

V354 Gedämpfte und Erzwungene Schwingungen

Alina Landmann, alina.landmann@tu-dortmund.de
Jannine Salewski, jannine.salewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 10.11.2017

1.Abgabe: 17.11.2017

2.Abgabe: 01.12.2017

TU Dortmund - Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theorie	1
2.1 Gedämpfte Schwingung	1
2.2 Erzwungene Schwingung	3
3 Durchführung	5
4 Auswertung	7
4.1 Zeitabhängigkeit der gedämpften Schwingung	7
4.2 Dämpfungswiderstand des aperiodischen Grenzfalls	9
4.3 Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung	10
4.4 Frequenzabhängigkeit der Phase zwischen Erreger- und Kondensatorspannung	12
5 Diskussion	14
Literatur	16

1 Zielsetzung

In diesem Versuch werden Amplituden und effektiver Dämpfungswiderstand eines gedämpften, sowie die Frequenzabhängigkeit der Spannung und der Phasenverschiebung eines angeregten Schwingkreises untersucht. Außerdem wird der Widerstand ermittelt, bei dem in einem gedämpften Schwingkreis der aperiodische Grenzfall eintritt.

2 Theorie

Ein Schwingkreis besteht im einfachsten Fall aus einem Kondensator mit einer Kapazität C und einer Spule mit der Induktivität L . Die Energie in diesem System oszilliert zwischen dem elektrischen Feld des Kondensators und dem magnetischen Feld der Spule. Falls ein idealer Draht vorliegt, bleibt diese **ungedämpfte Schwingung** für $t \rightarrow \infty$ unverändert.

2.1 Gedämpfte Schwingung

Wenn in dem Schwingkreis noch ein endlicher Widerstand R eingebaut ist, dann wird dies als **gedämpft Schwingung** bezeichnet, denn hier geht Energie in Form von Wärme über den Draht oder den Widerstand verloren. Dadurch fallen die Amplituden der Schwingungen exponentiell ab.

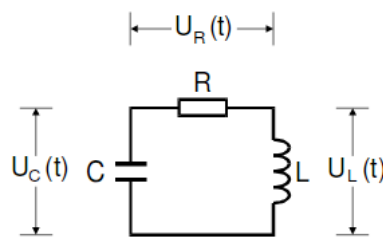


Abbildung 1: Schwingkreis einer gedämpften Schwingung [1].

Der Abfall der Amplituden lässt sich aus dem zweiten Kirchhoffschen Gesetz (Maschenregel) mit Hilfe der Spannungen aus der Abbildung 1 herleiten:

$$U_R(t) + U_L(t) + U_C(t) = 0.$$

Mit den folgenden Definitionen der Spannung U , der Stromstärke I , der Induktivität der Spule L , der Kapazität des Kondensators C , der Ladung Q des Kondensators und des Widerstandes R

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

lässt sich eine lineare Differentialgleichung 2. Ordnung aufstellen

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

Die Lösung der Differentialgleichung lautet

$$I'(t) = e^{-2\pi\mu t}(Ae^{i2\pi\nu t} + Be^{-i2\pi\nu t}), \quad (1)$$

wobei A und B beliebige komplexe Zahlen sind und die Abkürzungen wie folgt definiert werden

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

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

Für den weiteren Verlauf ist es notwendig zu ermitteln, ob ν reell oder imaginär ist. Deshalb wird eine Fallunterscheidung durchgeführt:

- ν ist reell, bzw. $\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2}$

Damit $I'(t)$ reell wird, muss $A = \overline{B}$ gelten, so erhält man durch den Ansatz

$$\begin{aligned}
A &= \frac{1}{2}A_0e^{i\eta} \\
B &= \frac{1}{2}A_0e^{-i\eta},
\end{aligned}$$

wobei A_0 und η reell sein sollen, die Funktion

$$I(t) = A_0e^{-2\pi\mu t}\cos(2\pi\nu t + \eta).$$

Diese Gleichung stellt eine gedämpfte Schwingung mit der Frequenz ν dar, dessen Amplitude exponentiell abfällt, mit der Schwingungsdauer

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}$$

Die Abnahmegeschwindigkeit lässt sich aus dem Exponenten der e-Funktion herleiten. Daraus lässt sich die Abklingdauer T_{ex} definieren, als

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

- ν ist imaginär, bzw. $\frac{1}{LC} < \frac{R^2}{4L^2}$

Es gibt keinen oszillatorische Anteil mehr in der Gleichung (1), da nurnoch die reelle Exponentialfunktion vorkommt. Es kommt zu einer aperiodischen Dämpfung. Abhängig von A und B strebt $I(t)$ monoton gegen 0 oder erreicht noch einen Extremwert. Für das Experiment von Bedeutung ist nur der Spezialfall

$$\frac{1}{LC} = \frac{R^2}{4L^2} \quad (5)$$

hierbei geht die Funktion ohne Überschwingungen am schnellsten gegen 0.

2.2 Erzwungene Schwingung

Nun wird der RCL-Kreis durch eine äußere periodische Schwingung mit einer Eigenfrequenz ergänzt, in diesem Fall mit einer sinusförmigen Wechselspannung $U(t)$, dies wird nun als **erzwungene Schwingung** bezeichnet. Nach einer gewissen Einschwingzeit wird der RCL-Kreis mit derselben Frequenz wie die Wechselstromquelle schwingen.

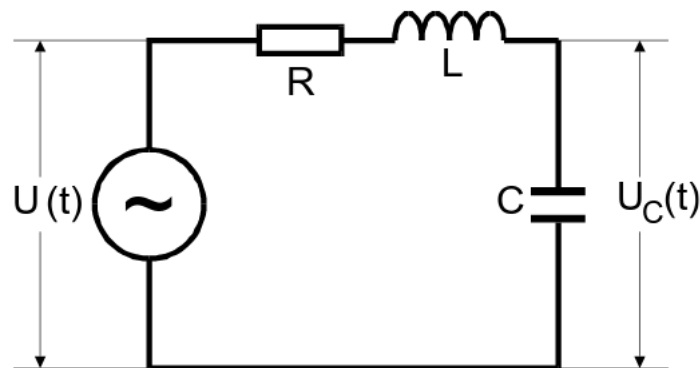


Abbildung 2: Schwingkreis einer erzwungenene Schwingung[2].

Mit

$$U(t) = U_0 e^{i\omega t}$$

wird die Differentialgleichung noch ergänzt. Die Differentialgleichung nimmt dann die Gestalt an:

$$L\dot{I}(t) + RI(t) + \frac{Q(t)}{C} = U_0 e^{i\omega t}$$

bzw.

$$LC\ddot{U}_C + RC\dot{U}_C + U_C = U_0 e^{i\omega t}$$

wobei $Q(t)$ die Ladung auf dem Kondensator entspricht.

Um zu ermitteln, wie die Amplitude U_{C_0} der Kondensatorspannung mit dem Phasenunterschied von der Erregerspannung mit der Amplitude U_0 und ihrer Frequenz abhängen, wird Ansatz

$$U_C(\omega t) = U_{C_0}(\omega) e^{i\omega t}$$

genommen und setzt diesen in die DGL (2.2) ein, so erhält man für die Amplitude

$$U_{C_0} = \frac{U_0(1 - LC\omega^2 - i\omega RC)}{(1 - LC\omega^2)^2 + \omega^2 R^2 C^2} \quad (6)$$

und die Phasenverschiebung $\phi(\omega)$ zwischen $U_C(t)$ und $U(t)$

$$\phi(\omega) = \arctan\left(\frac{-\omega RC}{1 - LC\omega^2}\right) \quad (7)$$

Mit (6) erhält man für die Kondensatorspannung in Abhängigkeit von ω die sogenannte Resonanzkurve

$$U_C(\omega) = \frac{U_0}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad (8)$$

Für die Frequenzen ω_1 und ω_2 bei denen die Phasenverschiebung genau $\frac{\pi}{2}$ bzw. $\frac{3\pi}{4}$ beträgt, gilt dann

$$\omega_{1,2} = \pm \frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}} \quad (9)$$

Bei näherer Betrachtung der Gleichung (8) ist zu erkennen, dass U_C für $\omega \rightarrow \infty$ gegen 0 geht und für $\omega \rightarrow 0$ gegen die Erregeramplitude U_0 strebt. U_C erreicht aber auch bei einer bestimmten Frequenz ein Maximum, dieses Phänomen wird **Resonanz** bezeichnet. Die zugehörige Resonanzfrequenz lässt sich durch

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

berechnen. Falls die Resonanzfrequenz ungefähr der Frequenz der Erregerspannung ($\omega_0 = \frac{1}{LC}$) entspricht, d.h. $\frac{1}{LC} \gg \frac{R^2}{2L^2}$, so wird dies als Schwache Dämpfung bezeichnet. Für diesen Fall wird U_C um den Faktor

$$q = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (11)$$

größer als U_0 . q wird auch als Güte bezeichnet. Die Breite der Resonanzkurve ist eine weitere wichtige Größe, sie wird aus der Differenz der beiden Frequenzen ω_- und ω_+ gewonnen. Wobei ω_- und ω_+ die Eigenschaft besitzen, dass die zugehörigen Spannungen $U_C(\omega_-)$ und $U_C(\omega_+)$ um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ kleiner sind, als das Maximum $U_C(\omega_{res})$ bei der Resonanzfrequenz. Mit der Näherung

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

folgt für die Differenz der Frequenzen

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

3 Durchführung

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 und in Abbildung 3 dargestellt. Auf Abbildung 4 ist auf der rechten Seite den Sinuswellengenerator erkenne, welcher mit dem Bauteil, in welchem der RCL-Schwingkreis eingebaut ist, verbunden ist. Von dem RCL-Schwingkreis geht außerdem eine Verbindung zu dem 1. Eingang des Oszilloskop, um dort die erzeugte Schwingung anzeigen zu können. Die zu erkennnden Verbindung zwischen dem Sinuswellenenerator und dem Oszilloskop wird erst im späteren Verlauf des Versuchs hinzugefügt. Im ersten Teil des Versuchs soll die Zeitabhängigkeit der Amplitude einer gedämpften Schwingung untersucht und daraus den Dämpfungswiderstand ermittelt werden. Es wird für die Messung der kleinere von den beiden festen Widerständen angeschlossen. Hierzu wird eine Rechteckspannung durch den Sinusgenerator erzeugt und auf dem Oszilloskop sichtbar gemacht. Folgend werden alle Hoch- und Tiefpunkte in Abhängigkeit der Zeit vermessen und notiert. Im zweiten Teil des Versuchs soll der aperiodische Grenzfall der Schwingung ermittelt werden. Hierzu wird die Schaltung an den veränderbaren Widerstand angeschlossen, eine Rechteckspannung durch den Sinusgenerator erzeugt und auf dem Oszilloskop sichtbar gemacht. Zunächst wird der veränderbare Widerstand auf den höchstmöglichen Wert gestellt. Danach wird der Widerstand verringert, bis eine erste

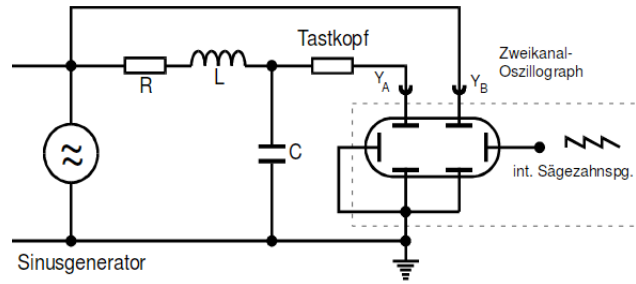


Abbildung 3: Versuchsaufbau Schaltkreis [3].

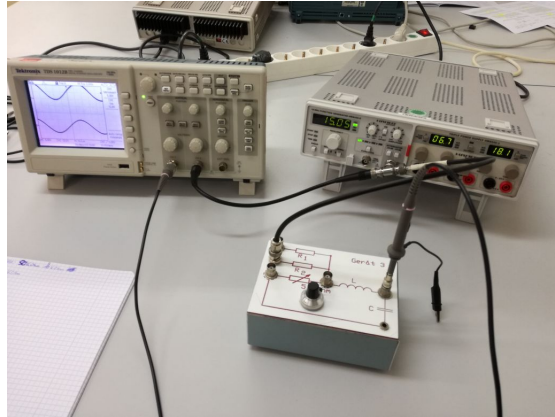


Abbildung 4: Versuchsaufbau[4].

Überschwingung zu erkennen ist. Daraufhin wird der Widerstand etwas vergrößert, so dass gerade keine Überschwingung mehr vorhanden ist. Der Wert des Widerstandes wird notiert.

Der Aufbau der letzten beiden Versuchsteile ist identisch. Hierzu wird zusätzlich noch eine Verbindung von dem Sinuswellengenerator zu dem Oszilloskop hergestellt, um eine unveränderte Sinusschwingung anzeigen zu lassen. Der Sinuswellengenerator erzeugt bei beiden Teilen eine Sinusschwingung. Hierzu wird der größere von den beiden festen Widerständen angeschlossen.

Zunächst wird die Abhängigkeit der Kondensatorspannung von der Frequenz gemessen. Hierzu werden Frequenzen im Bereich von 15kHz bis 60kHz in 5kHz-Schritten abgetastet und die jeweiligen Amplituden der Kondensatorspannungen abgemessen. Da die Amplitude der Vergleichsspannung immer gleich bleibt, wird diese zuvor einmal gemessen und die Verbindung kann im weiteren Verlauf vom Oszilloskop getrennt werden. In dem Bereich der größten Amplituden werden weitere Messungen durchgeführt, diesmal in 1kHz-Schritten, um den Peak der Kondensatorspannung besser darstellen zu können.

Im letzten Teil des Versuches wird die Abhängigkeit der Phasenverschiebung von der Frequenz ermittelt. Hierzu wird analog wie zuvor vorgegangen: Es werden Frequenzen

im Bereich von 15kHz bis 60kHz abgetastet und die jeweilige Schwingungsdauer T und die Phasenverschiebung der Kondensatorspannung gemessen. Hierbei kann die Ausgangsspannung nicht vom Oszilloskop getrennt werden, da diese für die Messung der Phasenverschiebung notwendig ist. Wie im vorherigen Teil des Versuchs, werden auch im kritischen Bereich der Resonanzfrequenz weitere Messwerte in 1kHz-Schritten aufgenommen.

4 Auswertung

Die Gerätedaten, die für die Berechnungen benutzt wurden, lauten

$$L = (3.53 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \text{ mH}$$

$$C = (5.015 \pm 0.500) \text{ mF}$$

$$R_1 = (30.3 \pm 0.1) \Omega$$

$$R_2 = (271.6 \pm 0.3) \Omega$$

4.1 Zeitabhängigkeit der gedämpften Schwingung

Tabelle 1 zeigt die mit Hilfe des Oszilloskops vermessenen Spannungsamplituden U_C mit den dazugehörigen Zeiten t .

Abbildung 2 zeigt den Abklingvorgang des gedämpften RCL -Kreises mit eingezeichneter Einhüllenden. Diese Einhüllende hat die Form

$$A = A_0 e^{-2\pi\mu t} \quad (13)$$

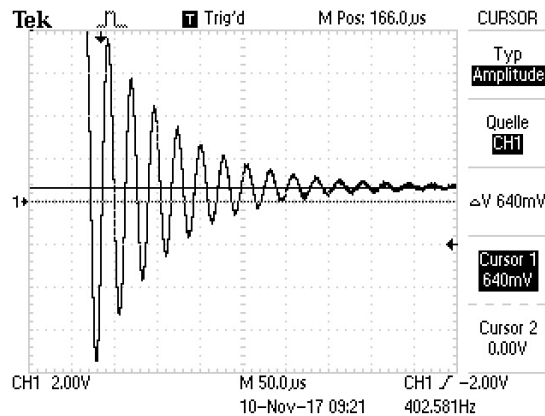


Abbildung 5: Bild vom Oszilloskop, gedämpfte Schwingung

Die Werte zur Erstellung des exponentiellen Fits wurden aus Tabelle 1 entnommen und mittels dem Programm "scipy optimize" ergeben sich folgende Werte für μ und U_0 :

Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung der Abklingdauer und des Dämpfungswiderstandes

U_C / V	$t / \mu\text{s}$
-7.52	-6
-5.28	22
-3.76	48
-2.64	76
-1.68	102
-1.04	130
-0.56	156
-0.24	184
0.000	212
0.160	238
0.400	266
0.480	292
0.500	319
0.540	346
0.560	373
0.560	400
0.620	427
0.640	455
0.700	415
0.700	440
0.720	388
0.760	360
0.800	333
0.880	307
0.920	279
1.060	252
1.220	225
1.420	198
1.680	171
2.000	144
2.640	117
3.280	91
4.240	63
5.680	36
7.600	9

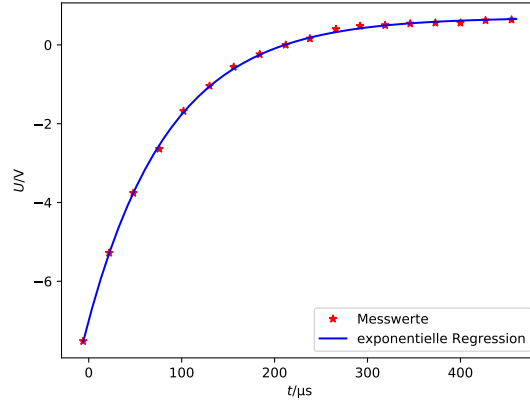


Abbildung 6: Messwerte und exponentieller Fit des unteren Teils der Einhüllenden

$$U_0 = (0.6991 \pm 0.0016) \text{ V} \quad (14)$$

$$\mu = (1812 \pm 19) \frac{1}{\text{s}} \quad (15)$$

Aus Gleichung (5) und (8) folgt somit ein effektiver Dämpfungswiderstand R_{eff} und eine Abklingzeit T_{ex} von:

$$R_{\text{eff}} = (80.4 \pm 1.1) \Omega$$

$$T_{\text{ex}} = (87.8 \pm 0.9) \mu\text{s}$$

Es zeigt sich eine Abweichung von R_1 um 30.1Ω

Die Theoriewerte und deren Abweichung für die T_{ex} und dessen Fehler, wurden unter Anwendung der Gleichung (3) und der Formel für die Gaußsche Fehlerfortpflanzung berechnet:

$$\Delta T_{\text{ex}} = \sqrt{\left(\frac{2}{R} \Delta L\right)^2 + \left(\frac{-2L}{R^2} \Delta R\right)^2}$$

4.2 Dämpfungswiderstand des aperiodischen Grenzfalls

Mit Hilfe der Gleichung

$$R_{\text{ap}} = \sqrt{\frac{4L}{C}}$$

und der Gaußschen Fehlerfortpflanzung wird folgender Wert für den Dämpfungswiderstand, bei dem der aperiodische Grenzfall eintritt, berechnet:

$$R_{\text{ap}} = (1.68 \pm 0.08) \text{ k}\Omega$$

Die Formel für den errechneten Fehler lautet:

$$\Delta R_a = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \Delta L\right)^2 + \left(\frac{-L}{\sqrt{\frac{L}{C}} C^2} \Delta C\right)^2}$$

Gemessen wurde ein Wert von 1.395Ω , was eine Abweichung von $0.285 \text{ k}\Omega$ im Mittel bedeutet.

4.3 Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung

Tabelle 2: Messwerte zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung

$\nu/10^3 \text{ Hz}$	$U_C / \text{ V}$	U_C/U_0
15	5,98	1,187
20	6,86	1,361
25	8,34	1,655
30	10,90	2,163
31	11,50	2,282
32	12,10	2,401
33	12,60	2,500
34	13,00	2,579
35	13,20	2,619
36	13,30	2,639
37	13,00	2,579
38	12,50	2,480
39	11,90	2,361
40	11,20	2,222
45	7,45	1,478
50	5,14	1,020
55	3,76	0,746
60	2,90	0,575

In der Tabelle 2 sind die Werte für die anregende Frequenz ν , die Kondensatorspannung U_C und die berechneten Quotienten aus der Kondensatorspannung und der Erregerspannung eingetragen. Dieser Quotient wird in Abbildung 9 gegen die Erregerfrequenz sowohl auf einer halblogarithmischen als auf einer linearen Skala (Abbildung 10) aufgetragen.

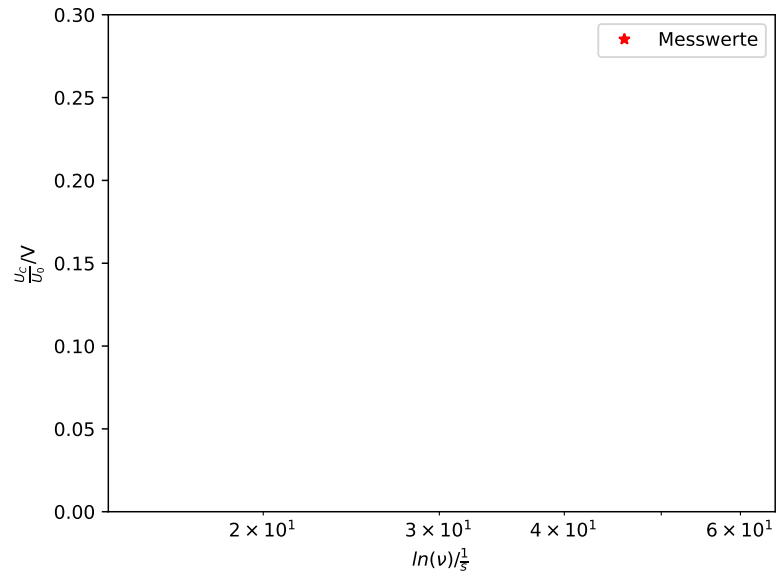


Abbildung 7: Hier wird der Quotient aus Erreger- und Kondensatorsspannung gegen ν halblogarithmisch aufgetragen.

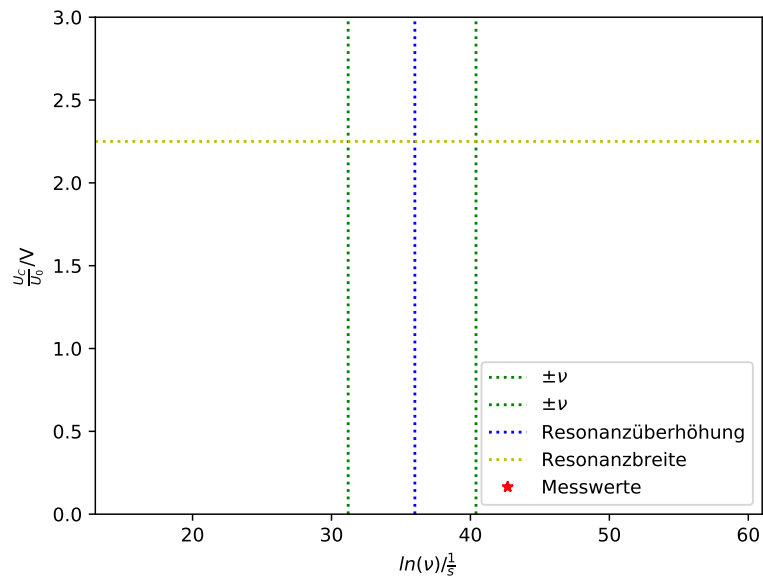


Abbildung 8: Hier wird der Quotient aus Erreger- und Kondensatorsspannung gegen ν linear aufgetragen. Außerdem zeigt die Abbildung lediglich den Ausschnitt um die Resonanzüberhöhung

Beide Graphen zeigen das zu erwartende Bild, einer zunächst ansteigenden Kurve, die nach dem Erreichen ihres Maximums, der Resonanzfrequenz, wieder abfällt. Mit Hilfe der Gleichung 5 und 6 wird der theoretische Wert für die Resonanzüberhöhung q , sowie die Resonanzbreite $\nu_+ - \nu_-$ berechnet. Aus dem Diagramm können die experimentell ermittelten Werte für beides gut abgelesen werden. Sie betragen für die Resonanzbreite $\nu_1 - \nu_2 = 9.2\text{kHz}$ und für die Resonanzüberhöhung $q = 2.7$. Die Theoriewerte betragen

$$q = 2.15 \pm 0.21$$

$$\nu_+ - \nu_- = (8.59 \pm 0.08) \text{ kHz.}$$

Der Fehler für q wurde mit Hilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet:

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{-1\Delta C}{\omega_0 R C^2}\right)^2 + \left(\frac{1\Delta R}{\omega_0 R^2 C}\right)^2}$$

4.4 Frequenzabhängigkeit der Phase zwischen Erreger- und Kondensatorspannung

Um die Frequenzabhängigkeit darzustellen, wird die Phasenverschiebung ϕ gegen die Frequenz der Erregerspannung ν wieder in einer halb logarithmischen Skalierung gegeneinander aufgetragen. Die Werte für ϕ und ν können Tabelle 3 entnommen werden. ϕ wird mit Hilfe folgender Formel bestimmt:

$$\phi = \frac{\Delta t}{T}$$

Abbildung 5 zeigt die halblogarithmische Darstellung, Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt des Frequenzbereichs um $\phi = 90^\circ$ in einer linearen Skalierung, um das Ablesen der Frequenzen zu erleichtern. Hieraus wird die Resonanzfrequenz ν_{res} und ν_1 und ν_2 , bei denen die Phasenverschiebung genau $\frac{\pi}{4}$, beziehungsweise $\frac{3\pi}{4}$ beträgt, abgelesen. Die experimentell ermittelten Werte betragen:

$$\nu_1 = 31 \text{ kHz}$$

$$\nu_2 = 44.5 \text{ kHz}$$

$$\nu_{\text{res}} = 36 \text{ kHz}$$

Die Theoriewerte werden mit Hilfe der Gleichungen 8 berechnet, der dazugehörige Fehler mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung und ergeben folgende Werte:

$$\nu_1 = (31.01 \pm 0.08) \text{ kHz} \quad \nu_2 = (38.20 \pm 0.20) \text{ kHz}$$

Tabelle 3: Messwerte für die Frequenz und die Phasenverschiebung zwischen Erreger und Kondensatorspannung

ν / kHz	Δt / 1/ μ s	$T = \frac{1}{\nu}$ μ s	ϕ / °
15	1,2	66,5	6
20	1,6	50,2	11
25	2,2	40,2	19
30	3,7	33,4	40
31	3,9	32,2	47
32	4,4	31,2	51
33	4,8	30,4	57
34	5,4	29,4	66
35	5,8	28,6	73
36	6,1	27,8	79
37	6,6	27,0	88
38	7,1	26,4	97
39	7,7	25,6	108
40	7,9	25,0	114
45	8,5	22,3	137
50	8,4	20,0	151
55	7,8	18,3	153
60	9,3	16,7	200

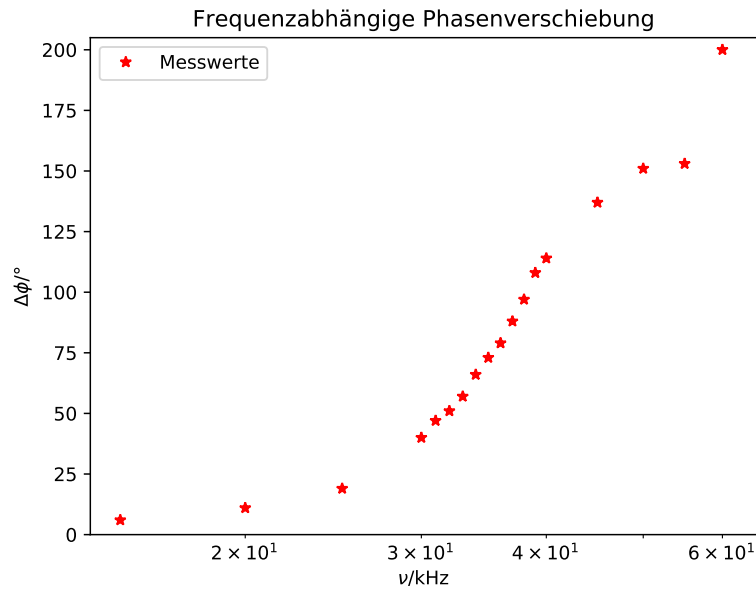


Abbildung 9: Hier wird die Frequenz ν halblogarithmisch gegen die Phasenverschiebung $\Delta\phi$ aufgetragen.

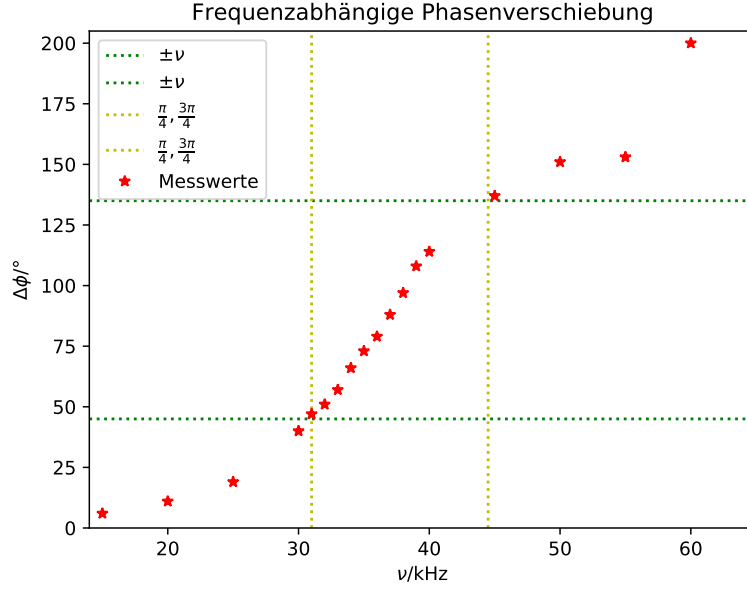


Abbildung 10: Hier wird die Frequenz ν gegen die Phasenverschiebung ν aufgetragen.

$$\Delta\nu = \sqrt{\left(\left(\frac{R}{4L^2\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}}} + \frac{1}{2L}\right)\Delta R\right)^2 + \left(\left(\frac{\frac{-1}{CL^2} - \frac{R^2}{2L^3}}{2\sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{R^2}{4L^2}}} - \frac{R}{2L^2}\right)\Delta L\right)^2 + \left(\frac{-\Delta C}{2LC^2\sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{R^2}{4L^2}}}\right)^2}$$

5 Diskussion

Bei der Bestimmung des effektiven Dämpfungswiderstandes zeigt sich eine große Abweichung des Theoriewertes von tatsächlich gemessenen Wert von 30.1Ω , welche, genauso wie die relativ große Abweichung des Theoriewertes vom experimentell ermittelten Wert des Widerstandes beim aperiodischen Grenzfall durch nicht beachtete Widerstände zu erklären ist. Hier ist besonders der Innenwiderstand des Generators zu bedenken. Im Falle des Widerstandes, bei dem der aperiodische Grenzfall eintritt, muss die begrenzt maximale Auflösung des Oszilloskops und die Ungenauigkeit des regelbaren Widerstandes erwähnt werden, die ein exaktes Ablesen der gemessenen Werte erschweren.

Die Abweichung bei der Bestimmung der Resonanzüberhöhung, also der Güte des Schwingkreises zeigt nicht allzu große Unterschiede zwischen dem experimentell ermittelten Wert von 2.7 und dem theoretischen von 2.15 ± 0.21 . Die etwas größere Abweichung der Theoriewerte der Resonanzbreite vom experimentell Ermittelten, lassen sich durch die Me-

thode zur Bestimmung der Werte erklären. Bei der graphischen Auswertung entstehen durch Abschätzungen zwangsläufig Fehler. Die Aufzeichnung weiterer Messwerte könnte diese Fehler minimieren. Gleiches gilt für die experimentelle Ermittlung von ν_1 und ν_2 . Auch hier könnten weitere Messwerte das graphisch ermittelte Ergebnis von Fehlern befreien. Abschließend ist zu sagen, dass der Versuch Ergebnisse mit unterschiedlich großen Abweichungen liefert. Teilweise sind die experimentell ermittelten Werte nah an den Theoriewerten und auch die entstandenen Plots zeigen allesamt die erwarteten Verläufe, was auf einen sorgfältigen Messvorgang hindeuten kann. Die Grenzen der Genauigkeit sind durch die vorgegebenen Apparaturen gegeben. So konnte man beispielsweise die Erregerspannung nie ganz exakt auf den gewünschten Wert einstellen und auch der bereits erwähnte regelbare Widerstand war nur sehr ungenau zu bedienen.

Literatur

- [Dor] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 353 Relaxationsverhalten eines RC-Kreises*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/index.php?page=medizin&sub=bachelorSc> (besucht am).