

Versuch 354

## **Gedämpfte und erzwungene Schwingungen**

Nico Schaffrath  
nico.schaffrath@tu-dortmund.de

Mira Arndt  
mira.arndt@tu-dortmund.de

Durchführung: 10.12.2019

Abgabe: 17.12.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Der ideale Schwingkreis . . . . .	3
2.2 Der reale Schwingkreis . . . . .	3
2.2.1 Der Schwingfall . . . . .	5
2.2.2 Der Kriechfall . . . . .	6
2.2.3 Der aperiodische Grenzfall . . . . .	6
2.3 Erzwungene Schwingungen . . . . .	7
<b>3 Durchführung</b>	<b>9</b>
3.0.1 Untersuchung der Amplitude und Berechnung des Dämpfungwi- derstandes . . . . .	9
3.0.2 Berechnung von dem Widerstand $R_{ap}$ . . . . .	9
3.0.3 Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung . . . . .	10
3.0.4 Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung . . . . .	10
<b>4 Auswertung</b>	<b>11</b>
4.1 Dämpfung des elektischen Schwingkreises . . . . .	11
4.2 Aperiodischer Grenzfall . . . . .	13
4.3 Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung . . . . .	14
4.4 Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen Kondensator- und Generatorspannung . . . . .	17
<b>5 Diskussion</b>	<b>19</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>19</b>
<b>Literatur</b>	<b>19</b>

## 1 Ziel

In diesem Versuch soll die Zeitabhängigkeit der Amplitude eines gedämpften Schwingkreises untersucht werden und daraus der Dämpfungswiderstand bestimmt werden. Weiterhin soll der Dämpfungswiderstand  $R_{ap}$  bestimmt werden, bei dem der aperiodische Grenzfall vorliegt. Zuletzt soll die Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung, ebenso wie die Frequenzabhängigkeit der Phase zwischen der erzeugenden Spannung und der Kondensatorspannung  $U_C$  bestimmt werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Der ideale Schwingkreis

Ein idealer Schwingkreis setzt sich aus einem Kondensator mit der Kapazität  $C$  und einer Spule mit der Induktivität  $L$  zusammen. Unter der Voraussetzung, dass diesem einmalig Energie hinzugeführt wurde, bleibt diese im System erhalten. Hierbei kommt es zwischen dem Kondensator und der Spule zu einem periodischen Austausch der Energie. Ist der Kondensator geladen, bildet sich ein elektrisches Feld aus, in dem die Energie steckt. Nimmt nun das elektrische Feld ab, indem sich die Ladungen durch den Draht und damit auch durch die Spule bewegen, baut sich in dieser ein magnetisches Feld auf. Wenn sich nun wiederum das magnetische Feld abbaut, baut sich das elektrische Feld auf. Ab diesem Punkt wiederholt sich der Vorgang.

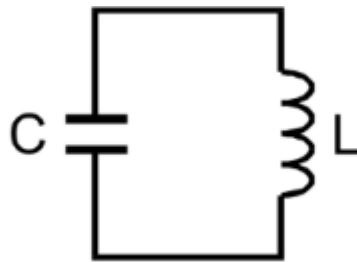
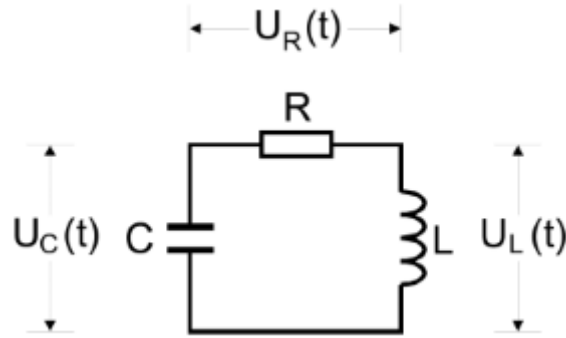


Abbildung 1: Schaltskizze eines ungedämpften Schwingkreises

### 2.2 Der reale Schwingkreis

Der Unterschied zwischen idealem und realem Schwingkreis liegt darin, dass bei einem realen Schwingkreis ein ohmscher Widerstand eingebaut ist. Somit verliert der Schwingkreis über jede Periode hinweg Energie in Form von Joulescher Wärme. Diese Schaltung wird als gedämpfter Schwingkreis bezeichnet.



**Abbildung 2:** Schaltskizze eines gedämpften Schwingkreises

Wie der Abbildung entnommen werden kann, bildet der RCL-Schwingkreis eine Masche. Nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetz ist die Summe aller Spannungen in einer geschlossenen Masche gleich null. Somit ergibt sich für den RCL-Kreis die Gleichung

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

Dabei gelten für die Spannungen die Beziehungen

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

wobei für die Stromstärke

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2)$$

gelten soll. Mithilfe dieser Zusammenhänge ergibt sich aus 1 die lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung

$$\ddot{I}(t) + \frac{R}{L} \dot{I}(t) + \frac{1}{RC} I(t) = 0, \quad (3)$$

welche sich mit Hilfe des Ansatzes

$$I(t) = Ue^{i\omega t} \quad (4)$$

lösen lässt. Durch Einsetzen des Ansatzes ergibt sich schließlich die charakteristische Gleichung

$$-w^2 + i\frac{R}{L}w + \frac{1}{LC} = 0. \quad (5)$$

Mit den beiden Kreisfrequenzen  $w_1$  und  $w_2$

$$w_{1,2} = i\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (6)$$

kann die allgemeine Lösung der Differentialgleichung

$$I(t) = U_1 e^{i w_1 t} + U_2 e^{i w_2 t}, \quad (7)$$

wobei  $U_1$  und  $U_2$  komplexe Koeffizienten darstellen, bestimmt werden. Wird nun die Darstellung

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{R}{4\pi L} \\ \nu &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \end{aligned} \quad (8)$$

verwendet, lässt sich 7 zu

$$I(t) = e^{-2\pi\mu t} (U_1 e^{i2\pi\nu t} + U_2 e^{-i2\pi\nu t}) \quad (9)$$

umschreiben. Dabei kann zwischen drei Fällen unterschieden werden, die nun vorgestellt werden sollen.

### 2.2.1 Der Schwingfall

Der erste Fall tritt dann ein, wenn  $\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2}$  gilt, was bedeutet, dass  $\nu_{1,2}$  zu imaginären Größen werden. Damit eine reelle Lösung zustande kommt, muss zwischen  $U_1$  und  $U_2$  notwendigerweise die Beziehung  $U_1 = \bar{U}_2$  gelten. Folglich lassen sie sich mithilfe der Euler-Formel in die Form

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{2} A_0 e^{i\eta} \\ U_2 &= \frac{1}{2} A_0 e^{-i\eta} \end{aligned}$$

bringen. Somit kann die Gleichung 9 in

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

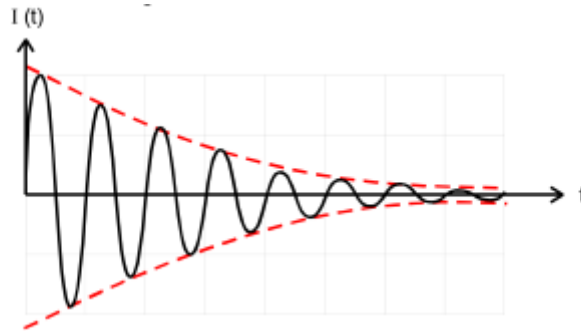
umgeformt werden. In diesem Fall liegt also eine gedämpfte harmonische Schwingung vor, dessen Amplitude mit fortlaufender Zeit exponentiell abnimmt. Die Schwingungsdauer kann mit Hilfe des Zusammenhangs  $T = \frac{1}{\nu}$  ermittelt werden. Für die allgemeine gedämpfte Schwingung ergibt sich

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}, \quad (10)$$

wobei zusätzlich die Abnahmegeschwindigkeit der Amplitude durch den Wert

$$T_{ex} = \frac{1}{2\pi\mu} = \frac{2L}{R} \quad (11)$$

beschrieben werden kann, welcher angibt, wann die Amplitude sich um den Faktor  $e$  verkleinert hat.



**Abbildung 3:** Zeitlicher Verlauf einer gedämpften Schwingung

### 2.2.2 Der Kriechfall

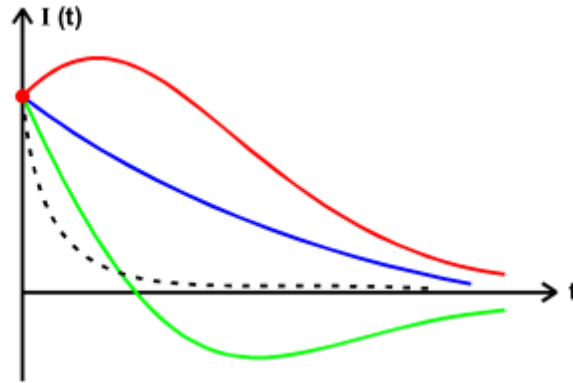
Der zweite Fall tritt ein, falls  $\frac{1}{LC} \frac{R^2}{4L^2}$  gilt, was dazu führt, dass selbst eine imaginäre Zahl darstellt. Damit enthält Gleichung 9 lediglich reelle Exponentialfunktionen, was bedeutet, dass keine Schwingung ausgeführt wird, sondern die Amplitude - abhängig von den Werten  $A_1$  und  $A_2$  - entweder direkt und monoton gegen null geht oder zuerst ein Maximum erreicht (die sogenannte Überschwingung) und dann gegen null strebt. Diese Verläufe sind in Abbildung 4 dargestellt.

### 2.2.3 Der aperiodische Grenzfall

Der dritte und letzte Fall tritt ein, wenn  $\frac{1}{LC} = \frac{R_{ap}^2}{4L^2}$  gilt, was dazu führt, dass  $\nu$  selbst null ergibt. Aus der Bedingung und Gleichung 9 ergibt sich für den zeitlichen Verlauf der Stromstärke

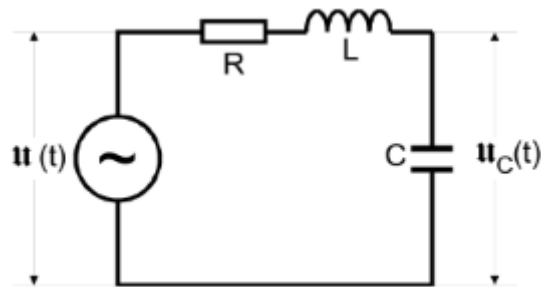
$$I(t) = Ae^{-\frac{R}{2L}t}$$

wobei angemerkt werden soll, dass hierbei keine Überschwingung auftreten kann und dass die Stromstärke hierbei noch schneller als beim Kriechfall gegen null strebt (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Darstellung des Kriechfalls und des aperiodischen Grenzfalls (gestrichelte Kurve)

## 2.3 Erzwungene Schwingungen



**Abbildung 5:** Schaltskizze eines erzwungenen RLC-Schwingkreises

Durch den Einbau einer Wechselstromquelle können am RCL-Kreis auch erzwungene Schwingungen betrachtet werden. Der schematische Aufbau für die Schaltung lässt sich der Abbildung 5 entnehmen. Für den von außen mit der Wechselspannung  $U(t) = U_0 e^{i\omega t}$  angetriebenen RCL-Kreis, geht Gleichung 1 in

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{Q}{C} = U_0 e^{i\omega t} \quad (12)$$

über. Weiterhin lässt sich diese auf die Form

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_0 e^{i\omega t} \quad (13)$$

bringen. Durch den Ansatz  $U_C(\omega, t) = \tilde{U}(\omega) e^{i\omega t}$  ( $\tilde{U}(\omega)$  ist eine komplexe Zahl) ergibt sich für die frequenzabhängigen Amplitude

$$\tilde{U}_C(\omega) = \frac{U_0(1 - LC\omega^2 - i\omega RC)}{(1 - LC\omega^2)^2 + \omega^2 R^2 C^2} \quad (14)$$

beziehungsweise für dessen Betrag

$$|\tilde{U}_C(\omega)| = U_C(\omega) = \frac{U_0}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + \omega^2 R^2 C^2}}. \quad (15)$$

Diese wird auch als Resonanzkurve bezeichnet. Zusätzlich ergibt sich als Zusammenhang zwischen Phasenverschiebung und Frequenz  $\omega$

$$\phi(\omega) = \arctan \frac{-\omega RC}{1 - LC\omega^2}. \quad (16)$$

Für  $\omega \rightarrow \infty$  gilt  $U_C \rightarrow 0$  und für  $\omega \rightarrow 0$  gilt  $U_C \rightarrow U_0$ . Falls die sogenannte Resonanzfrequenz

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} \quad (17)$$

sich der Eigenfrequenz

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (18)$$

nähert, kann die Kondensatorspannung  $U_C$  aber auch größer als die anliegende Generatorspannung  $U_0$  sein. Im Fall der schwachen Dämpfung

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

überschreitet die Kondensatorspannung die Generatorspannung, wobei

$$U_{C,max} = \frac{1}{\omega_0 RC} U_0 \quad (19)$$

den Zusammenhang darstellt. Falls  $R \rightarrow 0$  strebt, geht  $U_C \rightarrow \infty$ . Dies wird als Resonanzkatastrophe bezeichnet. Die Güte des Schwingkreises ergibt sich durch

$$q = \frac{1}{\omega_0 RC}. \quad (20)$$

Weiterhin wird die Breite der Resonanzkurve durch die Differenz der beiden Frequenzen

$$\omega_+ - \omega_- \approx \frac{R}{L} \quad (21)$$

angegeben, an denen die Kondensatorspannung, unter der Bedingung  $\frac{R^2}{L^2} \ll \omega_0^2$ , auf das  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fache ihres Maximalwerts abgefallen ist.

Für  $\frac{R^2}{2L^2} \gg \frac{1}{LC}$  liegt eine starke Dämpfung vor. Bei  $\omega_0$  liegt eine Phasenverschiebung von  $\phi = -\frac{\pi}{2}$  vor. Die Frequenzen  $\omega_1$  (bei  $\phi = \frac{\pi}{4}$ ) und  $\omega_2$  (bei  $\phi = \frac{3}{4}\pi$ ) lassen sich mit

$$\omega_{1,2} = \pm \frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} + \frac{1}{LC}} \quad (22)$$

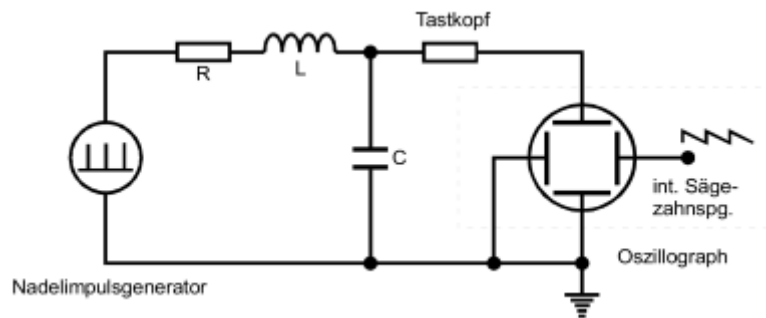
berechnen.



### 3 Durchführung

#### 3.0.1 Untersuchung der Amplitude und Berechnung des Dämpfungswiderstandes

Zur Untersuchung der Zeitanhängigkeit der Amplitude und zur Berechnung des Dämpfungswiderstandes wird ein gedämpfter Schwingkreis gemäß Abbildung 6 aufgebaut. Dieser wird mit einem Nadelimpulsgenerator so angeregt, dass zwischen zwei Impulsen die Amplitude um den Faktor drei bis acht abgenommen hat. Weiterhin soll der kleinere der beiden Festwiderstände verwendet werden und um Abweichungen der Messungen durch andere Bauteile zu vermeiden, wird ein hochohmiger Tastkopf mit  $R_i = 10\text{ M}\Omega$  verwendet.



**Abbildung 6:** Schaltskizze eines gedämpften Schwingkreises zur Berechnung des Dämpfungswiderstandes und zur Untersuchung der Zeitanhängigkeit der Amplitude

Das Bild des Spannungsverlaufs auf dem Oszilloskop soll aufgenommen werden und anschließend soll zur Bestimmung des Dämpfungswiderstandes  $R_{eff}$ , sowie der Abklingdauer  $T_{ex}$  die Kondensatorspannung  $U_C$  gegen die Zeit aufgetragen werden. Der errechnete Wert von  $R_{eff}$  soll anschließend mit dem tatsächlichen Wert  $R$  aus der Schaltung verglichen werden.

#### 3.0.2 Berechnung von dem Widerstand $R_{ap}$

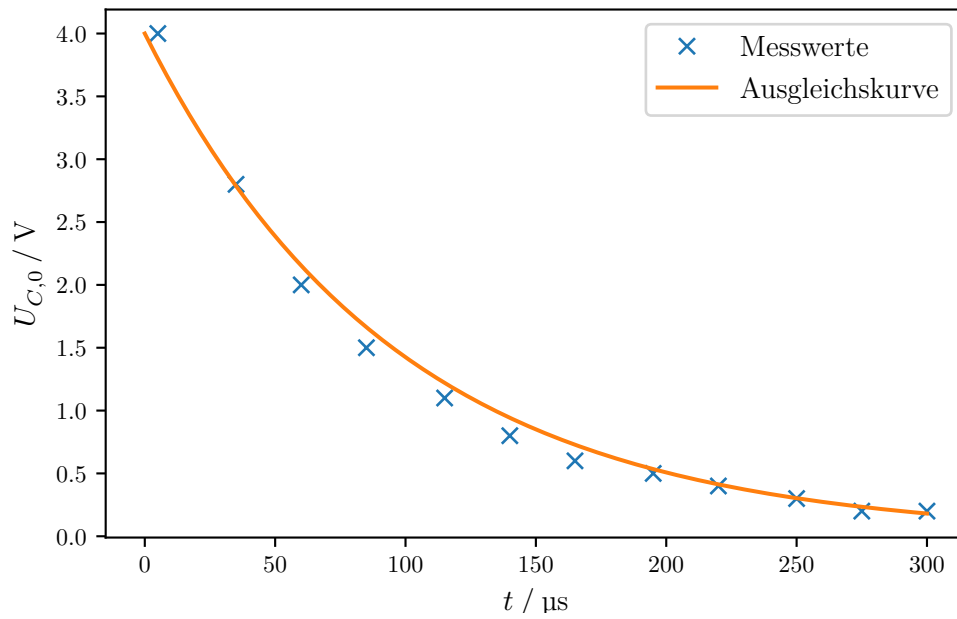
Die Schaltung wird gemäß Abbildung 7 aufgebaut, wobei der regelbare Widerstand zunächst auf seinen Maximalwert eingestellt werden soll. Mit diesen Einstellungen ist auf dem Oszilloskop lediglich das Relaxationsverhalten des Schwingkreises zu erkennen. Um den Dämpfungswiderstand zu finden, bei dem der aperiodische Grenzfall eintritt, wird der regelbare Widerstand nun vorsichtig verkleinert, bis eine Überschwingung, das bedeutet  $\frac{dU_C}{dt} > 0$ , eintritt. Wird dies erreicht, so muss der regelbare Widerstand gerade so erhöht werden, dass die Überschwingung verschwindet. Der experimentell gemessene Wert soll anschließend mit dem Theoriewert verglichen werden.



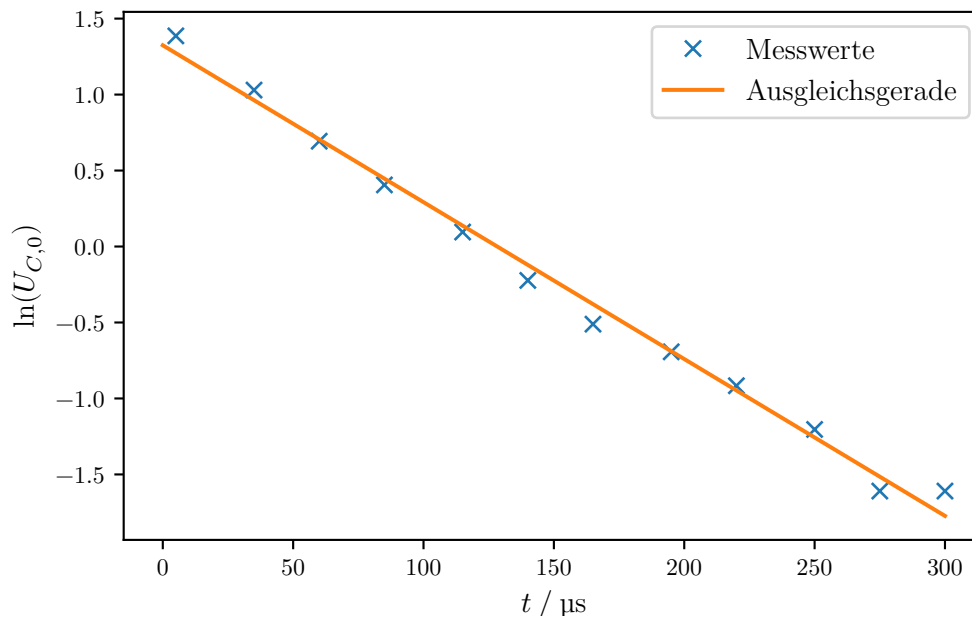


$$T_{ex} = 96,9 \cdot 10^{-3}$$

berechnet werden. Mit der Abklingdauer kann nun eine nichtlineare Ausgleichskurve erstellt werden, die der Einhüllenden in Abbildung (REFERENZ) entspricht. Die Ausgleichsgerade ist mit den abgelesenen Messwerten in Abbildung 10 zu sehen.



**Abbildung 10:** Amplitudenmaximum der Kondensatorspannung eines RLC-Kreises in Abhängigkeit der Zeit



**Abbildung 11:** Linearisierte Darstellung der Amplitudenmaxima der Kondensatorspannung eines RLC-Kreises in Abhängigkeit der Zeit

Der Dämpfungswiderstand  $R_{eff}$  ergibt sich durch Zusammenhang (REFERENZ) als WERT.

Die Abweichung zum eigentlichen Widerstandwert  $R = (30,3 \pm 0,1) \Omega$  lässt sich durch den Innenwiderstand des Generators erklären, welcher  $R_G = 600 \Omega$  beträgt.

## 4.2 Aperiodischer Grenzfall

Bei der Messung nach (REFERENZ AUF DURCHFÜHRUNG) ergab sich für  $R_{ap}$  ein Wert von

$$R_{ap} = 1,4 \text{ k}\Omega$$

Mit Gleichung (REFERENZ) lässt sich  $R_{ap}$  als

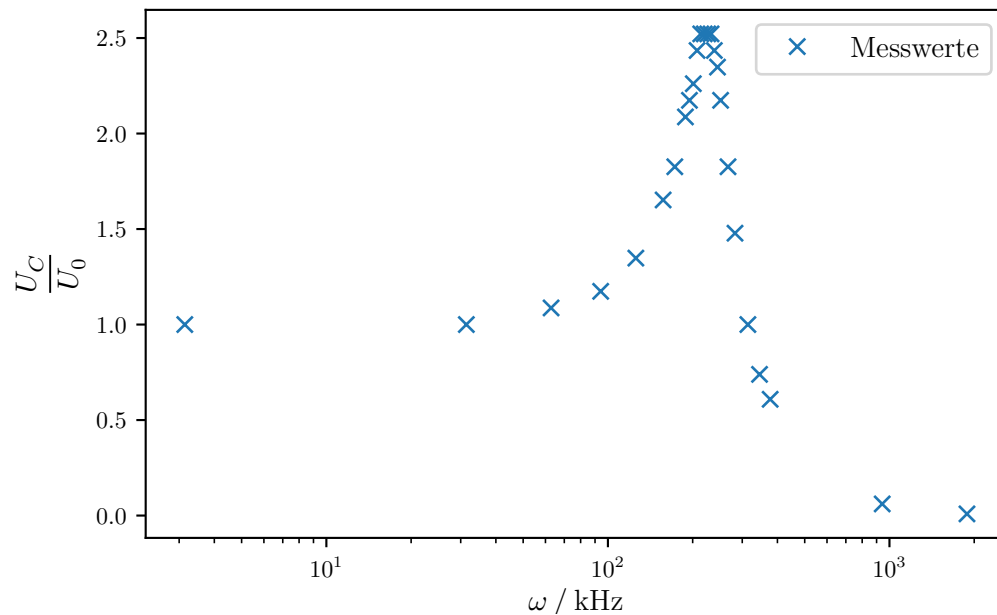
$$R_{ap} = 1,67 \text{ k}\Omega$$

berechnen. Beim Vergleich mit dem Messwert fällt wieder auf, dass sich die Abweichung durch den nicht beachteten Innenwiderstand  $R_G = 600 \Omega$  des Generators erklären lässt.

### 4.3 Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung

$\omega / \text{kHz}$	$U_C / \text{V}$
3	2,3
31	2,3
63	2,5
94	2,7
126	3,1
157	3,8
173	4,2
188	4,8
195	5,0
201	5,2
207	5,6
214	5,8
220	5,8
226	5,8
232	5,8
239	5,6
245	5,4
251	5,0
267	4,2
283	3,4
314	2,3
346	1,7
377	1,4
942	0,14
1885	0,02

**Tabelle 2:** Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung bei einer erzwungenen Schwingung



**Abbildung 12:** Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung bei einer erzwungenen Schwingung

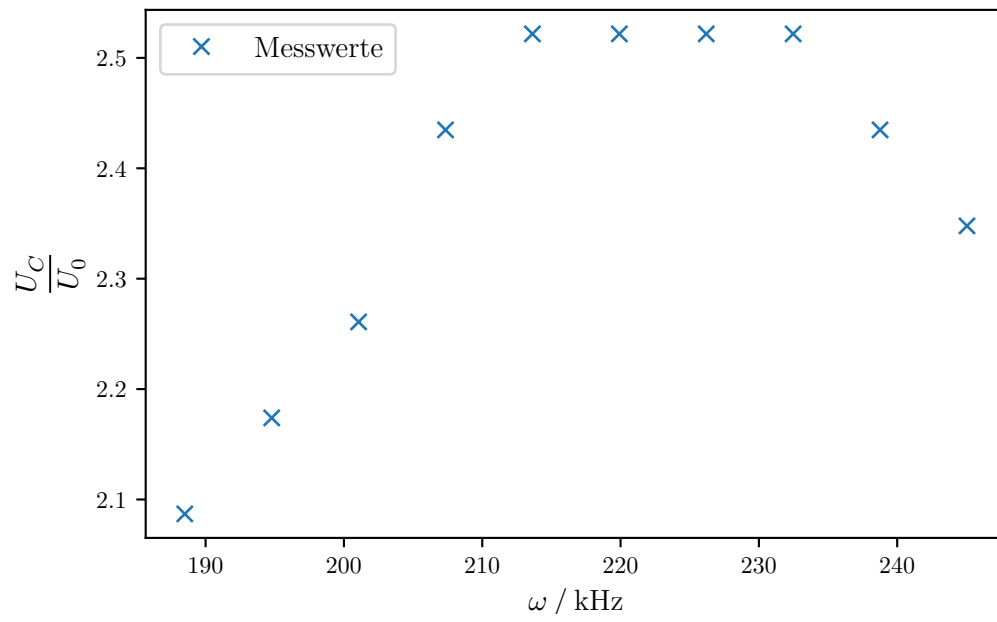
Die Messwerte aus Tabelle 2 werden in Abbildung ?? dargestellt. Dabei ist  $U_0$  der gemessene Wert  $U_0 = 2,3 \text{ V}$  der Generatorspannung. Die Resonanzüberhöhung lässt sich als

$$q = 2,52$$

ablesen. Dieser lässt sich mit dem nach Gleichung (REFERENZ) als

$$q = 0,9599 \pm 0,0024$$

errechneten Wert vergleichen. Für diesen wurde nun  $R = (271,6 \pm 0,1) \Omega + 600 \Omega$  angenommen. (VERGLEICH) In Abbildung (REFERENZ) ist der Bereich um die Resonanzfrequenz linear dargestellt.



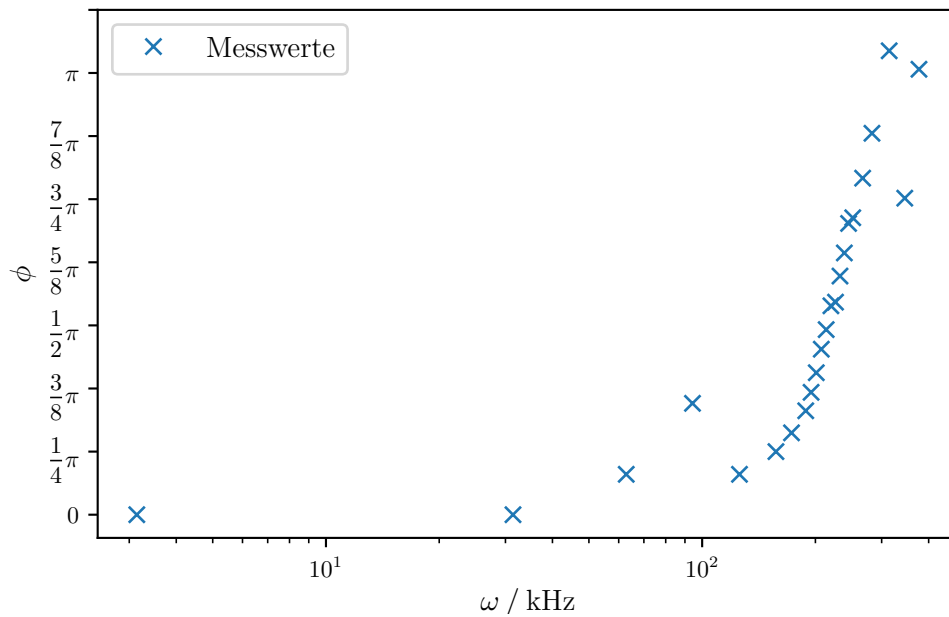
**Abbildung 13:** Frequenzabhängigkeit der Kondensatorspannung bei einer erzwungenen Schwingung in Nähe der Resonanz



#### 4.4 Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen Kondensator- und Generatorspannung

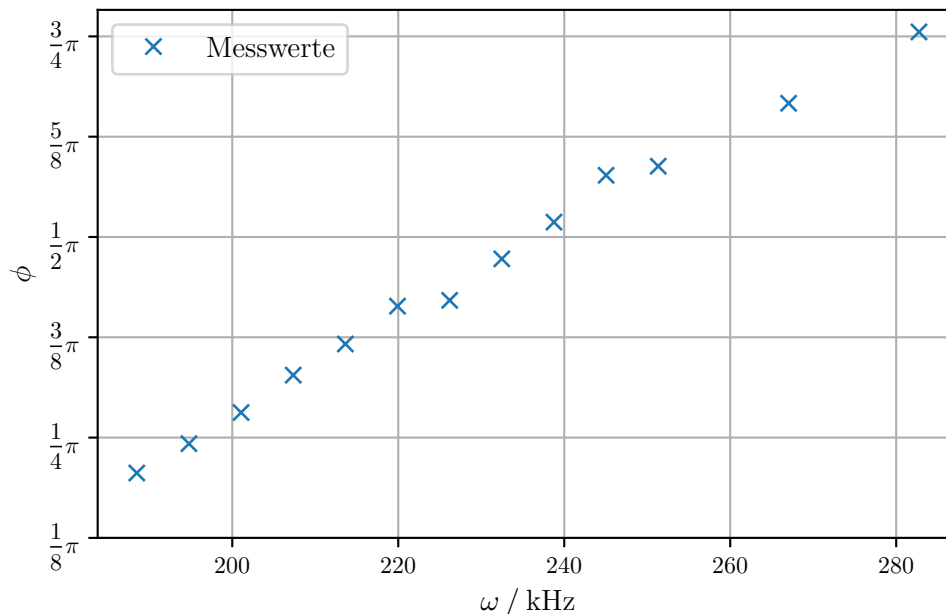
$\omega / \text{kHz}$	$a / \mu\text{s}$	$b / \mu\text{s}$	$\phi$
3	0,0	2000,0	0,00
31	0,0	100,0	0,00
63	2,0	50,0	0,25
94	7,5	68,0	0,69
126	2,0	50,0	0,25
157	2,5	40,0	0,39
173	3,0	37,0	0,51
188	3,5	34,0	0,65
195	4,0	33,0	0,76
201	4,5	32,0	0,88
207	5,0	30,5	1,03
214	5,5	30,0	1,15
220	6,0	29,0	1,30
226	6,0	28,5	1,32
232	6,5	27,5	1,49
239	7,0	27,0	1,63
245	7,5	26,0	1,81
251	7,5	25,5	1,85
267	8,0	24,0	2,09
283	8,5	22,5	2,37
314	8,5	18,5	2,89
346	5,8	18,5	1,97
377	7,5	17,0	2,77

**Tabelle 3:** Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen Kondensator- und Generatorspannung



**Abbildung 14:** Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen Kondensator- und Generatorspannung

Die Messwerte aus Tabelle (REFERENZ) werden in Abbildung (REFERENZ) dargestellt. In Abbildung (REFERENZ) ist der Bereich um die Resonanzfrequenz linear dargestellt. Diese lässt sich an der Stelle  $\pi/2$  als (WERT) ablesen. Im Vergleich zum gerechneten Wert (WERT) fällt auf, dass(VERGLEICH).



**Abbildung 15:** Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen Kondensator- und Generatorspannung in Nähe der Resonanz

$\omega_1$  liegt bei  $\pi/4$  und entspricht somit dem Messwert (WERT).

$\omega_1$  liegt bei  $\pi \cdot 3/4$  und entspricht somit dem Messwert (WERT).

Diese Werte können mit den beiden aus Gleichung (REFERENZ) errechneten Werten (WERTE)

verglichen werden. (VERGLEICH)

## 5 Diskussion

## 6 Anhang

### Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung-Das Relaxationsverhalten eines RC-Kreises*.
- [2] TU Dortmund. *Versuchsanleitung-Gedämpfte und erzwungene Schwingungen*.
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.

- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.