

Versuch 354

## **Gedämpfte und erzwungene Schwingungen**

Lukas Nickel

lukas.nickel@tu-dortmund.de

Rohat Kavili

rohat.kavili@tu-dortmund.de

Durchführung: 17.11.2015

Abgabe: 24.11.2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Theoretische Grundlagen . . . . .	1
1.2.1	Fall 1: Starke Dämpfung und aperiodischer Grenzfall . . . . .	2
1.2.2	Fall 2: Schwache Dämpfung . . . . .	2
1.2.3	Angeregter Schwingkreis . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
3.1	Zu den Messwerten . . . . .	5
3.2	Dämpfungswiderstand . . . . .	6
3.3	Aperiodischer Grenzfall) . . . . .	8
3.4	Resonanzüberhöhung . . . . .	9
3.5	Phasenverschiebung . . . . .	13
	<b>Literatur</b>	<b>17</b>

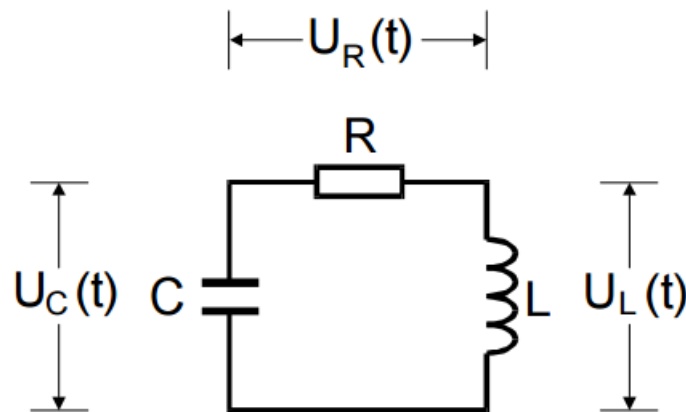
# 1 Theorie

## 1.1 Einleitung

Ziel dieses Versuches ist es, die Eigenschaften eines RLC-Schwingkreises zu bestimmen. Dafür werden Messungen mit Variation des Widerstandes oder der Frequenz durchgeführt.

## 1.2 Theoretische Grundlagen

Ein RLC-Kreis stellt einen gedämpften Schwingkreis dar. Die Schwingung besteht aus einer Verschiebung der elektromagnetischen Energie zwischen Spule L und Kondensator C. Dabei ändert der Strom periodisch sein Vorzeichen. Eine schematische Darstellung



**Abbildung 1:** Gedämpfter Schwingkreis(Quelle: [1]).

ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Differentialgleichung eines RLC-Kreises entspricht der eines gedämpften, harmonischen Oszillators:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{I}{LC} = 0. \quad (1)$$

Entsprechen ergeben sich die Lösungen zu:

$$I(t) = I_1 e^{j\omega_1 t} + I_2 e^{j\omega_2 t} \quad (2)$$

mit

$$\omega_{1,2} = j\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (3)$$

Dabei ist j die imaginäre Einheit. Wie unschwer an Gleichung 3 zu erkennen ist müssen abhängig von den Parametern R, L und C nun 3 Fälle unterschieden werden.

### 1.2.1 Fall 1: Starke Dämpfung und aperiodischer Grenzfall

In dem Fall  $\frac{1}{LC} < \frac{R^2}{4L^2}$  ist der Ausdruck in der Wurzel imaginär, in Gleichung 2 kommen also nur noch reelle Exponentialfunktionen vor. Diese beschreiben allerdings keine Schwingung, sondern die **aperiodische Dämpfung**. Nach einer gewissen Zeitspanne liegt dabei ein gewöhnliches Relaxationsverhalten vor, vorher kann allerdings noch ein Extremwert durchschritten werden. Den Fall  $\frac{1}{LC} = \frac{R^2}{4L^2}$  bezeichnet man als **aperiodischen Grenzfall**. Der Wurzelterm in Gleichung 3 verschwindet und  $I(t)$  geht schnellstmöglichst gegen null. Beide Fälle sind in Abb.2 dargestellt, die gestrichelte Linie zeigt den aperiodischen Grenzfall, die anderen mögliche Verläufe einer aperiodischen Dämpfung:

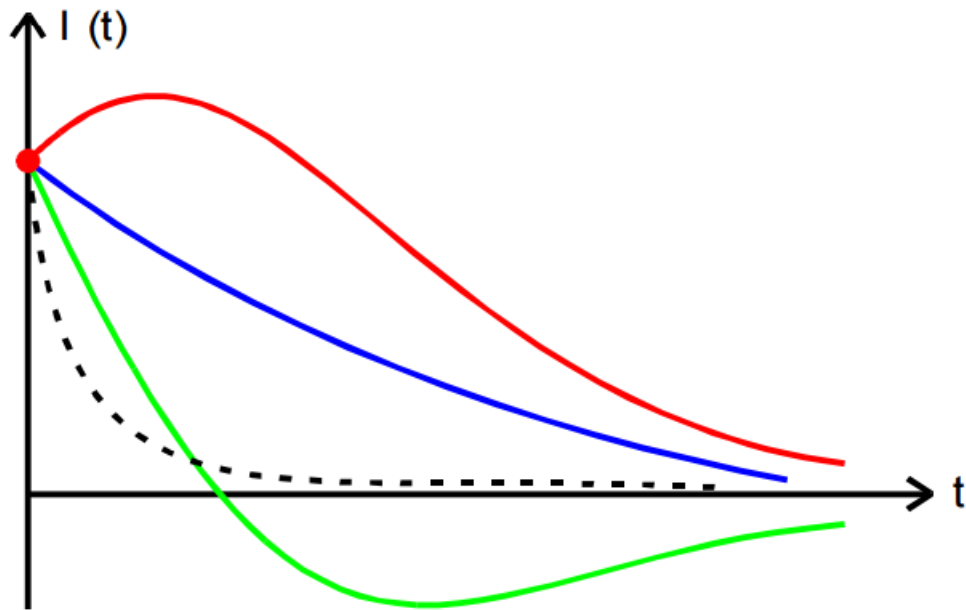


Abbildung 2: Stromverlauf in einem aperiodisch gedämpften System (Quelle: [1]).

### 1.2.2 Fall 2: Schwache Dämpfung

Unter der Bedingung  $\frac{1}{LC} > \frac{R^2}{4L^2}$  ist der Term unter der Wurzel in Gleichung 3 positiv, die Wurzel also reell. Damit muss  $I_1 = I_2$  sein und für den Strom ergibt sich:

$$I(t) = A_0 e^{-2\pi\mu t} \cos(2\pi\nu t + \eta). \quad (4)$$

Dabei beschreibt die einhüllende  $e$ -Funktion die Dämpfung und der Kosinus-Term die Schwingungseigenschaft des Systems,  $\nu$  bezeichnet die Frequenz. Zwei wichtige Eigen-

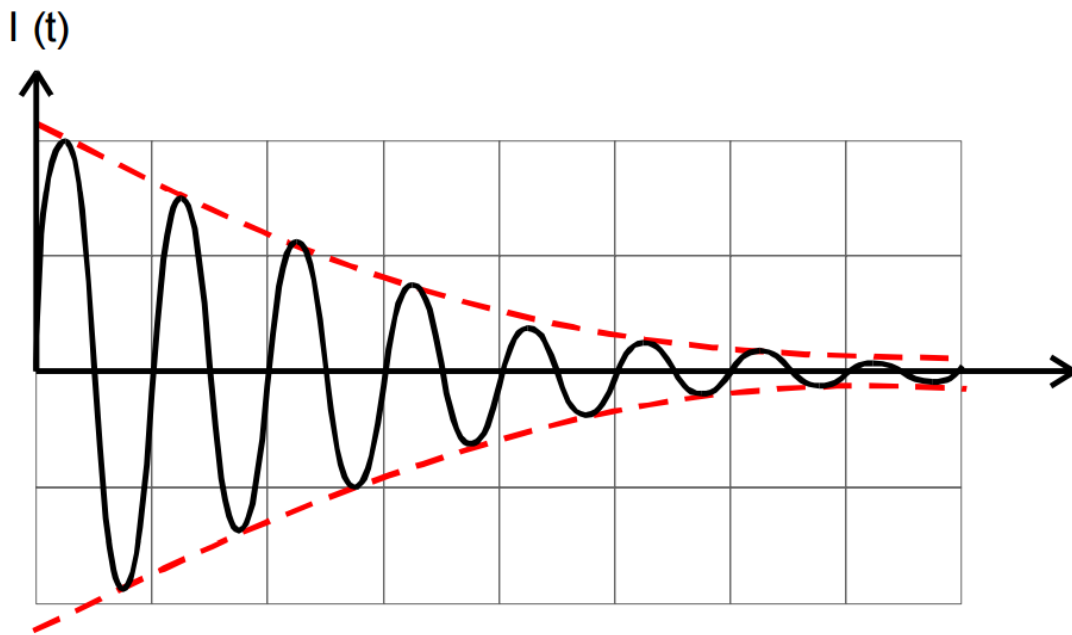
schaften des Schwingkreises bestehen in der Schwingungsdauer

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi}{\sqrt{1/LC - R^2/4L^2}} \quad (5)$$

und der Abklingdauer

$$T_{ex} = \frac{1}{2\pi\mu} = \frac{2L}{R}. \quad (6)$$

Als Abklingdauer wird die Zeit bezeichnet, nach der die Amplitude auf den e-ten Teil ihres ursprünglichen Wertes abgefallen ist.



**Abbildung 3:** Spannungsverlauf bei einer gedämpften Schwingung (Quelle: [1]).

Ein solches gedämpftes Schwingungsverhalten ist in 3 dargestellt. Die Lösung für den ungedämpften Schwingkreis erhält man über den selben Weg mit der Annahme, dass  $\frac{1}{LC} \gg \frac{R^2}{4L^2}$  sei.

### 1.2.3 Angeregter Schwingkreis

Für eine erzwungene Schwingung wird der Schwingkreis von einer äußeren sinusförmigen Wechselspannung kontinuierlich angetrieben. Die komplexe DGL wird also inhomogen und sieht wie folgt aus:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{I}{LC} = U_0 \exp j\omega t \quad (7)$$

Wie zuvor entspricht  $j$  der imaginären Einheit, die rechte Seite der Gleichung stellt die anregende Spannung dar. Abhängig von der Frequenz dieser Spannungsquelle variieren Spannungsamplitude und Phasenverschiebung zwischen Generator und Kondensator:

$$\phi(\omega) = \arctan \frac{-\omega RC}{1 - LC\omega^2} \quad (8)$$

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

Dabei bezeichnet  $\phi$  die Phasenverschiebung und  $U_c$  die Spannung am Kondensator. Von besonderer Bedeutung ist die Resonanzfrequenz  $\omega_{res}$ , bei der  $U_c$  ein Maximum erreicht, das größer ist als  $U_0$ :

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

Außerdem erkennt man an 9, dass  $U_c$  für  $\omega \rightarrow \infty$  gegen 0 und für  $\omega \rightarrow 0$  gegen  $U_0$  geht. Eine weitere charakteristische Größe eines angeregten Schwingkreises ist die Güte oder Resonanzüberhöhung, gegeben durch:

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

Die Größe  $\frac{1}{\omega_0 RC}$  entspricht dabei der Güte  $q$  des Schwingkreises. Außerdem lässt sich zwischen Güte und Schärfe der Resonanz folgender Zusammenhang herstellen:

$$q = \frac{\omega_0}{\omega_+ - \omega_-}. \quad (12)$$

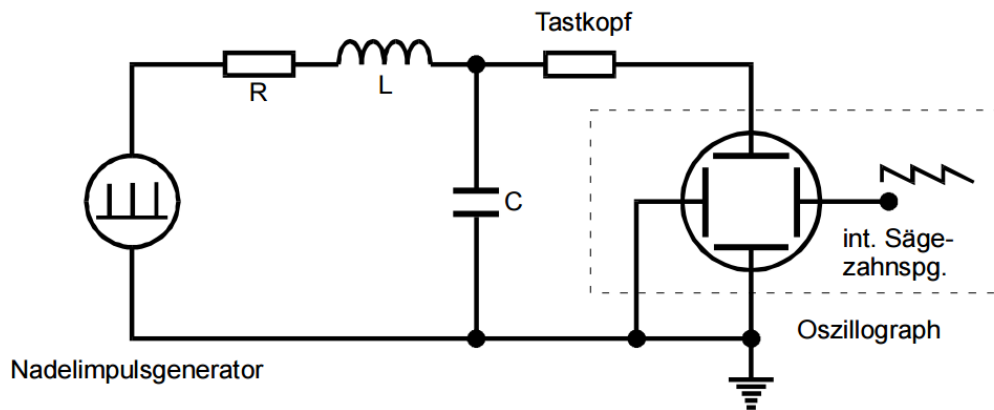
Dabei bezeichnen  $\omega_-$  und  $\omega_+$  die Frequenzen bei denen  $U_c$  dem  $1/\sqrt{2}$ -fachen des Maximums entspricht.

## 2 Durchführung

Für die einzelnen Teile des Versuches wird durchgehend derselbe Schwingkreis verwendet. Zunächst werden Eigenschaften des gedämpften Schwingkreises bestimmt, im speziellen der effektive Dämpfungswiderstand aus dem zeitlichen Amplitudenverlauf sowie der Dämpfungswiderstand, bei dem die aperiodische Dämpfung auftritt.

Im ersten Fall sei der Widerstand konstant und der Schwingkreis wird durch eine Rechteckspannung angeregt. Durch geeignete Wahl der Frequenz lässt sich ein gedämpfter Schwingkreis ohne Anregung simulieren. Der Spannungsverlauf wird an einem Oszilloskop aufgezeichnet und zur Auswertung abgespeichert. Die verwendete Schaltung ist in Abbildung 4 dargestellt. Anstelle des Nadelimpulsgenerators wird die erwähnte Rechtecksspannung verwendet.

Für den zweiten Versuchsteil wird der feste Widerstand  $R$  durch einen auf bis zu 10 k $\Omega$  regelbaren ersetzt. Dieser Widerstand wird zunächst auf seinen Maximalwert eingestellt



**Abbildung 4:** Schaltung zur Untersuchung der Zeitabhängigkeit der Amplitude (Quelle: [1]).

und dann verringert, bis der Spannungsverlauf auf dem Oszilloskop dem des aperiodischen Grenzfalles entspricht (siehe Abb.2).

Für die weiteren Versuchsteile wird der regelbare Widerstand wieder durch einen festen Widerstand ersetzt und die anregende Spannung zu einer sinusförmigen Wechselspannung geändert. Die Amplitude bleibt über alle Messungen konstant, die Frequenz wird geändert um die Frequenzabhängigkeit von Amplitude und Phasenverschiebung nachzuweisen. Gemessen werden bei verschiedenen Frequenzen die Erreger- und Kondensatorspannung sowie die Phase zwischen beiden.

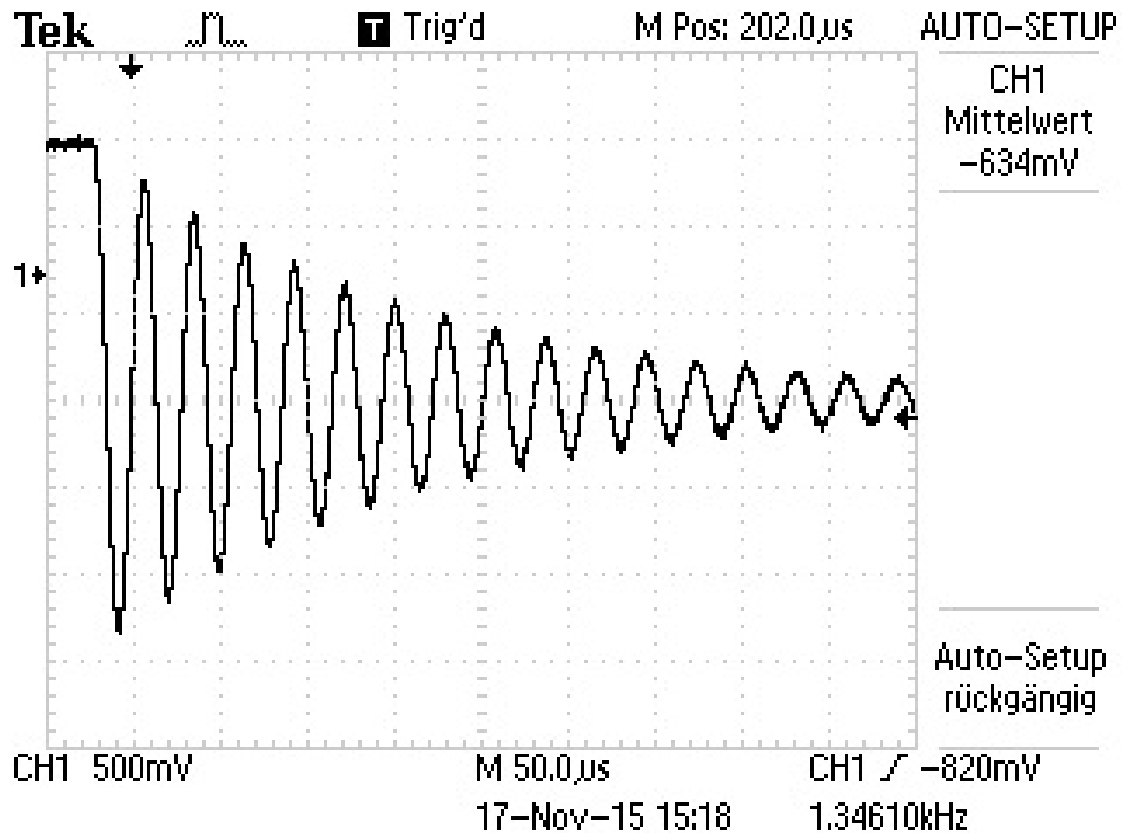
Dafür werden die Amplitude von Kondensator- und Erregerspannung für jede Frequenz einzeln mit dem Tastkopf gemessen, weil die Messung durch den Frequenzgang der Tastkopfes beeinflusst werden kann. Um die Phase zu messen werden beide Spannungen gegeneinander am Oszilloskop aufgetragen und die Zeitdifferenz zwischen zwei Extrema oder ähnlich ausgezeichneten Punkten bestimmt.

### 3 Auswertung

#### 3.1 Zu den Messwerten

Im Zuge dieser Auswertung werden nur die relevanten Messwerte herangezogen, alle Werte auszudrucken würde den Rahmen dieses Protokolls sprengen. Die originalen Messwerte zu den Aufgaben 5c) und 5d) sind hinter das Protokoll gehängt, die gesamte Messreihe zu 5a) und 5b) (von dem Oszilloskop abgespeichert) sind auf Wunsch über den Link im Quellenverzeichnis zu finden (siehe [2]).

### 3.2 Dämpfungswiderstand



**Abbildung 5:** Zeitlicher Spannungsverlauf des gedämpften Schwingkreises

Abb. 5 zeigt den Verlauf der Spannung in dem gedämpften Schwingkreis. Gut zu erkennen sind die sinusförmige Schwingung und die einhüllende e-Funktion, die die Dämpfung beschreibt. Die Frequenz beträgt 1,35 kHz. Die Extremstellen der Spannungen sind in Tabelle 1 dargestellt, für die übrigen, für die Auswertung weniger relevanten Werte sei auf Quelle [2] verwiesen.

Der negative Zeitabschnitt bei den ersten beiden Messwerten sowie die Tatsache, dass die Messwerte der Spannung offensichtlich einem Offset unterliegen, spielt für die Berechnung des Dämpfungswiderstandes keine nennenswerte Rolle (siehe Diskussion). Als Spannungsamplitude wird im folgenden die Differenz zwischen Maximum und Minimum der Spannung bezeichnet, auf Tabelle 1 bezogen also jeweils die Differenz zweier aufeinanderfolgenden Werte. Der Abfall der Spannung soll der Theorie zufolge (siehe Gleichung 4) mit  $e^{-2\pi\mu t}$  erfolgen. Die Spannungsamplitude fällt bei  $t=0.0001816$  s zum ersten Mal unter  $\frac{1}{e}$ tel des ursprünglichen Wertes. Da der erste Messwert nicht bei  $t=0$  aufgenommen wurde, ergibt sich also

$$T_{ex} = t_{1/e} - t_0 = (0.182 \pm 0.005) \text{ ms} - (-0.021 \pm 0.005) \text{ ms} = (0.203 \pm 0.007) \text{ ms}. \quad (13)$$



**Tabelle 1:** Messwerte 5a)

$t$ [ms]	$U$ [V]
-0.021 $\pm$ 0.0005	0.78 $\pm$ 0.005
-0.006 $\pm$ 0.0005	-2.06 $\pm$ 0.005
0.008 $\pm$ 0.0005	0.54 $\pm$ 0.005
0.023 $\pm$ 0.0005	-1.88 $\pm$ 0.005
0.037 $\pm$ 0.0005	0.36 $\pm$ 0.005
0.052 $\pm$ 0.0005	-1.70 $\pm$ 0.005
0.066 $\pm$ 0.0005	0.18 $\pm$ 0.005
0.081 $\pm$ 0.0005	-1.56 $\pm$ 0.005
0.095 $\pm$ 0.0005	0.08 $\pm$ 0.005
0.110 $\pm$ 0.0005	-1.44 $\pm$ 0.005
0.125 $\pm$ 0.0005	-0.04 $\pm$ 0.005
0.138 $\pm$ 0.0005	-1.34 $\pm$ 0.005
0.152 $\pm$ 0.0005	-0.14 $\pm$ 0.005
0.168 $\pm$ 0.0005	-1.24 $\pm$ 0.005
0.182 $\pm$ 0.0005	-0.22 $\pm$ 0.005
0.197 $\pm$ 0.0005	-1.18 $\pm$ 0.005
0.210 $\pm$ 0.0005	-0.30 $\pm$ 0.005
0.226 $\pm$ 0.0005	-1.12 $\pm$ 0.005
0.239 $\pm$ 0.0005	-0.36 $\pm$ 0.005
0.254 $\pm$ 0.0005	-1.06 $\pm$ 0.005
0.268 $\pm$ 0.0005	-0.42 $\pm$ 0.005
0.282 $\pm$ 0.0005	-1.02 $\pm$ 0.005

Der Exponent der e-Funktion muss zu diesem Zeitpunkt -1 betragen (auf  $4/e = e^{-1}$  abgefallen), es ergibt sich also:

$$-2\pi\mu T_{ex} = -1 \Rightarrow \mu = \frac{1}{2\pi T_{ex}} = (784.0 \pm 27.3) \text{ s}^{-1} \quad (14)$$

### 3.3 Aperiodischer Grenzfall)

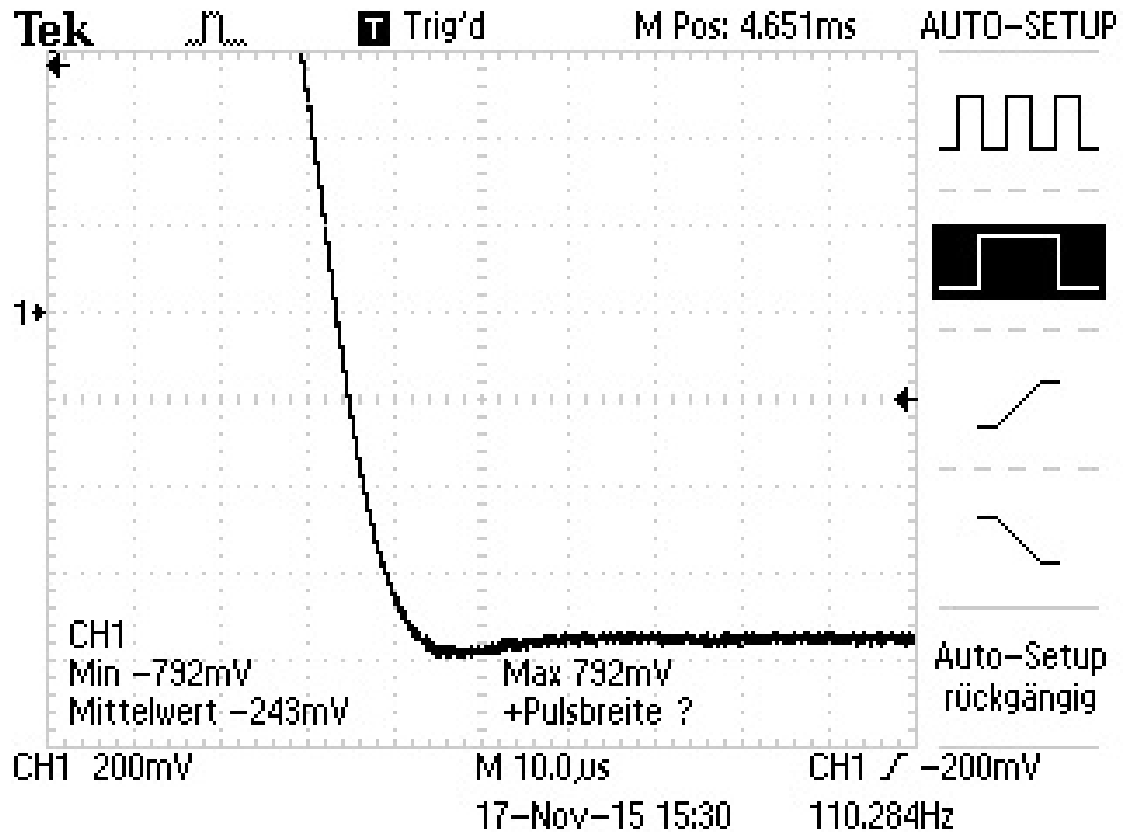
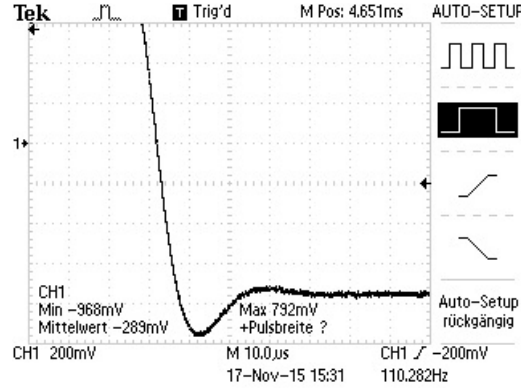


Abbildung 6: Spannungsverlauf bei aperiodischer Dämpfung.

Abb.6 zeigt den gemessenen Spannungsabfall für  $R = (3120 \pm 20) \Omega$ . Bei diesem Widerstand tritt die aperiodische Dämpfung auf, was daran zu erkennen ist dass kein Überschwingen stattfindet wie z.B. in Abb.7, bei der ein Widerstand von  $R = (2260 \pm 20) \Omega$  eingestellt wurde.

Der theoretische Wert berechnet sich gemäß:

$$\frac{1}{LC} = R_{ap}^2 / 4L^2 \Rightarrow R_{ap} = \sqrt{\frac{4L}{C}} = (4390.4 \pm 9.0) \Omega. \quad (15)$$



**Abbildung 7:** Spannungsverlauf bei aperiodischer Dämpfung mit  $R \neq R_{ap}$

Für den Fehler gilt dabei gemäß der Gaußschen Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial R(C, L)}\right) \Delta L + \left(\frac{\partial R(C, L)}{\partial C}\right) \Delta C} \quad (16)$$

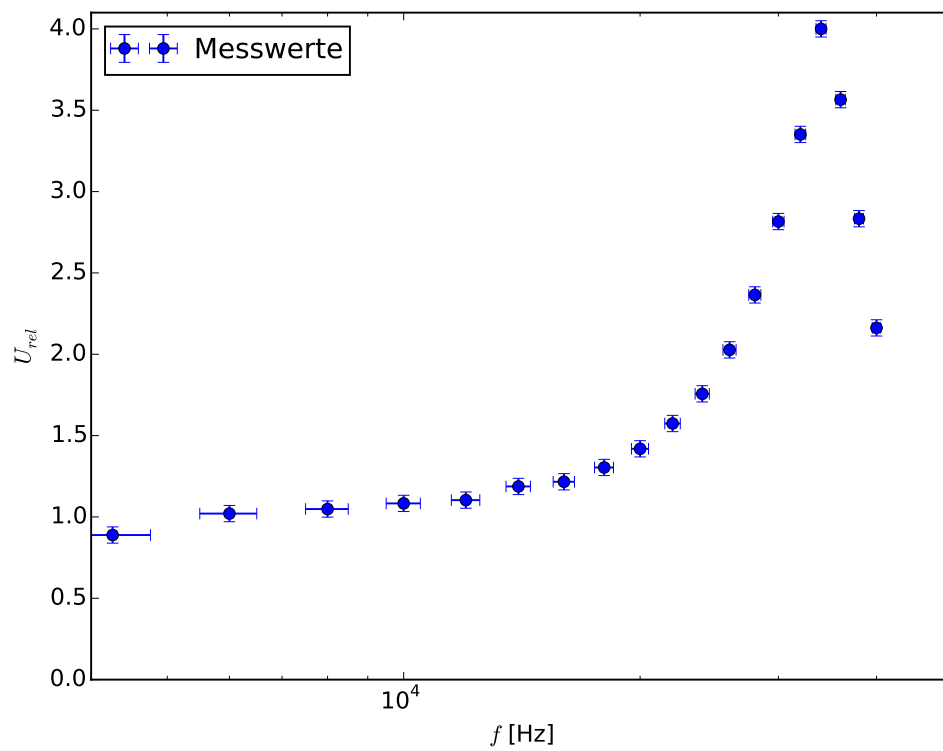
Der theoretische Wert weicht recht deutlich (40%) von dem gemessenen ab. Eine Erklärung dafür könnten die weiteren internen Widerstände sein, die in der Schaltung in Form von Kabel u.ä. enthalten sind. Außerdem ist die Toleranz des regelbaren Widerstandes nicht bekannt. Die Ungenauigkeit von  $R$  liegt also tatsächlich höher als die angegeben  $\pm 20 \Omega$ . Ohne Genaueres über den verwendeten Widerstand zu wissen, erscheint die Abweichung vom Theoriewert allerdings recht hoch und lässt einen Fehler bei der Messung vermuten.

### 3.4 Resonanzüberhöhung

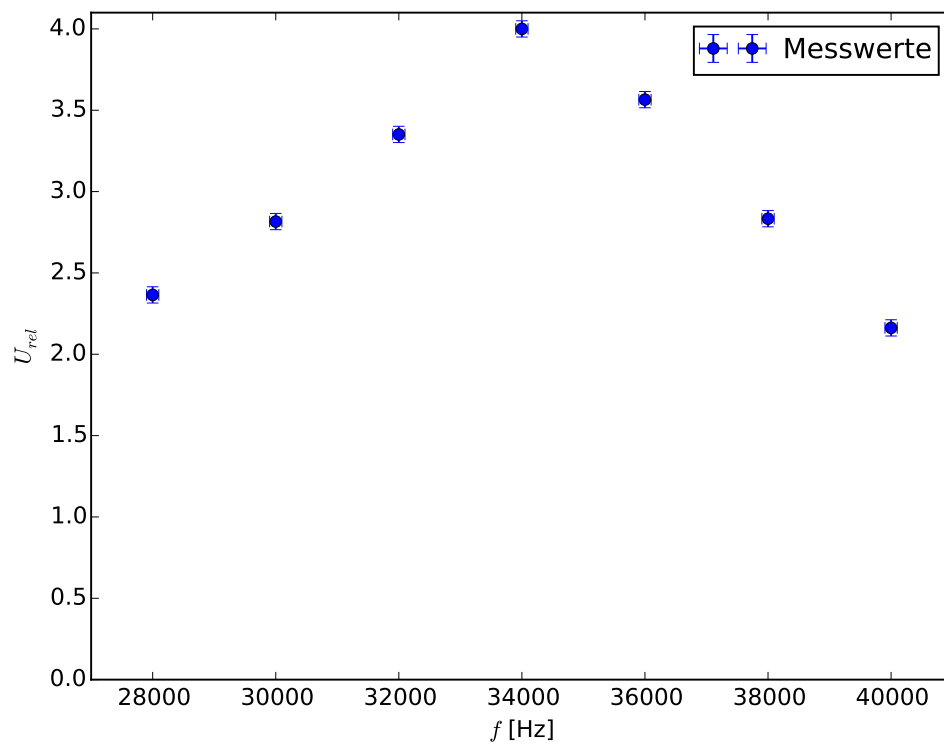
Um die Resonanzüberhöhung zu bestimmen, wird zunächst die Kondensatorspannung relativ zu der Erregerspannung berechnet. Da beide Werte mit dem selben Tastkopf gemessen wurden, kann die Frequenzabhängigkeit dieses vernachlässigt werden und man erhält  $U_{rel} = \frac{U_c}{U_0}$ . Die Messwerte sind in Tabelle 2 dargestellt. In Abb.8 lässt sich das qualitativ erwartete Ergebnis wiederfinden. Um die Resonanzfrequenz  $\omega_0$  steigt die Kondensatorspannung sprunghaft an, für geringe Frequenzen nähert sie sich der Erregerspannung  $U_0$ . Auffällig ist der Wert bei  $f=4.26 \text{ kHz}$ , bei dem die Kondensatorspannung unter  $U_0$  fällt. Dies ist mit der Theorie nicht vereinbar und am ehesten auf einen Fehler bei der Messung von  $U_c$  zurückzuführen. Die maximale Spannung liegt bei  $U_{max} = (5.520 \pm 0.005) \text{ V}$ .  $U_0$  beträgt dabei  $(1.380 \pm 0.005) \text{ V}$ , damit beträgt die Resonanzüberhöhung  $4.000 \pm 0.015$ . Zur Bestimmung der Schärfe der Resonanz ist es zweckmäßig den Bereich um die Resonanzfrequenz linear darzustellen, so zu sehen in Abb.9. Die Resonanzfrequenz liegt im Rahmen der aufgenommenen Messwerte bei  $\omega = (34 \pm 1) \text{ kHz}$ . In vorliegendem Fall entspricht  $U_{rel}(\omega_{\pm})$  dem 2.83 fachen von  $U_0$ . Diese Werte werden bei  $\omega_- = (30 \pm 1) \text{ kHz}$  ( $U_{rel} = 2.816 \pm 0.010$ ) und  $\omega_+ = (38 \pm 1) \text{ kHz}$  ( $U_{rel} = 2.833 \pm 0.010$ ) erreicht. Gemäß Gleichung 12 ergibt sich demnach für die Güte:

**Tabelle 2:** Frequenzabhängige Spannung an Schwingkreis und Generator)

$U_c[\text{V}]$	$U_0[\text{V}]$	$f[\text{kHz}]$
$1.28 \pm 0.005$	$1.44 \pm 0.005$	$4.26 \pm 0.005$
$1.48 \pm 0.005$	$1.45 \pm 0.005$	$6.00 \pm 0.005$
$1.51 \pm 0.005$	$1.44 \pm 0.005$	$8.00 \pm 0.005$
$1.56 \pm 0.005$	$1.44 \pm 0.005$	$10.00 \pm 0.005$
$1.60 \pm 0.005$	$1.45 \pm 0.005$	$12.00 \pm 0.005$
$1.71 \pm 0.005$	$1.44 \pm 0.005$	$14.00 \pm 0.005$
$1.80 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$16.00 \pm 0.005$
$1.93 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$18.00 \pm 0.005$
$2.10 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$20.00 \pm 0.005$
$2.33 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$22.00 \pm 0.005$
$2.60 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$24.00 \pm 0.005$
$3.00 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$26.00 \pm 0.005$
$3.50 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$28.00 \pm 0.005$
$4.28 \pm 0.005$	$1.52 \pm 0.005$	$30.00 \pm 0.005$
$4.96 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$32.00 \pm 0.005$
$5.52 \pm 0.005$	$1.38 \pm 0.005$	$34.00 \pm 0.005$
$4.92 \pm 0.005$	$1.38 \pm 0.005$	$36.00 \pm 0.005$
$4.08 \pm 0.005$	$1.44 \pm 0.005$	$38.00 \pm 0.005$
$3.20 \pm 0.005$	$1.48 \pm 0.005$	$40.00 \pm 0.005$



**Abbildung 8:** Halblogarithmische Auftragung von  $U_{rel}$  gegen  $f$



**Abbildung 9:**  $U_{rel}$  um die Resonanzfrequenz linear aufgetragen

$$q = \frac{(34 \pm 1) \text{ kHz}}{(38 \pm 1) \text{ kHz} - (30 \pm 1) \text{ kHz}} = 4.2 \pm 0.8 .$$

Dieser Wert weicht nur um  $6.00 \pm 0.17\%$  von dem Wert ab, der aus der maximalen Spannung hergeleitet wurde. Die Abweichung lässt sich neben Messfehlern in erster Linie auf die geringe Anzahl an Messwerten im Bereich der Resonanzfrequenz zurückführen. Dadurch ist die Genauigkeit bei der Bestimmung von  $U_{Cmax}$  sowie  $\omega_{\pm}$  begrenzt. Die maximale Spannung kann durchaus einige Prozentpunkte höher als der höchste gemessene Wert von  $4 \cdot U_0$  liegen. Berechnet man die Güte anhand der Parameter des Schwingkreises (Vgl. 11) erhält man mit:

$$L = (10.11 \pm 0.03) \text{ mH}$$

$$C = (2.098 \pm 0.006) \text{ nF} \text{ und}$$

$$R = (509.5 \pm 0.5) \Omega$$

für die Güte:

$$q = 4.309 \pm 0.010.$$

Dieser Wert liegt in guter Übereinstimmung mit den beiden aus den Messwerten erhaltenen Werten für q.

### 3.5 Phasenverschiebung

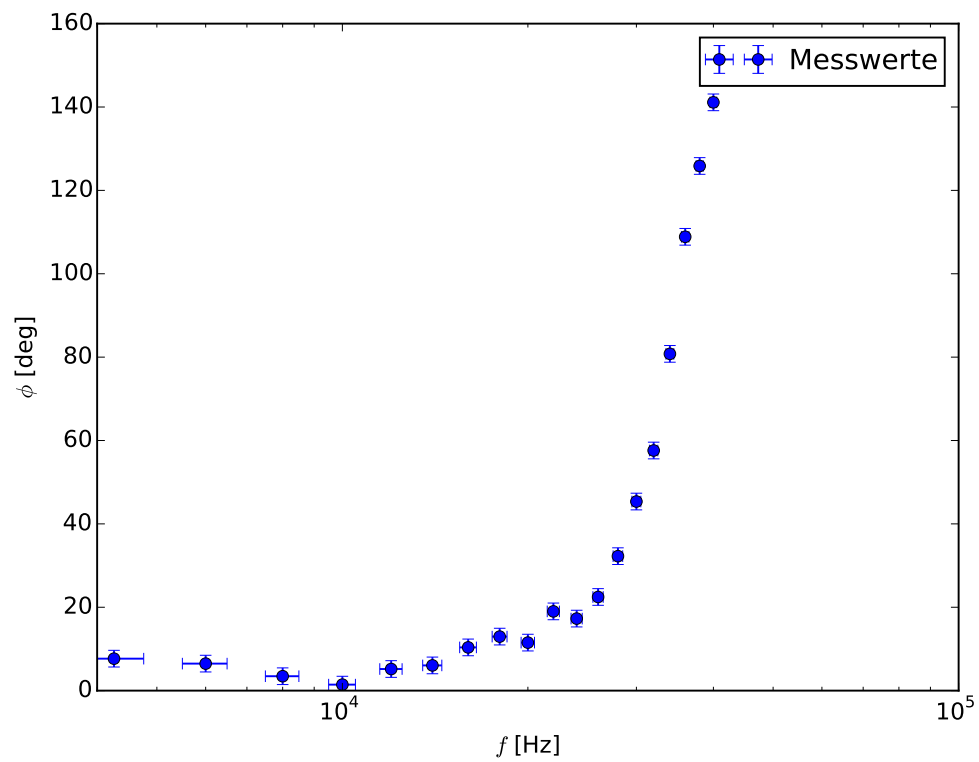
Die Messwerte für  $\phi$  sind in folgender Tabelle aufgelistet, Abb. 10 zeigt  $\phi$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  mit logarithmischer x-Achse, Abb.11 den Bereich um  $\phi = 90^\circ$  mit linearen Achsenskalierungen.

In Abb. 11 sind außerdem die Geraden eingetragen um das Ablesen der relevanten Phasenverschiebungen zu erleichtern.  $\omega_1$  ( $\phi = 45^\circ$ ) liegt ziemlich fast exakt bei 30kHz ( $\phi=45,36^\circ$ ),  $\omega_2$  liegt bei 39kHz. Damit liegen  $\omega_1$  und  $\omega_2$  bei ähnlichen Frequenzen wie zuvor (Vgl. Abschnitt 3.4) schon  $\omega_-$  und  $\omega_+$ . Dies ist das erwartete Ergebnis für den Fall schwacher Dämpfung, der hier realisiert ist.  $\omega_1$  und  $\omega_-$  sind im Rahmen der begrenzten Anzahl an Messwerten identisch,  $\omega_2$  und  $\omega_+$  weichen um 13% voneinander ab.

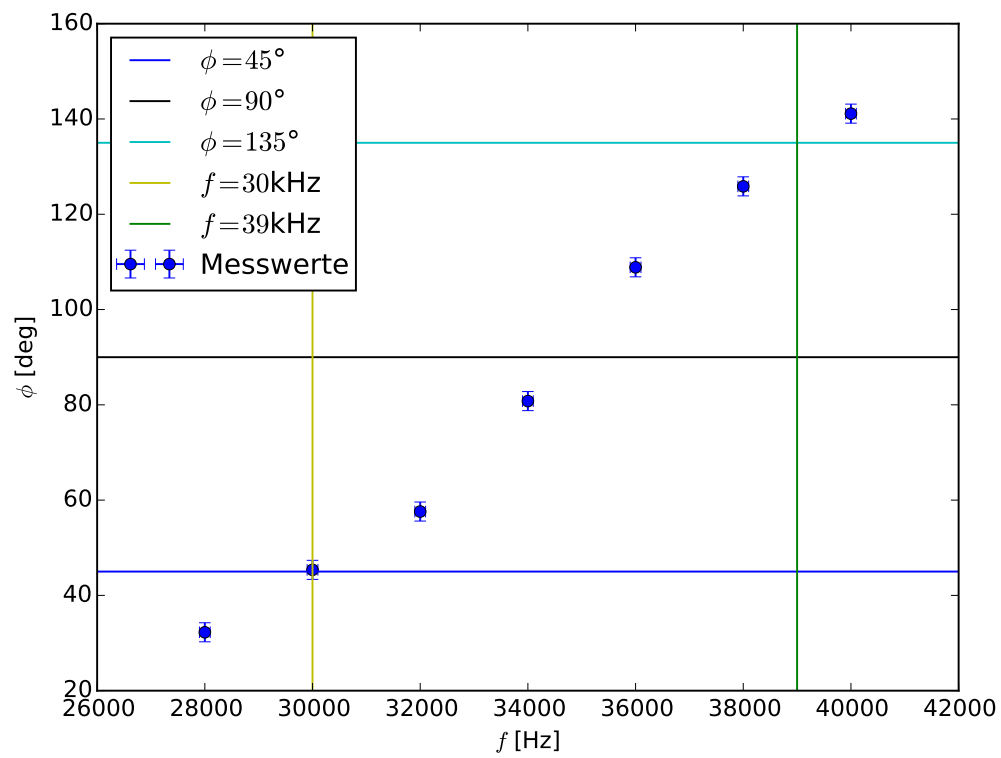
**Tabelle 3:** Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz)

$\phi[\text{deg}]$	$f[\text{kHz}]$
$7.67 \pm 0.005$	$4.26 \pm 0.005$
$6.48 \pm 0.005$	$6.00 \pm 0.005$
$3.46 \pm 0.005$	$8.00 \pm 0.005$
$1.44 \pm 0.005$	$10.00 \pm 0.005$
$5.18 \pm 0.005$	$12.00 \pm 0.005$
$6.05 \pm 0.005$	$14.00 \pm 0.005$
$10.37 \pm 0.005$	$16.00 \pm 0.005$
$12.96 \pm 0.005$	$18.00 \pm 0.005$
$11.52 \pm 0.005$	$20.00 \pm 0.005$
$19.01 \pm 0.005$	$22.00 \pm 0.005$
$17.28 \pm 0.005$	$24.00 \pm 0.005$
$22.46 \pm 0.005$	$26.00 \pm 0.005$
$32.26 \pm 0.005$	$28.00 \pm 0.005$
$45.36 \pm 0.005$	$30.00 \pm 0.005$
$57.60 \pm 0.005$	$32.00 \pm 0.005$
$80.78 \pm 0.005$	$34.00 \pm 0.005$
$108.86 \pm 0.005$	$36.00 \pm 0.005$
$125.86 \pm 0.005$	$38.00 \pm 0.005$
$141.12 \pm 0.005$	$40.00 \pm 0.005$





**Abbildung 10:** Phasenverschiebung  $\phi$  mit logarithmischer x-Achsenkalierung



**Abbildung 11:** Phasenverschiebung  $\phi$  im Bereich der Resonanzfrequenz mit linearer Achsenskalierung

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch Nr.354 - Gedämpfte und erzwungene Schwingungen*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V354.pdf>.
- [2] *Messwerte zu 5a) 5b)*. URL: <https://app.box.com/s/v4zb62gwzamisj358152k999mhzwjmq>.
- [3] *Schwingkreis*. 21.11.2015. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingkreis>.
- [4] Marcel C. Strzys Thorben Lünneweber. „Versuch Nr.354 - Gedämpfte und erzwungene Schwingungen“. In: (2008). URL: <http://physik-praktikum.jimdo.com/>.