

V354

gedämpfte und erzwungene Schwingungen

Umut Aydinli
umutaydinli27@gmail.com

Muhammed-Sinan Demir
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.11.2021

Abgabe: 26.11.2021

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Aufgaben	7
4 Vorbereitungsaufgaben	7
5 Versuchsaufbau	8
6 Versuchsdurchführung	10
7 Auswertung	11
8 Diskussion	17
9 Anhang	18
Literatur	19

1 Zielsetzung

In dem Versuch V354 sollen gedämpfte, sowie erzwungene Schwingungen näher untersucht werden. Zuerst wird die Amplitude und der effektive Dämpfungswiderstand in Abhängigkeit des Zeitgesetzes ermittelt, ebenso der Widerstand im aperiodischen Grenzfall. Anschließend wird eine von außen angeregte Schwingung betrachtet, bei der die Frequenzabhängigkeit und die Phasenverschiebung überprüft wird.

2 Theorie

Ein Schwingkreis, welches aus zwei Energiespeichern besteht (Kondensator mit der Kapazität C sowie eine Spule mit der Induktivität L), wird ein Energiebetrag zwischen den beiden Speichern übertragen. Anders als bei einem RC-Kreis, kann der Schwingkreis periodische Schwingungen ausführen. Dies schließt darauf, dass der Strom $I(t)$ sein Vorzeichen periodisch wechselt. Der Kondensator wird aufgeladen und dabei entsteht ein elektrisches Feld zwischen den Kondensatorplatten. Beim Entladen fließt der Strom durch die Spule und es entsteht somit ein Magnetfeld. Sobald der Strom nachlässt, wird der Kondensator mit umgekehrter Polarität wieder aufgeladen. Dies führt dazu, dass der Energieaustausch zeitlich unbegrenzt erhalten bleibt.

Wird jedoch ein Widerstand R in das Schaltsystem eingebaut, so nimmt die gesamte elektrische Energie mit der Zeit ab. Die Amplitude des Stroms sowie die Spannung am Kondensator nehmen eine monoton fallende Funktion ein. Man spricht hier von einer gedämpften Schwingung.

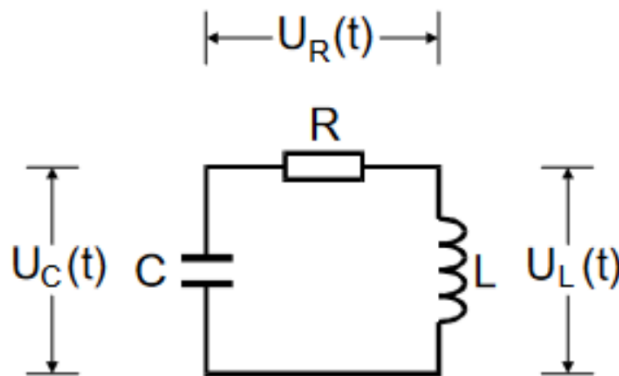


Abbildung 1: Die Darstellung eines RCL-Kreises [1, S. 1].

Wie in der Abbildung 1 zu sehen, gelten für die drei Spannungen U_C , U_R und U_L nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetz:

$$U_R(t) + U_C(t) + U_L(t) = 0. \quad (1)$$

Die einzelnen Teile können durch den Strom $I(t)$ ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} U_R(t) &= RI(t) \\ U_C(t) &= \frac{Q(t)}{C} \\ U_L(t) &= L \frac{dI}{dt} = L \dot{I}. \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$L \dot{I} + RI + \frac{Q}{C} = 0, \quad \text{mit} \quad I = \frac{dQ}{dt}.$$

Durch Umformen ergibt sich für Differentialgleichungen zweiter Ordnung:

$$\ddot{I}(t) + \frac{R}{L} \dot{I}(t) + \frac{1}{LC} I(t) = 0.$$

Mit der Lösung:

$$I(t) = e^{-2\pi\mu\nu t} (A_1 e^{-2\pi\nu t} + A_2 e^{-2\pi\nu t}),$$

mit

$$\mu = \frac{R}{4\pi L} \quad (2)$$

sowie

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (3)$$

ν kann sowohl reel als auch imaginär sein, d.h wir müssen hier zwei Fälle betrachten. Für den Fall, dass ν reel ist, gilt:

$$\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2}.$$

Durch Beachtung der Eulerschen Formel kann eine oszillatorische Funktion dargestellt werden:

$$I(t) = A_0 e^{-2\pi\mu t} \cos(2\pi\nu t + \eta).$$

Die folgende Funktion stellt eine gedämpfte Schwingung dar, soll heißen eine harmonische Schwingung, die mit zunehmender Zeit ihre Amplitude exponentiell gegen null verläuft. Die Abnahme der Amplitude lässt sich durch die sogenannte Abklingdauer definieren:

$$T_{\text{ex}} := \frac{1}{2\pi\mu} = \frac{2L}{R}. \quad (4)$$

Für den Fall, dass ν imaginär ist, gilt:

$$\frac{1}{LC} = \frac{R^2}{4L^2}.$$

Hierbei liegt ein aperiodischer Grenzfall vor, bei der die Lösung keinen oszillatorischen Anteil mehr besitzt. Ein Spezialfall wird in Betracht gezogen, wobei $\nu = 0$ entspricht:

$$\frac{1}{LC} = \frac{R_{\text{ap}}^2}{4L^2}. \quad (5)$$

Dieser Fall wird aperiodischer Grenzfall genannt, bei dem der Strom $I(t)$ schnell gegen null abfällt.

In einem weiteren Versuch wird eine Wechselspannung zusätzlich an den RLC-Kreis angeschlossen und dabei wird der Einfluss untersucht. Nach einer gewissen Einschwingzeit folgt der Oszillator nicht mehr nach seinem Eigenschwingverhalten, sondern in der Erregerfrequenz, hierbei die Frequenz des Wechselstroms mit der Wechselspannung $U(t) = U_0 e^{i\omega t}$.

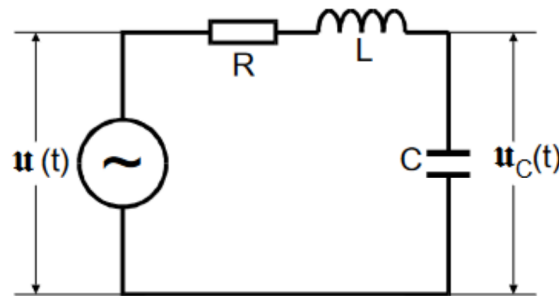


Abbildung 2: Die Darstellung einer Erzwungenen Schwingung [1, S. 6].

Die in Gleichung (1) aufgestellte Differentialgleichung ändert sich somit zu:

$$LC \ddot{U}_C(t) + R \dot{U}_C(t) + U_C(t) = U_0 e^{i\omega t}. \quad (6)$$

Zudem ergibt sich für die Spannung am Kondensator:

$$U(t) = \frac{U_0}{1 - LC\omega^2 + i\omega RC} = \frac{U_0(1 - LC\omega^2 + i\omega RC)}{(1 - LC\omega^2)^2 + \omega^2 R^2 C^2}.$$

Mit der Phasenverschiebung:

$$\tan(\varphi(t)) = \frac{\text{Im}(U)}{\text{Re}(U)} = \frac{-\omega RC}{1 - LC\omega^2} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \varphi(t) = \arctan\left(\frac{-\omega RC}{1 - LC\omega^2}\right). \quad (8)$$

Die Spannung für den Kondensator kann auch wie folgt aufgeschrieben werden:

$$U_C(\omega) = \frac{U_0}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + \omega^2 R^2 C^2}}. \quad (9)$$

Dabei wird die Abhängigkeit der Kondensatorspannung von der Erregerfrequenz herausgestellt. Wenn U_C sein Maximum erreicht und somit auch größer als U_0 sein kann, dann bezeichnet man dies als Resonanz und die auftretende Frequenz als Resonanzfrequenz ω_{res}

$$\omega_{\text{res}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}. \quad (10)$$

Falls sich die Resonanzfrequenz der Kreisfrequenz nähert, dann liegt eine schwache Dämpfung vor mit dem Fall:

$$\frac{R^2}{2L^2} \ll \frac{1}{LC}.$$

Man spricht von einer Resonanzkatastrophe, wenn $R \rightarrow 0$ und $U_{C,\text{max}} \rightarrow \infty$ gehen bei

$$U_{C,\text{max}} = \frac{1}{\omega_0 RC} U_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U_0. \quad (11)$$

Dabei wird der Faktor $\frac{1}{\omega_0 RC}$ als Güte bezeichnet. Die Breite der Resonanzkurve, welche durch die beiden Frequenzen ω_+ und ω_- ausgedrückt wird, sinkt bei der Kondensatorspannung $U_C(\omega)$ um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$.

Mit

$$\frac{R^2}{L^2} \ll \omega_0^2,$$

lässt sich die Breite der Resonanzkurve wie folgt ausrechnen:

$$\omega_+ - \omega_- \approx \frac{R}{L}. \quad (12)$$

Für den Fall einer starken Dämpfung gilt:

$$\frac{R^2}{2L^2} \gg \frac{1}{LC}.$$

Betrachtet man die Phasenverschiebung $\varphi(\omega)$, bei denen die Phasenverschiebung die Werte $\frac{\pi}{4}$ oder $\frac{3}{4}\varphi$ besitzt, so gilt:

$$\omega_{1,2} = \pm \frac{R}{L} \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}}. \quad (13)$$

Daraus folgt

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{R}{L}. \quad (14)$$

3 Aufgaben

Für diesen Versuch gibt es fünf verschiedene Arbeitsaufträge. Man beginnt mit der Untersuchung der Zeitabhängigkeit von der Amplitude einer gedämpften Schwingung und bestimmt den effektiven Dämpfungswiderstand durch die eingehenden Messungen. Danach bestimmt man den Dämpfungswiderstand des aperiodischen Grenzfalles. Als nächstes muss die Frequenzabhängige Kondensatorspannung über einen Serienresonanzkreis gemessen werden. Als letztes wird die Frequenzabhängigkeit von der Phase bestimmt, welche zwischen Erreger- und Kondensatorspannung vorhanden ist.

4 Vorbereitungsaufgaben

Vorbereitungsaufgaben gibt es zu diesem Versuch nicht, jedoch empfiehlt sich, sich mit dem Oszilloskop bekannt zu machen. Dies bezieht sich eher auf Anfänger beziehungsweise auf Personen welche sich nicht „gut“ oder ausreichend bekannt mit dem Gerät fühlen.

→ Erzeugung einer Sinuswelle und heran- sowie herauszoomen und Ablesen der Amplitude und/oder eine Erzeugung einer Rechteck-Schwingung wie in Abbildung 3.

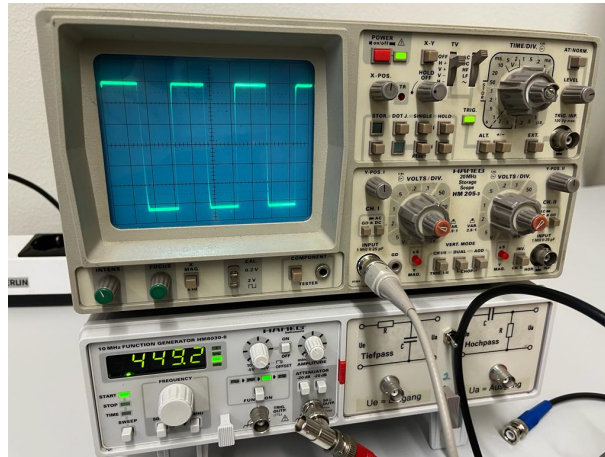


Abbildung 3: Bild einer Erzeugten Rechteckschwingung.

5 Versuchsaufbau

Der Versuch besteht aus den Einzelteilen:

Oszilloskop, Frequenzgenerator, RLC-Schaltung in Abbildung 4 zu sehen, Kabel, Kabel mit Tastkopf.

Der Frequenzgenerator wird über ein Kabel mit der RLC Schaltung (dem Gerät 1) verbunden. Die Schaltung besteht aus einer Reihenschaltung bestehend aus Spule mit Induktivität L und Kondensator mit Kapazität C . In der Serienschaltung sind parallel Widerstände geschaltet. Zwei davon sind fest Widerstände R und einer ein variabler Widerstand R_{variabel} .

Der variable Widerstand wird über einen Regler am Gerät eingestellt und umfasst einen Widerstand von bis zu $10\text{ k}\Omega$. Die Schaltung ist über ein Tastkopfkabel mit dem Oszilloskop verbunden. Das Signal wird auf dem Bildschirm des Oszilloskops angezeigt und kann durch verschiedene Einstellungen, verschieden Sichtbar gemacht werden. Der ganze Versuchsaufbau als Bild ist in Abbildung 5 gezeigt.

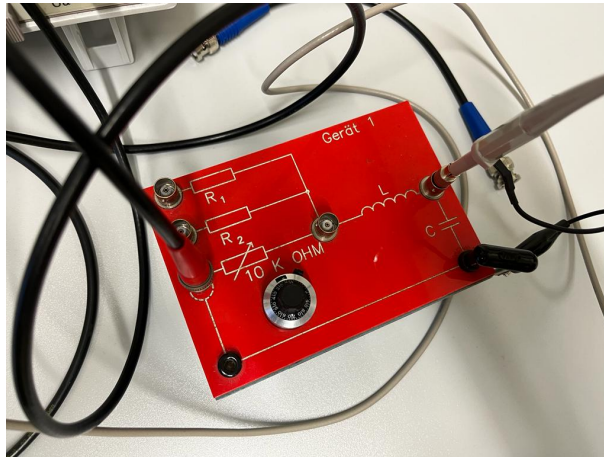


Abbildung 4: Ein Bild des Geräts 1 mit Tastkopf.

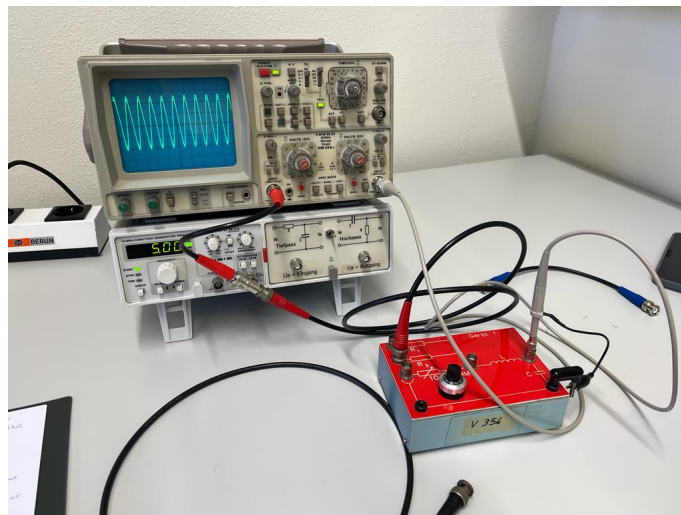


Abbildung 5: Übersicht auf den Kompletten Versuch (mit kleiner Erweiterung welche in Aufgabe 3 wichtig wird).

6 Versuchsdurchführung

Die Durchführung findet im oben beschriebenen Versuchsaufbau statt. Das Schaltkreisbild sieht ist dargestellt wie in Abbildung 7. Hierbei wird ein Signal von dem Frequenzgenerator in die RLC-Schaltung geschickt welches dann in dem Oszilloskop sichtbar gemacht wird. Alle Werteinstellungen die hier relevant sind, werden angegeben im nachfolgenden aufgezählt:

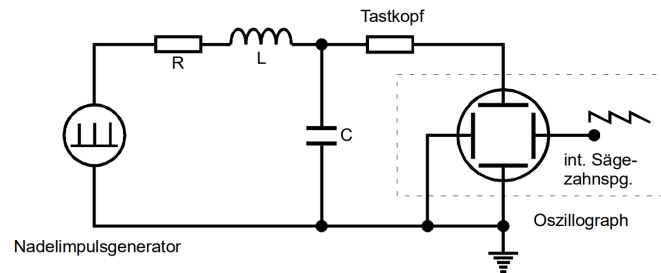


Abbildung 6: Der Schaltkreisbild für Aufgabe 1 [1, S. 11].

Im nächsten Arbeitsauftrag muss man mit dem Versuchsaufbau des vorherigen Arbeitsauftrages den Regler des variablen Widerstandes so einstellen, dass sich keine Wellen mehr „Überschwingen“.

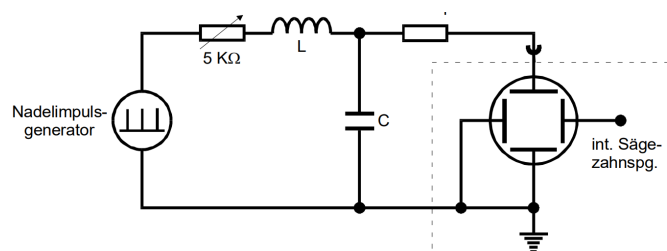


Abbildung 7: Schaltkreisbild für Aufgabe 2 [1, S. 12].

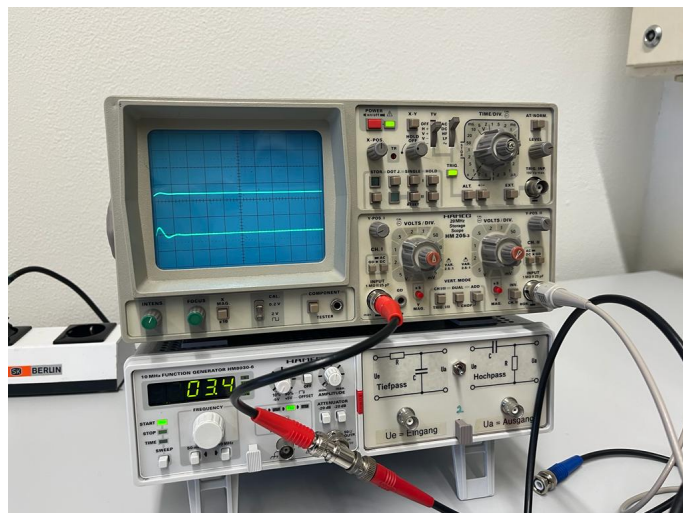


Abbildung 8: der Dämpfungswiderstand R_{ap} verbildlicht.

Als nächstes wird dem Versuchsaufbau ein Kabel hinzugefügt, welches direkt von dem Generator zu dem Oszilloskop geht ohne durch die Schaltung zu gehen. Die Spannung die dabei gemessen wird ist U_0 , wie in den Abbildung 9 und 5.

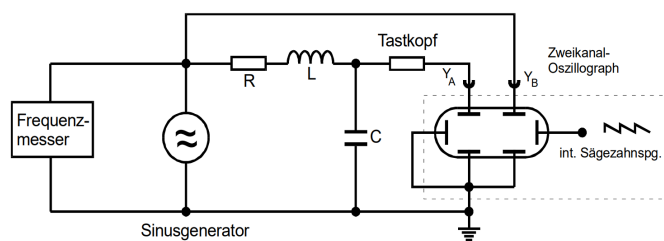


Abbildung 9: Das Schaltkreisbild für Aufgabe 3 [1, S. 13].

Als letztes wird der Versuchsaufbau des letzten Arbeitsauftrages verwendet und durch umstellen der Frequenz, die Phasenunterschiede immer mehr sichtbar und größer gemacht.

7 Auswertung

Die Werte für die Induktivität I , den Festwiderstand R und den Kondensator C für das Gerät (Gerät 1) was in diesen Versuch verwendet wurde sind:

$$I = (16,87 \pm 0,05) \text{ mH} \quad R = (67,2 \pm 0,1) \Omega \quad C = (2,060 \pm 0,003) \text{ nF}.$$

Wichtig hierbei zusagen ist noch, dass die Festwiderstände, kleine Wertunterschiede vorweisen die aber nicht sehr groß sind und deshalb beide Widerstände den Wert \mathbf{R} haben.

Die gewählte Frequenz $\mathbf{f} = 250 \text{ Hz}$ mit einem verstellbaren Widerstand bis zu $10 \text{ k}\Omega$. Der Widerstand ist festgelegt auf $\mathbf{R} = 0,2 \text{ k}\Omega$.

X-Achseinstellung (Zeit): $10 \mu\text{s}$ pro Einheit
Y-Achseinstellung (Spannung): $0,2 \text{ V}$ pro Einheit

Tabelle 1: Die Tabelle der Amplitude in Zeitabhängigkeit.

U_c / V	$t / \mu\text{s}$
$0,80 \pm 0,1$	0
$-0,60 \pm 0,1$	$10,0 \pm 0,1$
$0,58 \pm 0,1$	$20,0 \pm 0,1$
$-0,44 \pm 0,1$	$29,5 \pm 0,5$
$0,43 \pm 0,01$	$38,5 \pm 0,5$
$-0,32 \pm 0,02$	$48,5 \pm 0,5$
$0,32 \pm 0,01$	$58,5 \pm 0,5$
$-0,22 \pm 0,01$	$67,9 \pm 0,01$
$0,24 \pm 0,01$	$77,0 \pm 0,05$
$-0,18 \pm 0,01$	$86,0 \pm 0,5$
$0,17 \pm 0,05$	$97,0 \pm 0,01$

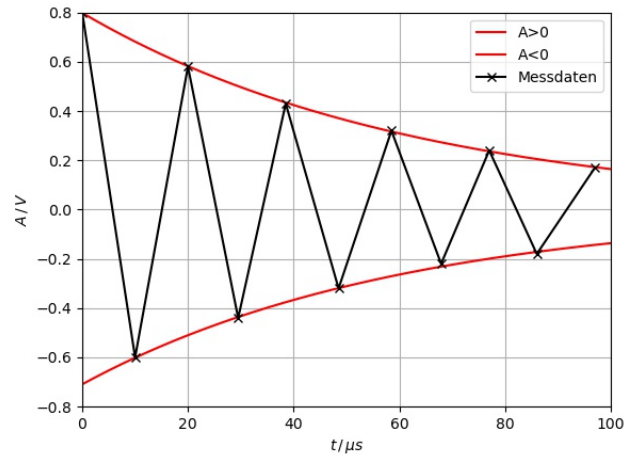


Abbildung 10: Die Darstellung der Amplitude in Zeitabhängigkeit der Tabelle 1.

Die Einhüllende wird dargestellt in der Abbildung 10 mit den Werten aus der Tabelle 1 durch:

$$A = A_0 \cdot e^{-2\pi\mu t}. \quad (15)$$

Die Werte A_0 sowie μ lassen sich mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung bestimmen:

$$A_0 = (0,79 \pm 0,023) \Omega$$

$$\mu_1 = (0,0165 \pm 0,000940) \frac{1}{\text{s}}$$

Der effektive Widerstand lässt sich durch umformen der oben genannte Funktion ausrechnen:

$$R_{\text{eff},1} = \mu_1 \cdot 4 \pi \cdot L = (0,00349 \pm 0,0016) \Omega,$$

ebenso die Abklingdauer

$$T_{\text{ex},1} = \frac{1}{2 \pi \mu_1} = \frac{2L}{2R} = (9,645 \pm 0,321) \text{ s}$$

Vergleicht man nun die Werte des effektiven Widerstandes $R_{\text{eff},1}$ und den vorgegebenen Widerstand $R = (67,2 \pm 0,1) \Omega$, so fällt auf, dass es eine Differenz von $-67,196 \Omega$ vorhanden ist.

Um den aperiodischen Widerstand im Grenzfall zu untersuchen, wurde der Graph so eingestellt, wie in Abbildung 8 zu sehen. Durch das Ablesen ergibt sich für R_{ap} einen Wert von

$$R_{\text{ap}} = 2,2 \text{ k}\Omega = 2,2 \cdot 10^3 \Omega.$$

Der theoretische Wert lässt sich wie in der Formel (5) bestimmen:

$$R_{\text{ap}} = \sqrt{\frac{4L}{C}} = (5723 \pm 0,013) \cdot 10^3 \Omega.$$

Die Abweichung beträgt $3,523 \text{ k}\Omega$, welches sich auf weitere Bauelemente zurückführen lassen kann, da wir nur R_1 bzw. R_2 gegeben haben, wurden andere Widerstände vernachlässigt. Somit haben wir es mit einem systematischen Fehler zu tun. Da R_{ap} empirisch bestimmt wurde, können (größere) Messfehler auftreten.

Tabelle 2: Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung.

U_0/V	U_C/V	$\frac{U_C}{U_0}$	f/kHz
4,8	0,52	0,1083	5
4,8	0,56	0,116	10
4,8	0,68	0,141	15
4,2	1,15	0,273	20
4,2	1,29	0,307	22
4,2	1,60	0,380	24
4,2	1,89	0,45	26
4,2	1,70	0,404	28
4,2	1,30	0,309	30
4,2	1,00	0,238	32
4,2	0,80	0,190	34
4,2	0,61	0,145	36
4,2	0,505	0,120	38
4,2	0,50	0,119	40

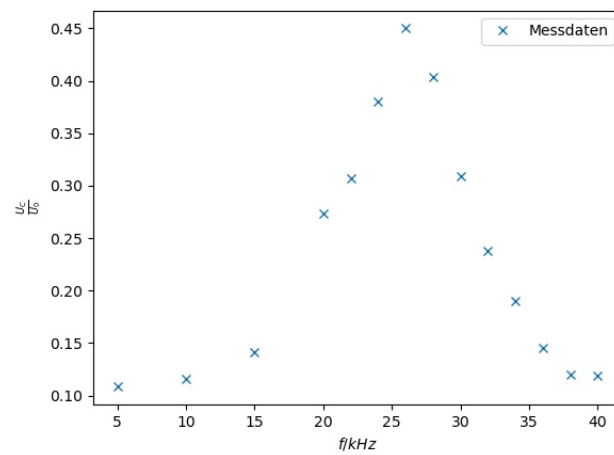


Abbildung 11: Darstellung der Werte $\frac{U_C}{U_0}$ in Frequenzabhängigkeit aus der Tabelle 2.

Die Güte q wurde experimentell bestimmt zu: $q_e = 0,45$.

Man betrachte, dass unsere Spannung $U = 2 \text{ V} / \text{Div}$, sowie $U_C = 0.5 \text{ V} / \text{Div}$ bzw. $0.2 \text{ V} / \text{Div}$ am Oszilloskop eingestellt wurde. Der theoretische Wert lässt sich durch die Gleichung

$$q = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad \text{mit} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (16)$$

ermitteln zu

$$q = 42,58 \pm 0,15 \quad \text{mit} \quad R_2 = 67,2$$

$$\text{Abweichung} : \frac{q_{\text{exp}} - q_{\text{theo}}}{q_{\text{theo}}}.$$

Die Abweichung hierbei beträgt -98% .

Anschließend wird unsere Resonanzkurve mit einer linearen Gerade ergänzt. Die Gerade befindet sich bei

$$\frac{U_C}{U_0} = \frac{q_e}{\sqrt{2}} = 0,318.$$

Zudem werden Halbwertsbreiten an den Punkten, welche sich mit dem Graphen kreuzen, aufgestellt. Der ermittelte Wert lautet

$$\nu_+ - \nu_- = 7 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

Theoretisch: mit der Formel (14):

$$\nu_+ - \nu_- = \frac{117 \Omega}{16,87 \text{ mH}} = (6,9 \pm 0,000012) \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

Die Abweichung hierbei beträgt $1,15\%$.

Die Phasenverschiebung der ersten drei gemessenen Werte beläuft sich bei einer Frequenz von 15 Hz auf $10 \mu\text{s}$. Die Phasenverschiebung der restlichen gemessenen Werte beläuft sich bei einer Frequenz von 30 Hz auf $6 \mu\text{s}$. Eine ganze Phase beträgt $20 \mu\text{s}$

Die Berechnung einer Phase geht über die Formel

$$\left(\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}}\right) \cdot 360^\circ. \quad (17)$$

Wobei \mathbf{A} D/V zwischen den Kästchen ist und \mathbf{B} die komplette Phase ist.

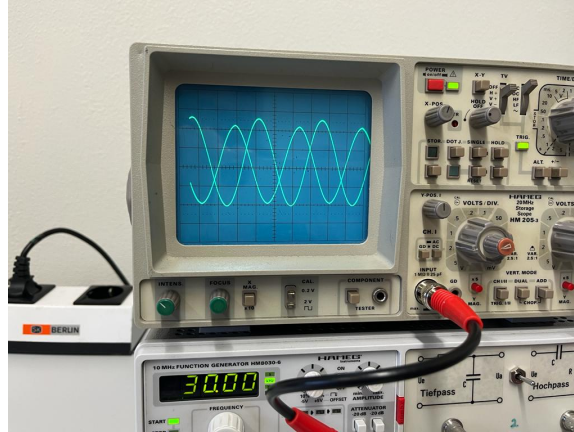


Abbildung 12: Die Phasenverschiebung am Oszilloskop verbildlicht.

Tabelle 3: Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung.

$\nu / 10^3 \text{ Hz}$	$t / \mu\text{s}$	$\phi / ^\circ$
15	1	17,9
30	6	107

8 Diskussion

Betrachtet man die Auswertung, weichen drei Werte stark von dem theoretischen Wert ab. Wie beim ersten Versuch dargestellt stellt sich ein Wert heraus, welcher eine große Abweichung vorweist. Das μ_1 wurde mithilfe von der Einhüllenden $A = A_0 \cdot e^{-2\pi\mu t}$ berechnet. Zwei mögliche Gründe dafür sind das falsches Ablesen der Werte, oder die falsche Berechnung mithilfe eines Darstellungsprogramms. Jedoch scheinen die abgelesenen Werte realistisch, bezogen auf die Darstellung in dem Diagramm 10. Die Dadurch folgende Differenz von $67,196 \Omega$ lassen sich durch das nicht betrachten der Innenwiderstände des Oszilloskops, welche ungefähr bei 50Ω [2] liegen, erläutern. Die Güte ist ebenfalls ein Faktor, welcher Abweichungen des theoretischen Werts vorweist. Die Breite der Resonanzkurve befindet sich im Toleranzbereich. Bei genauer Betrachtung weichen viele Werte ab, dies lässt sich auf überwiegend systematische Fehler zurückweisen.

9 Anhang

V354 Messdaten

zu 5a)

Gerät 1: $\alpha = 16,87 \pm 0,05 \text{ mH}$
 $R = 67,2 \pm 0,1 \Omega$
 $C = 2,060 \pm 0,003 \text{ nF}$

Einstellung $f = 250 \text{ Hz}$
 mit $R = 0,2 \text{ k}\Omega$ am Regler

$U_C = 0,2 \text{ V}$
 $\rightarrow 10 \mu\text{s}$

U_C / V	$t \text{ in } \mu\text{s}$
$\begin{pmatrix} 0,8 \\ -0,6 \\ 0,58 \\ -0,44 \\ 0,43 \end{pmatrix}$	$t_0 = 0 \text{ s}$ $t_1 = 10 \mu\text{s}$ $t_2 = 20 \mu\text{s} \text{ bzw. } 19,9 \pm 0,1$ $t_3 = 29,5 \pm (0,5)$ $t_4 = 38,5 \pm (0,5)$
$\begin{pmatrix} -0,32 \\ 0,32 \\ -0,22 \\ 0,24 \\ -0,18 \end{pmatrix}$	$t_5 = 48,5 \text{ "}$ $t_6 = 58,0 \text{ "}$ $t_7 = 67,9 \pm (0,01)$ $t_8 = 77,0 \pm (0,05)$ $t_9 = 86,0 \pm 0,5$
$\begin{pmatrix} 0,17 \end{pmatrix}$	$t_{10} = 97$

Phyton mit
 $A(t) = A_0 \exp(-2\pi \mu t)$

5b) durch Ablesen: $R_{ap} = 2,2 \text{ k}\Omega$

5c) + d)

U_0 kV	U_C V	$\text{kHz} (10^3 \text{ Hz})$
4,8	0,52	5
4,8	0,56	10
4,8	0,68	15
4,01	1,15	20
4,2	1,29	22
4,2	1,6	24
4,2	1,84	26
4,2	1,7	28
4,2	1,3	30
4,2	1	32
4,2	0,8	34
4,2	0,61	36
4,2	0,505	38
4,2	0,5	40

Gewählte Einstellungen:
 $x\text{-Achse: } 0,1 \text{ ms}$
 $U_C = 0,2 \text{ V}, U_0 = 2 \text{ V}$ y-Achse

Phasenverschiebung:
 bei $f = 15 \text{ Hz}$:
 $1 \mu\text{s}$

Gewählte Einstellungen:
 $U_C = 0,5 \text{ V}$
 $U_0 = 2 \text{ V}$
 $x\text{-A: } 0,1 \text{ ms}$
 später auf $10 \mu\text{s}$
 für besseres Ablesen

Phasenverschiebung
 bis (gezogen auf $50 \mu\text{s}$)
 bei $f = 30 \text{ Hz}$

Eine ganze Phase: $20,1 \mu\text{s}$

(A : B) $\cdot 360^\circ$

\hookrightarrow komplette Phase

$\hookrightarrow D / V$ zwischen Kästchen (also Phas.v.)

Literatur

- [1] TU Dortmund. *gedämpfte und Erzwungene Schwingungen*. 2021. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1716957/mod_resource/content/1/V354.pdf (besucht am 23.11.2021).
- [2] Hameg. *Oscilloscope HM205-3*. 2021. URL: https://cdn.rohde-schwarz.com/hameg-archive/HM205-3_deutsch.pdf (besucht am 25.11.2021).