

Experimente zur Untersuchung des Verhaltens von Spule und Kondensator im Wechselstromkreis

Rolf Winter, Potsdam

Elektrolokomotiven der Deutschen Bahn fahren mit Wechselstrom. Die Fahrspannung beträgt 15 000 V und die Frequenz $16 \frac{2}{3}$ Hz¹. Wichtige Baugruppen einer E-Lok sind Antriebsmotor, Transformatoren und Steuerungseinrichtungen. Diese Bauteile enthalten Spulen und Kondensatoren, die sich beim Betrieb mit Wechselstrom anders verhalten als bei Gleichstrom. In spannenden Experimenten untersuchen Ihre Schüler dieses unterschiedliche Verhalten.



Foto: K. Jähne/CC BY SA 2.0

Abb. 1: E-Lok der Deutschen Bahn

II/C

Spulen und Kondensatoren sind für die gesamte Elektrotechnik unerlässliche Bauelemente.

Der Beitrag im Überblick

Klasse: 10–12

Dauer: 10 Stunden

Ihr Plus:

- ✓ viele interessante Schüler- und Lehrerexperimente
- ✓ verschiedene Varianten zum Nachweis der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromstärke
- ✓ Erkennen der Bedeutung des induktiven und kapazitiven Widerstands in der Praxis

Inhalt:

- Effektivwerte von Spannung und Strom im Wechselstromkreis
- Experimente zur Untersuchung des unterschiedlichen Verhaltens von Spulen und Kondensatoren bei Gleich- und Wechselstrom
- Erklärung des Verhaltens von Spule und Kondensator in einem Wechselstromkreis
- Experimente zur Ermittlung der Abhängigkeit des induktiven und des kapazitiven Widerstands von Induktivität, Kapazität und Frequenz
- Experimente zur Phasenverschiebung
- Beispiele für Anwendungen von Spulen und Kondensatoren im Wechselstromkreis: Frequenzweichen für Mehrwegelautsprecherboxen, Kondensatormotor, Phasenschieber, Drosselspule
- Unterscheiden zwischen Wirk- und Blindleistung

¹ Die Frequenz des Bahnstroms von $16 \frac{2}{3}$ Hz ist historisch bedingt. Es war zu Beginn der Elektrifizierung der Bahn Anfang des 20. Jahrhunderts technisch noch nicht möglich, große Elektromotoren mit einer Frequenz von 50 Hz zu betreiben. Aus praktischen Gründen hat man die Netzfrequenz von 50 Hz gedrittelt.

Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit SV = Schülerversuch Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt
 ⌚ D = Durchführungszeit LV = Lehrerversuch Fo = Folie

M 1	Ab	Wechselstrom – frischen Sie Ihr Wissen auf!	
M 2	LV	Effektivwert der Spannung im Wechselstromkreis	
⌚ V: 10 min		<input type="checkbox"/> Netzgerät, 0 bis 20 V Gleich- und Wechselspannung	<input type="checkbox"/> Oszilloskop
⌚ D: 15 min		<input type="checkbox"/> Glühlampe mit Fassung, 6 V, 3 W	
M 3	SV/LV	Verhalten von Ohm'schen Widerstand, Spule und Kondensator bei Gleich- und Wechselspannung	
⌚ V: 5 min		<input type="checkbox"/> Netzgerät, 0 bis 20 V Gleich- und Wechselspannung	<input type="checkbox"/> U-Kern, geblättert
⌚ D: 15 min		<input type="checkbox"/> Festwiderstand, 10 Ω	<input type="checkbox"/> I-Kern, geblättert
		<input type="checkbox"/> Spule, 1 500 Wdg.	<input type="checkbox"/> Glühlampe, 6 V, 3 W
			<input type="checkbox"/> Kondensator, 100 μF
M 4	LV	Phasenbeziehungen im Wechselstromkreis/Variante 1	
⌚ V: 10 min		<input type="checkbox"/> Funktionsgenerator 0,2 Hz bis 10 kHz	<input type="checkbox"/> Kondensator, 2200 μF
⌚ D: 20 min		<input type="checkbox"/> Festwiderstand, 100 Ω	<input type="checkbox"/> 2 Spulen, 1200 Wdg.
		<input type="checkbox"/> Spannungsmesser mit Nullpunktmitellage, 3 V	<input type="checkbox"/> U-Kern, geblättert
		<input type="checkbox"/> Stromstärkemesser mit Nullpunktmitellage, 1 μA	<input type="checkbox"/> I-Kern, geblättert
			<input type="checkbox"/> Schalter
M 5	LV	Phasenbeziehungen im Wechselstromkreis/Variante 2	
⌚ V: 10 min		<input type="checkbox"/> Funktionsgenerator, 0,2 Hz bis 10 kHz	<input type="checkbox"/> 2 Spulen, 1200 Wdg.
⌚ D: 25 min		<input type="checkbox"/> 2 Festwiderstände, 100 Ω	<input type="checkbox"/> U-Kern, geblättert
		<input type="checkbox"/> Kondensator, 1 μF	<input type="checkbox"/> I-Kern, geblättert
			<input type="checkbox"/> Zweikanaloszilloskop
M 6	SV/LV	Phasenbeziehungen im Wechselstromkreis/Variante 3	
⌚ V: 10 min		<input type="checkbox"/> Funktionsgenerator, 0,2 Hz bis 10 kHz	<input type="checkbox"/> 2 Spulen, 1200 Wdg.
⌚ D: 10 min		<input type="checkbox"/> 2 Festwiderstände, 100 Ω	<input type="checkbox"/> U-Kern, geblättert
		<input type="checkbox"/> Kondensator, 2200 μF	<input type="checkbox"/> I-Kern, geblättert
		<input type="checkbox"/> 2 LEDs	<input type="checkbox"/> Schalter

Materialübersicht – Fortsetzung

M 7 SV/LV

- ⌚ V: 10 min
- ⌚ D: 30 min

Kapazitiver Widerstand eines Kondensators

- Netzgerät, 0 bis 20 V~
- Funktionsgenerator, 50 Hz bis 10 kHz
- Spannungsmesser, 30 V~/3 V~
- Stromstärkemesser, 10 mA~/100 mA~
- Kondensator, 1 μF
- Kondensator, 2 μF
- Kondensator, 3 μF
- Kondensator, 5 μF
- Kondensator, 10 μF
- Schalter

M 8 SV/LV

- ⌚ V: 10 min
- ⌚ D: 30 min

Induktiver Widerstand einer Spule

- Netzgerät, 0 bis 20 V~
- Funktionsgenerator, 50 Hz bis 10 kHz
- Spannungsmesser, 3 V~
- Stromstärkemesser, 1 A~
- Widerstandsmesser, 20 Ω
- Spule, 300 Wdg.
- Spule, 600 Wdg.
- Spule, 900 Wdg.
- Spule, 1200 Wdg.
- U-Kern
- I-Kern
- Schalter

M 9 SV/LV

- ⌚ V: 10 min
- ⌚ D: 20 min

Reihenschaltung von Spule, Kondensator und Ohm'schem Widerstand im Wechselstromkreis

- Netzgerät, 0 bis 20 V~
- Spannungsmesser, 30 V~
- Stromstärkemesser, 30 mA~
- Festwiderstand, 1 k Ω
- Kondensator, 4 μF
- Spule, 1200 Wdg.
- U-Kern, geblättert
- I-Kern, geblättert

M 10 SV/LV

- ⌚ V: 20 min
- ⌚ D: 20 min

Parallelschaltung von Spule, Kondensator und Ohm'schem Widerstand im Wechselstromkreis

- Netzgerät, 0 bis 50 V~
- Kondensator, 4 μF
- Spule, 1200 Wdg.
- U-Kern, geblättert
- I-Kern, geblättert
- 3 Glühlampen mit Fassung, 6 V; 0,4 A

M 11 LV

- ⌚ V: 10 min
- ⌚ D: 20 min

Leistung einer Glühlampe im Gleich- und im Wechselstromkreis

- Netzgerät, 0 bis 20 V für Gleich- und Wechselspannung
- Leistungsmesser (Wattmeter)
- 2 Glühlampen 6 V/3W mit Schraubfassung

M 12 LV

- ⌚ V: 10 min
- ⌚ D: 30 min

Leistungsbestimmung im Wechselstromkreis

- Netzgerät, 0 bis 20 V~
- Leistungsmesser
- Spannungsmesser, 10 V~
- Stromstärkemesser, 1 A~
- Glühlampe 6 V/3 W mit Fassung
- Kondensator, 50 μF
- Spule, 600 Wdg.
- I-Kern, geblättert
- Schalter

M 13 Ab

Anwendungen

M 14 Fo

Anwendungen von Spule und Kondensator im Wechselstromkreis

Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie ab Seite 36.

M 2 Effektivwert der Spannung im Wechselstromkreis

Aufgabe

Untersuchen Sie den Unterschied der Spannung im Gleich- und im Wechselstromkreis!

Lehrerversuch ⌚ Vorbereitung: 10 min Durchführung: 15 min

Materialien

- Netzgerät, 0 bis 20 V Gleich- und Wechselspannung
- Oszilloskop
- Glühlampe mit Fassung, 6 V, 3 W

II/C

Versuchsaufbau

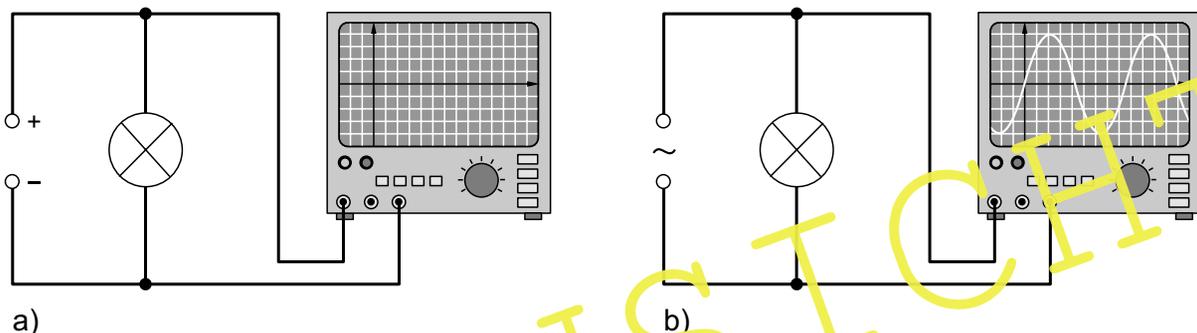


Abb. 8: Bestimmung der Effektivwerte, a) Gleichstromkreis, b) Wechselstromkreis

Versuchsdurchführung

Schließen Sie zuerst die Glühlampe an die Gleichspannungsquelle an (Abb. 8a). Wählen Sie die Spannung so, dass die Lampe hell leuchtet und messen Sie die Größe der Spannung mit dem Oszilloskop. Danach tauschen Sie die Gleichspannungsquelle gegen die Wechselspannungsquelle (Abb. 8b). Die Spannung wählen Sie so, dass die Glühlampe etwa die gleiche Helligkeit erreicht wie beim Betrieb mit Gleichspannung. Messen Sie mit dem Oszilloskop den Scheitelwert der Wechselspannung.



Zur Selbstkontrolle – Ergebnis

Messwertbeispiel:

$$U_{\text{G}} = 6 \text{ V} \quad U_{\text{S}} = 8,5 \text{ V} \quad U_{\text{S}}/U_{\text{G}} = 1,4$$

U_{S} : Scheitelwert der Wechselspannung

Ergebnis:

Gleiche Helligkeit der Glühlampe bei Gleich- und bei Wechselstrom bedeutet, dass in ihr jeweils die gleiche elektrische Leistung umgesetzt wird. Im Wechselstromkreis ist dazu eine Spannung erforderlich, deren Scheitelwert etwa um den Faktor $1,4 = \sqrt{2}$ größer ist als der Betrag der Gleichspannung.



M 3 Verhalten von Ohm'schen Widerstand, Spule und Kondensator bei Gleich- und Wechselspannung

Aufgabe

Untersuchen Sie das unterschiedliche Verhalten von Ohm'schen Widerstand, Spule und Kondensator bei Gleich- und Wechselspannung!

Schülerversuch/Lehrerversuch ⌚ Vorbereitung: 5 min Durchführung: 15 min

II/C

Materialien

- Netzgerät, 0 bis 20 V Gleich- und Wechselspannung
- Festwiderstand, 10 Ω
- Spule, 1500 Wdg.
- U-Kern, geblättert
- I-Kern, geblättert
- Glühlampe, 6 V, 3 W
- Kondensator, 100 μF

Versuchsaufbau

Bauen Sie einen Reihenstromkreis aus Spannungsquelle, Festwiderstand und Glühlampe auf (Abb. 9).

Versuchsdurchführung

Legen Sie zuerst an den Stromkreis eine Gleichspannung an und beobachten Sie die Glühlampe. Verwenden Sie danach statt der Gleichspannung eine Wechselspannung gleicher Größe (Effektivwert) und beobachten Sie wiederum die Glühlampe. Dann tauschen Sie den Festwiderstand gegen den Kondensator aus und führen die gleichen Messungen durch. Zum Schluss ersetzen Sie den Kondensator durch die Spule, erst ohne und dann mit Eisenkern.

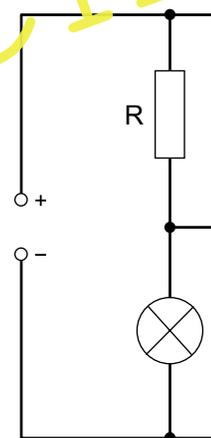


Abb. 9: Verhalten bei Gleich- bzw. Wechselspannung



Zur Selbstkontrolle – Ergebnis

Bei dem Festwiderstand leuchtet die Glühlampe sowohl bei Gleichspannung als auch bei Wechselspannung gleich hell. Der elektrische Widerstand R ist also unabhängig von der Art des Stroms.

Der Kondensator stellt für Gleichstrom einen unendlich großen Widerstand dar, die Glühlampe leuchtet nicht. Bei Wechselspannung wird er ständig umgeladen, dadurch kann ein Wechselstrom fließen.

Wird an die Spule eine Gleichspannung gelegt, leuchtet die Glühlampe hell, da die Spule nur einen geringen Gleichstromwiderstand besitzt (Ohm'scher Widerstand). Bei Wechselspannung wird sie deutlich dunkler. Bei Einführen eines Eisenkerns erlischt die Glühlampe fast vollständig.



M 14 Anwendungen von Spule und Kondensator im Wechselstromkreis

© Thinkstockphotos/iStockphoto



Abb. 26: Zwei-Wege-Box

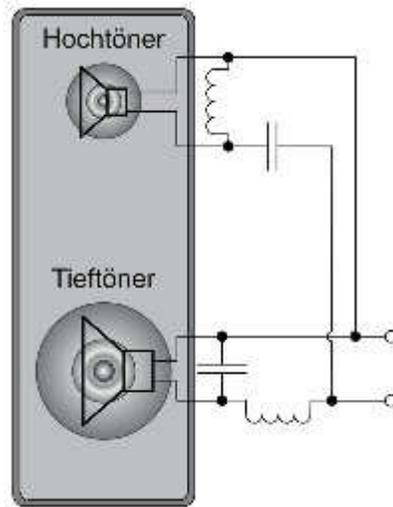
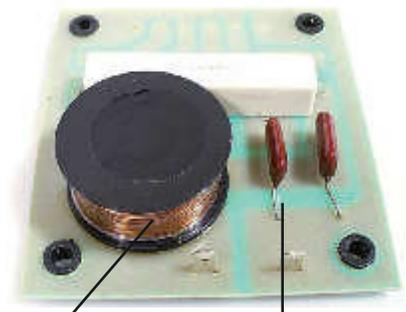


Abb. 27: Schaltung einer Zwei-Wege-Box



Spule
Kondensator
Abb. 28: Frequenzweiche der Marke Omnitronic

© by Steinigke Showtechnik GmbH

II/C

VORANSICHT

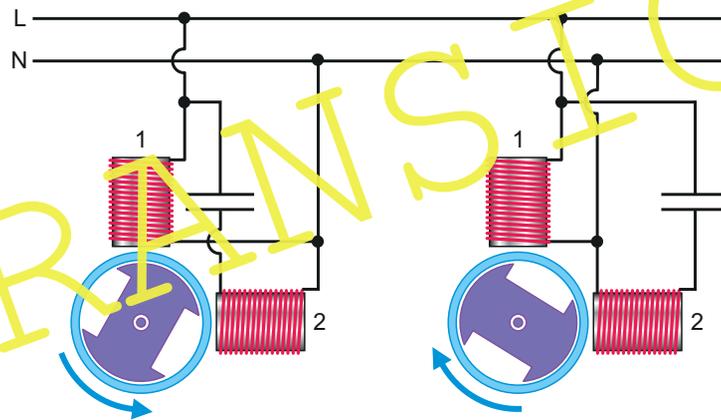


Abb. 29: Prinzip eines Kondensatormotors

Phasenverschiebungskondensator

© Elektromotorenwerk Grünhain GmbH



Abb. 30: Einphasen-Asynchronmotor mit Doppelkondensator

Sockel für Leuchtstofflampe

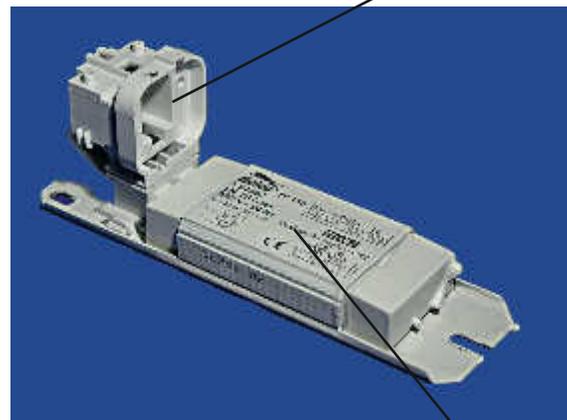


Abb. 31: Vorschaltgerät zum Betrieb von Leuchtstofflampen

Drosselspule

Foto: Ikiwamer/CC BY SA 3.0

Erläuterungen und Lösungen

M 1 Wechselstrom – frischen Sie Ihr Wissen auf!

1. Für den kapazitiven Widerstand eines Kondensators im Wechselstromkreis gilt:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Mit den gegebenen Werten für die Frequenz f des Wechselstroms und die Kapazität C des Kondensators ergeben sich die folgenden kapazitiven Widerstände:

$$X_{C, 50 \text{ Hz}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 159 \Omega; \quad X_{C, 200 \text{ kHz}} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 0,04 \Omega$$

Für den induktiven Widerstand einer Spule im Wechselstromkreis gilt:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Mit den gegebenen Werten folgt:

$$X_{L, 50 \text{ Hz}} = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,8 \text{ H} = 251 \Omega; \quad X_{L, 200 \text{ kHz}} = 2\pi \cdot 200 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 0,8 \text{ H} = 1 \text{ M}\Omega$$

2. Es gilt: $X_C(f_1) = X_L(f_1)$

$$\frac{1}{2\pi \cdot f_1 \cdot C} = 2\pi \cdot f_1 \cdot L \Rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,2 \text{ H} \cdot 10^{-4} \text{ F}}} = 35,6 \text{ Hz}$$

M 9 Reihenschaltung von Spule, Kondensator und Ohm'schem Widerstand im Wechselstromkreis

Die Stromstärke wird maximal, wenn die Impedanz Z minimal wird.

Aus der Gleichung: $Z_{\text{ges}} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ ist ersichtlich, dass dies unter der Bedingung

$X_L = X_C$ der Fall ist. Mit: $X_L = \omega \cdot L$ und $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ folgt: $\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$

Auflösen nach der gesuchten Kapazität C ergibt: $C = \frac{1}{\omega^2 \cdot L} = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot L}$

Mit der Spuleninduktivität $L = 2,4 \text{ H}$ und der Frequenz des Wechselstroms $f = 50 \text{ Hz}$ erhält man:

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot 50 \text{ Hz})^2 \cdot 2,4 \text{ H}} = 4,22 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 4,22 \mu\text{F}$$

M 10 Parallelschaltung von Spule, Kondensator und Ohm'schem Widerstand im Wechselstromkreis

$$\text{a) } X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \text{ Hz} \cdot 50 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 15,9 \Omega$$

$$\text{b) } Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_C^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(5 \Omega)^2} + \frac{1}{(15,9 \Omega)^2}}} = 4,8 \Omega$$

$$\text{c) } I_{\text{eff}} = \frac{U}{Z} = \frac{10 \text{ V}}{4,8 \Omega} = 2,1 \text{ A}$$

$$\text{d) } I_{R, \text{eff}} = \frac{U}{R} = \frac{10 \text{ V}}{5 \Omega} = 2,0 \text{ A}; \quad I_{C, \text{eff}} = \frac{U}{X_C} = \frac{10 \text{ V}}{15,9 \Omega} = 0,63 \text{ A}$$

$$\text{e) } \tan \Delta\varphi = \frac{R}{X_C} = \frac{5 \Omega}{15,9 \Omega} = 0,314; \quad \Delta\varphi = \arctan(0,314) = 17,5^\circ$$