

E1 - Phasenverschiebung im Wechselstromkreis

Julia Mariella Wiest

Gruppe A06

13.06.2025

Mit der Abgabe dieses Protokolls wird bestätigt, dass es kein Plagiat ist. Falls es dennoch eindeutig als Plagiat erkannt werden sollte, ist bekannt, dass das einen Punkt abzugreifen von 20 Punkten zur Folge, ohne Möglichkeit der Nachbearbeitung, hat. Diese Bewertung wird ausnahmslos zur Gesamtnote im Anfängerpraktikum beitragen.

1 Physikalische Grundlagen

Der nachstehende Versuch wurde mit dem Ziel durchgeführt, die durch elektronische Bauteile wie Widerstände, Kondensatoren und Spulen verursachte Phasenverschiebung im Wechselstromkreis zu untersuchen.

Wird in einem Stromkreis eine Wechselspannungsquelle U_G , ein ohmscher Widerstand R , ein Kondensator der Kapazität C und eine Spule der Induktivität L verbaut, so lässt sich der Wechselstrom

$$I = I_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

mit Periodendauer T des Wechselstroms angeben. Spannung und Strom sind dabei nicht immer einer Phase, sodass eine Phasenverschiebung φ auftreten kann (Bannwarth, Kremer und Schulz 2019, S. 110), (Universität Augsburg SoSe 2025).

Im Wechselstromkreis weisen die verwendete Spule beziehungsweise der Kondensator einen Wechselstromwiderstand auf. Dieser lässt sich über die Formel

$$U_R = R \cdot I$$

bestimmen.

Aufgrund von Spannungsabfällen an der Spule und am Kondensator ergibt sich nach der Kirchhoffschen Maschenregel eine Gesamtspannung von

$$U_G = U_R + U_C + U_L$$

(Bannwarth, Kremer und Schulz 2019, S. 112), (Universität Augsburg SoSe 2025).

Dabei lässt sich die Spannung am Kondensator folgendermaßen berechnen:

$$U_C = \frac{1}{C} \int I dt = -\frac{1}{\omega C} \cdot I_0 \cos(\omega t) = -\chi_C \cdot I_0 \cos(\omega t).$$

Das bedeutet, der Strom eilt der Spannung um $\frac{T}{4}$ voraus. Dies entspricht einem idealen Phasenwinkel von $\varphi = -\frac{\pi}{2}$.

Die Spannung U_L an der Spule

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = \omega L \cdot I_0 \cos(\omega t) = \chi_L \cdot I_0 \cos(\omega t)$$

eilt dem Strom um $\frac{T}{4}$ nach. Die Versetzung entspricht dem Phasenwinkel $\varphi = +\frac{\pi}{2}$.

1 Physikalische Grundlagen

Die in den obigen beiden Formeln verwendeten Variablen χ_C und χ_L stellen den kapazitiven und induktiven Blindwiderstand dar. Der Blindwiderstand besagt, dass im zeitlichen Mittel während des Spannungsabfalls keine Leistung umgesetzt wird (Walcher 1994, S. 244), (Universität Augsburg SoSe 2025).

Die Berechnung der Phasenverschiebung mithilfe der obigen trigonometrischen Gleichungen ist mathematisch schwierig, weswegen die Bestimmung des Phasenwinkels zwischen dem Wechselstrom I und der Wechselspannung U über Zeigerdiagramme in der komplexen Ebene, einfacher zu realisieren ist, um die relative Phase zu veranschaulichen. Dabei werden U und I auf der x-Achse gegen den Uhrzeigersinn mit der Periodendauer T als rotierende Zeiger aufgetragen. Die Amplitude der Sinuskurve wird über die Länge der Zeiger modelliert. Der Winkel φ zwischen den Zeigern ergibt die gesuchte relative Phase. Die graphische Darstellung der Zeiger in der komplexen Ebene kann mathematisch über den Zusammenhang

$$U' = U_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi)} \quad I' = I_0 \cdot e^{i(\omega t)}$$

erklärt werden (Meschede 2010, S. 414), (Universität Augsburg SoSe 2025). Die Modellierung des Sinus vom Einheitskreis zur Funktion (Kapitel 8.3) kann in folgender Simulation des digitalen Geogebra-Buches unter dem Link <https://www.geogebra.org/m/dm3khqm#material/ztpngs5d> gut nachvollzogen werden (Merkel SoSe 2025).

Dagegen lassen sich zeitunabhängige Wechselstromwiderstände, welche im Folgenden auch in der Auswertung Anwendung finden, in einem Zeigerdiagramm mit nicht rotierenden Zeigern darstellen. Die Zeigerlänge entspricht hierbei dem Ausdruck $\frac{U_0}{I_0}$. Der ohmsche Widerstand R wird auf der Achse des Realteils aufgetragen, der kapazitive und induktive Widerstand χ_C beziehungsweise χ_L auf der Achse des Imaginärteils. Durch Vektoraddition der Pfeile ergibt sich der resultierende Gesamtwiderstand Z , auch Scheinwiderstand oder Impedanz genannt. Für die Impedanz Z gilt

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Der gesuchte Phasenwiderstand φ lässt sich nun über die trigonometrischen Beziehungen im Dreieck bestimmen:

$$\varphi_Z = \arctan\left(-\frac{1}{\omega CR}\right).$$

(Tipler und Mosca 2024, S. 914), (Universität Augsburg SoSe 2025).

2 Phasenverschiebung im Wechselstromkreis

2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

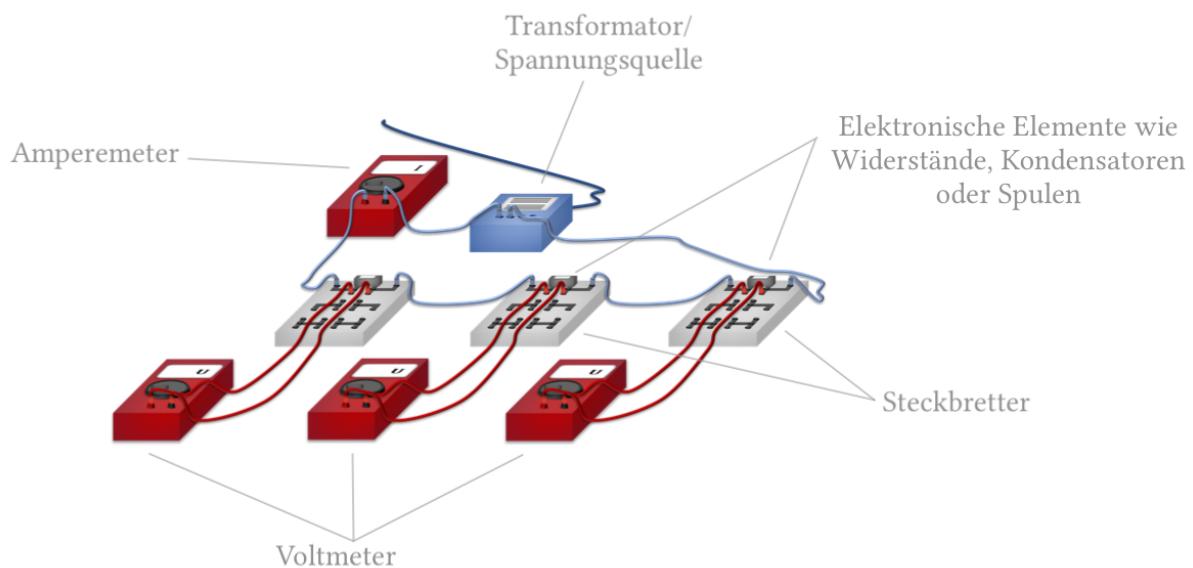


Abb. 2.1: Darstellung des Versuchsaufbaus (Universität Augsburg SoSe 2025).

Für den Versuch werden mehrere Schaltungen, welche über Steckverbindungen realisiert werden, aufgebaut und untersucht. Dafür stehen folgende Bauteile zur Verfügung:

- Ein Transformator, welcher als Stromquelle dient, wobei der 6 V-Ausgang für alle Schaltungen genutzt wird.
- Drei Steckbretter, auf welchen Leiterbahnen markiert sind, um weitere Bauteile über Pins einfach in Reihe oder parallel schalten zu können.
- Vier Multimeter, wovon eines zum Messen der Stromstärke benutzt und in Reihe geschaltet wird. Die weiteren drei fungieren als Voltmeter und messen die jeweiligen Spannungen der auf den Steckbrettern angebrachten elektronischen Elemente. Dabei sind die elektronischen Elemente und das Multimeter parallel zu schalten.
- Zur Realisierung der verschiedenen vorgegebenen Schaltungen stehen mehrere elektronische Elemente zur Verfügung: Zwei Kondensatoren mit unterschiedlichen Kapazitäten $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$ und $C_2 = 4,7 \mu\text{F}$, zwei Spulen mit unterschiedlicher Induktivität $L_1 = 220 \text{ mH}$ und $L_2 = 820 \text{ mH}$ und ein ohmscher Widerstand der Größe $R = 1 \text{ k}\Omega$.

2 Phasenverschiebung im Wechselstromkreis

- Die Steckbretter und Multimeter werden über Verbindungskabel zusammengesteckt, sodass ein elektrischer Stromkreis entsteht.

Die erste zu realisierende Schaltung (a) besteht aus dem ohmschen Widerstand $R = 1 \text{ k}\Omega$ und einem Kondensator der Kapazität C , wobei die Messung für zwei verschiedene Kapazitäten $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$ und $C_2 = 4,7 \mu\text{F}$ nacheinander durchgeführt wird. Der Schaltplan hierfür ist in Abbildung 2.2 visualisiert. Ein Foto des tatsächlichen Versuchsaufbaus für den Kondensator C_2 ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

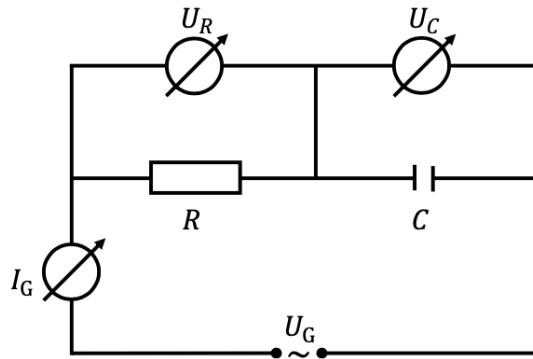


Abb. 2.2: Schaltung (a) (Universität Augsburg SoSe 2025).

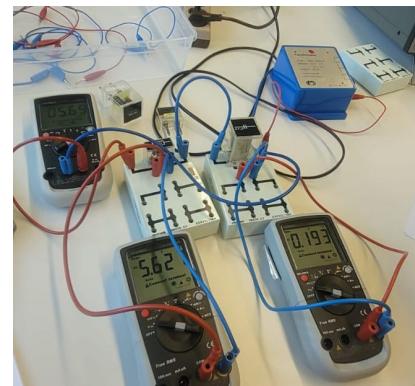


Abb. 2.3: Schaltung (a) für den Kondensator C_2 .

Für die zweite Schaltung (b) ist der ohmsche Widerstand $R = 1 \text{ k}\Omega$ nacheinander mit zwei verschiedenen Spulen der Induktivität $L_1 = 220 \text{ mH}$ und $L_2 = 820 \text{ mH}$ in Serie zu schalten. Der Schaltplan ist in Abbildung 2.4 zu sehen.

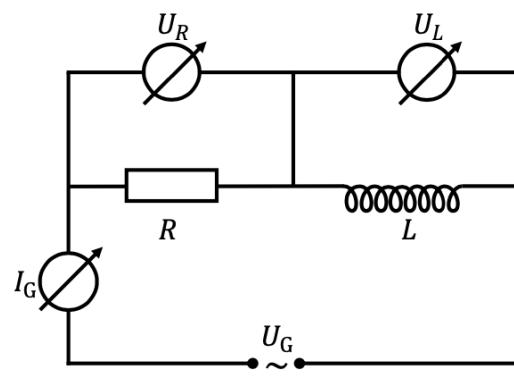


Abb. 2.4: Schaltung (b) (Universität Augsburg SoSe 2025).

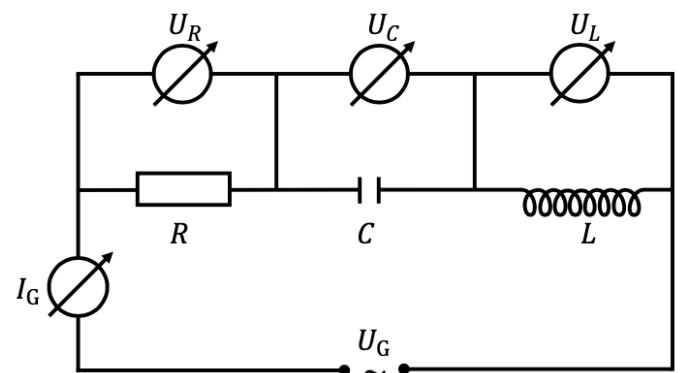


Abb. 2.5: Schaltung (c) (Universität Augsburg SoSe 2025).

Die dritte Schaltung (c) vereint den ohmschen Widerstand $R = 1 \text{ k}\Omega$, den Kondensator $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$ und die Spule $L_1 = 220 \text{ mH}$ in einer Serienschaltung. Der Schaltplan befindet sich in Abbildung 2.5.

Im ersten Versuchteil wird nun für jede Schaltung jeweils der Gesamtstrom I_G , die Gesamtspannung U_G und die jeweiligen Einzelspannungen der Bauteile U_R , U_C und U_L im Messprotokoll notiert. Dabei gibt das Voltmeter einen Effektivwert für die Wechselspannung aus.

Im zweiten Versuchsteil werden die angeschlossenen Multimeter des Stromkreises entfernt und durch ein Oszilloskop ersetzt. Dafür wird ein Eingang des Oszilloskops mithilfe eines zweiköpfigen Kabels direkt mit den Kabeln am Transformator verbunden. Der zweite Eingang wird mit den Kabeln des Widerstands R verbunden. Dadurch können auf dem Bildschirm des Oszilloskopes die jeweiligen Sinuskurven der Spannungen U_R und U_G beobachtet werden (Abbildung 2.6).

Mithilfe der Hebel, Knöpfe und Drehreglern am Oszilloskop können nun die Sinuskurven so verschoben werden, dass an der Skala des Bildschirms der Abstand der Nulldurchgänge zwischen U_R und U_G beziehungsweise der Abstand zweier Nulldurchgänge von U_G abgelesen werden kann. Dies wird für alle drei oben genannten Schaltungen und deren Variationen für unterschiedliche Kondensatoren beziehungsweise Spulen realisiert. Die Skala des verwendeten Oszilloskops gibt dabei pro eingezeichneter Markierung den Abstand in 2 ms an. Aus den gemessenen Abständen kann so später der Phasenwinkel φ_G bestimmt werden. Zuletzt wird allein der Widerstand an das Oszilloskop angeschlossen und dessen Abstand zweier Nulldurchgänge gemessen, um daraus die Schwingungsdauer T des verwendeten Wechselstroms bestimmen zu können.

Als letztes wird im dritten Versuchsteil der Innenwiderstand der beiden Spulen L_1 und L_2 gemessen. Hierfür können die jeweiligen Spulen direkt in das Multimeter gesteckt und deren Widerstand an der Anzeige abgelesen werden.

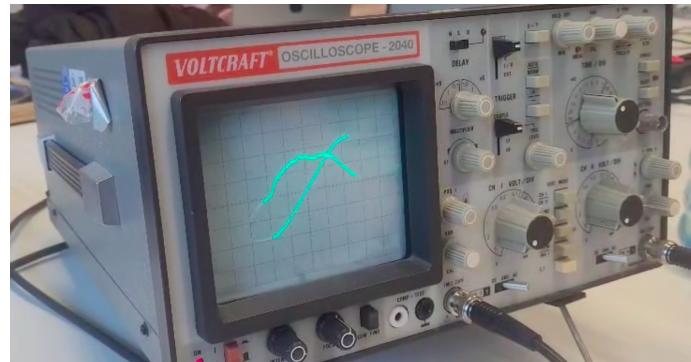


Abb. 2.6: Visualisierung der Sinuskurven U_R und U_G am Oszilloskop.

2.2 Auswertung der Messergebnisse

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Versuchsdurchführung werden die damit erlangten Messergebnisse nun ausgewertet.

Bestimmung der Bauteilcharakteristika

Für die Bestimmung der Bauteilcharakteristika der verwendeten elektronischen Bauelemente wird zunächst die Kreisfrequenz ω , welche sich über die gemessene Periodendauer T des Wechselstroms ergibt, bestimmt. In Teilversuch 2 wurde der einfache Abstand zweier Null-durchgänge des Widerstandes R , ohne dass sich weitere Bauteile im Stromkreis befanden, über das Oszilloskop gemessen. Dieser Abstand betrug $U_R = 10 \text{ ms}$. Für die Verdoppelung dieses Wertes ergibt sich eine Periodendauer von

$$T = 20 \text{ ms}.$$

Dieser Wert entspricht genau der Periodendauer für einen Wechselstrom bei einer Netzfrequenz von 50 Hz, welche in Europa vorherrscht (Tipler und Mosca 2024, S. 922).

Damit ergibt sich für die Kreisfrequenz

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,02 \text{ s}} = 314 \frac{1}{\text{s}}$$

mit dem Fehler

$$\Delta\omega = \left| \frac{\partial\omega}{\partial T} \right| \cdot \Delta T = \frac{2\pi}{T^2} \cdot \Delta T = 1,27 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{s}},$$

wobei für ΔT der Wert 0,002 s aufgrund der Skalenauflösung des Oszilloskops gewählt wurde.

Anhand der Messergebnisse können die einzelnen Widerstände der Bauteile über das ohmsche Gesetz

$$R = \frac{U}{I}$$

berechnet werden. Die Auswertung erfolgt im Folgenden gesondert für die Bauteilgruppe der Kondensatoren, um deren Kapazität zu bestimmen, der Spulen, um deren Induktivität zu bestimmen und für die Kombination aus beiden Bauteilgruppen.

Kondensatoren

Der experimentell bestimmte kapazitative Blindwiderstand der beiden verwendeten Kondensatoren 1 und 2 lässt sich über den Zusammenhang

$$\chi_C = \frac{U_C}{I_G}$$

mit dem Fehlerwert

$$\Delta\chi_C = \left| \frac{\partial\chi_C}{\partial U} \right| \cdot \Delta U + \left| \frac{\partial\chi_C}{\partial I} \right| \cdot \Delta I = \frac{1}{I} \cdot \Delta U + \frac{U_C}{I^2} \cdot \Delta I$$

bestimmen. Für die Fehlerberechnung werden auch für alle weiteren Bauteilgruppen die Fehlerwerte von $\Delta U = 0,003 \text{ V}$ und $\Delta I = 0,00001 \text{ A}$ verwendet.

Aus dem kapazitiven Blindwiderstand lässt sich anschließen die Kapazität

$$\chi_C = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \frac{1}{\omega\chi_C}$$

mit dem Fehlerwert

$$\Delta C = \left| \frac{\partial C}{\partial \chi_C} \right| \cdot \Delta \chi_C + \left| \frac{\partial C}{\partial \omega} \right| \cdot \Delta \omega = \frac{I}{\omega \chi_C} \cdot \Delta \chi_C + \frac{1}{\omega^2 \chi_C} \cdot \Delta \omega$$

berechnen.

Durch das Einsetzen der Werte aus dem Messprotokoll in die obigen Formeln ergeben sich die in Tabelle 2.1 aufgetragenen Ergebnisse.

	I in A	U_R in V	R_{U_R} in Ω	U_C in V	χ_C in Ω	$\Delta\chi_C$ in Ω	C in F	ΔC in F
Kondensator 1	0,00100	1,02	1022,00	6,81	6810,00	71,10	$4,67652 \cdot 10^{-7}$	$0,33250 \cdot 10^{-7}$
Kondensator 2	0,00568	5,62	988,73	0,19	33,98	0,59	$0,93733 \cdot 10^{-6}$	$0,31303 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 2.1: Auswertung von Schaltung (a) der Kondensatoren mit den Kapazitäten C_1 und C_2 .

Die verwendeten Kondensatoren beziehungsweise der in der Schaltung befindliche Widerstand weisen die tatsächlichen Bauteilcharakteristika von

$$\text{Widerstand } R = 1 \Omega = 1000 \Omega,$$

$$\text{Kondensator 1: } C_1 = 0,47 \mu\text{F} = 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ F},$$

$$\text{Kondensator 2: } C_2 = 4,7 \mu\text{F} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

auf.

Ein Vergleich mit den tatsächlichen Bauteilcharakteristika der beiden verwendeten Kondensatoren ergibt, dass die experimentell bestimmten Werte für den Widerstand R und die Kapazität C_1 des ersten Kondensators fast mit der Herstellerangabe übereinstimmen. Die berechnete Kapazität C_2 für den zweiten Kondensator ist jedoch viel zu klein.

Spulen

Bei der Auswertung der Spulen ist zu beachten, dass eine Spule neben einem induktiven Blindwiderstand χ_L auch einen Innenwiderstand aufweist. Jener Innenwiderstand R_{innen} wurde im dritten Teilversuch durch die Einzelmessung am Multimeter bestimmt.

Zunächst wird die Impedanz Z der Spule über die Formel

$$Z = \frac{U_L}{I_G}$$

mit dem Fehlerwert

$$\Delta Z = \left| \frac{\partial Z}{\partial U_L} \right| \cdot \Delta U_L + \left| \frac{\partial Z}{\partial I} \right| \cdot \Delta I$$

berechnet.

Der experimentell bestimmte induktive Blindwiderstand ergibt sich anschließend aus der Differenz der Impedanz Z und dem Innenwiderstand R_{innen} der Spule selbst

$$\chi_L = Z - R_{\text{innen}}$$

mit dem Fehler

$$\Delta \chi_L = \Delta Z + \Delta R,$$

wobei für den Fehler ΔR ein Wert von $0,5 \Omega$ angenommen wird.

Über den Zusammenhang

$$\chi_L = \omega L \Rightarrow L = \frac{\chi_L}{\omega}$$

kann die Induktivität L mit dem Fehlerwert

$$\Delta L = \left| \frac{\partial L}{\partial \chi_L} \right| \cdot \Delta \chi_L + \left| \frac{\partial L}{\partial \omega} \right| \cdot \Delta \omega = \frac{1}{\omega} \cdot \Delta \chi_L + \frac{\chi_L}{\omega^2} \cdot \Delta \omega$$

bestimmt werden.

Die Resultate durch das Einsetzen der Messergebnisse in die obigen Formeln sind in Tabelle 2.2 aufgetragen.

	I in A	U_R in V	R_{U_R} in Ω	U_L in V	Z in Ω	ΔZ in Ω	χ_L in Ω	$\Delta \chi_L$ in Ω	L in H	ΔL in H
Spule 1	0,00654	6,53	997,86	0,59	89,60	0,60	31,00	1,10	0,09873	$3,49 \cdot 10^{-3}$
Spule 2	0,00521	5,21	1000,00	0,19	36,08	0,65	-259,62	1,15	-0,82680	$3,65 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 2.2: Auswertung von Schaltung (b) der Spulen mit den Induktivitäten L_1 und L_2 .

Die tatsächlichen Werte der verwendeten Bauteile sind

$$\text{Widerstand: } R = 1 \Omega = 1000 \Omega,$$

$$\text{Spule 1: } L_1 = 220 \text{ mH} = 0,22 \text{ H},$$

$$\text{Spule 2: } L_2 = 820 \text{ mH} = 0,82 \text{ H}.$$

Ein Vergleich ergibt, dass die experimentell bestimmten Werte für den Widerstand mit den Angaben des Herstellers übereinstimmen. Die Bauteilcharakteristika von Spule L_1 kann experimentell nicht bestätigt werden. Die Induktivität L_1 der ersten Spule liegt nicht im errechneten Fehlerbereich. Bei Spule 2 jedoch können die Herstellerangaben, bei vernachlässigung des Vorzeichens, welches daraus resultiert, dass der Strom an der Spule nachläuft, bestätigt werden.

Kombination aus Kondensator und Spule

Bei der Messung der Kombination aus Kondensator C_1 und Spule L_1 wurde durchgehend eine Stromstärke von $I = 0,001\,01 \text{ A}$ gemessen.

Die Anwendung der obigen Formeln für die Auswertung des Kondensators und der Spule ergeben sich die in Tabelle 2.3 aufgetragenen Ergebnisse.

Widerstand	U_R in V 1,04	R_{U_R} in Ω 1026,73					
Kondensator	U_C in V 6,90	χ_C in Ω 6831,68	$\Delta\chi_C$ in Ω 70,61	C in F $4,661\,68 \cdot 10^{-7}$	ΔC in F $0,3329 \cdot 10^{-7}$		
Spule	U_L in V 0,10	Z in Ω 95,05	ΔZ in Ω 3,91	χ_L in Ω 36,45	$\Delta\chi_L$ in Ω 4,41	L in H 0,11608	ΔL in H 0,01405

Tabelle 2.3: Auswertung von Schaltung (c) der Kombination aus Kondensator C_1 und Spule L_1 .

Die Herstellerangaben der verwendeten Bauteile lauten

$$\text{Widerstand: } R = 1 \Omega = 1000 \Omega,$$

$$\text{Kondensator 1: } C_1 = 0,47 \mu\text{F} = 4,7 \cdot 10^{-7} \text{ F},$$

$$\text{Spule 1: } L_1 = 220 \text{ mH} = 0,22 \text{ H}.$$

Ein Vergleich ergibt, dass die Herstellerangabe des Widerstandes abermals bestätigt werden kann. Ebenfalls liegt die Kapazität C des Kondensators innerhalb der Fehlerrechnung. Die Induktivität L der Spule kann allerdings wieder nicht bestätigt werden. Jedoch ist der hier vorliegende Messwert etwas besser als bei der Einzelbetrachtung von Spule 1.

Insgesamt konnten in dem Versuch einige Bauteilcharakteristika experimentell nachgewiesen werden. Jedoch kam es auch zu beträchtlichen Abweichungen zu den Herstellerangaben. Generell kann man davon ausgehen, dass der erste Teilversuch wenig von systematischen

Fehlern geprägt ist, denn die verwendeten Multimeter weisen eine hohe Genauigkeit auf bis auf etwaige geringfügige Rundungsfehler. Zudem haben die angezeigten Werte während des Ablesevorgangs nicht geschwankt, sodass Ablesefehler eher unmöglich erscheinen. Da für manche Bauteile die Werte bestätigt werden konnten, ist auch auszuschließen, dass eines der Kabel möglicherweise kaputt war.

Während der Versuchsdurchführung erhöht sich im Laufe der Messung stetig die Temperatur des Widerstandes aufgrund der auftretenden Joulschen Wärme, jedoch ist davon auszugehen, dass dies die Messung der Spannung der Spule nicht in so gravierender Weise beeinflusst hat. Möglicherweise waren die verwendeten Bauteile aufgrund häufiger Benutzung nicht mehr so gut in Schuss, sodass es durch das Alter der Spule zu einer Verzerrung kommt.

Darstellung der Wechselspannungen im Zeigerdiagramm

Die im obigen Teilkapitel bestimmten Ergebnisse für den Widerstand R und für die kapazitativen χ_C und induktiven Widerstände χ_L werden nun graphisch in einem Zeigerdiagramm dargestellt. Dafür werden alle berechneten Werte als Vektoren vom Nullpunkt aus in der komplexen Ebene aufgetragen. Der ohmsche Widerstand R wird dabei auf der reellen x-Achse und der kapazitative beziehungsweise induktive Blindwiderstand auf der imaginären y-Achse. Dabei eilt der Strom des Kondensators der Spannung voraus. An der Spule hängt die Spannung dem Strom nach. Die Impedanz Z ergibt sich über die Summe der aufgezeichneten Vektoren. Der Winkel, welcher zwischen den Vektoren R und Z entsteht, gibt die Phasenverschiebung zwischen dem Strom und der Spannung des jeweiligen Bauteils an. Die Zeigerdiagramme wurden über das Programm Geogebra erstellt. Ebenfalls wurde die Berechnung des Phasenwinkels mittels Geogebra vorgenommen.

Zeigerdiagramme der Kondensatoren

Die Zeigerdiagramme aus den Ergebnissen der Auswertung von Schaltung (a) sind in den Abbildungen 2.7 und 2.8 zu finden.

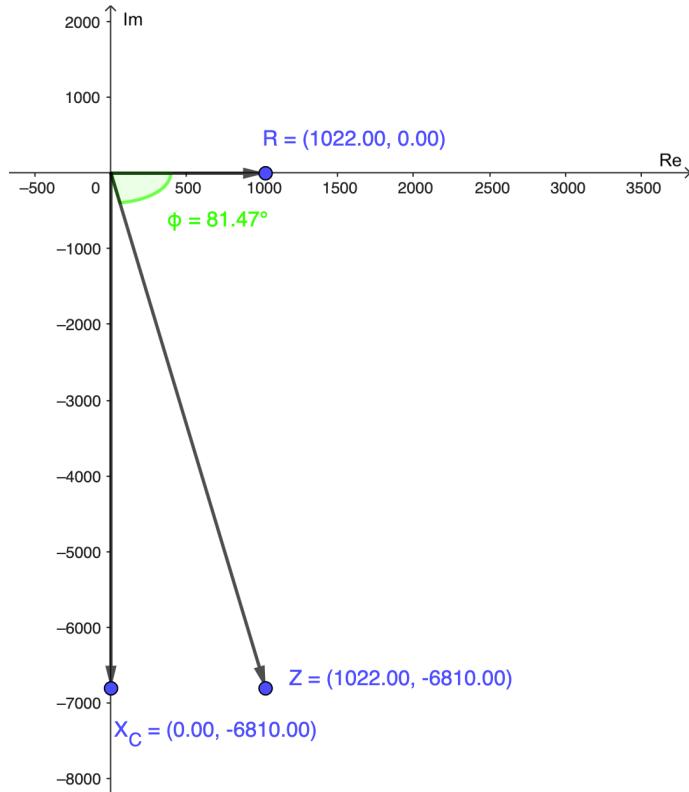


Abb. 2.7: Zeigerdiagramm der Schaltung (a) für den Kondensator C_1 .

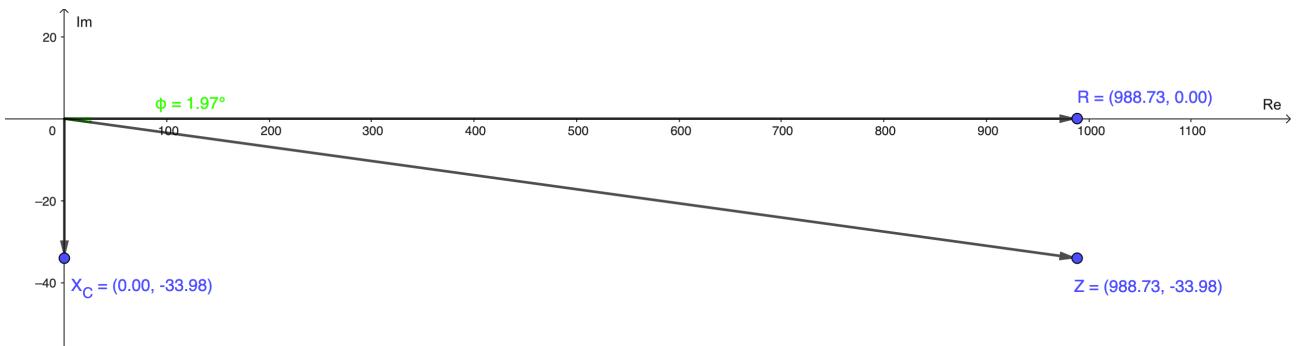


Abb. 2.8: Zeigerdiagramm der Schaltung (a) für den Kondensator C_2 .

Die Phasenwinkel der beiden verwendeten Kondensatoren sind:

$$\varphi_{\text{Kondensator } 1} = 81,47^\circ$$

$$\varphi_{\text{Kondensator } 2} = 1,97^\circ.$$

Zeigerdiagramme der Spulen

Die Zeigerdiagramme der Auswertung von Schaltung (b) sind in den Abbildungen 2.9 und 2.10 gezeigt.

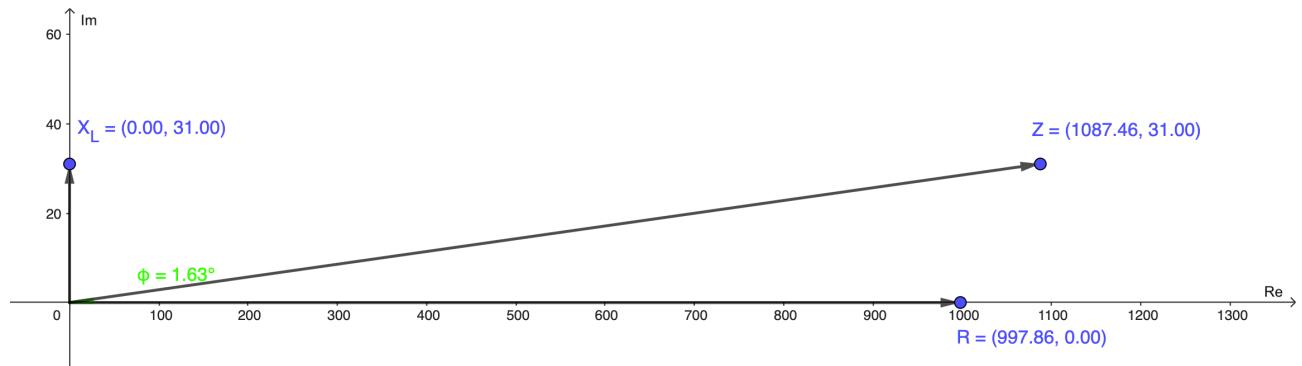


Abb. 2.9: Zeigerdiagramm der Schaltung (b) für die Spule L_1 .

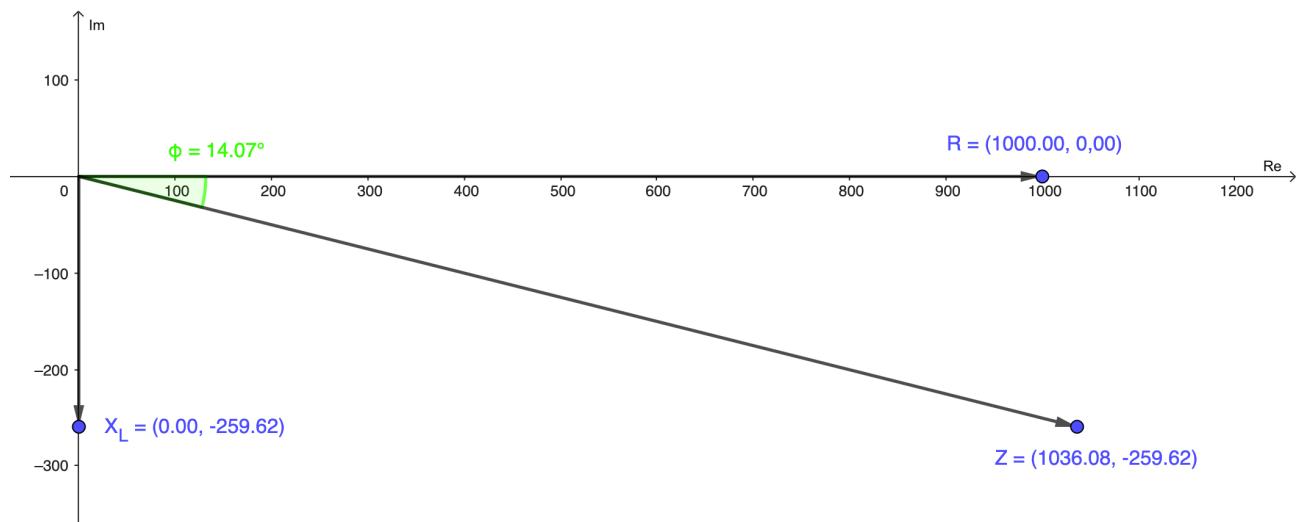


Abb. 2.10: Zeigerdiagramm der Schaltung (b) für die Spule L_2 .

Die Phasenwinkel der beiden verwendeten Spulen sind:

$$\varphi_{\text{Spule } 1} = 1,63^\circ$$

$$\varphi_{\text{Spule } 2} = 14,07^\circ.$$

Zeigerdiagramm der Kombination aus Kondensator und Spule

Das Zeigerdiagramm von Schaltung (c) ist in Abbildung 2.11 zu sehen.

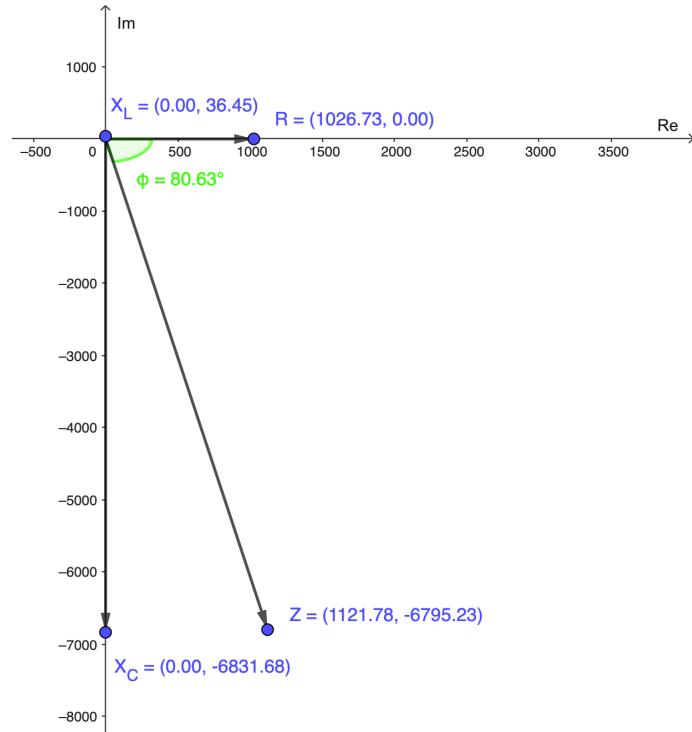


Abb. 2.11: Zeigerdiagramm der Schaltung (c) für die Kombination.

Der Phasenwinkel der Kombination aus Kondensator und Spule lautet

$$\varphi_{\text{Kombination}} = 80,63^\circ$$

Berechnung des Phasenwinkels

Analog zur Auswertung des Phasenwinkels aus den Zeigerdiagrammen lässt sich dieser auch über die Messungen aus Teilversuch 2 am Oszilloskop bestimmen.

Dabei wurde die Zeitdifferenz t durch das Ablesen der Nullstellen zwischen U_R und U_G und der Zeitdifferenz T zweier Nulldurchgänge von U_G am Oszilloskop bestimmt. Der Phasenwinkel daraus lässt sich über die Formel

$$\varphi_G = \frac{\text{Abstand der Nulldurchgänge von } U_R \text{ zu } U_G}{\text{Abstand zweier Nulldurchgänge von } U_G} \cdot 180^\circ = \frac{t}{T} \cdot 180^\circ$$

mit dem Fehler

$$\Delta\varphi_G = \left| \frac{\partial\varphi_G}{\partial t} \right| \cdot \Delta t + \left| \frac{\partial\varphi_G}{\partial T} \right| \cdot \Delta T = \frac{1}{T} \cdot \Delta t + \frac{t}{T^2} \cdot \Delta T,$$

wobei für $\Delta t = \Delta T = 2 \text{ ms}$ angenommen wird, bestimmen.

Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 2.4 zu finden.

	Kondensator 1 in ms	Kondensator 2 in ms	Spule 1 in ms	Spule 2 in ms	Kombination in ms
Abstand U_R zu $U_G = t$	4,0	2,0	0,0	0,4	4,0
Nulldurchgänge $U_G = T$	10,4	10,4	10,2	10,0	10,0
Phasenwinkel φ_G	69,23	34,62	0,00	7,20	72,00
Fehler $\Delta\varphi_G$	0,27	0,23	0,20	0,21	0,28

Tabelle 2.4: Auswertung der Phasenwinkel über die Formel.

Ein Vergleich der Phasenwinkel aus den Zeigerdiagrammen und den Phasenwinkeln aus der Berechnung auf Grundlage der mit dem Oszilloskops bestimmten Messergebnisse ist in Tabelle 2.5 aufgetragen.

Vergleich	Kondensator 1	Kondensator 2	Spule 1	Spule 2	Kombination
$\varphi_{G\text{Oszilloskop}}$	69,23	34,62	0,00	7,20	72,00
$\varphi_{G\text{Zeigerdiagramm}}$	81,47	1,97	1,63	14,07	80,63

Tabelle 2.5: Vergleich der Phasenwinkel.

Keiner der gemessenen Phasenwinkel des Vergleichs stimmt mit der Berücksichtigung des Fehlerterms überein. Im Folgenden wird im Detail auf die Abweichungen eingegangen:

- Für den ersten Kondensator konnten die Bauteilcharakteristika des Herstellers in der Auswertung des ersten Teilversuchs für den Widerstand und die Kapazität bestätigt werden. Deswegen lässt sich die Abweichung des Phasenwinkels vermutlich auf einen Ablesefehler am Oszilloskop zurückführen.
- Dagegen konnten die Herstellerwerte des zweiten Kondensators im ersten Teilversuch nicht bestätigt werden. Die experimentell bestimmte Kapazität des zweiten Kondensators war viel zu klein, sodass der berechnete Phasenwinkel aus dem Zeigerdiagramm falsch zu sein scheint und dadurch der errechnete Phasenwinkel aus den Messwerten des Oszilloskops eher der Realität entspricht.
- Für die erste Spule liegt der Wert des Phasenwinkels aus dem Zeigerdiagramm und der aus den mit dem Oszilloskop gemessenen Werten sehr nah beieinander. Die Herstellerangabe der Spule konnte zwar im ersten Teilversuch nicht bestätigt werden, jedoch ist die resultierende Phasenverschiebung der Spule mit einer sehr geringen Induktivität trotz allem einigermaßen gut bestimmbar.
- Der Vergleich der Phasenwinkel von Spule 2 ergibt, dass es auch hier wie bei Kondensator 1 trotz der guten Ergebnisse in Teilversuch 1 eine Abweichung der Phasenwinkel vorherrscht. Die Abweichung ist für Spule 2 jedoch etwas geringer als bei Kondensator 1.
- Die Messergebnisse der Kondensator-Spule-Kombination in Teilversuch 1 bestätigten nicht exakt die Herstellerangaben, jedoch passen die beiden ermittelten Phasenwinkel im großen und ganzen relativ gut zueinander, wenn man die möglichen Fehler aus der Fehlerdiskussion im ersten Teilkapitel mit den folgenden möglichen Fehlern, welche bei dem Versuch mit dem Oszilloskop auftreten berücksichtigt, mit einfließen lässt.

Die Skala des Oszilloskops war mit 2 ms pro Messeinheit sehr fein, doch teilweise fiel die Abschätzung des Abstandes je nach Beschaffenheit der Sinuskurve etwas schwer. Vor allem die Sinuskurve des Widerstandes U_R wies sehr viele Dellen und Knicke auf. Aufgrund dieser Unförmigkeiten fiel die Kurve am abzulesenden Nullpunkt oft sehr flach ein, sodass der genaue Nullwert eher nur geschätzt werden konnte. Durch das Umstellen des Anzeigemodus von AC auf GND konnte die Sinuskurve als parallele Linie zur x-Achse angezeigt werden. Dadurch wurde die Ausrichtung der Linie auf den Nullpunkt durch das Verschieben der parallelen Linie direkt auf die x-Achse einfacher. Hierbei verlief die gemittelte Sinuskurve jedoch teilweise etwas über beziehungsweise unter der x-Achse, sodass die Ausrichtung manchmal etwas willkürlich erfolgte.

Literatur

- Bannwarth, Horst, Bruno Kremer und Andreas Schulz (2019). *Basiswissen Physik, Chemie Und Biochemie*. 4. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Merkel, Andreas (SoSe 2025). *Geogebra Buch Zur Vorlesung Didaktik Der Geometrie*. URL: <https://www.geogebra.org/m/dm3khhqm#material/ztpngs5d>.
- Meschede, Dieter (2010). *Gerths Physik*. 24. Aufl. Heidelberg: Springer.
- Tipler, Paul und Gene Mosca (2024). *Tipler Physik*. 9. Aufl. Berlin: Springer Spektrum.
- Universität Augsburg (SoSe 2025). *Versuchsanleitung E1 - Phasenverschiebung Im Wechselstromkreis*.
- Walcher, Wilhelm (1994). *Praktikum Der Physik*. 7. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner.

3 Anhang

Widerstand $R = 1 \text{ k}\Omega$

Kondensatoren $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$ $C_2 = 4,7 \mu\text{F}$

Spulen $L_1 = 220 \text{ mH}$ $L_2 = 820 \text{ mH}$

Versuch 1

Gruppe A06

13.06.2025

Schaltung (a)

- Für $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$

$$I_G = 1,00 \text{ mA}$$

$$U_G = 6,00 \text{ V}$$

$$U_R = 1,022 \text{ V}$$

$$U_C = 6,81 \text{ V}$$

- Für $C_2 = 4,7 \mu\text{F}$

$$I_G = 5,68 \text{ mA}$$

$$U_G = 6,00 \text{ V}$$

$$U_R = 5,616 \text{ V} \pm 0,003$$

$$U_C = 0,193 \text{ V} \pm 0,003$$

Schaltung (b)

- Für $L_1 = 220 \text{ mH}$

$$I_G = 6,54 \text{ mA}$$

$$U_G = 6,00 \text{ V}$$

$$U_R = 6,526 \text{ V}$$

$$U_C = 0,586 \text{ V}$$

- Für $L_2 = 820 \text{ mH}$

$$I_G = 5,21 \text{ mA}$$

$$U_G = 6,00 \text{ V}$$

$$U_R = 5,210 \text{ V}$$

$$U_C = 0,188 \text{ V}$$

Schaltung (c)

mit $C_1 = 0,47 \mu\text{F}$ und $L_1 = 220 \text{ mH}$

$$I_G = 1,01 \text{ mA}$$

$$U_G = 6,00 \text{ V}$$

$$U_R = 1,037 \text{ V}$$

$$U_C = 6,90 \text{ V}$$

$$U_L = 0,086 \text{ V}$$

$$\Delta U = 0,003 \text{ V}$$

ΔI vernachlässigbar?

\hookrightarrow schwankt am Messgerät nicht

Versuch 2

Schaltung (a)

C_1 Abstand $U_R - U_G$: 4 ms Nulldurchgänge U_G : 10,4 ms	C_2 2 ms 10,4 ms
---	--------------------------

Schaltung (b)

L_1 Abstand $U_R - U_G$: 0 ms Nulldurchgänge U_G : 10,2 ms	L_2 0,4 ms 10,0 ms
---	----------------------------

Schaltung (c)

$U_R = 10,0 \text{ ms}$ $\Rightarrow T = 20 \text{ ms}$	Sinuskurve Widerstand U_R hat viele Dellen
--	---

Abstand $U_R - U_G$: 4 ms
 Nulldurchgänge U_G : 10 ms
 Nur Widerstand R : Nulldurchgänge $U_R = 10,0 \text{ ms}$

Versuch 3

Innenwiderstand der Spulen

Spule 1: $R_1 = 58,6 \Omega$ $\Delta R = 0,5 \Omega$

Spule 2: $R_2 = 295,7 \Omega$

Klasse