

ulm university universität
uulm

Grundpraktikum der Elektrotechnik

Versuch 4: Henry meets Faraday

Institut für Mikroelektronik
Universität Ulm



Grundpraktikum Elektrotechnik

Versuch 4: Henry meets Faraday

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	2
1.1	Kenngrößen einer Wechselspannung	2
1.2	Der ohmsche Widerstand	3
1.3	Die Kapazität	4
1.4	Die Induktivität	5
1.5	Schwingkreise - Der Reihenschwingkreis	6
2	Vorbereitende Fragen	7
2.1	Lade- und Entladevorgang eines Kondensators	7
2.2	Ein- und Ausschaltvorgang einer Induktivität	7
2.3	Schwingkreise	8
2.4	Analyse unbekannter Schaltungen	8
3	Versuchsdurchführung	9
3.1	Ein- und Ausschaltvorgang einer Induktivität	9
3.2	Freie Schwingungen	10
3.3	Spannungsüberhöhung	12
3.4	Induktionsschleife einer Ampelschaltung	12
3.5	Analyse einer unbekannten Schaltung	13
3.6	Evaluation	15

Versuch 4: Henry meets Faraday

Bislang wurden als passive Schaltungselemente nur der ohmsche Widerstand betrachtet. In diesem Versuch werden der Kondensator und die Spule genauer betrachtet. Dieser Versuch gliedert sich in mehrere Teile. Am Anfang werden die wichtigsten Eigenschaften von Kondensatoren und Spulen wiederholt. Dies soll nur einer Auffrischung des in der Vorlesung *Grundlagen Elektrotechnik I* behandelten Wissens dienen. Erinnerungslücken können mit dem Skript *Grundlagen Elektrotechnik I* und mit den Übungsblättern gefüllt werden. Die in Kapitel 2 auf Seite 7 enthaltenen vorbereitenden Fragen müssen handschriftlich beantwortet und zum Colloquium mitgebracht werden. Im letzten Kapitel sind die Aufgaben zur Versuchsdurchführung enthalten. Arbeiten Sie auch dieses Kapitel bereits vor dem eigentlichen Versuchstag genauestens durch!

1 Theorie

Zunächst einige Hinweise:

- Die Kirchhoffschen Sätze, die Knoten- und Maschenregel, gelten auch bei sinusförmigen Strömen und Spannungen.
- Auch für komplexe Ströme und Spannungen müssen Zählpfeile definiert werden.
- Mit den komplexen Widerständen (Impedanzen) kann gerechnet werden wie bisher, wenn alle Ströme und Spannungen die gleiche Frequenz aufweisen.

1.1 Kenngrößen einer Wechselspannung

Eine sinusförmige Wechselspannung muss, anders als eine Gleichspannung, mit vielen Parametern beschrieben werden. In diesem Abschnitt werden einige Begriffe nochmal näher erläutert.

Abbildung 1 zeigt Kenngrößen einer sinusförmigen Spannung und eines sinusförmigen Stroms:

- \hat{U} und \hat{I} : Die Amplitude, auch Scheitelwert genannt, einer Wechselspannung oder eines Wechselstromes ist definiert als der Abstand des Hoch- bzw. Tiefpunktes zur Nullachse und beschreibt somit das Maximum des Verlaufes.
- U_{eff} : Der Effektivwert U_{eff} einer beliebigen zeitabhängigen Spannung entspricht derjenigen Gleichspannung, die an einem ohmschen Widerstand den gleichen Leistungsabfall verursacht. Der Effektivwert einer Sinusspannung kann aus dem Scheitelwert berechnet werden mit $U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$. Die Effektivspannung wird auch gerne mit der englischen Bezeichnung U_{RMS} gekennzeichnet.
- φ_U : Der Nullphasenwinkel φ_U ist definiert als die Phasenverschiebung der Spannung U gegenüber $\cos(\omega \cdot t)$.
- φ_I : Der Nullphasenwinkel φ_I ist definiert als die Phasenverschiebung des Stromes I gegenüber $\cos(\omega \cdot t)$.
- Periodendauer und Frequenz: Eine Sinusschwingung wiederholt sich nach der Periodendauer T . Die Frequenz ist $f = 1/T$

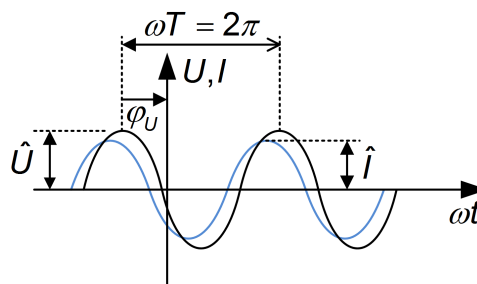


Abbildung 1: Kenngrößen von sinusförmiger Spannung und Strom

1.2 Der ohmsche Widerstand

Der ohmsche Widerstand im Gleichspannungsnetzwerk wurde bereits ausführlich in Versuch 2 „Netzwerke mit Kirchhoff und Ohm“ behandelt. In Abbildung 2 ist ein ohmscher Widerstand an einer Wechselspannung zu sehen. Die Verläufe von Spannung und Strom verhalten sich wie in Abbildung 3a dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass Strom und Spannung den selben Nullphasenwinkel aufweisen. Man sagt auch, Strom und Spannung sind „in Phase“. Das Auftragen von Strom und Spannung als Vektor in der komplexen Ebene ergibt Abbildung 3b. Auch hier ist eine Phasenverschiebung von 0° deutlich erkennbar.

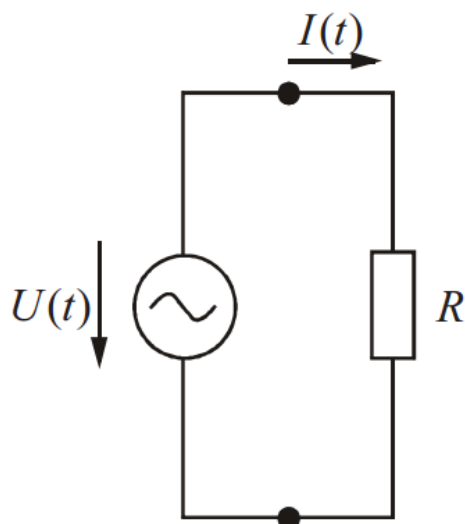


Abbildung 2: Ohmscher Widerstand an Wechselspannung

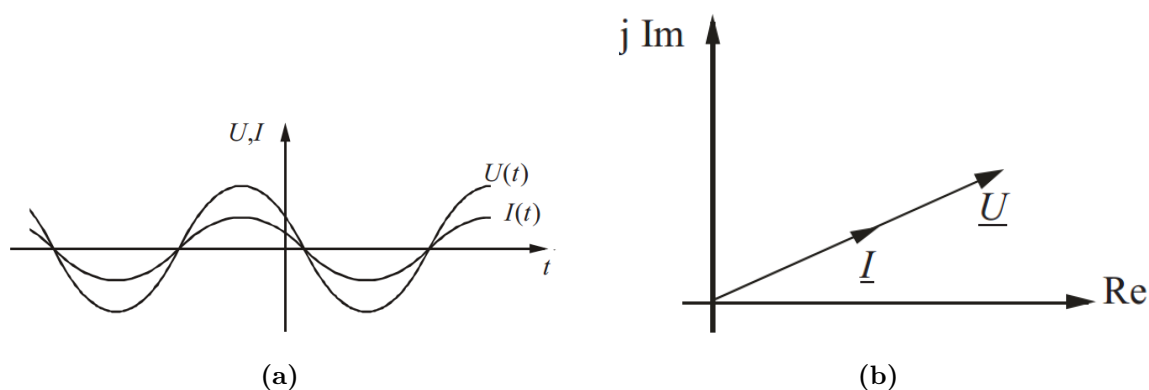


Abbildung 3: Wechselspannung an ohmschem Widerstand: (a) Verlauf von Strom und Spannung (b) Zeigerdiagramm von Strom und Spannung

1.3 Die Kapazität

In Abbildung 4 ist eine Kapazität an eine Wechselspannung angeschlossen. Der Strom und die Spannung an der Kapazität verhalten sich im eingeschwungenen Zustand wie in Abbildung 5a dargestellt. Im Vektordiagramm in Abbildung 5b ist gut zu sehen, dass der Nullphasenwinkel des Stromes um 90° größer ist als der Nullphasenwinkel der Spannung, d.h. am Kondensator eilt der Strom der Spannung voraus.

Kondensatoren können in verschiedene industriell gefertigte Baugruppen unterteilt werden. Die wichtigsten hierbei sind Keramik-, Kunststoff-, Elektrolyt- und Folienkondensatoren. Die verschiedenen Bauformen unterscheiden sich z.B. in der Spannungsfestigkeit, oder der maximal erreichbaren Kapazität. Ein sehr wichtiger Unterschied ist, ob ein Kondensator unipolar, d.h. Anschluss des Kondensators an eine Spannung falscher Polarität kann zu einer Zerstörung des Bauteils führen, oder bipolar ist. Der in diesem Versuch verwendete Kondensator ist bipolar und somit für Wechselspannung ohne Mittelwert geeignet.

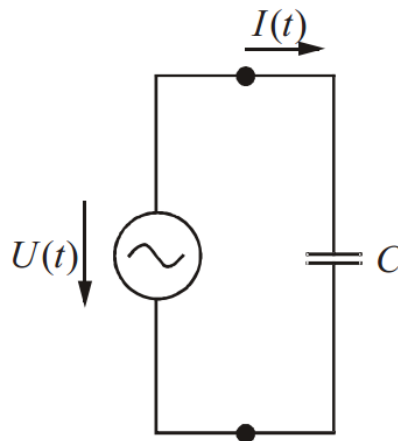


Abbildung 4: Kapazität an Wechselspannung

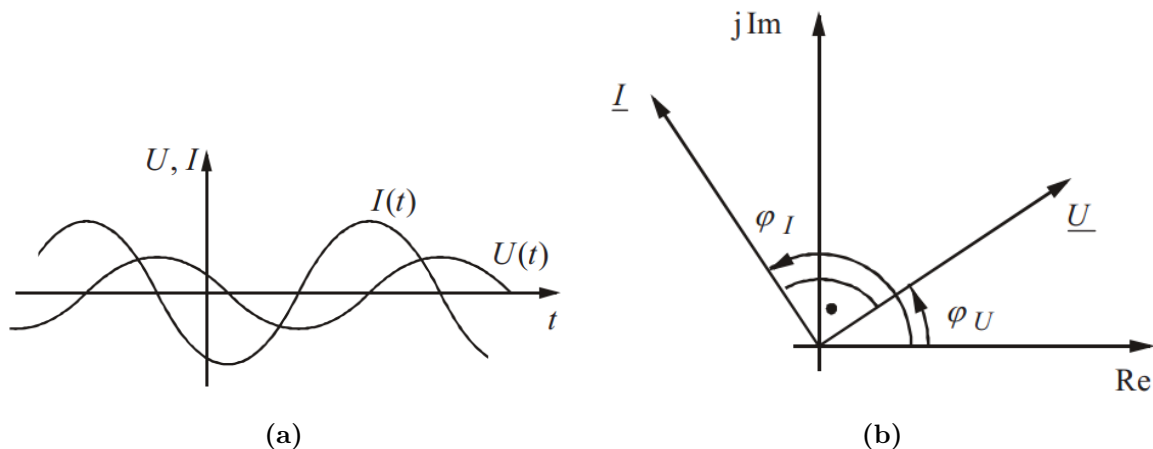


Abbildung 5: Wechselspannung an Kapazität: (a) Verlauf von Strom und Spannung
(b) Zeigerdiagramm von Strom und Spannung

1.4 Die Induktivität

In Abbildung 6 ist eine Induktivität an eine Wechselspannung angeschlossen. Der Strom und die Spannung an der Induktivität verhalten sich im eingeschwungenen Zustand wie in Abbildung 7a dargestellt. Im Vektordiagramm in Abbildung 7b ist gut zu sehen, dass der Nullphasenwinkel der Spannung um 90° größer ist als der Nullphasenwinkel des Stromes. Bei einer idealen Induktivität eilt also die Spannung dem Strom um 90° voraus.

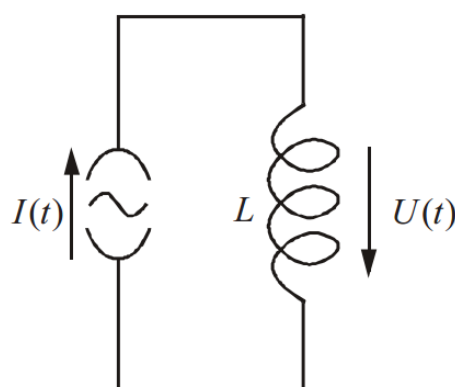


Abbildung 6: Induktivität an Wechselstrom

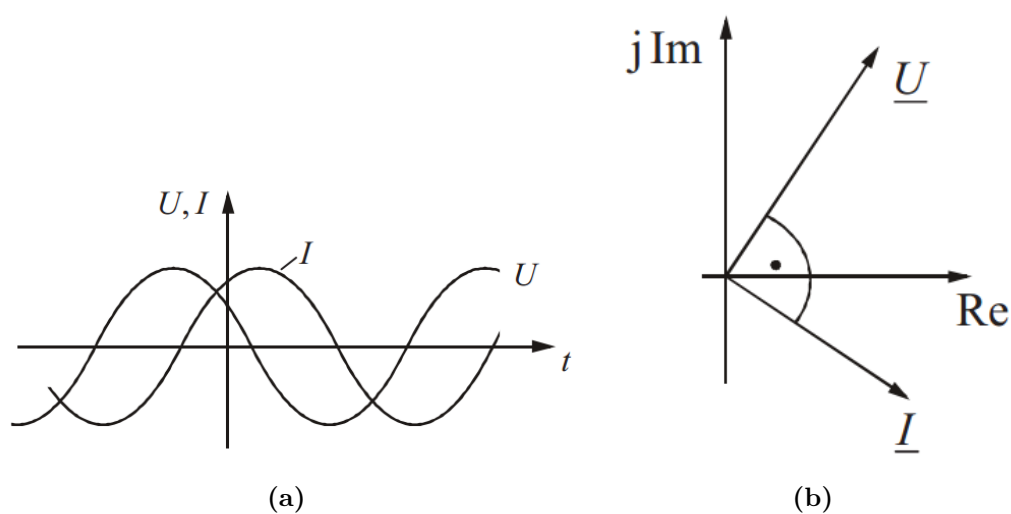


Abbildung 7: Wechselstrom durch Induktivität: (a) Verlauf von Strom und Spannung
 (b) Zeigerdiagramm von Strom und Spannung

1.5 Schwingkreise - Der Reihenschwingkreis

Jetzt kombinieren wir Widerstand, Induktivität und Kapazität wie in Abbildung 8 dargestellt.

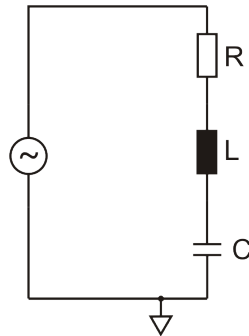


Abbildung 8: Reihenschwingkreis

Von dieser Schaltung kann der komplexe Widerstand \underline{Z} wie folgt berechnet werden. Weiterhin gibt es eine besondere Frequenz bei der der komplexe Widerstand rein reell werden kann. Hierzu wird der Imaginärteil zu null gesetzt und es ergibt sich für die Resonanzkreisfrequenz ω_0 :

$$\underline{Z} = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Das Verhalten der Schaltung in Abhängigkeit von der Frequenz der Erregung wird in Abbildung 9 dargestellt. Für $\omega < \omega_0$ wirkt der Leitwert kapazitiv, für $\omega = \omega_0$ ist der Leitwert rein reell und für $\omega > \omega_0$ wirkt der Leitwert induktiv.

Tabelle 1: Übersicht der komplexen Widerstände und Leitwerte

	komplexer Widerstand	komplexer Leitwert
ohmscher Widerstand	$\underline{Z} = R$	$\underline{Y} = G = \frac{1}{R}$
Kondensator	$\underline{Z} = \frac{1}{j\omega C}$	$\underline{Y} = G = j\omega C$
Spule	$\underline{Z} = j\omega L$	$\underline{Y} = G = \frac{1}{j\omega L}$

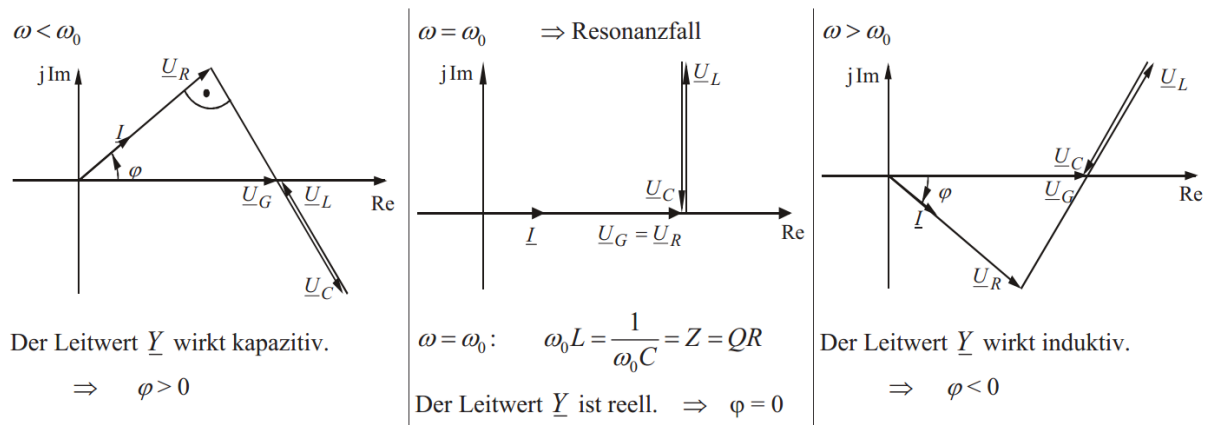


Abbildung 9: Zeigerdiagramme der Spannungen am Schwingkreis

2 Vorbereitende Fragen

2.1 Lade- und Entladevorgang eines Kondensators

Der Lade- und Entladevorgang eines Kondensators wird üblicherweise mit einem Schalter realisiert (siehe Abbildung 10a).

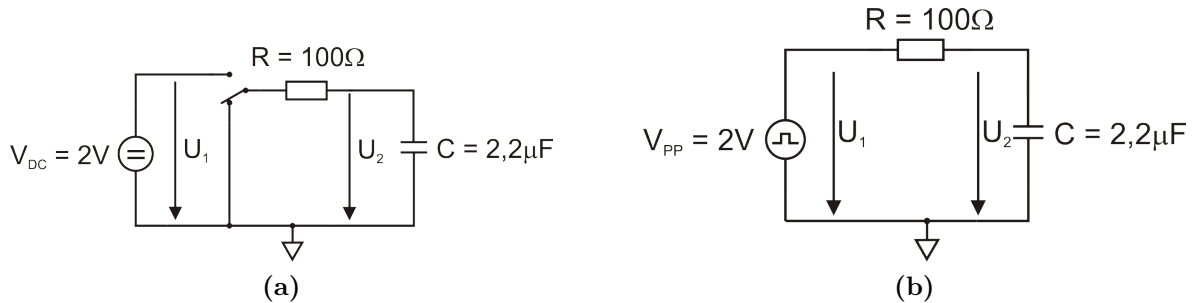


Abbildung 10: Laden und Entladen eines Kondensators

1. Stellen Sie die Differentialgleichung für die Spannung an der Kapazität für den Ladevorgang auf und bestimmen Sie die Zeitkonstante τ als Funktion des Widerstands und der Kapazität.
2. Berechnen Sie nun für einen Widerstand von $R = 100\Omega$ und einer Kapazität von $C = 2,2\mu\text{F}$ die resultierende Zeitkonstante.
3. Kann ein Lade- und Entladevorgang auch mit einem rechteckförmigen Eingangssignal gemessen werden? Welche Pulsweite müssen Sie für die Rechteckspannung einstellen, um einen kompletten Lade- und Entladevorgang beobachten zu können?

2.2 Ein- und Ausschaltvorgang einer Induktivität

1. Wieso ist der Widerstand bei der in Abbildung 11 dargestellten Schaltung sehr wichtig? Was kann passieren, wenn die Messung ohne Widerstand durchgeführt wird?
2. Stellen Sie die Differentialgleichung des Stromes für den Einschaltvorgang auf und bestimmen Sie die Zeitkonstante τ .

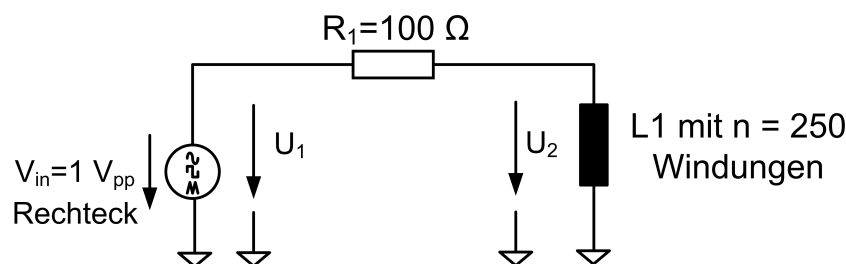


Abbildung 11: Messaufbau um Strom- und Spannungsverlauf beim Schalten der Spannung an einer Spule zu bestimmen.

2.3 Schwingkreise

1. Welche Limitierungen realer Bauteile führen dazu, dass kein idealer ungedämpfter Schwingkreis realisiert werden?
2. Wie lautet bei Parallel- und Reihenschwingkreisen die Formel zur Bestimmung der Resonanzfrequenz?
3. Wieso kann für eine freie Schwingung, die üblicherweise mit einer Gleichspannungsquelle und einem Schalter erregt wird, auch eine Rechteckspannung ohne Schalter als Anregung benutzt werden? Begründen Sie Ihre Antwort.

2.4 Analyse unbekannter Schaltungen

Bestimmen Sie für die in Abbildung 12 gezeigten Schaltungen qualitativ die Impedanz für die drei Frequenzen $f = 0 \text{ Hz}$, $f = f_{\text{res}}$ (d.h. im Resonanzfall) und $f = \infty$. Berücksichtigen Sie für Ihre Abschätzung die folgenden Grenzfälle:

- $f = 0 \text{ Hz}$: $Z(\text{Spule}) = 0 \Omega$, $Z(\text{Kondensator}) = \infty$
- $f = \infty$: $Z(\text{Spule}) = \infty$, $Z(\text{Kondensator}) = 0 \Omega$
- $f = f_{\text{res}}$: $Z(\text{LC-Serien-Schwingkreis}) = 0 \Omega$, $Z(\text{LC-Parallel-Schwingkreis}) = \infty$

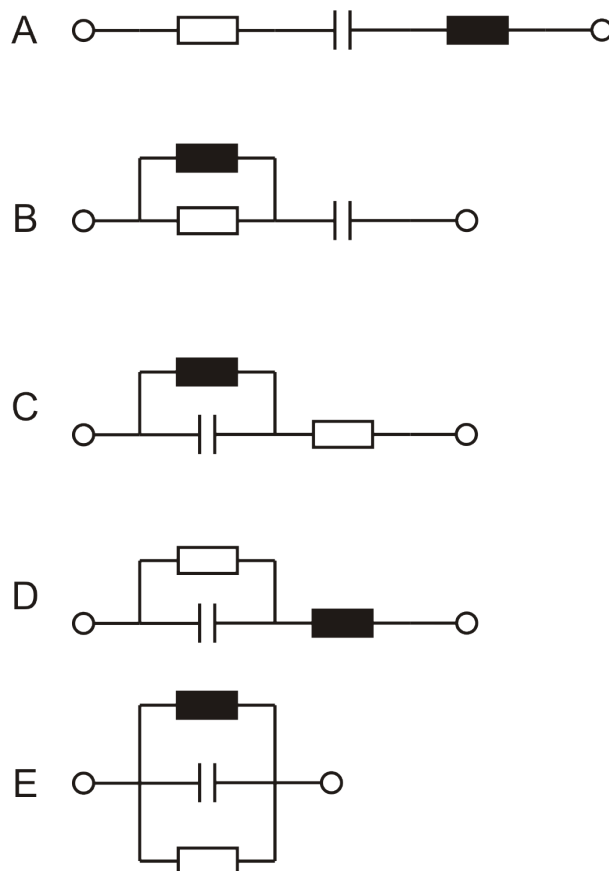


Abbildung 12: Mögliche Verschaltungen einer Kapazität, einer Spule und eines Widerstandes.

3 Versuchsdurchführung

Generelle Hinweise:

- Verwenden Sie in diesem Versuch ausschließlich den Funktionsgenerator des Oszilloskopes.
- Die Massepotentiale des Funktionsgenerators und der beiden Messkanäle des Oszilloskopes sind intern miteinander verbunden. Somit sind auch die Massepotentiale, die an den unterschiedlichen Bananklemmen der BNC-Adapter abgegriffen werden können, intern miteinander verbunden. Eine Messung mit dem Oszilloskop ist also immer nur gegen den Masseknoten möglich, nicht zwischen zwei Knoten innerhalb der Schaltung!
- Da mit dem Oszilloskop Ströme nicht direkt gemessen werden können, muss eine indirekte Strommessung über die Ermittlung des Spannungsabfalls an einem Widerstand erfolgen. Da an einem ohmschen Widerstand Strom und Spannung gemäß Abschnitt 1.2 in Phase sind, stellt die gemessene Spannung ein um den Widerstandswert skaliertes Abbild des Stromes dar. Die Differenz zweier bezogen auf Masse gemessener Spannungen kann über die Math-Funktion des Oszilloskops realisiert werden (Differenzbildung der beiden Eingangskanäle).

3.1 Ein- und Ausschaltvorgang einer Induktivität

In diesem Versuch sollen die zeitlichen Verläufe des Stromes und der Spannung beim Schalten einer Induktivität untersucht werden. Verwenden Sie hierzu den in Abbildung 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.

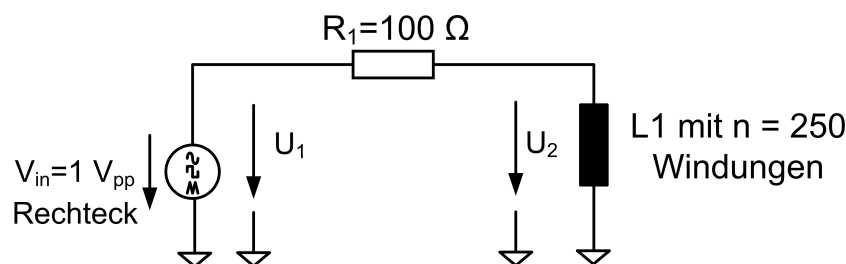


Abbildung 13: Messaufbau um Strom- und Spannungsverlauf beim Schalten der Spannung an einer Spule zu bestimmen

Versuchsauswertung:

1. Erstellen Sie einen Screenshot der Spannungs- und Stromverläufe.
2. Erläutern Sie die Verläufe von Spannung und Strom.

3.2 Freie Schwingungen

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

1. Bauen Sie hierzu zunächst die in Abbildung 14 gezeigte Schaltung auf. Verwenden Sie die Spule mit $n = 1000$ Windungen.

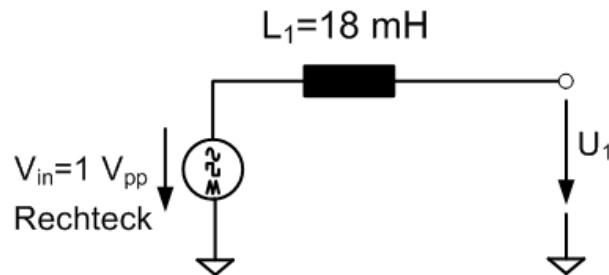


Abbildung 14: Messaufbau zur Erzeugung einer freien Schwingung über die Eigenresonanz einer Spule.

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.

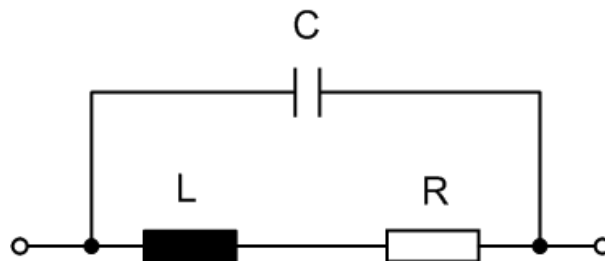


Abbildung 15: Ersatzschaltbild einer realen Spule mit parasitärem Widerstand und parasitärer Kapazität.

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.

- (a) Erstellen Sie für Ihre Versuchsauswertung einen Screenshot der Messung.
- (b) Schätzen Sie mit Hilfe Ihrer Messung den Wert der parasitären Kapazität der verwendeten Spule ab.

2. Bauen Sie als nächstes die in Abbildung 16 dargestellte Schaltung auf. Verwenden Sie erneut die Spule mit $n = 1000$ Windungen und den Kondensator mit $C_1 = 100 \text{ nF}$.

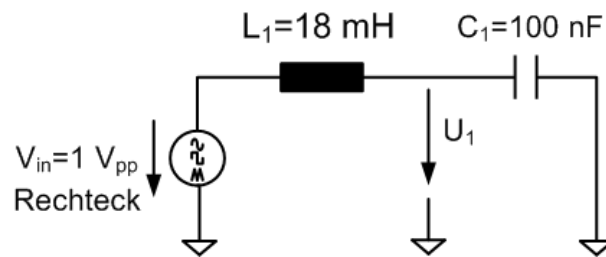


Abbildung 16: Messaufbau zur Erzeugung einer freien Schwingung in einem Serien-LC-Schwingkreis.

- 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.
3. Bauen Sie nun die in Abbildung 17 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.

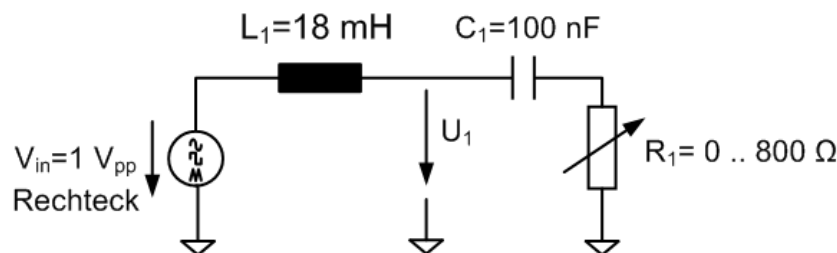


Abbildung 17: Messaufbau Erzeugung einer freien Schwingung in einem Serien-LC-Schwingkreis mit erhöhter Dämpfung.

- 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.
- 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.

3.3 Spannungsüberhöhung

In folgender Messung soll der Effekt der Spannungsüberhöhung in einem Serien-LC-Schwingkreis untersucht werden. Errichten Sie hierzu die Schaltung nach Abbildung 18. Verwenden Sie die Spule mit $n = 1000$ Windungen sowie einen Kondensator mit $C = 100 \text{ nF}$.

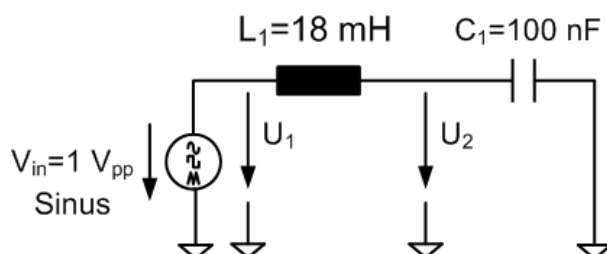


Abbildung 18: Messaufbau zur Untersuchung der Spannungsüberhöhung in einem Serien-LC-Schwingkreis

1. Bei welcher Frequenz erwarten Sie ein Maximum der Spannung U_2 ? Begründen Sie Ihre Antwort.
2. 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 V_{pp} ; 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.
3. Stimmt die Messung mit dem theoretischen Wert überein?

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 19 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.

1. 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.

2. Führen Sie nun einen Eisenkern in die Spule ein und beobachten Sie die Veränderung der Amplitude der Spannung U_2 . Interpretieren Sie Ihre Beobachtung.
3. 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.

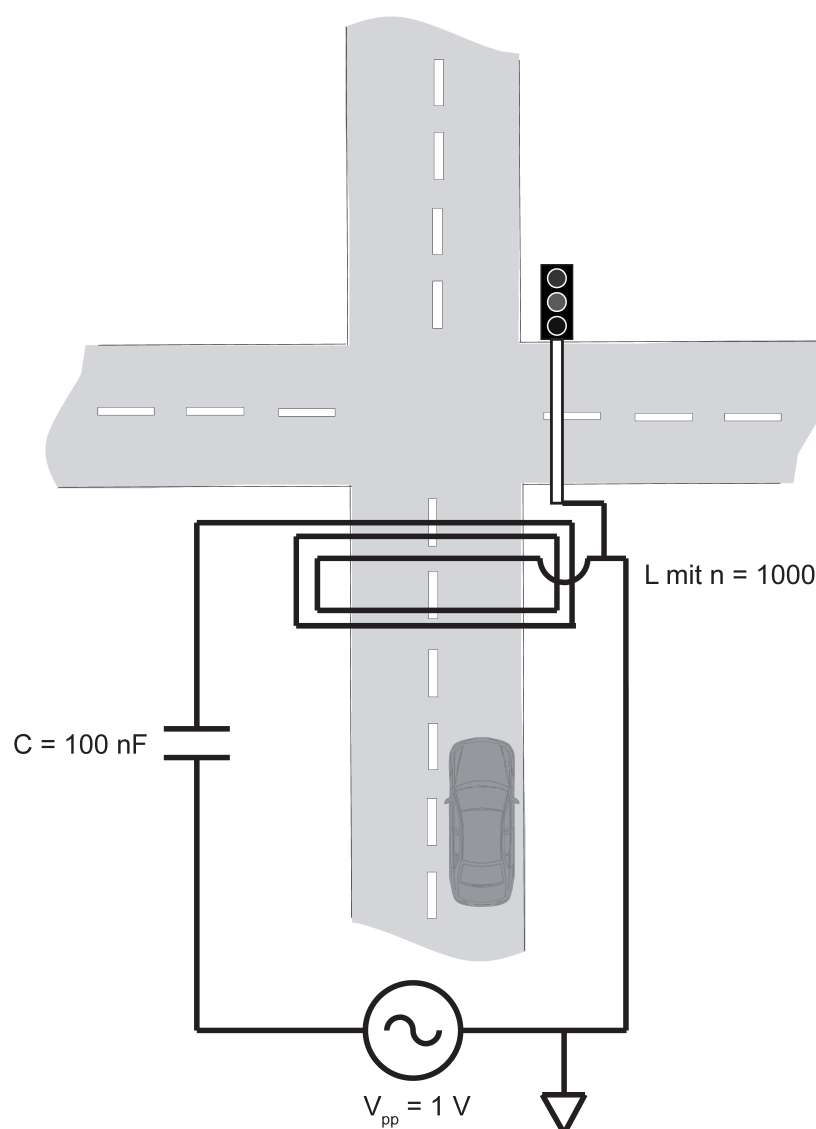


Abbildung 19: Aufbau einer Induktionsschleife an einer Kreuzung.

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 21 dargestellt.

Messen Sie die Transferfunktion der BB mit Hilfe des Schaltungsaufbaus in Abbildung 20. Verwenden Sie hierzu einen Sweep mit einer unteren Frequenz von 1 Hz, einer oberen

Frequenz von 250 kHz und einer Auflösung von 200 Punkten.

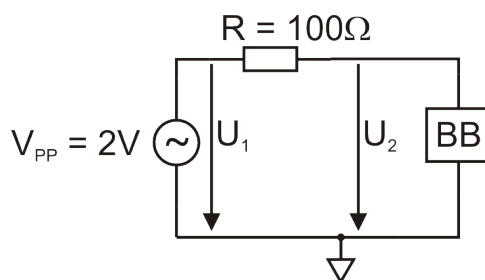


Abbildung 20: Messaufbau zum Analysieren der BB

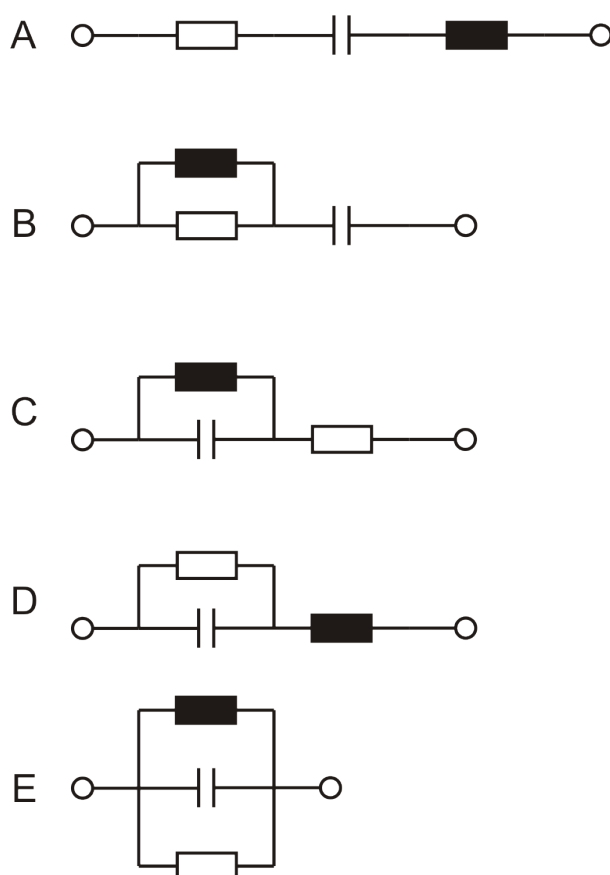


Abbildung 21: Mögliche Schaltungen der BB

Versuchsauswertung:

1. 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).
2. 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.

3.6 Evaluation

Auf der Moodleseite gibt es zu jedem Versuch eine Umfrage zur Evaluation. Bitte helfen Sie die Qualität des Praktikums zu verbessern, indem Sie uns Rückmeldung geben wie Sie die Versuchsdurchführung empfunden haben!

Loggen Sie Sich beide einzeln vom Praktikumsrechner aus ein und beantworten Sie die Umfrage noch direkt nach der Versuchsdurchführung bevor Sie das Praktikum verlassen!