 1 dazwischengeschaltet.

Über den Widerstand R_2 kann die Spannung am Galvanometer zwischen 0 und 1,25 Volt stufenlos geregelt werden. Für die folgenden Aufgabenteile der Aufgabe 2 wurde konstant eine Spannung von $U_0 = 0,8 \text{ V}$ verwendet.

Aufgabe 2.1 Schaltung 2

Mit der Schaltung 2 wird der Galvanometer-Widerstand R_G und die statische Stromempfindlichkeit C_I ermittelt. Dazu wird die Auslenkung α des Galvanometers in Abhängigkeit vom Widerstand $R = R_5 - R_{10}$ gemessen. Laut Aufgabenblatt gilt zudem für die Bauelemente $R_3 = 14,9 \text{ k}\Omega$ und $R_4 = 0,70 \text{ }\Omega$.

R in Ω	10	21,5	33	46,8	56	67,6
α in mm	12,5	11	9,5	8,5	7,5	7

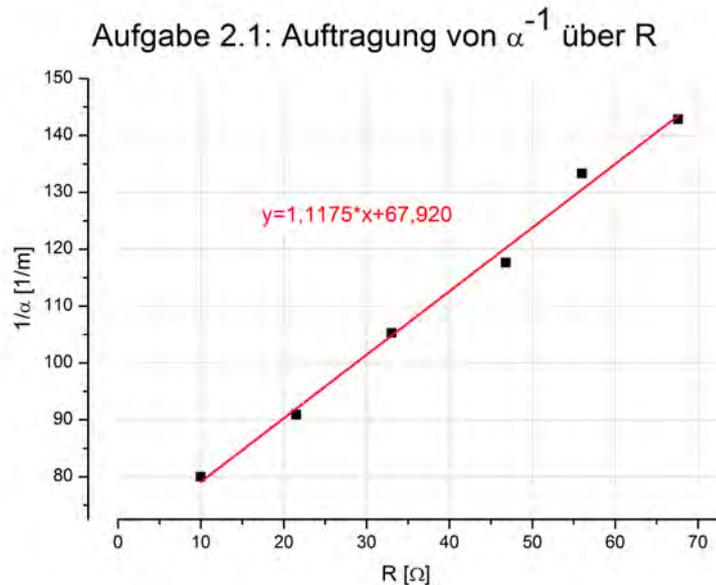


Abbildung 12: Messung von α^{-1} über dem Widerstand R, Ausgleichsgerade durch lineare Regression

Es folgt für die Ausgleichsgerade: $m = 1,1175 \frac{1}{m \cdot \Omega}$ und $c = 67,920 \frac{1}{m}$. Mit der Gleichung (61) kann nun der Galvanometer-Innenwiderstand berechnet werden:

$$R_{G1} = \frac{c}{m} - R_4 = \frac{67,920}{1,1175} \cdot \Omega - 0,7 \text{ }\Omega = 60,08 \text{ }\Omega \quad (78)$$

Der berechnete Wert ist ungefähr das Doppelte des gegebenen Wertes $R_G \approx 30 \text{ }\Omega$. Diese große Abweichung kann eigentlich nur durch den oben beschriebenen mechanischen Defekt auftreten, da bei der statischen Messung die

Ablesefehler sich in Grenzen halten und die sechs Messwerte einen linearen Verlauf zeigen.

Fehlerrechnung

Bei Berechnung des Galvanometer-Widerstands tritt nach (61) die Steigung m und der Achsenabschnitt c als statischer, der Wert des Widerstands R_4 als systematischer Fehler auf. Das Programm *Origin* liefert durch lineare Regression den Standardfehler. Dabei ergeben sich folgende Werte:

Größe	Standardfehler
σ_c	$1,87188 \frac{1}{m}$
σ_m	$0,04267 \frac{1}{m \cdot \Omega}$

Daraus folgt für σ_{R_G} :

$$\begin{aligned} \sigma_{R_G} &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_G}{\partial c}\right)^2 \cdot \sigma_c^2 + \left(\frac{\partial R_G}{\partial m}\right)^2 \cdot \sigma_m^2} = \sqrt{\frac{1}{m^2} \sigma_c^2 + \frac{c^2}{m^4} \sigma_m^2} \quad (79) \\ &\approx \sqrt{2,8058 + 5,3858} \Omega = 2,862 \Omega \end{aligned}$$

Für den systematischen Fehler folgt:

$$\Delta R_G = \left| \frac{\partial R_G}{\partial R_4} \cdot \Delta R_4 \right| = |-1 \cdot 0,0105| \Omega = 0,0105 \Omega \quad (80)$$

Damit ergibt sich für den Galvanometer-Widerstand:

$$R_G = (60,08 \pm 2,87 \pm 0,02) \Omega \quad (81)$$

Nun zur Berechnung der Stromempfindlichkeit. Nach Gleichung (62) gilt:

$$C_{I_1} = \frac{R_3}{m R_4 U} = \frac{14,9 \text{ k}\Omega}{1,175 \frac{1}{m \cdot \Omega} \cdot 0,70 \Omega \cdot 0,8 \text{ V}} = 2,38 \cdot 10^4 \frac{m}{A} \quad (82)$$

Fehlerrechnung

Für die Stromstoßempfindlichkeit C_I treten zum einen der statistische Fehler für die Steigung m auf, zum anderen systematische Fehler für R_3, R_4, U . Origin liefert für σ_m den Wert $0,04267 \frac{1}{m \cdot \Omega}$. Daraus folgt für den statistischen Fehler:

$$\sigma_{C_I} = \frac{\partial C_I}{\partial m} \sigma_m = \frac{R_3}{m^2 \cdot R_4 \cdot U} \cdot 0,04267 \frac{1}{m \cdot \Omega} = 0,089 \cdot 10^4 \frac{m}{A} \quad (83)$$

Der systematische Fehler beträgt:

$$\begin{aligned}\Delta C_I &= \left| \frac{\partial C_I}{\partial R_3} \cdot \Delta R_3 \right| + \left| \frac{\partial C_I}{\partial R_4} \cdot \Delta R_4 \right| + \left| \frac{\partial C_I}{\partial U} \cdot \Delta U \right| \\ &= \left| \frac{1}{m R_4 U} \cdot \Delta R_3 \right| + \left| -\frac{R_3}{m R_4^2 U} \cdot \Delta R_4 \right| + \left| -\frac{R_3}{m R_4 U^2} \cdot \Delta U \right| \quad (84) \\ &= 690,48 \frac{m}{A}\end{aligned}$$

Insgesamt ergibt sich dann für die Stromempfindlichkeit:

$$C_I = (2,38 \pm 0,09 \pm 0,07) \cdot 10^4 \frac{m}{A} \quad (85)$$

Aufgabe 2.2 Schaltung 3

Der Widerstand des Galvanometers wird hier mit der Wheatstone-Brückenschaltung bestimmt. Die verwendeten Widerstände haben die Werte $R_{11} = 479 \text{ k}\Omega$, $R_{12} = 47,3 \text{ }\Omega$ und $R_{13} = 46,9 \text{ }\Omega$. Folgende Werte wurden gemessen:

R_{14} in Ω	α in mm bei offener Brücke	α in mm bei geschlossener Brücke
0	21	16,5
2,46	20	-
4,91	20	16,5
7,37	19,5	-
9,82	19,5	16,5
12,28	19	-
14,73	19	16,5
17,19	18,5	-
19,64	18,5	16,5
22,1	18,5	-
24,55	18	16,5
27,01	18	-
29,46	18	16,5
31,92	17,5	-
34,37	17,5	16,5
36,8	17,5	-
39,28	17,5	16,5
41,74	17	-
44,19	17	16,5
46,6	17	-
49,1	17	16,5

Diese Messwerte werden in folgender Tabelle aufgetragen; beim Schnittpunkt beider Geraden gilt nach Gleichung (66) $R = R_{G2}$.

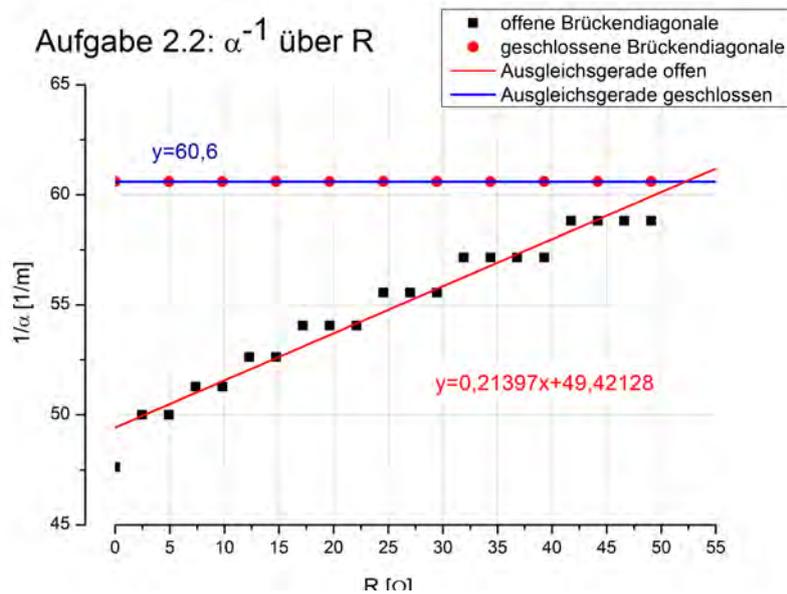


Abbildung 13: Messung von α^{-1} über dem Widerstand R_{14} bei geöffneter und geschlossener Brücke, Ausgleichsgeraden durch lineare Regression

Es folgt:

$$R_G = 52,25 \Omega \quad (86)$$

Dabei fällt auf, dass sich die Geraden mit den gemessenen Werten im Messbereich nicht schneiden. Der Schnittpunkt der Geraden wird deshalb durch Gleichsetzen aus den erhaltenen Geradengleichungen ermittelt. Die "Stufenform" ergibt sich aus der Ablesegenauigkeit von ungefähr 1 mm und der hohen Anzahl an Messwerten. Da erkennbar war, dass die Messwerte bei geschlossener Brücke sich nicht ändern, wurden weniger Werte gemessen.

Der ermittelte Widerstand liegt etwa im Bereich vom Messwert aus Aufgabe 2.1, hat allerdings gegenüber dem gegebenen Richtwert von $R_G = 30 \Omega$ immer noch eine Abweichung von 74,2 %.

Fehlerrechnung

Hier treten als statistische Fehler die Steigungen und Achsenabschnitte auf, als systematische Fehler die Widerstände R_{12} und R_{13} . Es gilt:

$$R = \frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2} = \frac{b_2 - b_1}{m_1}, \quad (87)$$

da $m_2 = 0$. Der statistische Fehler σ_{b_2} und σ_{m_2} ist null, da konstant der gleiche Wert gemessen wurde. *Origin* liefert $\sigma_{b_1} = 0,29294 \frac{1}{m}$ und $\sigma_{m_1} =$

$0,01021 \frac{1}{m\Omega}$. Daraus folgt:

$$\begin{aligned} \sigma_{R_G} &= \sqrt{\left(\frac{1}{m_1}\right)^2 (\sigma_{b_2}^2 + \sigma_{b_1}^2) + \left(\frac{b_1 - b_2}{m_1^2}\right)^2 (\sigma_{m_1}^2)} \\ &= 2,84 \Omega \end{aligned} \quad (88)$$

Für den systematischen Fehler folgt:

$$\begin{aligned} \Delta R_G &= \left| \frac{R}{R_{13}} \right| \Delta R_{12} + \left| -\frac{R_{12}}{R_{13}^2} R \right| \Delta R_{13} \\ &= 1,70 \Omega \end{aligned} \quad (89)$$

Daraus folgt also nun:

$$R_G = (52,25 \pm 2,84 \pm 1,70) \Omega \quad (90)$$

Aufgabe 2.3 Schaltung 4

Ziel bei dieser Aufgabe ist es, nochmals auf eine andere Art und Weise die statische Stromempfindlichkeit zu bestimmen. Dazu wird Schaltung 4 verwendet. Dabei folgt aus Gleichung (67) der Strom aus der Spannung; bei folgendem Schaubild entspricht C_{I3} gerade der Steigung, da $\alpha = C_I \cdot I_G$.

U in V	I_G in μA	α in mm
0	0	0
0,1	0,21	4,5
0,2	0,42	9,5
0,3	0,63	14
0,4	0,84	19
0,5	1,05	23,5
0,6	1,27	28
0,7	1,48	32,5
0,8	1,69	37
0,9	1,9	42
1,0	2,1	46,5

Die lineare Regression durch *Origin* ergibt:

$$C_{I3} = 2,20 \cdot 10^4 \frac{m}{A} \quad (91)$$

Dieser Wert passt gut zum im Aufgabenteil 2.1 (siehe (82)) bestimmten Wert von $C_{I1} = 2,38 \cdot 10^4 \frac{m}{A}$, die Abweichung beträgt etwa 7,6%.

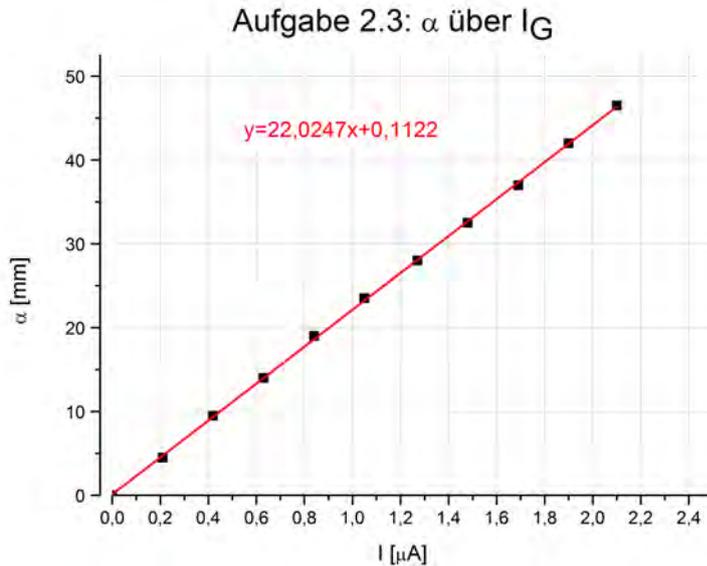


Abbildung 14: Messung von α^{-1} über dem Widerstand R_a mit Schaltung 4, Ausgleichsgerade durch lineare Regression

Für die weitere Rechnung werden jetzt jeweils die Mittelwerte aus den beiden gemessenen Werten gebildet.

$$\bar{C}_I = \frac{1}{2}(C_{I1} + C_{I3}) = 2,29 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{A}} \quad \bar{R}_G = \frac{1}{2}(R_{G1} + R_{G2}) = 56,17 \Omega \quad (92)$$

Fehlerrechnung

Hier tritt als statistischer Fehler die Steigung m der Geraden auf sowie die Messung der Spannung U . Laut *Origin* beträgt der Standardfehler für die Steigung $\sigma_m = 0,10533 \frac{\text{mm}}{\mu\text{A}} = 105,33 \frac{\text{m}}{\text{A}}$.

Für die Spannung wird als Fehler die Abweichung bei Vollausschlag angenommen, d.h. $\sigma_U = 0,01 \text{ V}$. Für α und U werden jeweils die größten Werte eingesetzt.

$$\begin{aligned} \sigma_{C_I} &= \sqrt{\left(\frac{\partial C_I}{\partial U}\right)^2 \sigma_U^2 + \left(\frac{\partial C_I}{\partial m}\right)^2 \sigma_m^2} \\ &= 220,65 \frac{\text{m}}{\text{A}} \end{aligned} \quad (93)$$

Der systematische Fehler kommt durch den Widerstand zum Tragen:

$$\begin{aligned}\Delta C_I &= \left| \frac{\partial C_I}{\partial R_{15}} \cdot \Delta R_{15} \right| \\ &= 330,62 \frac{m}{A}\end{aligned}\tag{94}$$

Damit folgt:

$$C_I = (2,20 \pm 0,03 \pm 0,04) \cdot 10^4 \frac{m}{A}\tag{95}$$

Nun soll man noch die statische Spannungsempfindlichkeit bestimmen. Nach Gleichung (63) gilt:

$$C_U = \frac{\alpha}{U} = \frac{C_I}{R_G} = \frac{\bar{C}_I}{\bar{R}_G} = 815,4 \frac{m}{V}\tag{96}$$

15 Aufgabe 3: Ermittlung charakteristischer Größen

Hierfür wird wieder Schaltung 4 verwendet, allerdings bei verschiedenen Außenwiderständen R_a . Dabei ermittelt man aus den Schwingungen des Galvanometers

- das Dämpfungsverhältnis $\frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}$ und
- die Schwingungsdauer T ,

wobei möglichst viele Schwingungen betrachtet werden. Hier dient nun der Widerstand $R_{16} = 330 \Omega$ und der Taster T dazu, die Schwingung zu dämpfen, sodass der Einschwingvorgang schneller abläuft.

Folgende Werte wurden mit einer angelegten Spannung U von 0,8V gemessen :

R_a in Ω	∞	3300	2240	1500	1200	1000
Periodendauer in s	2,38	2,23	2,2	2,25	2,35	2,35
Periodenzahl			α in mm			
0	37	36	36	36	35,5	35
0,5	34	28	24	21	20	16
1	33	20	18	13	10	7
1,5	30	15	10	8	5	4
2	28	11	9	5	3	2
2,5	26	9	5			
3	25	7	4			
3,5	24	5				
4	22	4				
4,5	20					
5	19					
5,5	18					
6	17					
6,5	16					
7	15					
7,5	14					
8	13					
8,5	12					
9	11					
9,5	10					
10	10					
10,5	9					
11	9					
11,5	8					
12	8					
12,5	7					
13	7					

Aus diesen Messwerten können nun die Daten für die lineare Regression von k ausgelesen werden, dabei handelt es sich um gedämpfte Schwingungen mit $\alpha = \alpha_0 \cdot e^{-\beta \cdot n \cdot T}$. Durch das Logarithmieren des Ausschlags α und Auftragen der Ergebnisse über der Periodenzahl n entstehen die in der Abbildung unten dargestellten Geraden.

Aus diesen Messungen können nun die folgenden charakteristischen Größen bestimmt werden:

- **Abklingkonstante β_{R_a}** Es gilt:

$$\beta_{R_a} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}\right)}{T} \quad (97)$$

Aufgabe 3: lineare Regression zur Bestimmung von k

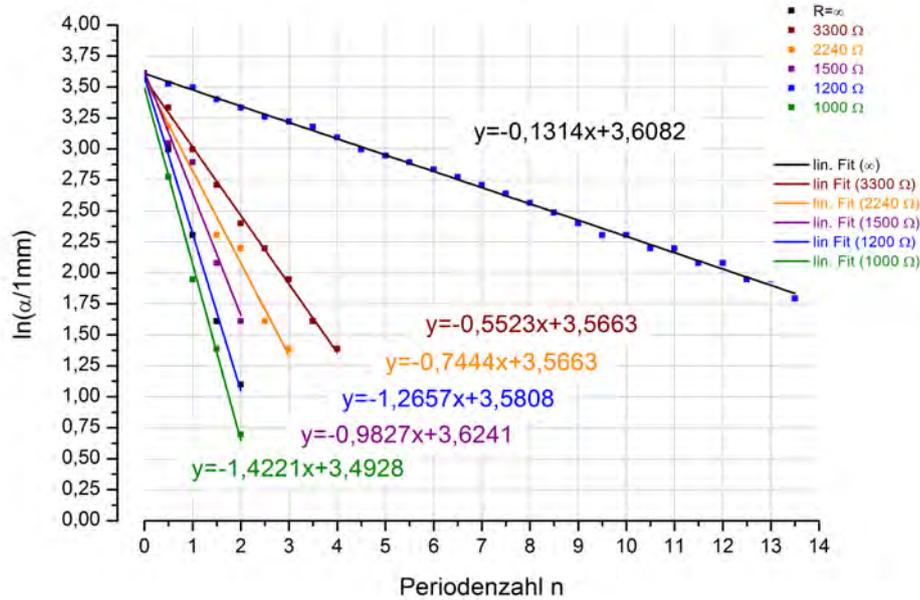


Abbildung 15: Lineare Regression zur Bestimmung von k

Außerdem gilt:

$$\beta_{R_a} = \frac{1}{2} \frac{1}{\Theta} \left(\rho + \frac{G^2}{R_G + R_a} \right) = \beta_{\infty} + \frac{G^2}{2\Theta(R_G + R_a)} \quad (98)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\beta_{R_a} - \beta_{\infty}} = \frac{2\Theta}{G^2} \cdot R_a + \frac{2\Theta R_G}{G^2}, \quad (99)$$

was wieder einer Geradengleichung mit der Steigung $m_{R_a} = 2 \frac{\Theta}{G^2}$ und dem Offset $c_{R_a} = 2 \frac{\Theta R_G}{G^2}$ entspricht. Nun wird $(\beta_{R_a} - \beta_{\infty})^{-1}$ über R_a aufgetragen.

R_a [ω]	κ	$k = e^{-\kappa}$	T [s]	$\beta_{R_a} = \frac{-\kappa}{T}$ [$\frac{1}{s}$]	$(\beta_{R_a} - \beta_{\infty})^{-1}$
∞	-0,1314	1,14	2,21	0,0595	-
3000	-0,5523	1,74	2,23	0,2477	5,3135
2240	-0,7444	2,11	2,2	0,3384	3,5855
1500	-0,9827	2,67	2,25	0,4368	2,6504
1200	-1,2657	3,55	2,35	0,5386	2,0872
1000	-1,4221	4,15	2,35	0,6051	1,8328

Aufgabe 3: lineare Regression zur Bestimmung von $R_{a,gr}$

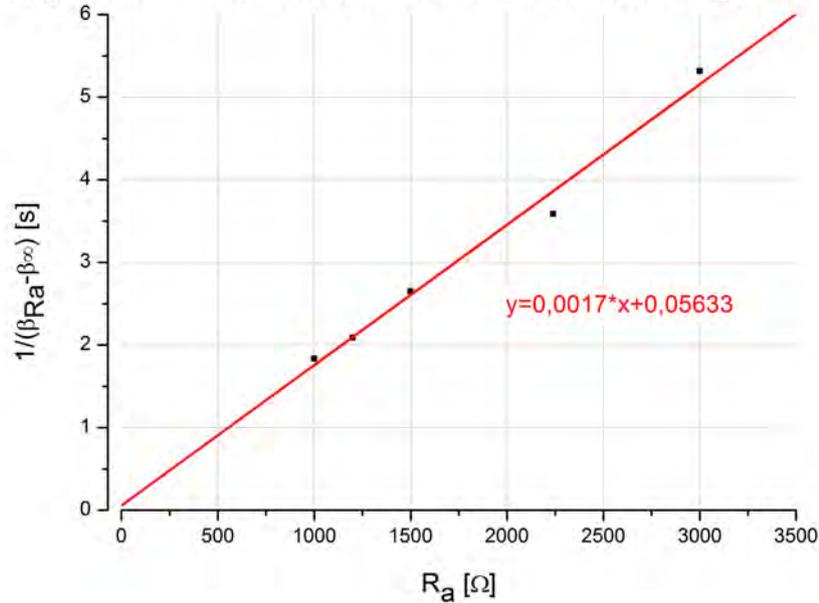


Abbildung 16: Die Gerade von $(\beta_{Ra} - \beta_\infty)^{-1}$ über R_a

- **Frequenz des ungedämpften Galvanometers**

Es gilt:

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{T_\infty}\right)^2 + \beta_\infty^2} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{2,21}\right)^2 + (0,0595)^2} = 2,84 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (100)$$

- **Außenwiderstand $R_{a,gr}$ für Grenzdämpfung**

Beim aperiodischen Grenzfall gilt $\beta_{Ra} = \omega_0$, d.h. es wird der Punkt auf der Geraden $(\beta_{Ra} - \beta_\infty)^{-1}$ gesucht, an dem $\beta_{Ra} = \omega_0$ ist.

Der Grenzwert $R_{a,gr}$ der Ausgleichsgerade an der Stelle $y = (\omega_0 - \beta_\infty)^{-1} = 0,36$ berechnet sich aufgrund von :

$$\begin{aligned} y &= 0,0017 \cdot R_a + 0,05633 \\ \Rightarrow R_{a,gr} &= \frac{0,36 - 0,05633}{0,0017} = 178,63 \Omega \end{aligned} \quad (101)$$

- **Galvanometer-Kenngrößen G , Θ und D**

Zur Berechnung dieser drei Größen sind auf dem Aufgabenblatt drei Formeln gegeben:

$$m = \frac{2\Theta}{G^2} \quad \omega_0^2 = \frac{D}{\Theta} \quad C'_1 = \frac{G}{D} \quad (102)$$

Aus der Gleichung (99) ergeben sich die gesuchten Kenngrößen zu

$$G = \frac{2}{m_{R_a} \omega_0^2 \bar{C}_I} \quad \Theta = \frac{2}{m_{R_a} \omega_0^4 \bar{C}_I^2} \quad D = \frac{2}{m_{R_a} \omega_0^2 \bar{C}_I^2}. \quad (103)$$

und mit eingesetzten Werten von oben:

$$G = \frac{2}{0,0017 \cdot (2,84)^2 \cdot 2,29 \cdot 10^4 \frac{m}{s^2}} = 6,37 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 6,37 \cdot 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s} \quad (104)$$



$$\Theta = 3,45 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (105)$$

$$D = 2,78 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (106)$$

16 Aufgabe 4: Wirkung von Stromstößen

Bei dieser Aufgabe soll nun der Messstrom nicht solange fließen, bis sich die Gleichgewichtslage eingestellt hat (siehe Aufgabe 2), sondern es wird die Wirkung von kürzeren Stromstößen, ausgelöst durch die Entladung eines Kondensators, untersucht.

Da der exponentielle Stromverlauf keine scharfe Angabe der Stromstoßdauer T_Q erlaubt, gibt man die Zeit $T_Q = 3RC$ an, nach der circa 95% der Ladung abgeflossen ist.

- **Bestimmung der Stromstoßempfindlichkeiten bei sehr kurzer Stromstoßdauer**

Die Stromstoßempfindlichkeit ist folgendermaßen definiert:

$$C_b = \frac{\alpha}{Q_G} = \frac{\alpha}{U_G C} = \frac{R_G + R_a}{R_a} \cdot \frac{\alpha}{UC} \quad (107)$$

Dabei wird nun auch berücksichtigt, dass ein Teil der Ladung nicht durch das Galvanometer fließt.

Es werden verschiedene Dämpfungen betrachtet:

- $R_a = \infty$ ballistische Empfindlichkeit bei minimaler Dämpfung
- $R_{20} = 998 \Omega$ ballistische Empfindlichkeit im Schwingfall
- $R_{19} = 334 \Omega$ ballistische Empfindlichkeit nahe der Grenzdämpfung und

– $R_{18} = 328 \Omega$ fluxmetrische Empfindlichkeit im Kriechfall

Dabei haben wir folgende Messwerte erhalten:

Messung	∞	α_{max} in mm 999 Ω	341 Ω	33 Ω
	1	62	43	28
2	63	44	28	4
3	62	44	27	5
4	62	45	28	4
5	63	44	28	5
Mittelwert	62,4	44	27,8	4,4
C_b in $\frac{rad}{s}$ experimentell	121166	90246	63059	23175
C_b in $\frac{rad}{s}$ theoretisch	130087	130087	47856	27934
Abweichung in %	7,4	44,1	31,8	20,5

• **Vergleich mit theoretischen Werten**

Die gemessenen Werte können mit theoretischen Ergebnissen verglichen werden, die aus Resultaten der Aufgaben 2 und 3 berechnet werden können (s. Vorbereitungshilfe Seite 3). Es gilt:

$$C_{b \infty, 998} = \frac{G}{\omega_0 \Theta} \quad C_{b 334} = \frac{G}{\omega_0 \Theta e} \quad C_{b 32,8} = \frac{R_a + R_G}{G} \quad (108)$$

Die Abweichung nahe beim Grenzfall kann daher kommen, dass die Grenzfrequenz durch Abweichungen beim Widerstand nicht optimal getroffen wurde.

• **Unabhängigkeit der Stromstoßempfindlichkeiten von T_Q**

Durch mehrere Messungen mit großen R-Werten sollen wir uns noch davon überzeugen, dass die Stromstoßempfindlichkeiten nur für $T_Q \ll T$ beinahe unabhängig von T_Q sind.

Folgende Werte wurden bestimmt:

R_{17} in $k\Omega$	α in mm	T_Q in s	C_b in $\frac{rad}{s}$
40	47	0,618	53305
80	39	1,236	44231
120	33	1,854	37427
160	28	2,472	31756
200	24	3,09	27220
240	22	3,708	24951
280	20	4,326	22683
320	18	4,944	20415
360	16	5,562	18146
400	15	6,18	17012

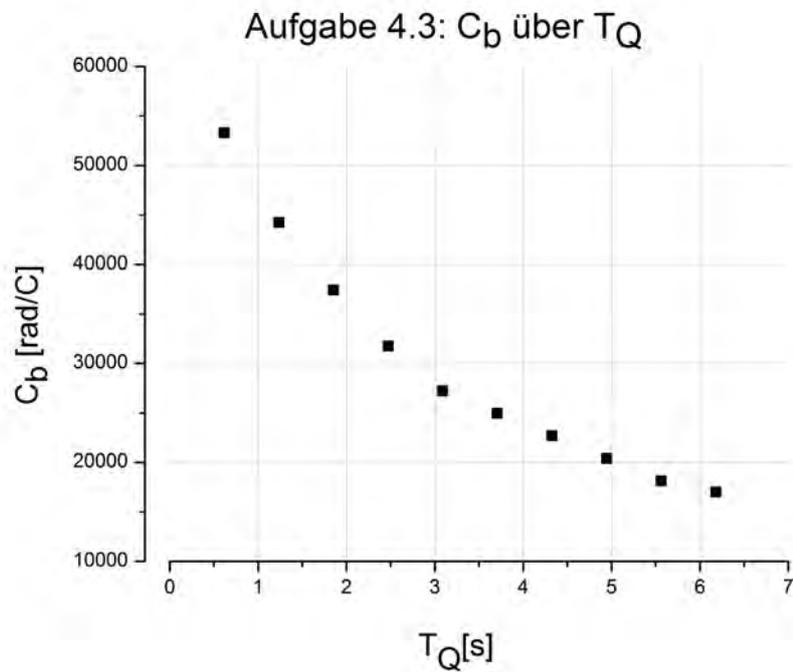


Abbildung 17: Stromstoßempfindlichkeit über Stromstoßdauer

Dabei ist leider nicht zu erkennen, dass die Stromstoßempfindlichkeiten für kleine T_Q unabhängig davon sind. Man hätte für den Widerstand R_{17} zwischen 0 und 40 Ω mehr Messwerte aufzeichnen sollen. Allerdings ist schön zu sehen, dass die Stromstoßempfindlichkeit für größere T_Q deutlich abnimmt.

17 Literatur

- **Praktikum der Physik**, von Wilhelm Walcher, 8. Auflage
- **Musterprotokoll**, von Steven Weitemeyer und Holger Drees
- **Das Neue Physikalische Grundpraktikum**, von H. J. Eichler, H.-D. Kronfeldt und J. Sahm, 2. Auflage
- **Vorbereitungshilfe Galvanometer**, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe
- **Schaltskizzen** vom Aufgabenblatt
- **Wikipedia zum Thema ballistisches Pendel** de.wikipedia.org/wiki/Ballistisches_Pendel, Stand: 29. Oktober 2011