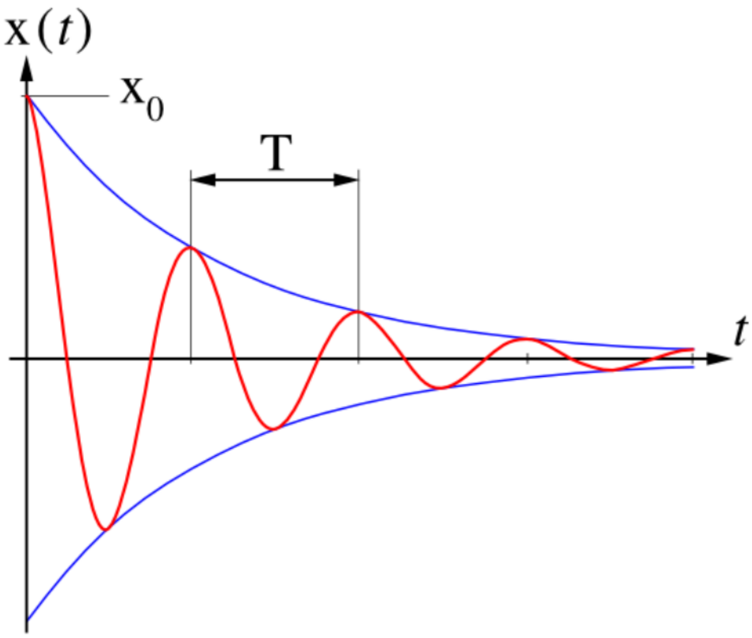
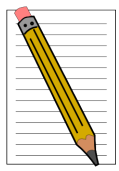


Schwingkreise

In diesem Versuch experimentieren Sie mit *elektrischen Schwingkreisen*, vor allem mit dem *Serienschwingkreis*. Diese Schaltung wird aus Widerstand, Kondensator und Spule zusammengesetzt. Sie werden hier das Abklingverhalten freier Schwingungen untersuchen und den Einfluss der *Dämpfung*. Sie messen *Resonanzkurven*, um bei erzwungenen Schwingungen das Frequenzverhalten zu untersuchen und bestimmen die *Güte* von Schwingkreisen.

Schriftliche VORbereitung:



- Erklären Sie mit Hilfe der Zeigerdarstellung (Abb. 5) den Verlauf der Stromresonanzkurve (Abb.6)?
- Welche Anwendungen gibt es für elektrische Schwingkreise?
- Erklären sie folgende Begriffe:
  - Blindwiderstand
  - Wirkwiderstand
  - Impedanz
  - Wo finden sich Frequenzabhängigkeiten?

1 Grundlagen

Sie werden feststellen, dass Ihnen die mathematischen Formeln bekannt vorkommen. Bereits in der Mechanik haben Sie Schwingungen analysiert. Wenn Sie nun hier gedanklich die Kondensatoren durch die Federn ersetzen, die Spulen durch die Massen und die ohmschen Widerstände durch die Reibungswiderstände, finden Sie die formale Identität zwischen den elektrischen und mechanischen Schwingungen.

Der ideale LC-Schwingkreis

Abb. 1 zeigt die Schaltung: Der Kondensator wird in Stellung 1 aufgeladen und erhält die Ladung $Q_0 = C \cdot U_0$. Die so gespeicherte Energiemenge ist:

$$W_C = \frac{1}{2} C U_0^2$$

In Stellung 2 entlädt sich der Kondensator (Strom$\mathrm{I}(t)$) über die Spule und die Spannung U_C sinkt:

$$\frac{d\,\mathrm{Q}(t)}{dt} = \mathrm{I}(t) = C \cdot \frac{d\,\mathrm{U_C}(t)}{dt}$$

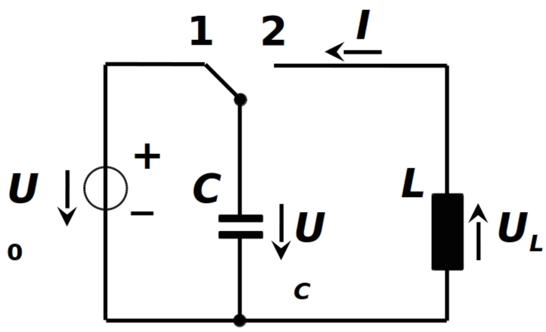


Abbildung 1: Idealer L-C-Schwingkreis

Hinweise zu den Zählpfeilen Obwohl Ströme und Spannungen keine Vektoren, sondern Skalare sind, enthalten Schaltbilder wie Abb. 1 für diese Größen Oft Pfeilsymbole. Diese Pfeile sind willkürliche *Zählpfeile*, die angeben, wie Spannungen in Maschen und Stromstärken an Knoten gezählt werden. Wir verwenden meistens das sogenannte *Verbrauchersystem*, bei dem Spannungs- und Stormpfeile die gleiche Richtung haben. In diesem System zählt die an den Verbraucher *ab*gegebene Leistung positiv.

Der zeitlich veränderliche Strom mit der Stromstärke $\mathrm{I}(t)$ induziert in der Spule ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld. Die Energie im elektrischen Feld des Kondensators nimmt in gleichen Maße ab, wie die Feldenergie im Magnetfeld der Spule zunimmt:

$$\text{Mit } W_L = \frac{1}{2} L \cdot \mathrm{I}(t)^2 \text{ gilt also der Energiesatz } W_L + W_C = \frac{1}{2} L \cdot \mathrm{I}(t)^2 + \frac{1}{2} C \cdot \mathrm{U_C}(t)^2 = const. \tag{1}$$

Sie erkennen hier bereits den Aufbau einer Schwingung. Zum Zeitpunkt t_0 ist der Kondensator geladen, W_C ist maximal. Der Entladevorgang führt zum Aufbau des Magnetfeldes der Spule bis W_L maximal ist. Der nun folgende Zusammenbruch des B-Feldes führt zu einer *Induktionsspannung* zur Aufrechterhaltung des Stroms (*Lenzsche Regel*) und der Kondensator wird wieder geladen– allerdings mit umgekehrten Vorzeichen.

Die zeitliche Ableitung von Gl. (1) führt auf die Bewegungsgleichung der Ladung im Schwingkreis:

$$\frac{d}{dt}\left(W_L + W_C\right) = L \cdot \mathrm{I}(t) \cdot \frac{d\,\mathrm{I}(t)}{dt} + C \cdot \mathrm{U_C}(t) \cdot \frac{d\,\mathrm{U_C}(t)}{dt} = 0. \text{ Einsetzen von Gl. (1) liefert:}$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\,\mathrm{U_C}(t)}{dt^2} + \frac{1}{LC}\mathrm{U_C}(t) = 0 \tag{2}$$

Die Lösung dieser DGL kennen Sie aus der Mechanik: Sie beschreibt eine *harmonische Schwingung* mit der *Anfangsphase* ϕ und der *Kreisfrequenz* $\omega = 1/\sqrt{LC}$:

$$\mathrm{U_C}(t) = \hat{U} \cdot \cos\left(\omega_0 t + \phi\right).$$

Für die Anfangswerte $\mathrm{U_C}(0) = U_0$ und $\mathrm{I}(0) = 0$ erhalten Sie $\phi = 0$ und $\hat{U} = U_0 = Q_0/C0$.

Beschreibung von Verlusten

Nun kann es diesen idealen Schwingkreis real nicht geben. Kondensatoren haben Leckwiderstände, Spulendrähte weisen ohmesche Widerstände auf, oszillierende Elektronen strahlen Energie ab– alles Phänomene, die zu einer *Dämpfung der Schwingung* führen. Bei übermäßiger Dämpfung entsteht möglicherweise gar keine Schwingung.

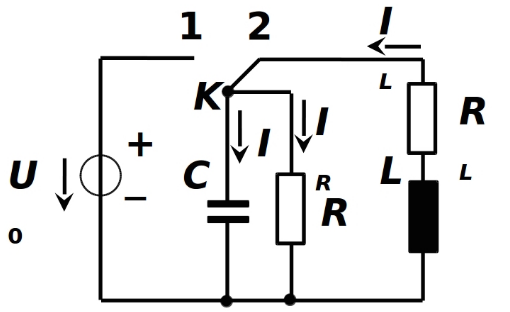


Abbildung 2: Realer LC-Schwingkreis

In Abb. 2 stellen die eingezeichneten Widerstände Ersatzwiderstände für diese Dämpfungsphänomene dar. R steht für die Verluste im Kondensator und durch Abstrahlung, R_L beschreibt die ohmschen Verluste in den Spulendrähten. Abb. 3 zeigt Ihnen die Wirkung. Je nach Größe der Verluste finden Sie eine gedämpfte Schwingung (1), ein langsamem aperiodisches „Kriechen"zurück ins Gleichgewicht (3) oder im Übergang zwischen diesen Phänomenen den sog. *aperiodischen Grenzfall* (2)– die schnellstmögliche Relaxation in die Gleichgewichtslage. Je nach Anfangsbedingung kann hier ein Nulldurchgang auftreten.

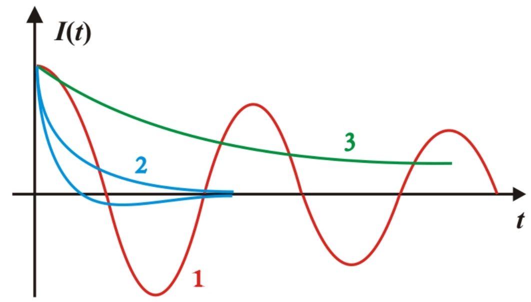


Abbildung 3: Stromstärke bzw. Spannung beim realen RLC-Schwingkreis

Zur mathematischen Modellbildung eignet sich wieder der Energiesatz. Die Rate, mit der die Energie im Schwingkreis (= Summe der Feldenergien in Kondensator und Spule) abnimmt, ist danach gerade so groß wie die in den Ersatzwiderständen R und R_L dissipierte Leistung:

$$\frac{d}{dt}\left(W_L + W_C\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}C \cdot U_C^2 + \frac{1}{2}L \cdot I_L^2\right) = -R \cdot I_R^2 - R_L I_L^2 \tag{3}$$

Die hier auftretenden Stromstärken sind nicht unabhängig (Knoten K Abb. 2):

$$\begin{aligned} &\mathrm{I_L}(t) = \mathrm{I_R}(t) + \mathrm{I}(t) \text{ wobei } \mathrm{I_R}(t) = \frac{\mathrm{U_C}(t)}{R} \text{ und} \\ &\mathrm{I}(t) = \frac{dQ_C}{dt} = C\frac{d\,\mathrm{U_C}(t)}{t} \end{aligned} \tag{4}$$

Gl. (3) lässt sich damit umschreiben:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}CU_C^2 + \frac{1}{2}L\left(I + I_R\right)^2\right) = -RI_R^2 - R_L\left(I + I_R\right)^2. \tag{5}$$

$$\Rightarrow 0 = \frac{d^2\,\mathrm{U_C}(t)}{dt^2} + \left(\frac{R_L}{L} + \frac{1}{RC}\right) \cdot \frac{d\,\mathrm{U_C}(t)}{dt} + \frac{1}{LC}\left(1 + \frac{R_L}{R}\right) \cdot U_C \tag{6}$$

Der Exponentialsatz $\mathrm{U_C}(t) = U_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + U_2 e^{\lambda_2 t}$ führt durch einsetzten in Gl. (5) auf die *charakteristische Gleichung* der Dgl.:

$$\lambda_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \Omega^2}; \quad \gamma = \frac{1}{2}\left(\frac{R_L}{L} + \frac{1}{RC}\right) \text{ und } \Omega^2 = \frac{1}{LC}\left(1 + \frac{R_L}{R}\right) = \omega_0^2\left(1 + \frac{R_L}{R}\right)$$

Dämpfungsphänomene beim Schwingkreis

Ungedämpfter Oszillator: $\gamma = 0$

Für $R_L \to 0$ und $R \to \infty$ verschwinden die Verluste: $\gamma \to 0$. Gl. (5) liefert in dem Fall $\lambda_{1,2} = \pm i\omega_0$. Setzen Sie dies und die Anfangsbedingungen $\mathrm{U_C}(0) = Q_0/C$ und $\mathrm{I}(0) = 0$ in den Lösungsansatz ein, finden Sie, wie zu erwarten, wieder Gl. (2) als Lösung (mit $\phi = 0$). Mit zunehmender Dämpfung nimmt auch γ zu.

Gedämpfte Schwingung: $0 < \gamma < \Omega$

Als Lösung von Gl. (5) finden Sie die exponentiell gedämpfte Schwingung nach Abb. 2.1 (vgl. Titelbild mit $x = Q/C$ und $T = 1/f = 2\pi/\omega$). Die Anfangsbedingungen von oben liefern eine übersichtliche Lösung:

$$\mathrm{U_C}(t) = \frac{Q_0}{C} \cdot e^{-\gamma t} \cdot \cos(\omega t) \text{ mit den Abkürzungen } \gamma = \frac{1}{2}\left(\frac{R_L}{L} + \frac{1}{RC}\right) \text{ und } \omega = \sqrt{\omega_0^2 \left(1 + \frac{R_L}{R}\right) - \gamma^2}.$$

Aperiodischer Grenzfall: $\gamma = \Omega$

Die Amplitude des Oszillators (hier die Spannung U_C) nähert sich in minimaler Zeit, ohne Schwingung der Gleichgewichtslage. Aus der Bedingung für den aperiodischen Grenzfall leitet sich her:

Kriechfall: $\gamma > \Omega$

Wie auch beim aperiodischen Grenzfall wird die Gleichgewichtslage ohne Schwingung erreicht. Der Rückgang erfolgt jedoch langsamer.

Logarithmishes Dekrement Λ und Güte Q

Zur Charakterisierung der Qualität eines Schwingkreises betrachtet man die Verluste, die pro Schwingungen auftreten. Dazu bieten sich zwei unterschiedliche Möglichkeiten an.

(1) Vergleich der Amplituden Als *logarithmisches Dekrement* Λ bezeichnet man den natürlichen Logarithmus aufeinanderfolgender Amplituden ($T = 1/f = 2\pi/\omega$):

$$\Lambda = \ln\left(\frac{\mathrm{U_C}(t)}{\mathrm{U_C}(t+T)}\right) = \ln\left(\frac{e^{-\gamma t}}{e^{-\gamma(t+T)}}\right) = \ln(e^{\gamma T}) = \gamma T$$

(2) Vergleich der gespeicherten Energien Als eine Güte Q bezeichnet man den Quotienten aus gespeicherter Energie und Energieverlust pro Schwingung:

$$Q = 2\pi \frac{W_{ges}}{|W \cdot T|} = \omega \left|\frac{W_{ges}}{W}\right| = \frac{2\pi}{T} \left|\frac{\frac{1}{2} C U_{Cmax}^2}{C \cdot U_C \cdot \dot{U}_C}\right| = \frac{2\pi}{T} \frac{e^{-2\gamma t}}{2\gamma \cdot e^{-2\gamma t}} = \frac{\pi}{\gamma T} = \frac{\pi}{\Lambda}$$

Für die von Ihnen hier untersuchten Schwingkreise gilt $R \to \infty$ und die Formeln vereinfachen sich:

$$\gamma = \frac{R_L}{2 \cdot L} \text{ und } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \text{ , für die Güte } Q = \frac{\pi}{\gamma T} = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \frac{2L}{R_L} = \frac{1}{R_L}\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ und für den aperiodischen Grenzfall } R_L = 2L\omega_0 = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ oder auch } Q = 0,5. \tag{7}$$

Periodische Anregung

Mittels einer Wechselspannung mit variabler Frequenz $f = \omega/2\pi$ und konstanter Amplitude lässt sich der Schwingkreis periodisch anregen. Im Versuch interessiert später, mit welcher Amplitude jeweils die elektrischen Größen der Anregung folgen. Das Folgen geschieht hierbei träge, daher werden die *eingeschwungenen Zustände* betrachtet.

Wird der Schwingkreis (Abb. 4 ein Reihenschwingkreis, weil alle Bauteile in „in Reihe“geschaltet sind) mit konstanter Spannungsamplitude U_0 betrieben, so ist die Stromamplitude I_0 frequenzabhängig, $I_0 = \mathrm{I}_0(\omega)$.

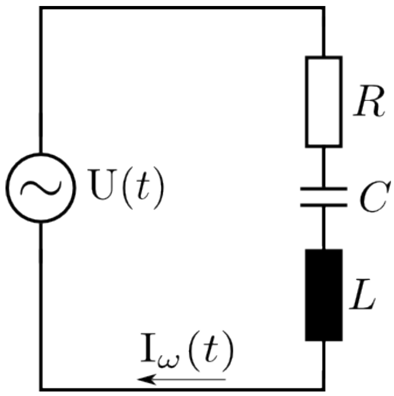


Abbildung 4: Serienschwingkreis: Periodische Anregung

I_0 berechnen Sie z.B. nach dem ohmschen Gesetz für Wechselstromwiderstände.

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C}; \quad Z_L = i\omega L; \quad Z = R + Z_L + Z_C = R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C} \tag{8}$$

In Gl. (8) wurde die Schreibweise mit komplexen Zahlen gewählt. Durch den imaginären Faktor i wird die phasenrichtige Addition sichergestellt. Abb. 5 zeigt, wie es geht.

Dort wurde als Referenzgröße der allen Bauteilen gemeinsame Strom gewählt: $\mathrm{I}(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t)$. Die Spannungen U_R am ohmschen Widerstand ist in Phase mit I_0, die Spannung U_L an der Spule eilt dem Strom um $\pi/2$ voraus. Die Kondensatorspannung liegt gegenüber dem Strom um $\pi/2$ zurück. Alle Bauteile zusammen bewirken eine Phasenverschiebung ϕ zwischen der Anregungsspannung U_0 und dem Strom I_0.

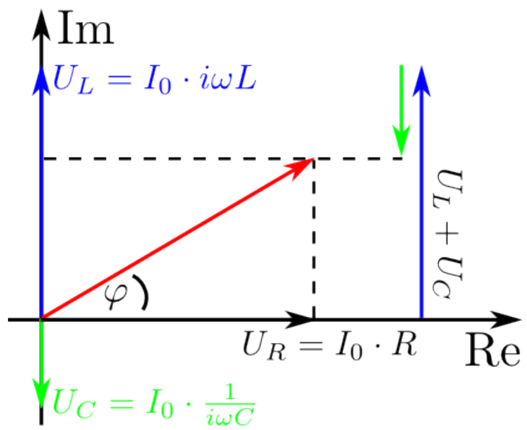


Abbildung 5: Phasenrichtige Addition der Spannungen an R, L und C

Im Experiment ist die Amplitude der anregenden Spannung $\mathrm{U}_1(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t + \phi)$ konstant, die Phase ϕ hängt von der Frequenz ab:

$$I_0 = U_0 \frac{1}{Z} = U_0 \frac{1}{R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{U_0}{R} \frac{1}{1 + iQ\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right)} = \frac{U_0}{R} \frac{1 - iQ\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right)}{1 + Q^2\left(\Omega - \frac{1}{\Omega}\right)^2} \tag{9}$$

Gleichung (9) wurde übersichtlich mit den Abkürzungen Q für die Güte des Reihenschwingkreises und Ω als normierte Frequenz:

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}; \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_0}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$ Aus Gleichung (9) folgt direkt:

$$|I_0| = \frac{U_0}{R}\frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\Omega-\frac{1}{\Omega}\right)}}; \quad \tan\phi = \frac{\mathrm{Im}(I_0)}{\mathrm{Re}(I_0)} = -Q\left(\Omega-\frac{1}{\Omega}\right). \tag{10}$$

Resonanzphänomene

Im Versuch untersuchen Sie die Frequenzabhängigkeit der Stromstärke I_0 und des Phasenwinkels ϕ.

Abb. 6 zeigt die *Stromresonanz*. Für Ω=1 (also $\omega = \omega_0$) erreicht die Stromstärke ihr Maximum:

$$|I_0| = \frac{U_0}{R}.$$

Messtechnisch von Bedeutung ist die Breite der Resonanzkurve. Für den in Abb. 6 gekennzeichneten Wert ergibt sich:

$$\Omega_{1,2} = \pm\frac{1}{2Q} + \sqrt{1+\frac{1}{4Q^2}}$$
$$\Delta\Omega = \frac{1}{\Omega} \Rightarrow \Delta f = \frac{f_0}{Q} \text{ mit } \omega_0 = 2\pi f_0$$

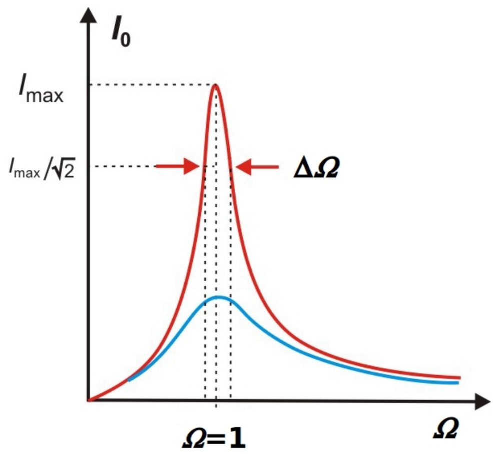


Abbildung 6: Die Stromstärke I_0 hängt von der Frequenz ab. Die Resonanzbreite nimmt mit der Güte ab.

Die Bandbreite des Schwingkreis ist umgekehrt proportional zur Güte Q.

Die Spannungen an Kondensator und Spule zeigen eine besondere Eigenschaft: Resonanzüberhöhung. Aus Gl. (10) finden Sie leicht:

$$|\mathrm{U_C}(\Omega = 1)| = \frac{U_0}{R}\frac{1}{\omega C} = QU_0 \tag{11}$$

Spannungsresonanz:
Kondensator und Spulenspannung sind um den Faktor Q gegenüber der Erregerspannung überhöht.

Aufgaben:

zu Der ideale LC-Schwingkreis

1. Benennen Sie die entsprechenden Energieformen bei mechanischen Schwingungen zu Gl. (1).

zu Beschreibung von Verlusten

2. Leiten Sie mit Gl. (5) und Gl. (4) die bekannte DGl. einer gedämpften Schwingung her:

$$\boxed{\frac{d^2\,\mathrm{U_C}(t)}{dt^2} + \left(\frac{R_L}{L} + \frac{1}{RC}\right) \cdot \frac{d\,\mathrm{U_C}(t)}{dt} + \frac{1}{LC}\left(1 + \frac{R_L}{R}\right) \cdot U_C = 0}$$

zu Periodische Anregung

3. Auch ohne weitere Rechnungen können Sie Abb. 5 entnehmen:
   - Für sehr kleine Frequenzen ($\omega \to 0$) ist $U_C \to U_0, I_0 \to 0$ und die Phasenverschiebung ϕ zwischen I_0 und U_0 ist $\phi \to -\pi/2$.
   - Für sehr große Frequenzen ($\omega \to \infty$) ist $U_C \to \boxed{\cdots}$, $I_0 \to \boxed{\cdots}$ und die Phasenverschiebung ϕ zwischen I_0 und U_0 ist $\phi \to \boxed{\cdots}$.
   - Für $\omega = \omega_0$ ist $U_C + U_L = \boxed{\cdots}$ und $\phi = \boxed{\cdots}$ und $U_R = \boxed{\cdots}$.

   Ergänzen Sie zur Vorbereitung.
4. Rechnen Sie Gl. (9) und Gl. (10) nach und überprüfen Sie die o.g. Spezialfälle $\omega \to 0$, $\omega \to \infty$ und $\omega = \omega_0$.

2 Experimente

Eigenfrequenz

Bauen Sie die Schaltung nach Abb. 7 auf. Das Relais, die Spannungsquelle U_I und den Spannungssensor U_A finden Sie auf dem CASSY-Lab-Steckpunkt. Eine gesonderte CASSY-Anleitung liegt am Arbeitsplatz aus.

Sobald das Relais von 1 auf 2 umschaltet, setzen die Schwingungen ein. Stellen Sie die Schwingung möglichst groß auf dem Bildschirm dar.

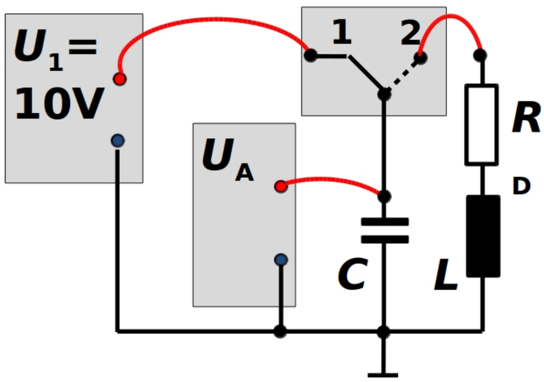


Abbildung 7: Damit messen Sie die Schwingungen. R_D ist die Widerstandsdekade.

(M1) Wenn Ihnen die Darstellung gefällt, drucken Sie das Diagramm aus (nicht die Wertetabelle!).

(M2) Ermitteln Sie aus der graphischen Darstellung für unterschiedliche R_D-Werte ($R_D < 1{,}5\,\mathrm{k\Omega}$)

(a) die Schwingungsdauer und

(b) die Spannungswerte für die ersten drei Amplituden.

(A1) Bestimmen Sie damit die Schwingungsfrequenz, das logarithmische Dekrement und die Güte. Berücksichtigen Sie bitte bei der Auswertung auch den ohmschen Widerstand der Spule: $R = R_D + R_L$:

R	$f_{0,\text{exp}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$	$\Lambda_{\text{exp}} = \ln\left(\frac{\mathrm{U_C}(t)}{\mathrm{U_C}(t+T)}\right)$	$\Lambda = \frac{RT}{2L}$	$Q_{\text{exp}} = \frac{\pi}{\Lambda_{exp}}$	$Q = \omega_0 \frac{L}{R}$
...						

Aperiodischer Grenzfall

(M3) Ermitteln Sie möglichst genau den aperiodischen Grenzfall, indem Sie den Widerstand der Dekade verändern und drucken Sie den Verlauf aus.

(A2) Vergleichen Sie den von Ihnen ermittelten Widerstandswert R_{exp} mit dem theoretischen Wert nach Gl.(7). Vergessen Sie dabei nicht den Spulenwiderstand R_L.

Periodische Anregung

Messung der Strom-Resonanz

Bauen Sie die Schaltung nach Abb. 8 auf. Achten Sie auf den richtigen Masseanschluss. Power CASSY wird als Sinusgenerator mit konstanter Spannungsamplitude betrieben und so programmiert, dass die Frequenz z.B. in drei Minuten den Bereich von 0 Hz bis 10 kHz stetig durchfährt und jede Sekunde eine Messung aufgenommen wird. Die Resonanzkurve wird so in einem einzigen Messzyklus aufgenommen. Nehmen Sie die Resonanzkurve mit den angegebenen Werten zunächst in einem Bereich von 0 Hz bis 5 kHz auf, um die Lage der Resonanzfrequenz f_0 ungefähr festzustellen. Danach grenzen Sie den Bereich auf $f_0 = \pm 1$ kHz ein (hier noch kein Ausdruck).

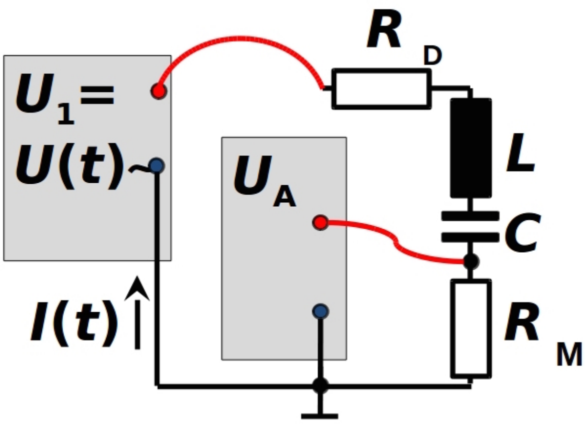


Abbildung 8: Periodisch angeregter Schwingkreis

(M4) Nehmen Sie die Stromresonanz für $R_D = 0$ und mit starker Dämpfung in *ein* Diagramm auf (Parameter: **neue Messreihe anhängen**) und drucken Sie die fertige Kurvenschar aus.

(A3) Bestimmen Sie aus der Resonanzkurve für $R_D = 0$ die Resonanzfrequenz, die Breite Δf an den Stellen $I_{max}/\sqrt{2}$ (Halbwert der Güte, da $P \sim I^2$) und die Güte Q.

C in nF	$f_{0,\text{exp}}$	$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$	$\Delta f_{\text{exp}} = f_2 - f_1$	$\Delta f = \frac{R}{2\pi L}$	$Q_{\text{exp}} = \frac{f_0}{\Delta f}$	$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$
10	...					
220	...					

Messung der Phasenverschiebung als Funktion der Frequenz

Stellen Sie dazu den Funktionsgenerator auf eine feste Frequenz (Resonanzfrequenz) und den Sensoreingang U_{A2} auf die Messung von Momentanwerten ein. Stellen Sie zudem die Darstellung so ein, dass die Spannungen U_1 und U_{A2} gegen die Zeit aufgetragen werden. Das Messintervall sollte auf $10\,\mu$s, also so kurz wie möglich, eingestellt sein.

(M5) Wiederholen Sie die Messung für 3 Frequenzen oberhalb der Resonanzfrequenz und 3 Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz. Verteilen Sie die Frequenz so, dass Sie eine einigermaßen vollständige Darstellung bekommen.

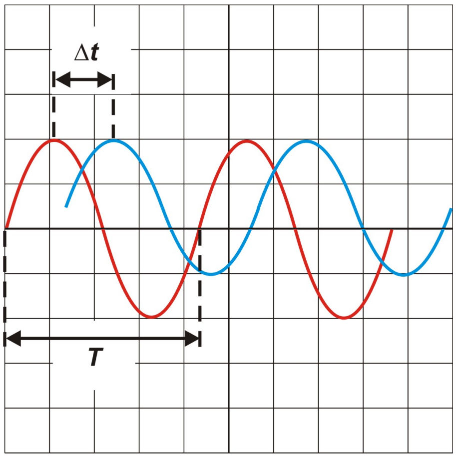


Abbildung 9: So bestimmen Sie die Phasendifferenz zwischen zwei Wechselspannungen.

Die Verschiebung zwischen den Kurven lässt sich gut ablesen, wenn Sie die jeweiligen Maxima (oder Nulldurchgänge) anklicken, die zugehörigen Zeiten ablesen und die Differenz Δt berechnen.

(A4) Berechnen Sie (vgl. dazu Abb. 9) $\phi = 2\pi \cdot \frac{\Delta t}{T} = \omega \cdot \Delta t$. Stellen Sie den Verlauf $\phi(f)$ grafisch dar. Wie groß ist die Phasenverschiebung im Resonanzfall?

Messung der Spannungsüberhöhung an Spule und Kondensator im Resonanzfall

Stellen Sie den Funktionsgenerator wieder auf die Resonanzfrequenz f_0 (aus 1 übernehmen) ein und die maximale Eingangsspannung auf $U_0 = 3\,\mathrm{V}$. Greifen Sie die Spannung nicht mehr über dem $100\,\Omega$-Widerstand R_M ab, sondern über der Spule bzw. über dem Kondensator ab.

(M6) Messen Sie jeweils die maximale Spannungsamplitude.

(A5) Bestimmen Sie daraus die Spannungsüberhöhung und vergleichen Sie die Werte für die Güte.

R_D	U_0	$\mathrm{U_C}(f_0)$	$\mathrm{U_L}(f_0)$	$Q_{exp} = \frac{\mathrm{U_L}(f_0)}{U_0}$	$Q_{exp} = \frac{\mathrm{U_C}(f_0)}{U_0}$	$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$
$0\,\Omega$	$3\,\mathrm{V}$					
$1\,\mathrm{k}\Omega$	$3\,\mathrm{V}$					
$10\,\mathrm{k}\Omega$	$3\,\mathrm{V}$					

(A6) Vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den theoretischen Werten.

3 Messparameter und CASSY-Anleitungen für den Versuch

zu Versuchteils **Eigenfrequenz; Einstellungen Power-CASSY:**

- **Stellgröße:** Stellbereich $-10\,\mathrm{V}$ bis $10\,\mathrm{V}$; Messbereich $-1\,\mathrm{A}$ bis $1\,\mathrm{A}$.
- **Signalform:** DC
- **Parameter:** $10\,\mathrm{V}$; Momentanwerterfassung

Das Relais schalten Sie **autmatisch während der Aufnahme**; Spannungsquelle = **An**; eine gute Auflösung erhalten Sie bei einem Messintervall von $10\,\mathrm{ms}/4000$ Messpunkte.

Sofern das für Sie neu ist, lassen Sie sich die Arbeit mit dem CASSY-System erklären, bevor Sie anfangen zu messen.

Parameter: Für R_D fünf unterschiedliche Werte $R_D \leq 1{,}5\,\mathrm{k}\Omega$; Spulenwiderstand $R_L = 265\,\Omega$, $L = 1\,\mathrm{H}$; $C = 0{,}22\,\mu\mathrm{F}$.

zu Versuchsteil **Messung der Strom-Resonanz**

$R_M = 100\,\Omega$; $R_L = 265\,\Omega$; $L = 0{,}9\,\mathrm{H}$; $C = 0{,}22\,\mu\mathrm{F}$; Widerstandsdekade sinnvoll einstellen.

Hier wird Power-CASSY als Sinusgenerator betrieben. Um die Resonanzkurve in einem einzigen Messzyklus aufzunehmen, wird dabei nicht mit einer festen Frequenz gearbeitet. CASSY wird so programmiert, dass die Frequenz z.B. in drei Minuten den Bereich von $1\,\mathrm{kHz}$ bis $10\,\mathrm{kHz}$ linear verändert und jede Sekunde eine Messung aufgenommen wird. Um Ihnen die Programmierung zu erleichtern, wurde die Beispielsdatei „Resonanz“ bereits vorprogrammiert. Kopieren Sie diese aus dem Verzeichnis C02 auf dem Desktop und verändern Sie die Parameter nach Bedarf. Sollten Sie Schwierigkeiten haben, die Einstellungen zu verstehen, klären Sie unbedingt Ihre Fragen mit den Tutoren.

Wiederholen Sie die Messung mit einem $10\,\mathrm{nF}$ Kondensator.