

GPET Versuch 4 — Henry meets Faraday

Gruppe: Dienstag14

Tim Luchterhand, Paul Nykiel
tim.luchterhand@uni-ulm.de, paul.nykiel@uni-ulm.de

18. Mai 2017

3.1 Ein- und Ausschaltvorgang einer Induktivität

Einführung In diesem Versuch sollen die zeitlichen Verläufe des Stromes und der Spannung beim Schalten einer Induktivität untersucht werden. Verwenden Sie hierzu den in Abbildung 3.13 gezeigten Versuchsaufbau. Verwenden Sie einen Widerstand von $R = 100\Omega$ und die Spule mit $n = 250$ Windungen. Stellen Sie eine Rechteckspannung mit $f = 10\text{kHz}$ ein. Bestimmen Sie den Verlauf der Spannung an der Spule, U_2 , sowie des Stromes durch die Spule (über die Differenz der Spannungen U_1 und U_2) mit Hilfe des Oszilloskops und erklären Sie den charakteristischen Verlauf beider Größen.

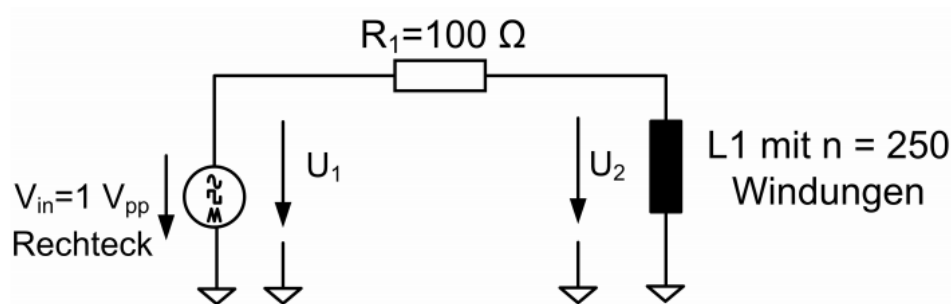


Abbildung 3.13: Messaufbau um Strom- und Spannungsverlauf beim Schalten der Spannung an einer Spule zu bestimmen

3.1.1 Versuchsauswertung

3.1.1.1 Screenshot

Aufgabe Erstellen Sie einen Screenshot der Spannungs- und Stromverläufe.

Protokoll U_1 in grün, U_2 in gelb $U_1 - U_2 = I \cdot R_1$ in violett.

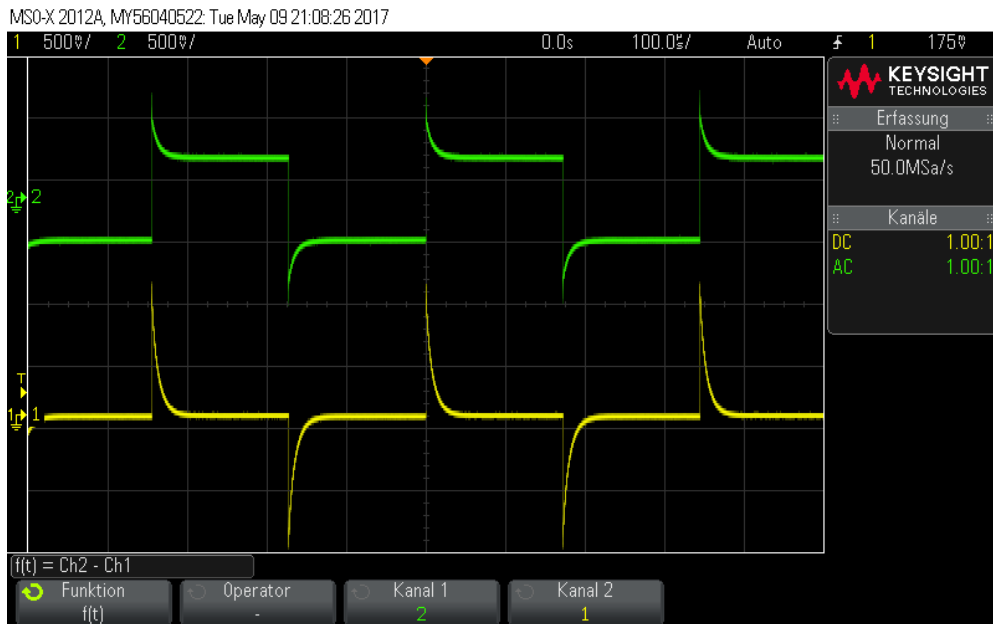


Abbildung 3.14: Spannung an der Spule

Die Eingangsspannung U_1 steigt zu Beginn eines Duty-cycles auf den eingestellten Maximalwert an, fällt dann aber exponentiell auf einen tieferen Wert ab und verläuft schließlich konstant. Dies lässt sich wie folgt erklären: Bei der ansteigenden Flanke der Rechteckspannung verhält sich die Induktivität wie ein Leerlauf. Die Spannung steigt also auf das eingestellte Maximum. Der Strom, der durch die Induktivität fließt, steigt im weiteren Verlauf wie folgt an:

$$I_L(t) = \frac{U_{\text{eingang}}}{R} \left(\exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) - 1 \right) \quad (3.1)$$

Dadurch fällt U_1 exponentiell ab. Der konstante Verlauf von U_1 stellt sich dann ein, wenn der Sättigungsstrom der Spule erreicht ist. Die gemessene Spannung beträgt dann die Spannung am Widerstand R .

U_2 verhält sich identisch zu U_1 . Der einzige Unterschied ist, dass die Spannung auf 0V abfällt, da über der gesättigten Spule keine Spannung mehr abfällt.

Der Ausschaltvorgang verhält sich analog.

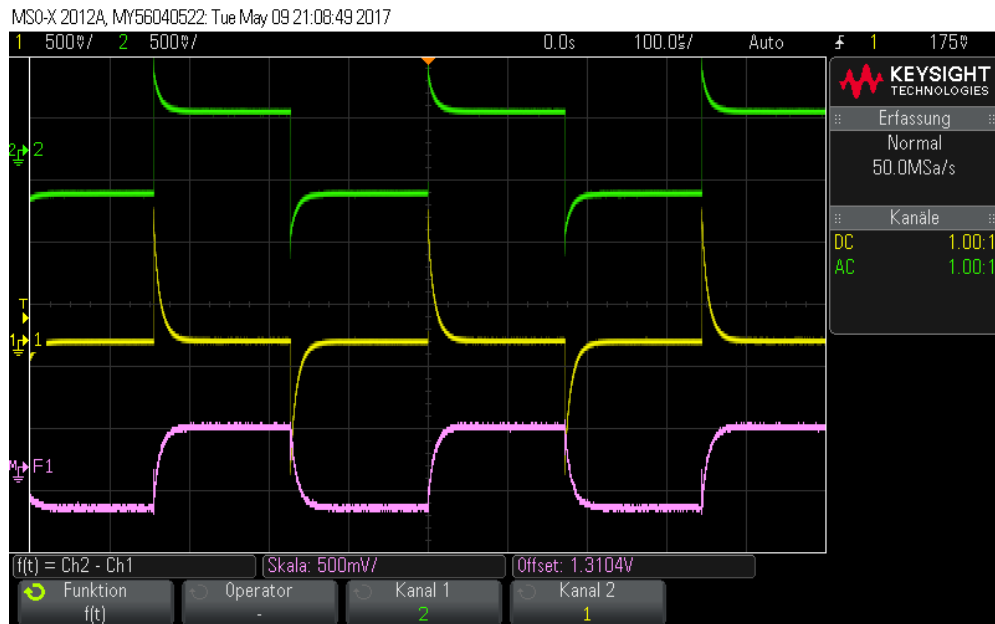


Abbildung 3.15: Strom (in violett) an der Spule

Der Strom, der durch die Spule fließt, lässt sich wie folgt bestimmen:

$$I_L = \frac{U_1 - U_2}{R} \quad (3.2)$$

Im Diagramm ist lediglich die Spannungsdifferenz in violett dargestellt. Diese ist jedoch proportional zum Kehrwert des Widerstandes R . Der Strom verhält sich wie durch Gleichung 3.1 beschrieben und steigt exponentiell auf einen Sättigungsstrom an. Der Ausschaltvorgang verhält sich analog.

3.2 Freie Schwingungen

Einführung In diesem Versuch werden die freien Schwingungen eines LC Schwingkreises genauer untersucht.

3.2.1 Parasitäre Kapazität

Aufgabe Bauen Sie hierzu zunächst die in Abbildung 3.16 gezeigte Schaltung auf. Verwenden Sie die Spule mit $n = 1000$ Windungen.

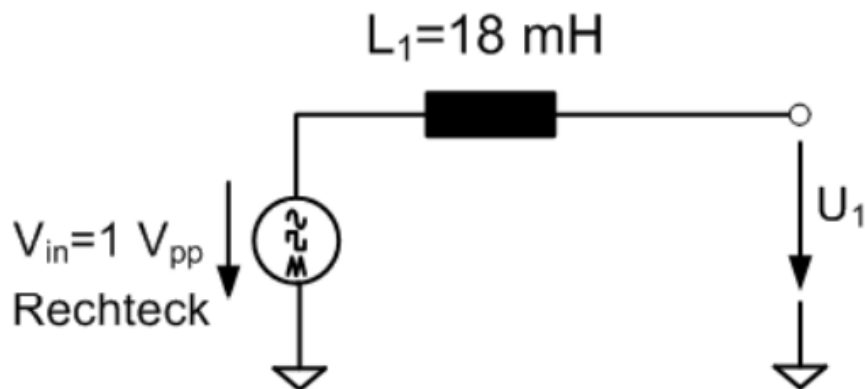


Abbildung 3.16: Messaufbau zur Erzeugung einer freien Schwingung über die Eigenresonanz einer Spule.

Bemerkung Die beobachtete Schwingung kommt durch die sogenannte Eigenresonanz der verwendeten Spule zu Stande. Die Spule weist neben ihrer Induktivität und ihrem Widerstand auch eine parasitäre Kapazität gemäß Abbildung 15 auf. Diese führt dazu, dass die Spule für höhere Frequenzen nicht mehr als reine Induktivität wirkt sondern sich wie ein gedämpfter parallel-LC-Schwingkreis verhält.

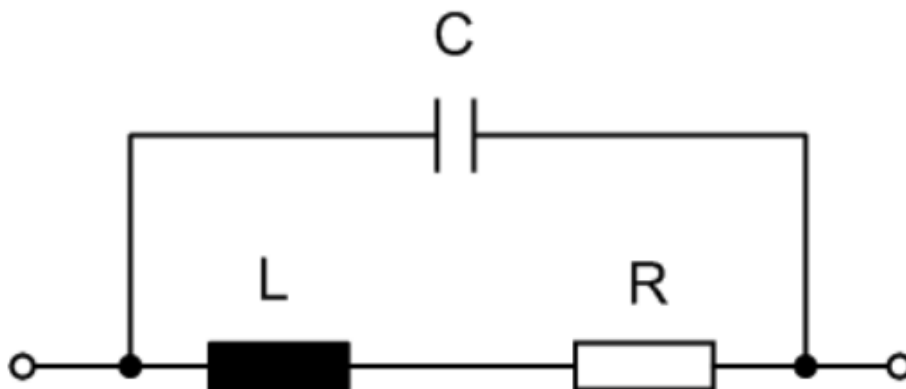


Abbildung 3.17: Ersatzschaltbild einer realen Spule mit parasitärem Widerstand und parasitärer Kapazität.

Aufgabe Nehmen Sie den Verlauf der Spannung U_1 mit dem Oszilloskop auf und verwenden Sie die Cursorfunktion des Oszilloskops, um die Frequenz der Schwingung sowie die Abnahme der Amplitude der Schwingung zu messen.

3.2.1.1 Screenshot

Aufgabe Erstellen Sie für Ihre Versuchsauswertung einen Screenshot der Messung.

Protokoll

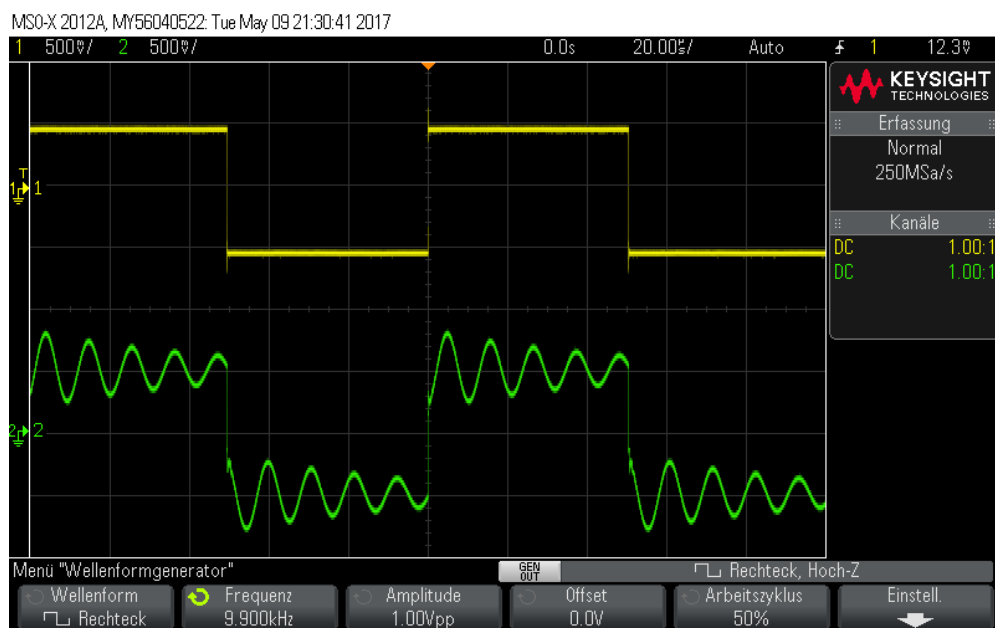


Abbildung 3.18: Spannung an der Spule

Es fällt auf, dass das grüne Spulensignal (U_1) sich nicht verhält wie ein typischer Einschaltvorgang an einer Spule, sondern eine gedämpfte harmonische Schwingung ausführt.

Erklärung: Die Spule, die neben ihrer Induktivität auch noch eine parasitäre Kapazität aufweist, führt bei Resonanzfrequenz eine harmonische Schwingung aus, die durch den ohmschen Widerstand der Spule gedämpft wird.

3.2.1.2 Abschätzung der Kapazität

Aufgabe Schätzen Sie mit Hilfe Ihrer Messung den Wert der parasitären Kapazität der verwendeten Spule ab.

Protokoll

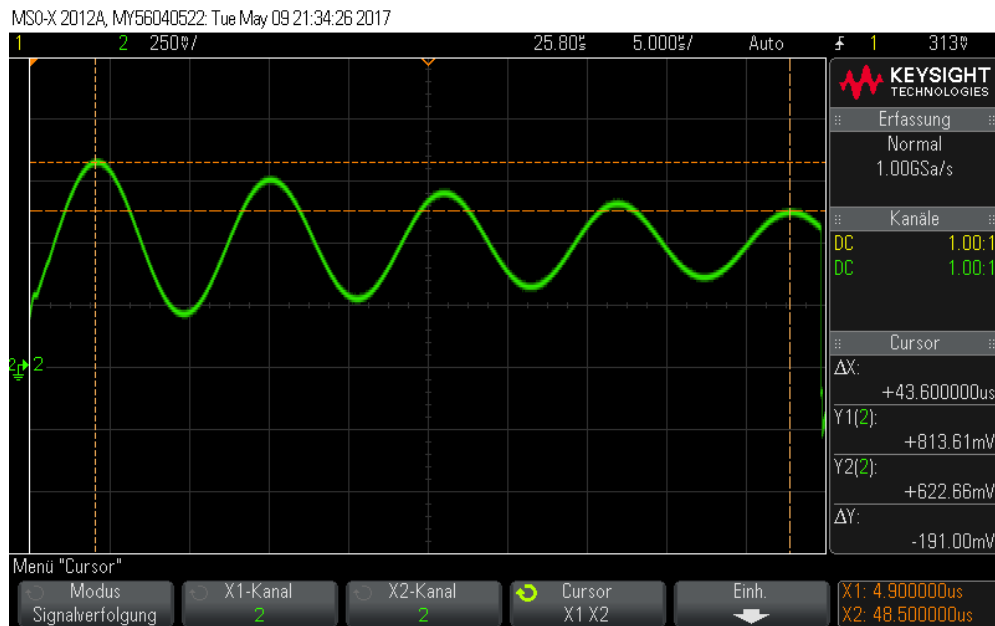


Abbildung 3.19: Spannung an der Spule

Vorgehensweise Mit Cursor wird die Frequenz des LC-Schwingkreises bestimmt. Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, wurden 5 Perioden gemessen und der Durchschnitt berechnet. Durch folgende Formeln lässt sich dann die parasitäre Kapazität abschätzen.

$$\Delta x = 43.6 \mu s \quad (3.3)$$

$$f_0 = \frac{5}{\Delta x} = 114.678 \text{ kHz} \quad (3.4)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.5)$$

$$\Leftrightarrow C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \approx 0.11 \text{ nF} \quad (3.6)$$

3.2.2 Schwingung am Kondensator

Bauen Sie als nächstes die in Abbildung 3.20 dargestellte Schaltung auf. Verwenden Sie erneut die Spule mit $n = 1000$ Windungen und den Kondensator mit $C_1 = 100\text{ nF}$.

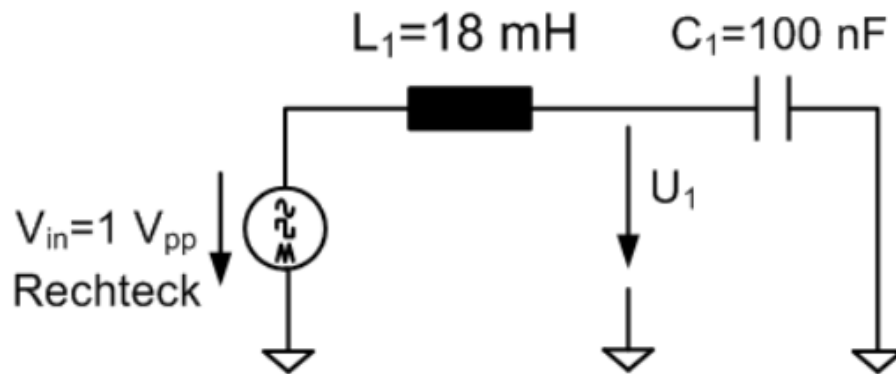


Abbildung 3.20: Messaufbau zur Erzeugung einer freien Schwingung in einem Serien LC-Schwingkreis.

Aufgabe Nehmen Sie den Verlauf der Spannung U_1 mit dem Oszilloskop auf und verwenden Sie die Cursorfunktion des Oszilloskops, um die Frequenz der Schwingung sowie die Abnahme der Amplitude der Schwingung zu messen.

Erstellen Sie für Ihre Versuchsauswertung einen Screenshot der Messung.

Protokoll

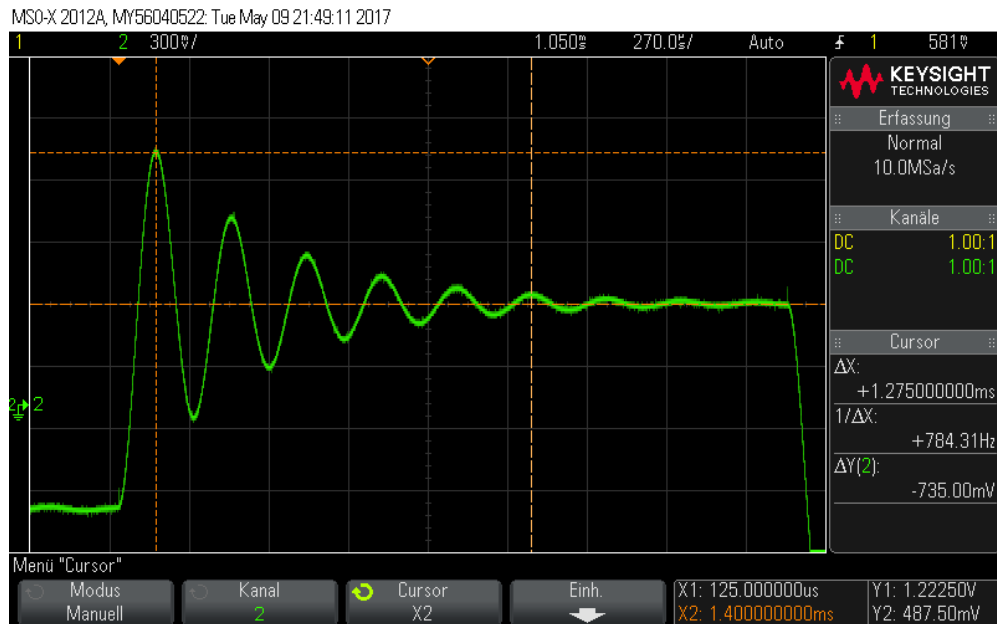


Abbildung 3.21: Spannung am Kondensator

Das Bild zeigt die Spannung am Kondensator des LC-Kreises bei einer steigenden Rechteckflanke des Eingangssignals. Es ist eine gedämpfte harmonische Schwingung zu erkennen.

Aus Genauigkeitsgründen wurden fünf Perioden gemessen. Der Messcursor wurde auf das jeweilige Maximum gesetzt, da die Nulldurchgänge ohne eine klare Nullreferenz schwer zu bestimmen sind.

Die Frequenz lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$\Delta x = 1.275\text{ms} \quad (3.7)$$

$$f_0 = \frac{5}{\Delta x} \approx 3922\text{Hz} \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

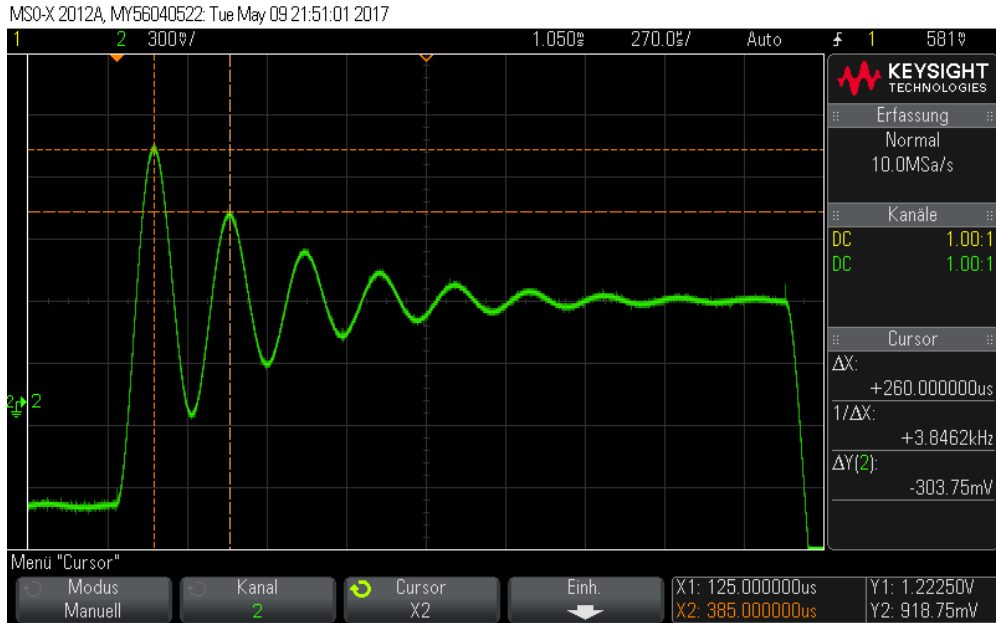


Abbildung 3.22: Abnahme der Amplitude der Schwingung des LC-Schwingkreises

Aus 3.22 lassen sich die ersten beiden Amplituden der Schwingung bestimmen. Folgendermaßen lässt sich dann eine Exponentialfunktion aufstellen, die den Verlauf der Amplitude beschreibt.

$$\hat{U}_1 = 735\text{mV} \quad (3.10)$$

$$\hat{U}_2 = \hat{U}_1 - 303.75\text{mV} = 431.25\text{mV} \quad (3.11)$$

$$\alpha = \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_1} = 0.587 \quad (3.12)$$

$$\hat{U}(t) = \alpha \frac{t}{\Delta x} = \exp(\log(\alpha) \cdot \frac{t}{\Delta x}) \quad (3.13)$$

3.2.3 Veränderung der Schwingung

Aufbau Bauen Sie nun die in Abbildung 3.23 gezeigte Schaltung auf. Verwenden Sie erneut die Spule mit $n = 1000$ Windungen und den Kondensator mit $C_1 = 100\text{nF}$ sowie als Widerstand das Potentiometer.

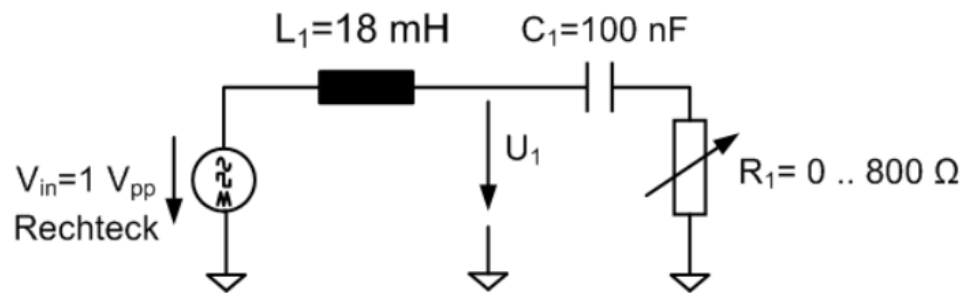
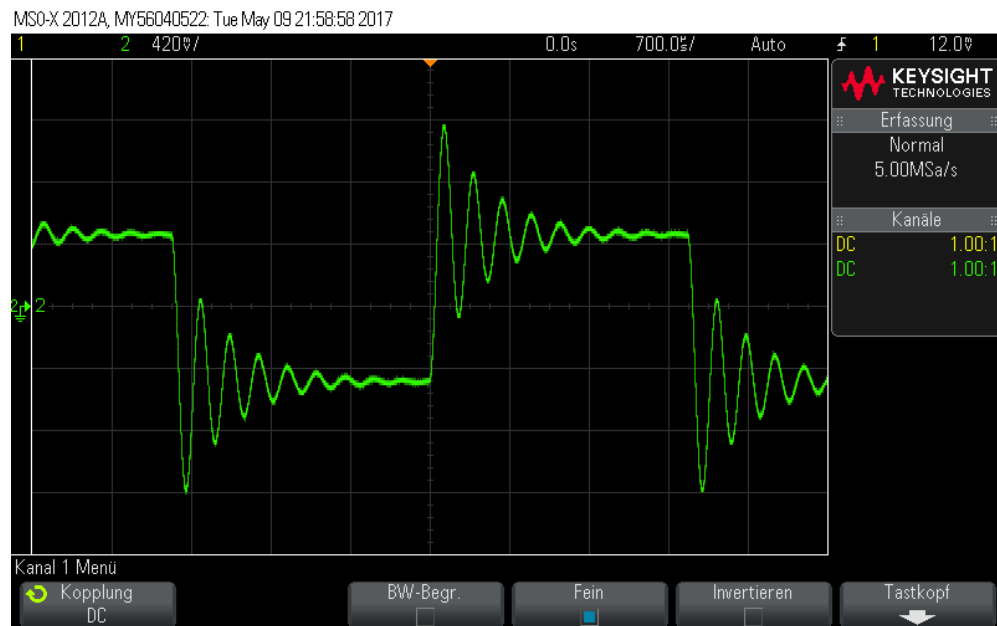


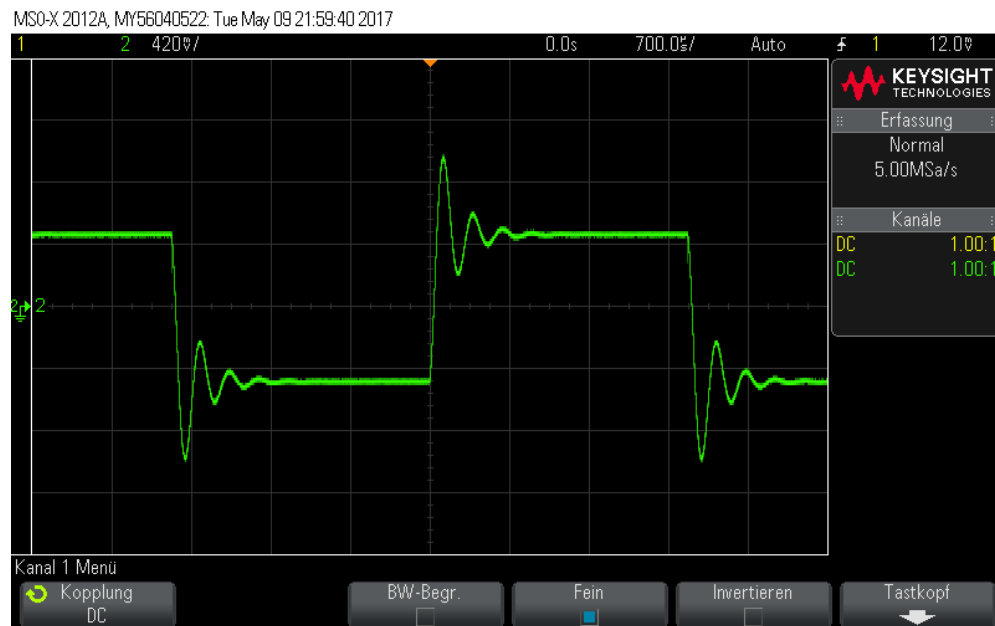
Abbildung 3.23: Messaufbau Erzeugung einer freien Schwingung in einem Serien-LC Schwingkreis mit erhöhter Dämpfung.

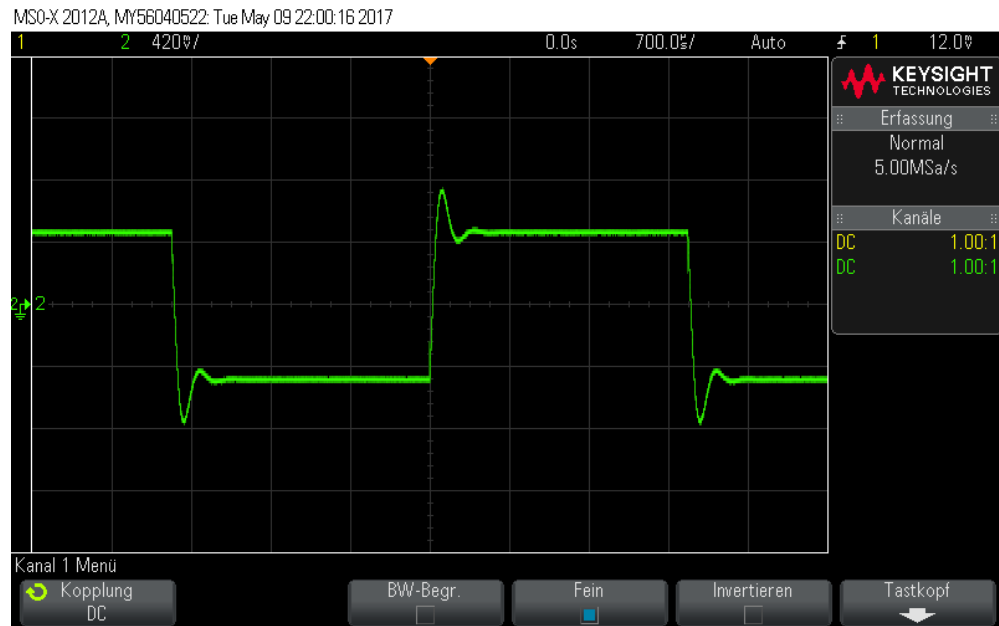
3.2.3.1 Spannungsverlauf

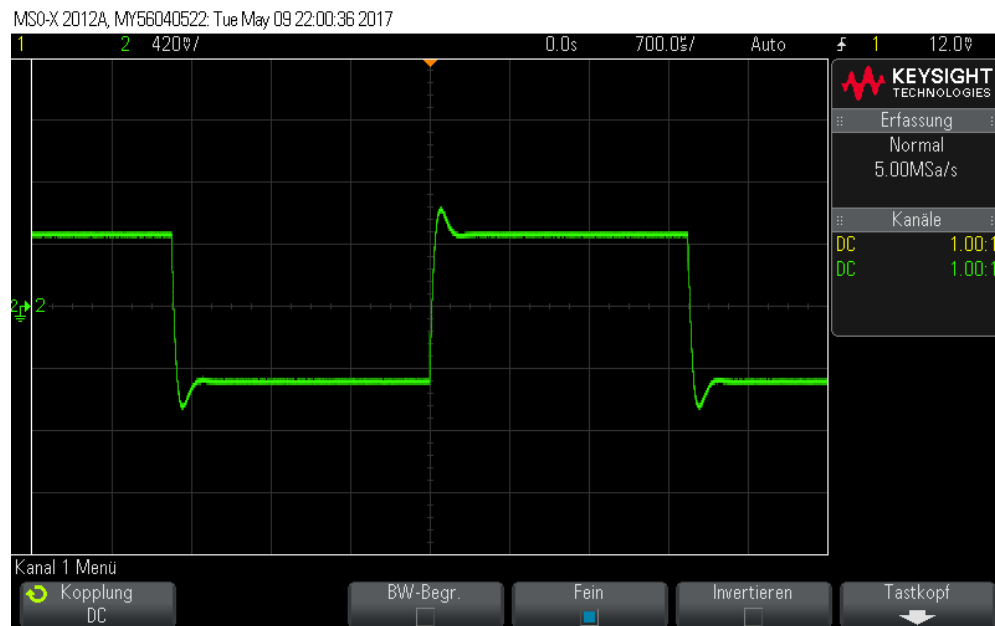
Aufgabe Nehmen Sie den Verlauf der Spannung U_1 mit dem Oszilloskop auf. Stellen Sie mit dem Potentiometer nacheinander verschiedene Widerstandswerte zwischen 0 und 800Ω ein. Beobachten und beschreiben Sie die Änderungen im Verlauf der Schwingung.

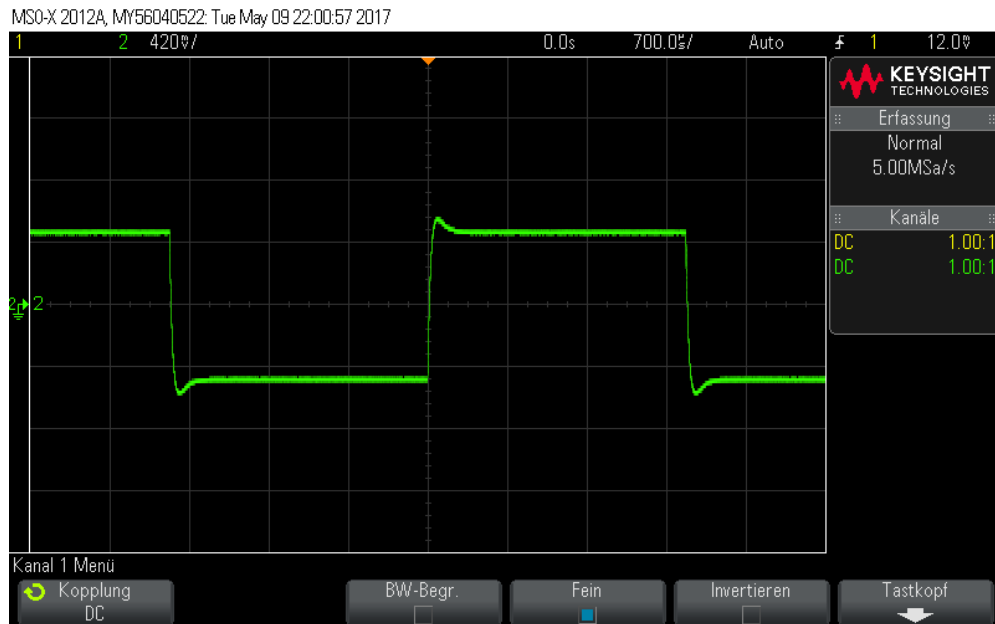
Protokoll

Abbildung 3.24: Potentiometer mit $R = 0\Omega$

Abbildung 3.25: Potentiometer mit $R = 100\Omega$

Abbildung 3.26: Potentiometer mit $R = 300\Omega$

Abbildung 3.27: Potentiometer mit $R = 500\Omega$

Abbildung 3.28: Potentiometer mit $R = 800\Omega$

Durch Erhöhen des Widerstandes des Potentiometers wird die Amplitude der Schwingung verringert. Der Widerstand fungiert also als Dämpfung und verändert nur die Amplitude und hat keinen Einfluss auf die Frequenz oder Phase der Schwingung. Bei einem Widerstand von 800Ω ist die Dämpfung so groß, dass die Schwingung kaum noch zu erkennen ist.

3.2.3.2 Screenshot

Aufgabe Nehmen Sie nun für einen Wert von $R_1 \approx 15\Omega$ den Verlauf der Spannung U_1 mit dem Oszilloskop auf und verwenden Sie die Cursorfunktion des Oszilloskops, um die Frequenz der Schwingung sowie die Abnahme der Amplitude der Schwingung zu messen. Erstellen Sie für Ihre Versuchsauswertung einen Screenshot dieser Messung.

Protokoll

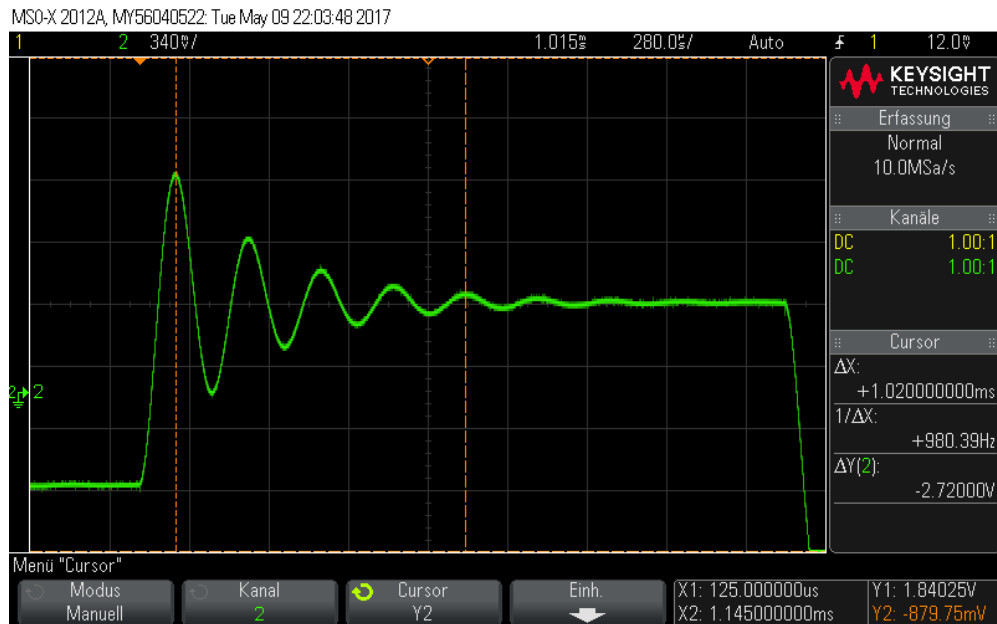


Abbildung 3.29: Bestimmung der Frequenz

Das Bild zeigt die Spannung die über Kondensator und Potentiometer des LC-Kreises bei einer steigenden Rechteckflanke des Eingangssignals abfällt. Es ist eine gedämpfte harmonische Schwingung zu erkennen.

Aus Genauigkeitsgründen wurden fünf Perioden gemessen. Der Messcursor wurde auf das jeweilige Maximum gesetzt, da die Nulldurchgänge ohne eine klare Nullreferenz schwer zu bestimmen sind.

Die Frequenz lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$\Delta x = 1.02\text{ms} \quad (3.14)$$

$$f_0 = \frac{5}{\Delta x} \approx 4902\text{Hz} \quad (3.15)$$

$$(3.16)$$

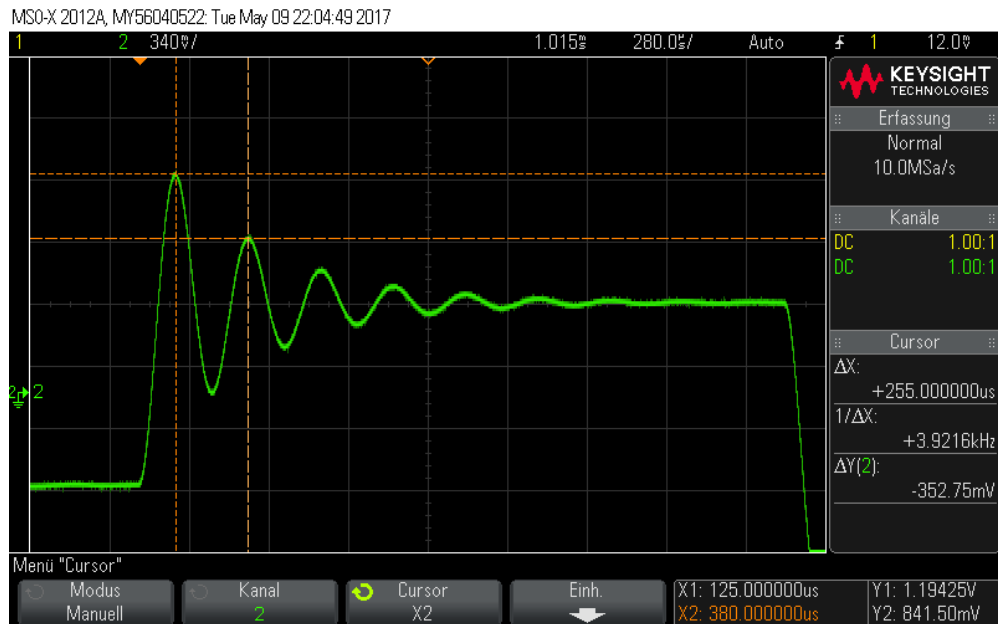


Abbildung 3.30: Abnahme der Amplitude

In der ersten Periode nimmt die Amplitude um 352.75mV ab.

3.3 Spannungsüberhöhung

Aufgabe In folgender Messung soll der Effekt der Spannungsüberhöhung in einem Serien-LC Schwingkreis untersucht werden. Errichten Sie hierzu die Schaltung nach Abbildung 3.31. Verwenden Sie die Spule mit $n = 1000$ Windungen sowie einen Kondensator mit $C = 100\text{nF}$.

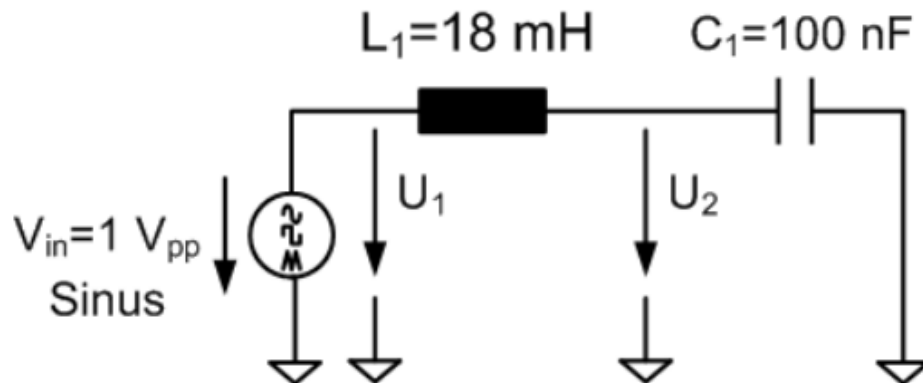


Abbildung 3.31: Messaufbau zur Untersuchung der Spannungsüberhöhung in einem Serien-LC-Schwingkreis.

3.3.1 Spannungsmaximum

Aufgabe Bei welcher Frequenz erwarten Sie ein Maximum der Spannung U_2 ? Begründen Sie Ihre Antwort.

Protokoll Die maximale Amplitude wird bei der Resonanzfrequenz f_0 erreicht. Diese lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 3.751 \text{ kHz} \quad (3.17)$$

$$(3.18)$$

3.3.2 Frequenzsweep

Aufgabe Führen Sie mit Hilfe der MATLAB GUI einen Sweep der Eingangsfrequenz durch. Verwenden Sie dafür folgende Parameter: Type: Sweep frequency, peak-to-peak; Frequency sweep: logarithmic; Spannung 2 Vpp; Frequenz: 200 Hz bis 10 kHz; Anzahl der Punkte: 50. Fügen Sie eine Messkurve aus der GUI in Ihre Auswertung bei. Erzeugen Sie eine Grafik des durchgeführten Sweeps.

Protokoll

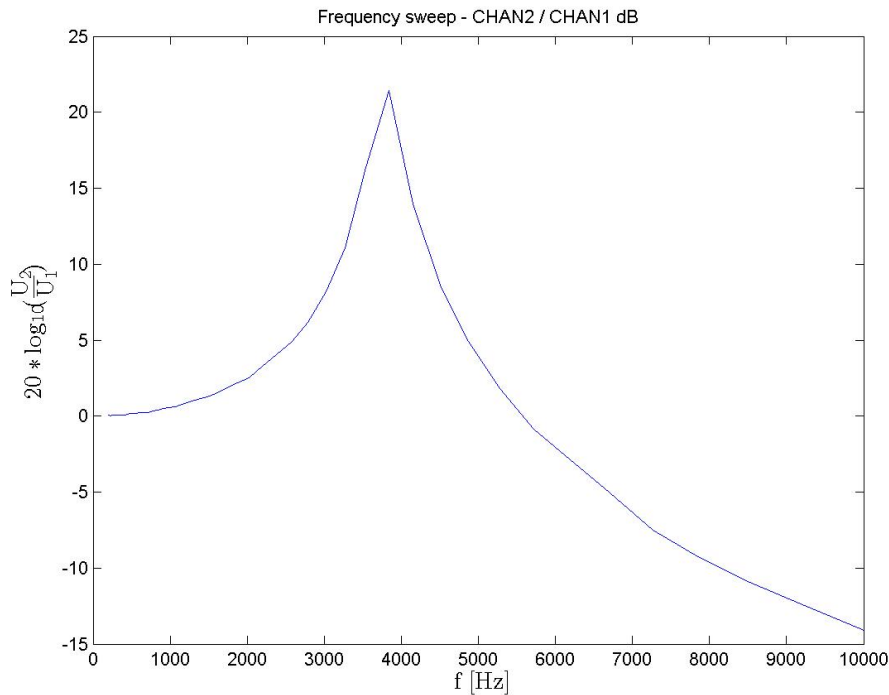


Abbildung 3.32: Frequenzsweep

3.3.3 Übereinstimmung mit den theoretischen Werten

Aufgabe Stimmt die Messung mit dem theoretischen Wert überein?

Protokoll Wie in Diagramm 3.32 zu erkennen, erhält man die größte Amplitude bei ca. 3.8kHz. Dieses Ergebnis weicht um weniger als 2% vom berechneten Wert ab.

3.4 Induktionsschleife einer Ampelschaltung

Viele Ampelsysteme werden mittlerweile bedarfsgerecht geschaltet. Hierzu werden Sensoren benötigt, die ein Fahrzeug an einer Kreuzung erkennen können. Eine Fahrzeugerkennung wird üblicherweise über Induktionsschleifen im Boden vor einer Ampel realisiert. Mit modernen Induktionsschleifen kann nicht nur erkannt werden, ob ein Fahrzeug darüber steht, es kann sogar unterschieden werden, um welchen Fahrzeugtyp es sich handelt. So können beispielsweise LKW, PKW und Motorräder erkannt werden.

Die Grundlagen solcher Sensoren wurden in den gerade eben durchgeführten Versuchen bereits behandelt. Wird Metall in die Nähe einer Spule gebracht, so ändert sich die Induktivität dieser Spule. Um diese Änderung einfach detektieren zu können, wird ein Schwingkreis verwendet. Bauen Sie die Ampelinduktionsschleife nach Abbildung 3.33 auf. Die Anordnung entspricht exakt derjenigen aus Versuch 3.3. Verwenden Sie eine Kapazität von $C = 100\text{nF}$ und die Spule mit $n = 1000$ Windungen. Aus Versuch 3.3 kennen Sie bereits die Resonanzfrequenz dieses LC-Schwingkreises.

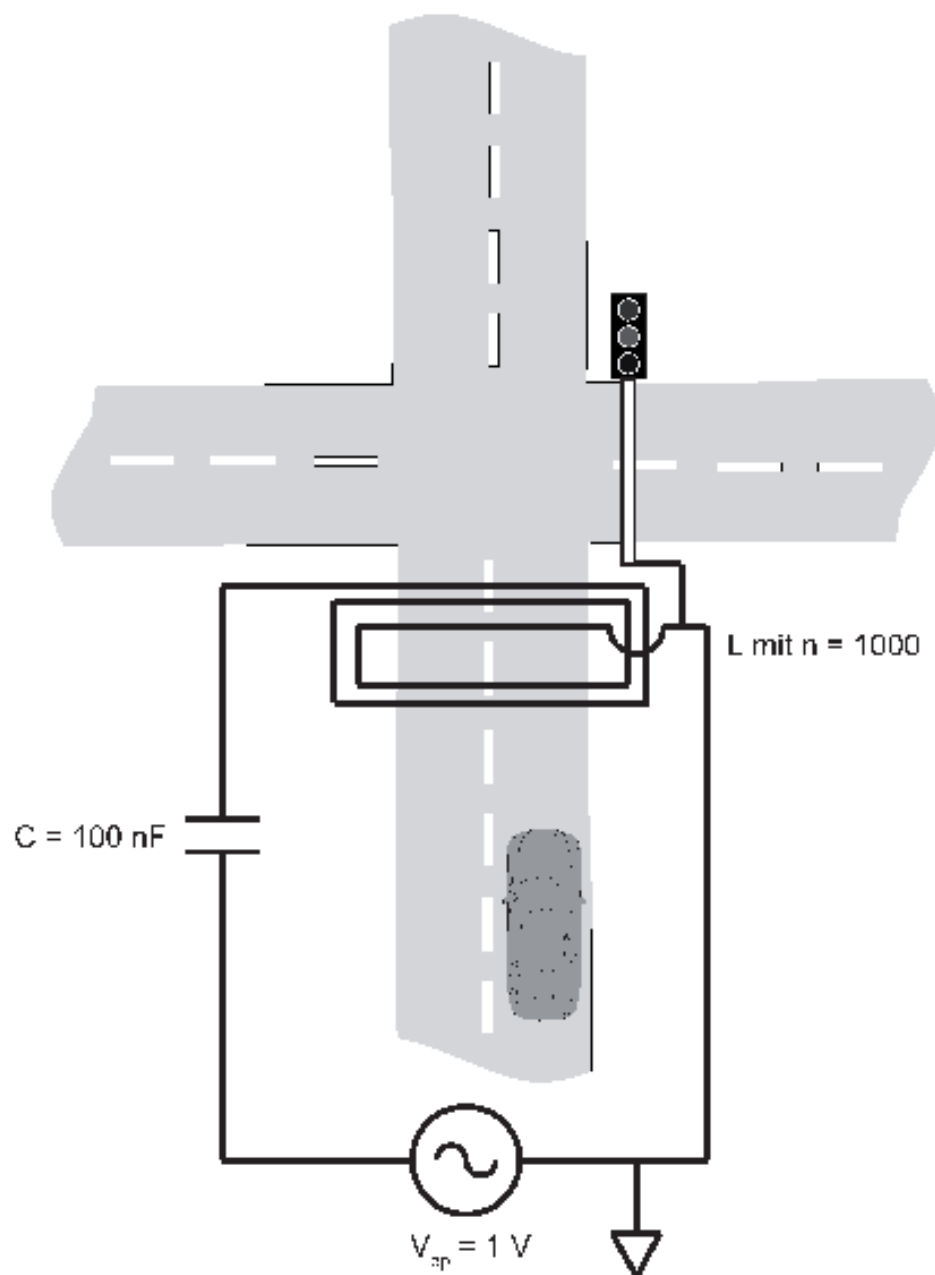


Abbildung 3.33: Aufbau einer Induktionsschleife an einer Kreuzung.

3.4.1 Resonanzfrequenz

Aufgabe Stellen Sie die Frequenz des Signalgenerators auf die eben ermittelte Resonanzfrequenz des LC-Schwingkreises ein und beobachten Sie die Spannung U_2 mit Hilfe des Oszilloskops. Setzen Sie Marker, um charakteristische Werte zu messen und nehmen Sie einen Screenshot auf.

Protokoll

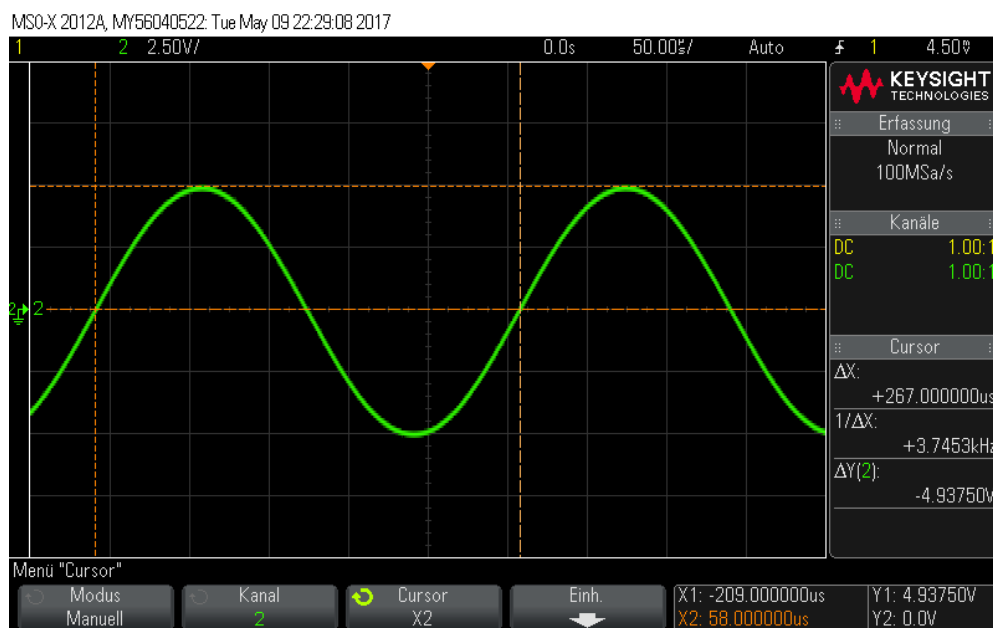


Abbildung 3.34: Marker

Das aufgezeichnete Signal hat eine Amplitude von $\hat{U} \approx 5\text{V}$ und eine Frequenz von $f \approx 3.7\text{kHz}$.

3.4.2 Eisenkern

Aufgabe Führen Sie nun einen Eisenkern in die Spule ein und beobachten Sie die Veränderung der Amplitude der Spannung U_2 . Interpretieren Sie Ihre Beobachtung.

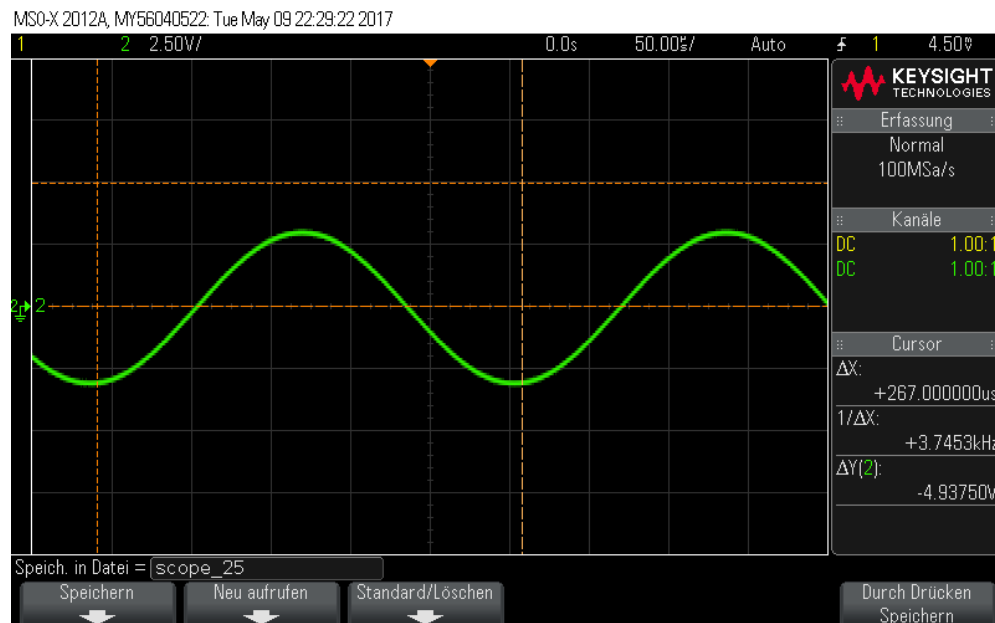
Protokoll

Abbildung 3.35: Eisenkern halb in Spule

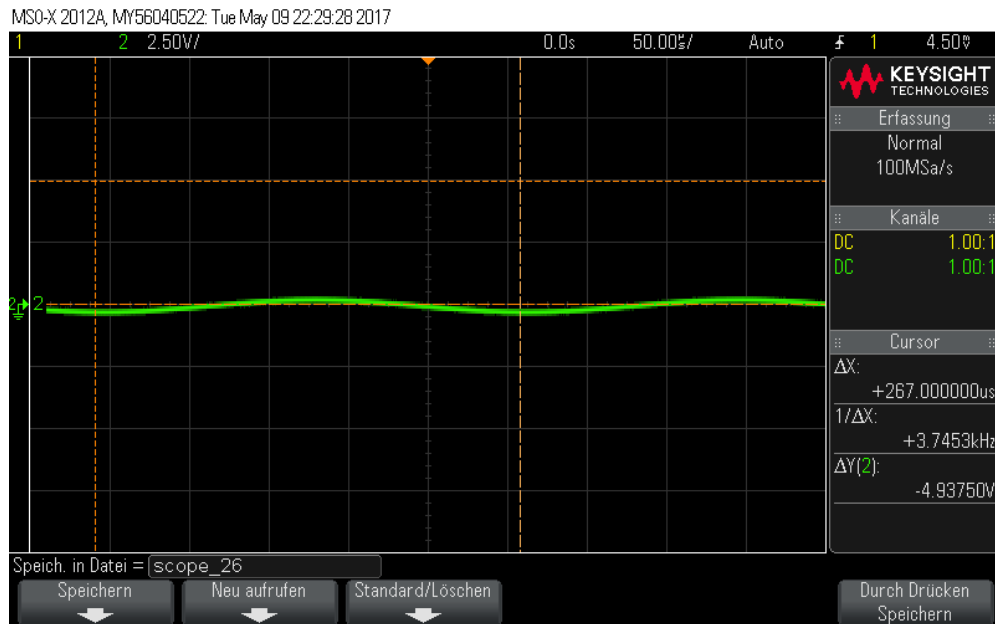


Abbildung 3.36: Eisenkern vollständig in Spule

Wie in den Bildern 3.35 und 3.36 zu erkennen, verringert der Eisenkern die Amplitude des Signals.

Dies lässt sich folgendermaßen Erklären:

Es gilt:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.19)$$

Da der Eisenkern die Induktivität der Spule erhöht, wird der Ausdruck im Zähler größer und die Resonanzfrequenz f_0 kleiner. Die zuvor am Funktionsgenerator eingestellte Frequenz von 3751Hz stimmt nun nicht mehr mit f_0 überein, was eine Verringerung der Amplitude zur Folge hat.

3.4.3 Frequenzsweep

Aufgabe Wiederholen Sie nun den Frequenz-Sweep aus Versuch 3.3 mit Eisenkern in der Spule. Was stellen Sie fest? Interpretieren Sie Ihre Ergebnisse und erstellen Sie für Ihre Unterlagen eine Grafik des zweiten Frequenz Sweeps.

Protokoll

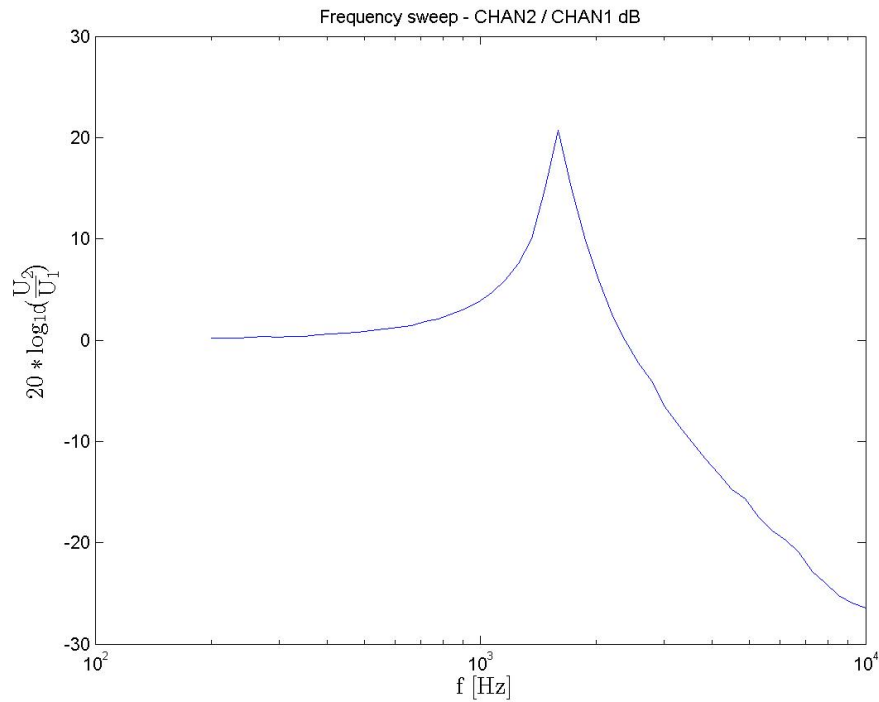


Abbildung 3.37: Frequenzsweep

Wie bereits in obiger Gleichung beschrieben, sorgt eine größere Induktivität für eine kleinere Resonanzfrequenz. Durch die größere Induktivität der Spule mit Eisenkern verschiebt sich also der Peak in Grafik 3.37 nach links. Weiterhin ergibt sich aus dem Frequenz-Sweep:

$$f_0 \approx 1100\text{Hz} \quad (3.20)$$

$$C = 100\text{nF} \quad (3.21)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.22)$$

$$\Leftrightarrow L = \frac{1}{(f_0 2\pi)^2 C} \approx 0.21\text{H} \quad (3.23)$$

Die Induktivität wird also durch das Einführen des Eisenkerns ca. um einen Faktor 10 größer.

3.5 Analyse einer unbekannten Schaltung

In diesem Versuch soll das Verhalten einer unbekannten Schaltung, einer sogenannten Blackbox (BB) untersucht werden. Hierzu steht Ihnen im Rahmen dieses Versuchs eine mit BB1 beschriftete Blackbox zur Verfügung. Alle möglichen Schaltungskombinationen, die sich im Inneren der Blackbox befinden können, sind in Abbildung 3.39 dargestellt. Messen Sie die Transferfunktion der BB mit Hilfe des Schaltungsaufbaus in Abbildung 3.38. Verwenden Sie hierzu einen Sweep mit einer unteren Frequenz von 1Hz, einer oberen Frequenz von 250kHz und einer Auflösung von 200 Punkten.

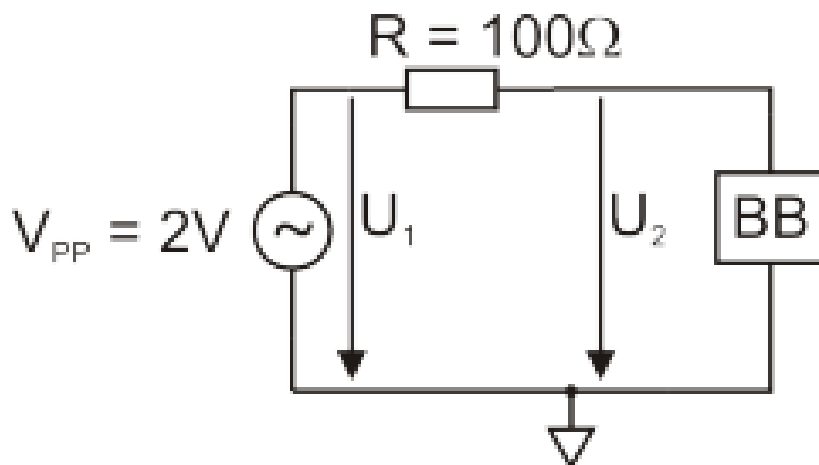


Abbildung 3.38: Messaufbau zum Analysieren der BB

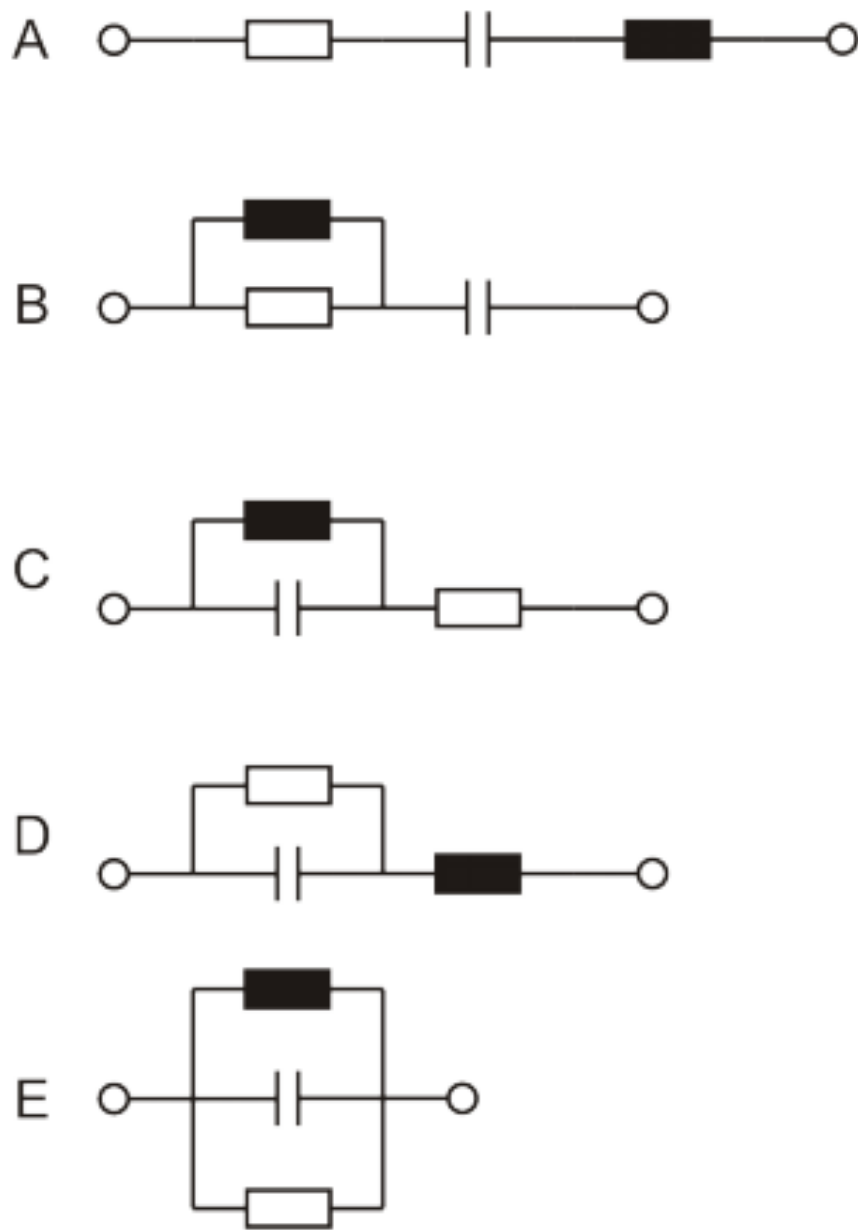


Abbildung 3.39: Mögliche Schaltungen der BB

3.5.1 Schaltung bestimmen

Aufgabe Bestimmen Sie welche Schaltung aus Abbildung 21 in der BlackBox enthalten ist. Gibt es mehrere Möglichkeiten? Hinweis: Verwenden Sie Ihre Abschätzungen aus der Versuchsvorbereitung (Abschnitt 2.4).

Protokoll

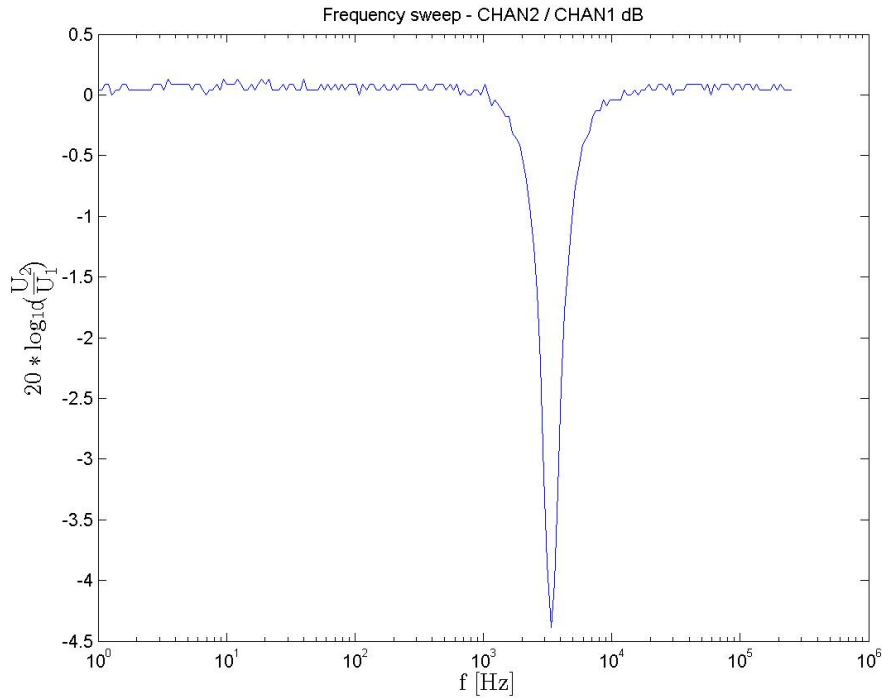


Abbildung 3.40: Frequenzsweep der BB

Für $f \rightarrow 0$ bzw. $f \rightarrow \infty$ beträgt der logarithmische Wert der Übertragungsfunktion 0dB. Das heißt: $U_1 \approx U_2$. Daraus folgt, dass über der BB viel Spannung abfallen muss, was bedeutet, dass sie eine hohe Impedanz besitzt.

Für den Resonanzfall zeigt das Bode-Diagramm einen deutlichen Einbruch, was bedeutet, dass $U_2 < U_1$ sein muss. Diese wiederum bedeutet, dass die BB bei der Resonanzfrequenz eine vergleichsweise geringe Impedanz haben muss.

Schaltung A weist genau dieses Verhalten auf, weswegen die BB aus einer Reihenschaltung von Widerstand, Kondensator und Spule bestehen muss.

3.5.2 Wieso keine andere Schaltung?

Aufgabe Begründen Sie für jede andere Schaltung, wieso diese nicht in der BB enthalten sein kann. Verwenden Sie für Ihre Begründung das Übertragungsverhalten bei einer sehr kleinen Frequenz, bei der Resonanzfrequenz und bei der oberen Frequenz des Messbereiches.

Protokoll Schaltung B: Verhält sich nicht symmetrisch. Für $f \rightarrow 0$ und $f \rightarrow \infty$ verhält sich die Schaltung nicht gleich.

Schaltung C: Bei der Resonanzfrequenz müsste sich das Bode-Diagramm der 0 annähern, was im dargestellten Diagramm nicht der Fall ist.

Schaltung D: Verhält sich nicht symmetrisch. Für $f \rightarrow 0$ und $f \rightarrow \infty$ verhält sich die Schaltung nicht gleich.

Schaltung E: Bei den Grenzfällen $f \rightarrow 0$ und $f \rightarrow \infty$ müsste sich das Diagramm der $-\infty$ annähern, was im dargestellten Diagramm nicht der Fall ist.