

Elektromagnetische Schwingungen – fachliche Grundlagen, Anwendungen und Experimente (Teil I)

Dr. Rolf Winter, Potsdam



Elektronische Musik macht Spaß und ist sehr beliebt.

II/C

Mit elektromagnetischen Schwingungen ist es möglich, elektronische Musik zu machen. In einem Synthesizer erzeugen Oszillatoren für jeden Ton einer Oktave Sinusschwingungen. Zwischentöne werden durch Frequenzteilung gewonnen. Durch Überlagerung von Grund- und Oberschwingungen kann der Klang der meisten Instrumente imitiert werden. Auch neuartige Klangeffekte lassen sich erzeugen. Wir beschreiben die physikalischen Grundlagen von elektromagnetischen Schwingungen.

Der Beitrag im Überblick

Klasse: 11/12

Dauer: 9 Stunden

Ihr Plus:

- ✓ viele Experimente
- ✓ Grundlagen für die Beschreibung zahlreicher Anwendungen, z. B.
 - Synthesizer,
 - Mikrofone,
 - intelligente Ampelsteuerung,
 - Quarzuhr und
 - Mikrowellenherd (in Teil II, Mai 2015)

Inhalt:

- Schwingkreise
- Wirkungsweise eines Oszillators für elektromagnetische Schwingungen
- gedämpfte und ungedämpfte Schwingungen
- Überlagerung von elektromagnetischen Schwingungen
- Anwendungsgebiete: Verkehrssteuerung, Uhren, elektronische Musik
- Experimente zur Erzeugung und Anwendung elektromagnetischer Schwingungen

Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

Fachlicher Hintergrund

Die **Erzeugung** elektromagnetischer Schwingungen erfolgt in Oszillatoren. Das sind schwingungsfähige Systeme, die periodische sinusförmige Signale erzeugen können. Aus physikalischer Sicht ist ein **elektrischer Oszillator** ein Verstärker, bei dem ein Teil der Ausgangsspannung über ein Netzwerk wieder auf den Eingang des Verstärkers zurückgeführt bzw. zurückgekoppelt wird (Abb. 1). Aufgabe des Verstärkers ist es, dem Rückkoppelnetzwerk so viel Energie zuzuführen, dass auftretende Energieverluste ersetzt und ungedämpfte Schwingungen aufrechterhalten werden.

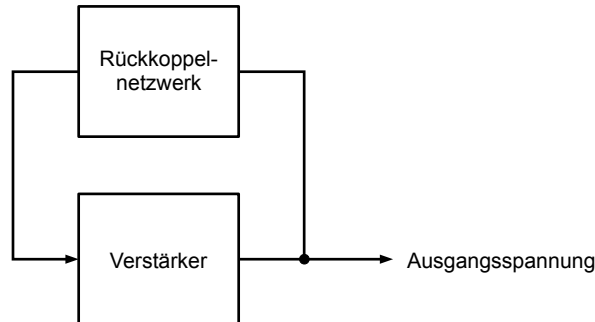


Abb. 1

Die vom Ausgang des Verstärkers auf seinen Eingang zurückgeführte Wechselspannung muss dort die gleiche Frequenz und die gleiche Phasenlage haben wie die Ausgangswechselspannung. Das bedeutet, dass es durch das Rückkoppelnetzwerk keine Phasenverschiebung geben darf. Dieses Prinzip wird als **Mitkopplung** bezeichnet.

Mit einem **Bipolartransistor in Emitterschaltung** lässt sich ein einfacher **Sinus-Oszillator** herstellen (Abb. 2). Das Rückkoppelnetzwerk kann z. B. ein **Schwingkreis** (a), eine **Wienbrückenschaltung** (b) oder eine **Phaseschieberkette** sein (c, Abb. 3). Die Bauelemente des Rückkoppelnetzwerks bestimmen dabei die Frequenz der Schwingung.

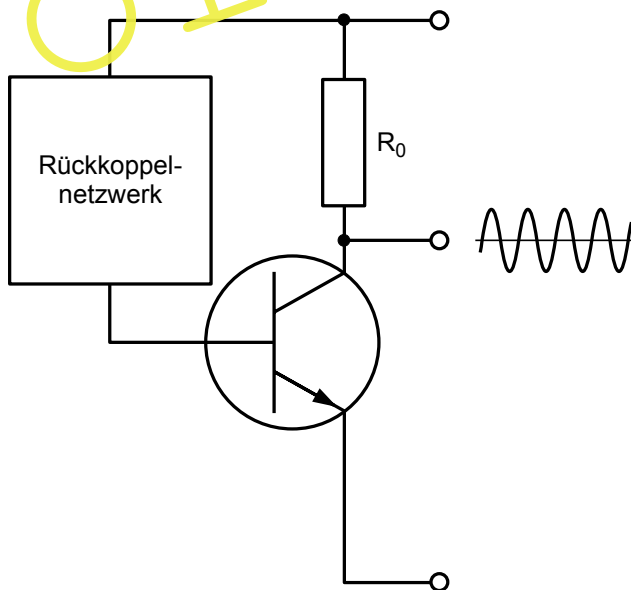


Abb. 2

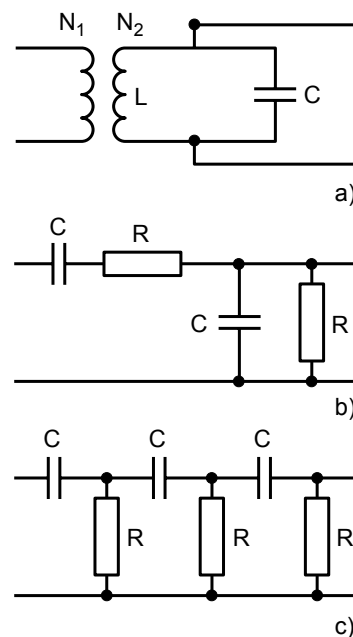


Abb. 3

Da ein Verstärker in Emitterschaltung die Phase zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung um 180° dreht, muss das Rückkoppelnetzwerk eine weitere Phasendrehung um 180° gewährleisten. Ist das Rückkoppelnetzwerk ein LC-Schwingkreis, wird die auf den Eingang zurückzuführende Wechselspannung mithilfe einer induktiv an die Schwingkreisspule N_2 gekoppelten Rückkopplungsspule N_1 dem Schwingkreis entnommen (Abb. 3a). N_1 und N_2 bilden einen Transformator, der eine Phasendrehung von 180° hervorruft. Die Frequenz eines LC-Oszillators hängt von den frequenzbestimmenden Bauelementen Spule und Kondensator ab. Sie wird nach der **Thomson'schen Schwingungsgleichung**

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

berechnet und ist in weiten Bereichen variierbar – von niedrigen Frequenzen bis in den Hochfrequenzbereich. Bekanntestes Beispiel eines LC-Oszillators ist die **Meißner-Schaltung** (M 8).

Das **Wienbrückennetzwerk** besteht aus zwei Kondensatoren und zwei Ohm'schen Widerständen. Es ruft eine bauelementabhängige Phasendrehung zwischen 0° und 90° hervor. Sind die R- und C-Werte jeweils gleich, ergibt sich nur bei einer ganz bestimmten RC-Kombination eine Phasendrehung von null. Der Verstärker muss deshalb mit einer zweiten Emitterstufe aufgebaut werden. Wienbrücken-Oszillatoren sind nur für den mittleren Frequenzbereich geeignet. Auf dieser Frequenz schwingt der Oszillator:

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

Auch die **Phasenschieberkette** ist ein Netzwerk, das nur bei einer ganz bestimmten Kombination der drei Widerstände und Kondensatoren eine Phasendrehung von 180° hervorruft. Jedes RC-Glied verschiebt dabei um 60° , sodass mit drei Gliedern bei genau einer Frequenz die gesamte Phasendrehung von 180° erreicht wird.

Hinweise zur Gestaltung des Unterrichts

Für den Physikunterricht sind elektromagnetische Schwingungen ein interessantes Thema. Sie treten in Technik und Medizin sehr häufig auf. Viele Geräte der **Unterhaltungselektronik** (z. B. Rundfunk- und Fernsehgeräte, Mobiltelefone, elektronische Musikinstrumente) besitzen Schwingkreise, in denen elektromagnetische Schwingungen verschiedener Frequenzen erzeugt werden. Das Thema ermöglicht somit die praktische Realisierung der didaktischen Forderung nach **Alltagsorientierung** des Physikunterrichts.

In den **Physik-Lehrplänen** der einzelnen Bundesländer finden die elektromagnetischen Schwingungen deshalb auch entsprechende Berücksichtigung. Beispielsweise findet man im Lehrplan der gymnasialen Oberstufe von Brandenburg folgende Stichworte:

- periodische Energieübergabe zwischen Spule und Kondensator beim Schwingkreis
- Analogie zwischen mechanischer und elektromagnetischer Schwingung
- Abhängigkeit der Schwingungsdauer von Kapazität und Induktivität
- Prinzip der Erzeugung ungedämpfter, elektromagnetischer Schwingungen; Rückkopplung

Im Lehrplan von Nordrhein-Westfalen werden im Inhaltsfeld „**Elektrik**“ die Eigenschaften elektrischer Ladungsträger und ihr Verhalten in elektrischen und magnetischen Feldern untersucht. Weitere Schwerpunkte liegen auf den Beziehungen zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen, insbesondere auf der Beschreibung von elektromagnetischer Induktion und von elektromagnetischen Schwingungen und Wellen.

Der Lehrplan von Bayern sieht für die Jahrgangsstufe 11/12 vor: „11.5 Elektromagnetische Schwingungen und Wellen (ca. 24 Std.)“.

Die **Erzeugung elektromagnetischer Schwingungen** knüpft im Physikunterricht direkt an die Physik elektrischer und magnetischer Felder an. Dabei können Sie auf die Vorkenntnisse der Schüler in Bezug auf Eigenschaften von Spulen und Kondensatoren aufbauen. Ein Schwerpunkt bei der Behandlung der elektromagnetischen Schwingungen im Physikunterricht sind neben ihrer Erzeugung quantitative Betrachtungen zur Periodendauer (**Thomson'sche Schwingungsgleichung**) und das Phänomen der **Resonanz**.

Ein wesentliches Mittel zur effektiven Gestaltung des Lernprozesses ist die **Nutzung von Analogien** zu den **mechanischen Schwingungen** (siehe RAAbits-Beitrag I/B Reihe 25, „Eine Einführung in die Lehre der Schwingungen und Wellen“, 9./10. Schuljahr, August 2014). Das gilt insbesondere für die Vorgänge in einem Schwingkreis, die man sehr gut mit den Vorgängen bei einem Fadenpendel oder einem horizontalen Federpendel vergleichen kann, sowie für die Erscheinung der Resonanz. Auch zur Herleitung des Zusammenhangs zwischen Periodendauer, Induktivität und Kapazität können Sie von Analogiebetrachtungen zu den mechanischen Schwingungen ausgehen.

Eine interessante Alternative zur Gestaltung des Unterrichts sind **Simulationen**. Gut gemachte Beispiele zum Thema elektromagnetische Schwingungen finden Sie im Internet (siehe Mediathek).

Für **Experimente** mit elektromagnetischen Schwingungen im Physikunterricht benötigen Sie neben Geräten der Grundausstattung (Netzgeräte, Amperemeter und Voltmeter, Oszilloskop) einen Gerätesatz zur Elektrizitätslehre (Widerstände, Spulen, Kondensatoren ...). In älteren Physiksammlungen finden sich noch Gerätesätze, die auf größeren Schaltbrettern komplette Schaltungen enthalten. Diese Gerätesätze ermöglichen einen schnellen und übersichtlichen Aufbau, sind allerdings in ihren Variationsmöglichkeiten erheblich eingeschränkt. Neuere Entwicklungen nutzen universell einsetzbare Vertikaldemonstrationstafeln, die es in verschiedenen Ausführungen gibt. Dadurch ergeben sich sehr übersichtliche Experimentieraufbauten, die den Schaltbildern weitgehend entsprechen. Für Schülerexperimente werden Gerätesätze angeboten, die Rasterplattensysteme oder Steckbretchen verwenden.

Bei den Netzgeräten wird eine stufenlose Verstellbarkeit vorausgesetzt. Zum Nachweis der elektromagnetischen Schwingungen können Sie, wenn die Frequenzen kleiner als 5 Hz sind, Drehspulmessgeräte mit Nullpunktmittellage, Glühlampen oder Leuchtdioden einsetzen. Für höhere Frequenzen sind Lautsprecher und Oszilloskope geeignet.

Um die unterschiedliche Ausstattung der Schulen zu berücksichtigen, werden die Experimente durchweg nur als prinzipielle Schaltbilder dargestellt. Fast immer ist es möglich, die angegebenen Werte bei Widerständen, Spulen und Kondensatoren durch Werte ähnlicher Größen zu ersetzen. Es ist lediglich zu beachten, dass die zulässigen **Belastungshöchstwerte nicht überschritten** werden.

Die Experimentieranordnungen, in denen hochfrequente elektromagnetische Schwingungen auftreten, sind im Sinne des Telekommunikationsgesetzes funktstörende Hochfrequenzanlagen. Deshalb sind alle Experimentieranordnungen so dimensioniert, dass es nicht zur Abstrahlung störender elektromagnetischer Wellen kommen kann.

Eine Alternative zu den Realexperimenten sind interaktive **Bildschirmexperimente** (IBE). Sie stellen eine Weiterentwicklung des Realfilms dar und ermöglichen das Experimentieren am Computerbildschirm. Das IBE vereint die vorteilhaften Eigenschaften eines Realfilms mit den lernrelevanten Eigenschaften der interaktiven Simulation. Beispiele zum Thema elektromagnetische Schwingungen finden Sie im Internet.

Im **Mai 2015** erscheint ein Folgebeitrag zu den Anwendungen elektromagnetischer Schwingungen.

Materialübersicht

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

M 1	WH	Frischen Sie Ihr Wissen zur Elektrizitätslehre auf!	
M 2	Ab	Elektromagnetische Schwingungen in einem Schwingkreis	
M 3	SV / LV	Ein Experiment zur Erzeugung elektromagn. Schwingungen	
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> Netzgerät, 0 bis 20 V	<input type="checkbox"/> Kondensator, 50 μ F
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> Spule mit großer Induktivität, 500 H	<input type="checkbox"/> Widerstand, 1 k Ω
		<input type="checkbox"/> Strommesser mit Nullpunkt-Mittellage, 10 mA	<input type="checkbox"/> Umschalter
M 4	Ab	Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen	
M 5	SV / LV	Ein Experiment zur Erzeugung gedämpfter elektromagnetischer Schwingungen	
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> Netzgerät, 0 bis 20 V	<input type="checkbox"/> Kondensator, 1 μ F
	⌚ D: 10 min	<input type="checkbox"/> U- und I-Eisenkern, geblättert	<input type="checkbox"/> Spule, 1500 Windungen
		<input type="checkbox"/> Oszilloskop	<input type="checkbox"/> Umschalter
M 6	SV / LV	Ein Experiment zur Untersuchung der Abhängigkeit der Dämpfung einer elektromagnetischen Schwingung vom Ohm'schen Widerstand	
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> U- und I-Eisenkern, geblättert	<input type="checkbox"/> Funktionsgenerator
	⌚ D: 10 min	<input type="checkbox"/> Spule, 500 Windungen	<input type="checkbox"/> Kondensator, 0,1 μ F
		<input type="checkbox"/> Zweikanal-Oszilloskop	<input type="checkbox"/> Kondensator, 10 nF
		<input type="checkbox"/> veränderlicher Widerstand, 0 ... 1 k Ω	
M 7	Ab	Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen	
M 8	SV / LV	Experiment zur Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen mit einer Meißner'schen Rückkopplungsschaltung	
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> Netzgerät, 0 bis 20 V	<input type="checkbox"/> Spule, 250 Windungen
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> Kondensator, 1 μ F	<input type="checkbox"/> Spule, 500 Windungen
		<input type="checkbox"/> U- und I-Eisenkern, geblättert	<input type="checkbox"/> Oszilloskop
		<input type="checkbox"/> veränderlicher Widerstand, 100 k Ω	<input type="checkbox"/> Lautsprecher
		<input type="checkbox"/> Transistor BD 137, o. Ä.	<input type="checkbox"/> Schalter
M 9	Ab	Anwendungen ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen	

Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie ab Seite 20.

Minimalplan

Bei Zeitknappheit können Sie Material **M 9** weglassen. Falls das noch nicht reicht, streichen Sie auch Material **M 6**.

II/C

M 1 Frischen Sie Ihr Wissen zur Elektrizitätslehre auf!

Für das Gebiet „elektromagnetische Schwingungen“ benötigen Sie **Vorkenntnisse** zu folgenden Themen:

- elektrisches und magnetisches Feld
- Kondensator und Spule
- kapazitiver und induktiver Widerstand
- Induktionsgesetz
- Selbstinduktion
- Lenz'sches Gesetz
- Kenngrößen einer mechanischen Schwingung
- Resonanz
- Bipolartransistor



Bearbeiten Sie die Aufgaben. Wiederholen Sie so die Grundlagen der Elektrizitätslehre.

Aufgaben

1. Beschreiben Sie das elektrische Feld.

Tipp Verwenden Sie die Begriffe

- Punktladung,
- Kräfte zwischen geladenen Körpern,
- Feldlinien.

Für Experten: Erklären Sie den Begriff „elektrisches Potenzial“.

2. Beschreiben Sie das magnetische Feld.

Tipp Verwenden Sie die Begriffe

- Feld um einen stromdurchflossenen Leiter,
- Feldlinien,
- Lorentzkraft,
- Ladungsträger im Magnetfeld.

Für Experten: Warum vergrößert sich die magnetische Feldstärke einer stromdurchflossenen Spule um ein Vielfaches, wenn man einen Eisenkern in das Innere der Spule steckt?

Tipp Verwenden Sie zur Erklärung das Phänomen des Ferromagnetismus.

3. Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise eines Kondensators.

Tipp Verwenden Sie die Begriffe

- Kapazität,
- Dielektrikum,
- Auf- und Entladen,
- Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren.

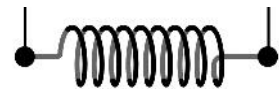
4. Warum hat ein Kondensator im Wechselstromkreis einen anderen elektrischen Widerstand als im Gleichstromkreis? Von welchen Größen hängt dieser kapazitive Widerstand ab?

Für Experten: Erklären Sie das Entstehen der Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung.

5. Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise einer Spule.

Tipp Verwenden Sie die Begriffe

- Induktivität,
- Permeabilität,
- Ein- und Ausschaltvorgänge.



6. Begründen Sie, warum eine Spule im Wechselstromkreis gegenüber einem Gleichstromkreis einen zusätzlichen Widerstand besitzt.

Von welchen Größen hängt dieser induktive Widerstand ab?

Für Experten

Erklären Sie das Entstehen der Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung.

7. Welche Aussagen beinhaltet das Induktionsgesetz?

Für Experten

Formulieren Sie das Induktionsgesetz quantitativ mithilfe des magnetischen Flusses.

8. Was versteht man unter Selbstinduktion?

Für Experten

Beschreiben Sie ein Experiment zum Nachweis der Selbstinduktion beim Ein- und Ausschalten einer Spule.

9. Was besagt das Lenz'sche Gesetz?

10. Beschreiben Sie die Kenngrößen einer mechanischen harmonischen Schwingung.

Tipp Verwenden Sie die Begriffe

- harmonische Schwingung,
- Auslenkung, Amplitude,
- Periodendauer und
- Frequenz.

Für Experten

a) Wie lautet die Gleichung für die zeitliche Abhängigkeit der Auslenkung bei einer harmonischen Schwingung?

b) An der Steckdose „schwingt“ die sinusförmige Wechselspannung mit einer Amplitude von 325 V und der Frequenz von 50 Hz. Wie lautet die Gleichung für den Spannungsverlauf?

11. Erläutern Sie den Begriff der Resonanz.

Tipp Verwenden Sie die Begriffe Anregung, schwingungsfähiges System, Eigenfrequenz, Erregerfrequenz.

Für Experten

In der StVO steht, dass auf Brücken nicht im Gleichschritt marschiert werden darf.

- a) Begründen Sie die Notwendigkeit dieses Verbots.
- b) Recherchieren Sie im Internet nach Informationen über Brücken, die durch Resonanzkatastrophen zerstört wurden.

12. Beschreiben Sie die Emitterschaltung eines Bipolartransistors.

Tipp Gehen Sie vom Aufbau eines Bipolartransistors aus zwei pn-Übergängen aus, und beschreiben Sie den Zusammenhang zwischen Basis- und Kollektorstromstärke.

M 2 Elektromagnetische Schwingungen in einem Schwingkreis

Ein elektrischer Schwingkreis ist eine Zusammenschaltung von einem Kondensator und einer Spule. In ihm können nach Zufuhr elektrischer Energie elektromagnetische Schwingungen angeregt werden. Dabei wird die im Kondensator gespeicherte elektrische Feldenergie in der Spule in magnetische Feldenergie umgewandelt. Danach wird diese Energie wieder abgebaut und in elektrische Feldenergie des Kondensators umgewandelt. Es entsteht eine **elektromagnetische Schwingung** (siehe M 3). Den zeitlichen Verlauf von Spannung U und Stromstärke I zeigt Abb. 1.

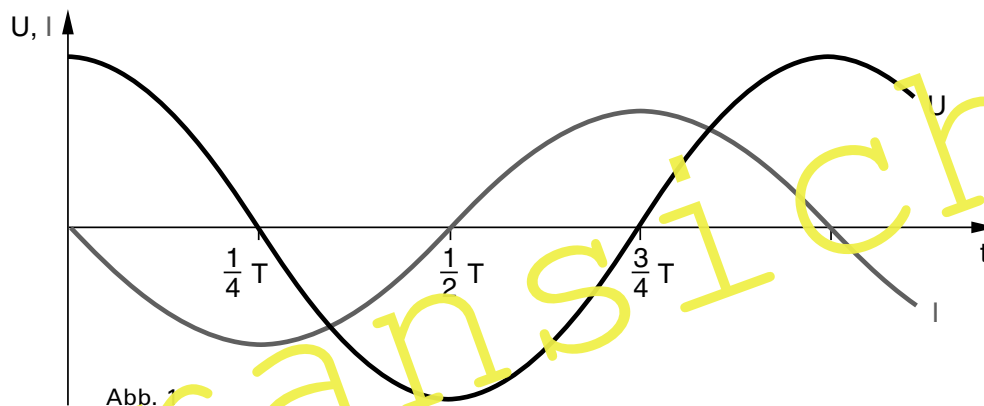
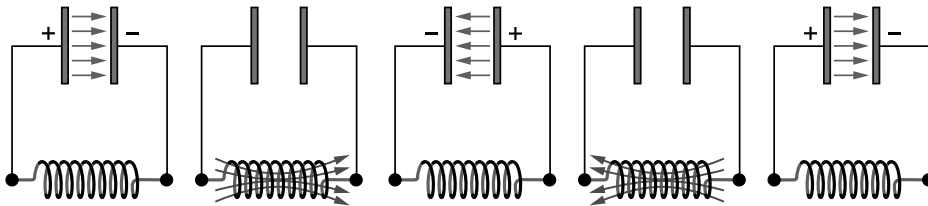


Abb. 1

Vorgänge im Schwingkreis

Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist die Spannung U am Kondensator maximal und die Stromstärke I null. Dann entlädt sich der Kondensator, und es fließt ein Strom durch die Spule. In der Zeit $0 < t < T/4$ nimmt die Spannung am Kondensator ab, während die Stromstärke im Schwingkreis ansteigt. Wenn der Kondensator völlig entladen ist, hat die Stromstärke ihren betragsmäßig höchsten Wert erreicht ($t = T/4$). Obwohl zu diesem Zeitpunkt zwischen den Kondensatorplatten keine Spannung mehr besteht, hört der Stromfluss nicht auf. Durch den Abbau des Magnetfeldes wird in der Spule eine Spannung induziert, die den Schwingkreisstrom weiterfließen lässt. Ursache für das Weiterfließen des Stromes ist die **Selbstinduktion** in der Spule. Infolge des **Lenz'schen Gesetzes** fließt der Induktionsstrom in der gleichen Richtung wie der Entladestrom. Dadurch wird der Kondensator erneut aufgeladen, diesmal jedoch mit umgekehrter Polung. Beim Aufladen nimmt die Stromstärke ab und die Spannung am Kondensator zu ($T/4 < t < T/2$). Der Ladevorgang ist beendet, wenn die magnetische Feldstärke null ist ($t = T/2$). Danach entlädt sich der Kondensator erneut, und die Vorgänge wiederholen sich. Stromstärke und Spannung sind um eine Viertelperiode phasenverschoben (Abb. 1).

Die Frequenz der Schwingung hängt von der Kapazität des Kondensators und der Induktivität der Spule ab. Man bezeichnet sie als **Eigenfrequenz** des Schwingkreises. Es gilt die **Thomson'sche Schwingungsgleichung**:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{bzw.} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

M 3 Ein Experiment zur Erzeugung elektromagn. Schwingungen

Aufgabe

Demonstrieren Sie das Entstehen einer elektromagnetischen Schwingung in einem Schwingkreis durch Entladen eines Kondensators über eine Spule.

Lehrerversuch ⌚ Vorbereitung: 10 min Durchführung: 15 min

Materialien

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Netzgerät, 0 bis 20 V | <input type="checkbox"/> Spule mit großer Induktivität, 500 H |
| <input type="checkbox"/> Kondensator, 50 μF | <input type="checkbox"/> Strommesser mit Nullpunkt-Mittellage, 10 mA |
| <input type="checkbox"/> Widerstand, 1 k Ω | <input type="checkbox"/> Umschalter |

Versuchsaufbau

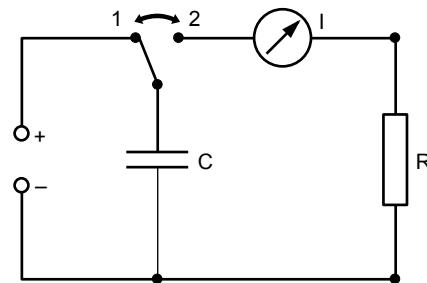
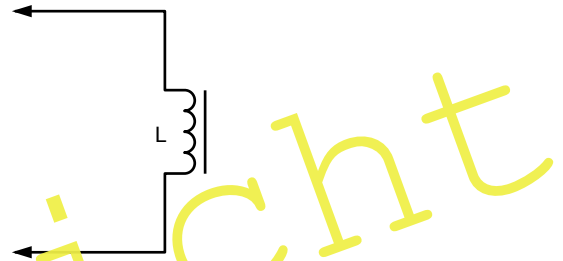


Abb. 1



Versuchsdurchführung

Bauen Sie die Schaltung gemäß der Abbildung auf. Laden Sie im ersten Teil des Experiments den Kondensator mithilfe der Gleichspannungsquelle auf (Schalterstellung 1), und entladen Sie ihn danach über einen Ohm'schen Widerstand (Schalterstellung 2). Der Verlauf der Stromstärke wird am Strommesser beobachtet.

Tauschen Sie im zweiten Teil den Widerstand gegen die Spule mit großer Induktivität aus, und führen Sie das Experiment in der gleichen Weise wie oben aus.

Tipp

Falls keine Spule mit großer Induktivität zur Verfügung steht, ist Folgendes zu beachten:

Zur Erzeugung von elektromagnetischen Schwingungen mit sehr geringer Frequenz (1–2 Hz) sind Spulen mit großer Induktivität notwendig. Rein rechnerisch könnte man nach der Thomson'schen Schwingungsgleichung auch Spulen geringer Induktivität verwenden, wenn man entsprechend Kondensatoren mit sehr großer Kapazität einsetzt (z. B. Spule mit 1500 Windungen und Eisenkern und Kondensator mit 10 000 μF), allerdings ist die Dämpfung des Schwingkreises dann so groß, dass sich keine Schwingung mehr ausbilden kann.

Merke

Wird ein aufgeladener Kondensator über einen **Ohm'schen Widerstand** entladen, so fließt ein elektrischer Strom, dessen Stärke zuerst sehr schnell und dann immer langsamer abnimmt. Entlädt man den Kondensator über eine **Spule**, so schwingt der Zeiger des Strommessers mehrmals um die Nulllage hin und her, wobei die Ausschläge immer kleiner werden. Nach kurzer Zeit ist die Schwingung beendet.



M 4 Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen

In einem Schwingkreis wird immer ein Teil der elektrischen Energie in thermische Energie umgewandelt. Ursache hierfür ist der Ohm'sche Widerstand in den Zuleitungen und im Draht der Spule. Die Amplituden von Schwingkreisstromstärke und Schwingkreisspannung nehmen ab, wenn nicht von außen Energie zugeführt wird (Abb. 1).

Die Abnahme der Amplituden erfolgt nach einer e-Funktion (einhüllende Kurve). Wie schnell die Amplitude abnimmt, hängt von der Größe des Ohm'schen Widerstands ab (siehe M 6).

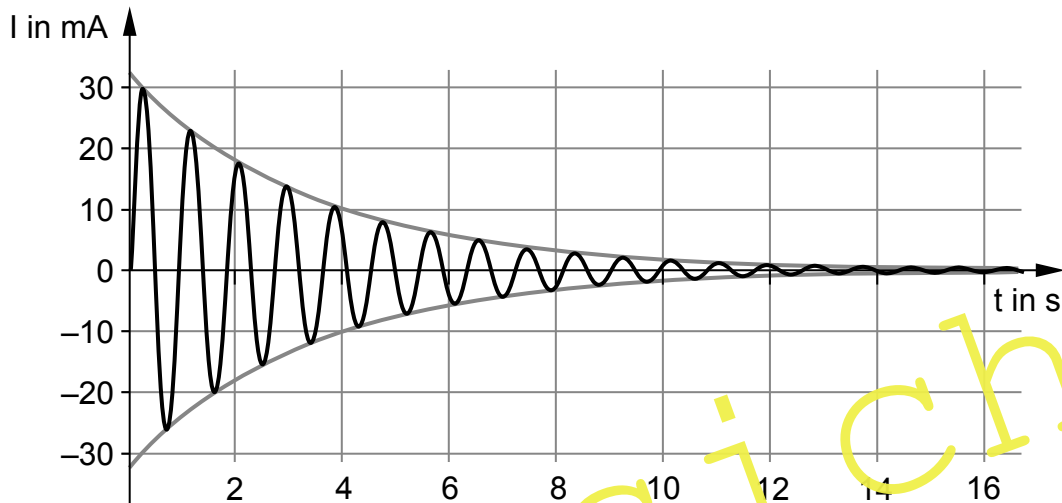


Abb. 1

Mathematische Beschreibung der gedämpften Schwingung

Für die gedämpfte elektromagnetische Schwingung in einem Schwingkreis gilt der Energieerhaltungssatz

$$E_{\text{mag}}(t) + E_{\text{el}}(t) + E_{\text{th}}(t) = \text{konstant.}$$

Daraus kann man folgende Gleichungen zur Beschreibung der gedämpften Schwingung herleiten:

$$U(t) = U_{\text{max}} \cdot (\cos \omega' t) \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t}$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

R = Ohm'scher Widerstand (Drahtwiderstand der Spule + eventueller Festwiderstand)

C = Kapazität des Kondensators

L = Induktivität der Spule

ω' = Kreisfrequenz der gedämpften Schwingung

Tipp

$\beta = \frac{R}{2L}$ heißt „Abklingkoeffizient“.



M 5 Ein Experiment zur Erzeugung gedämpfter elektromagnetischer Schwingungen

Aufgabe

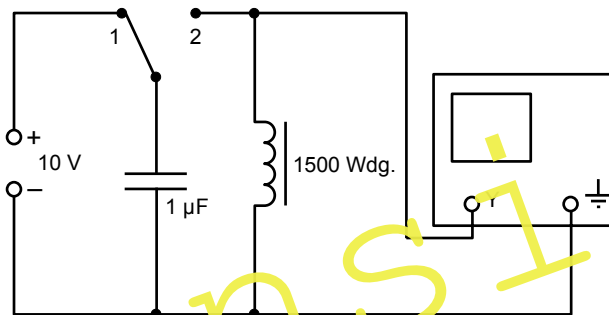
Demonstrieren Sie das Entstehen einer gedämpften elektromagnetischen Schwingung in einem Schwingkreis mithilfe eines Oszilloskops.

Lehrerversuch ⌚ Vorbereitung: 10 min Durchführung: 10 min

Materialien

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Netzgerät, 0 bis 20 V | <input type="checkbox"/> U- und I- Eisenkern, geblättert |
| <input type="checkbox"/> Kondensator, 1 μF | <input type="checkbox"/> Umschalter |
| <input type="checkbox"/> Spule, 1500 Windungen | <input type="checkbox"/> Oszilloskop |

Versuchsaufbau

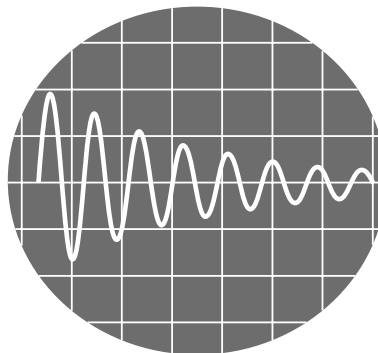


Versuchsdurchführung

Schließen Sie nach dem Aufladen des Kondensators (Schalterstellung 1) den Schwingkreis (Schalterstellung 2) und beobachten Sie den Bildschirm. Wiederholen Sie das Experiment mehrfach. Bei sehr schnellem Umschalten, z. B. mit einer Morsetaste, gelingt ein fast stehendes Bild.

Zur Selbstkontrolle – Ergebnis

Nach dem Umschalten erscheint für einen Moment das Bild einer gedämpften Schwingung auf dem Bildschirm des Oszilloskops:



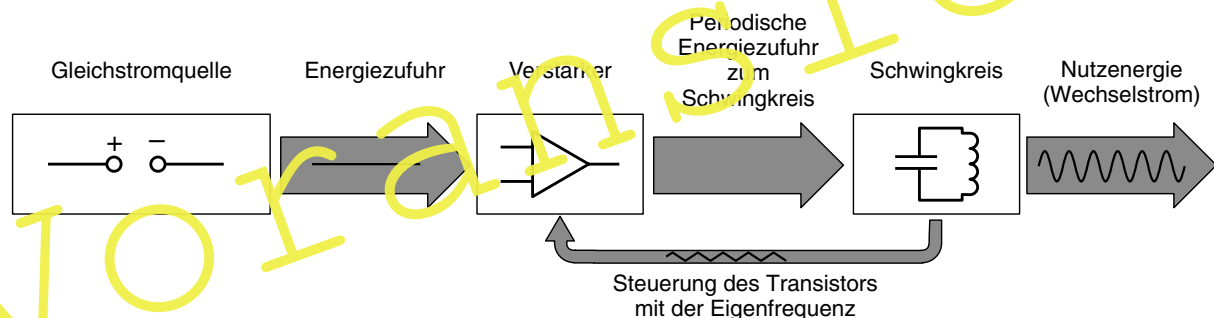
M 7 Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen

Elektromagnetische Schwingungen mit abnehmender Amplitude sind für die praktische Nutzung wenig geeignet. So benötigt man beispielsweise für den Betrieb von **Radiosendern, Quarzuhren** oder **elektronischen Musikinstrumenten** Schwingungen mit konstanter Amplitude. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, solche elektromagnetischen Schwingungen zu erzeugen. Eine Möglichkeit beruht auf dem **Rückkopplungsprinzip**: Ein Kind, das auf einer Schaukel schwingt, muss der Schaukel ständig mechanische Energie zuführen, um die Reibungsverluste auszugleichen. Das Kind weiß intuitiv, wann die jeweils notwendigen Bewegungen auszuführen sind, es orientiert sich dabei am jeweiligen Schwingungszustand der Schaukel. Das System „Schaukel / Kind“ steuert also seine Energiezufuhr selbst. Es gibt aber auch Systeme, deren Rückkopplung automatisch durch den Oszillator selbst gesteuert wird.

II/C

Meißner'sche Rückkopplungsschaltung

Der Physiker **Alexander Meißner** (1883–1958) übertrug das Rückkopplungsprinzip auf den Schwingkreis und entwickelte eine Schaltung zur Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen. Das Grundprinzip ist in der Abbildung dargestellt. Es handelt sich um einen rückgekoppelten Transistorverstärker mit einem Schwingkreis als Kopplungsglied. Mithilfe des Transistors erfolgt eine periodische Energiezufuhr zum Schwingkreis. Das erreicht man dadurch, dass ein Teil der Schwingkreisspannung auf den Verstärkereingang zurückgeführt wird. So steuert der Schwingkreis seine Energiezufuhr selbst in der richtigen Frequenz und der richtigen Phase (siehe **M 8**).



Aufgaben

1. Erläutern Sie die Funktionsweise der Selbsterregung bei einer elektrischen Klingel.
2. Informieren Sie sich über Beispiele für das Rückkopplungsprinzip in Natur und Technik.

Tip

Suchen Sie z. B. in den Bereichen mechanische Schwingungen, Akustik und Klimawandel.

3. Für Experten

Kann man den in der Abb. als Schalter verwendeten Bipolartransistor durch einen Feldeffekttransistor ersetzen?

Merke

Damit ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen entstehen können, muss dem Schwingkreis ständig elektrische Energie zugeführt werden. Dadurch wird dann der am Ohm'schen Widerstand in thermische Energie umgewandelte Teil immer wieder ersetzt.



M 8 Experiment zur Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen mit einer Meißner'schen Rückkopplungsschaltung

Aufgabe

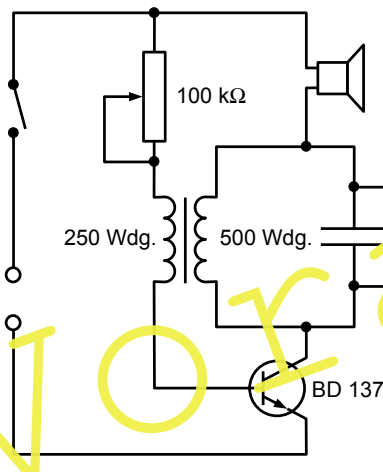
Demonstrieren Sie das Entstehen einer ungedämpften Schwingung mithilfe einer Meißner'schen Rückkopplungsschaltung.

Schülerversuch/Lehrerversuch ⌚ Vorbereitung: 10 min Durchführung: 15 min

Materialien

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Netzgerät, 0 bis 20 V | <input type="checkbox"/> U- und I- Eisenkern, geblättert |
| <input type="checkbox"/> Kondensator, 1 μF | <input type="checkbox"/> veränderlicher Widerstand, 100 k Ω |
| <input type="checkbox"/> Spule, 250 Windungen | <input type="checkbox"/> Transistor BD 137 o. Ä. |
| <input type="checkbox"/> Spule, 500 Windungen | <input type="checkbox"/> Oszilloskop |
| <input type="checkbox"/> Lautsprecher | <input type="checkbox"/> Schalter |

Versuchsaufbau



Versuchsdurchführung

Stellen Sie zuerst den veränderlichen Widerstand auf einen mittleren Wert. Legen Sie danach eine Spannung von 10 V an, und beobachten Sie die einsetzende Schwingung. Sollte die Schwingung nicht harmonisch sein, verändern Sie den Stellwiderstand feinfühlig so lange, bis eine saubere **Sinuskurve** entsteht. Schwingt der Generator überhaupt nicht an, liegt die Rückkopplungsspannung in falscher Phasenlage an der Basis des Transistors. Dann muss die Rückkopplungsspule umgepolt werden.

Variieren Sie die Kapazität des Kondensators und die Induktivität der Schwingkreis-spule durch Verändern der Windungszahl oder Verschieben des I-Kerns auf dem U-Kern, der die Spulen verbindet, und beobachten Sie die Frequenzänderungen der Schwingung.

Tipp Wenn Schüler das Experiment durchführen, ist es zweckmäßig, den Nachweis der ungedämpften Schwingungen nur mit dem **Lautsprecher** durchzuführen. Das Oszilloskop können Sie weglassen. Experimentieren Sie mit Spulen und Kondensatoren mit verschiedenen Werten, sodass jede Gruppe einen anderen Ton erzeugt.

Für Experten

Wenn Sie die Bedienung eines Oszilloskops beherrschen, können Sie eine Meißnerschaltung aufbauen, deren Frequenz oberhalb des Hörbereichs des Menschen liegt. Berechnen Sie vorab die notwendigen Werte für L und C.

Merke

Mithilfe einer Meißner'schen Rückkopplungsschaltung kann man ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen mit verschiedenen Frequenzen erzeugen.



Erläuterungen und Lösungen

M 1 Frischen Sie Ihr Wissen zur Elektrizitätslehre auf!

■ Die **Lösungskarten** sind für die Schülerhand gedacht. Teilen Sie sie bei Bedarf aus.



1. Beschreiben Sie das **elektrische Feld**.

Im Raum um einen elektrisch geladenen Körper herrscht ein elektrisches Feld, in dem auf andere geladene Körper **Kräfte** ausgeübt werden. Zur Veranschaulichung elektrischer Felder dienen **Feldlinien**. Ihre Richtung stimmt in jedem Punkt des Feldes mit der Richtung der Kraft auf eine positiv geladene **Punktladung** überein. Feldlinien können niemals im leeren Raum beginnen oder enden, sie durchkreuzen sich niemals und laufen auch niemals zusammen. Die Feldlinien stehen immer senkrecht auf Leiteroberflächen.



Für Experten:

Das **elektrische Potenzial** in einem Punkt des elektrischen Feldes bezieht sich auf die Energie, die man benötigt, um einen geladenen Körper von einem festgelegten Bezugspunkt zu diesem Punkt zu bringen. Die Einheit des elektrischen Potenzials ist Volt (V).

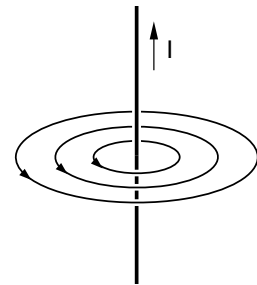
Es gilt:

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C} = 1 \text{ Nm/As.}$$



2. Beschreiben Sie das **magnetische Feld**.

In der Umgebung eines Magneten herrscht ein Feld, das auf andere Magneten eine **Kraft** ausübt. Der Magnet kann ein Permanentmagnet oder ein stromdurchflossener Leiter sein. Magnetische Felder veranschaulicht man mit **Feldlinien**. Die Richtung der Feldlinien gibt in jedem Punkt des Magnetfeldes an, wie sich der Nordpol einer frei drehbaren kleinen Magnetnadel ausrichtet.



Das Magnetfeld eines geraden stromdurchflossenen Leiters ist ein Wirbelfeld, d. h., der Leiter ist von kreisförmigen Feldlinien umgeben. Im Inneren einer stromdurchflossenen Spule bildet sich ein nahezu homogenes Magnetfeld aus.

Auf bewegte Ladungsträger übt das Magnetfeld eine Kraft aus. Diese als **Lorentzkraft** bezeichnete Kraft steht senkrecht zu den magnetischen Feldlinien und senkrecht zur Bewegungsrichtung der Ladungsträger.

Für Experten:

Bringt man einen Eisenkern in das Innere einer stromdurchflossenen Spule, so vergrößert sich die magnetische Feldstärke innerhalb der Spule um ein Vielfaches. Dieses Phänomen beruht auf dem **Ferromagnetismus**: Ferromagnetische Stoffe enthalten **Weiss'sche Bezirke**. Das sind mikrokristalline Bereiche, in denen die kleinen magnetischen Dipole einheitlich ausgerichtet sind. Die Ausrichtung der Dipole in benachbarten Weiss'schen Bezirken ist jedoch unterschiedlich. Liegt kein äußeres Magnetfeld vor, sind die Ausrichtungen der Dipole über den gesamten ganzen Festkörper etwa gleich verteilt. Wird der Körper in ein Magnetfeld gebracht, können sich die Dipole benachbarter Weiss'scher Bezirke parallel ausrichten und damit das äußere Magnetfeld verstärken.



3. Beschreiben Sie Aufbau u. Wirkungsweise eines Kondensators.

Ein Kondensator besteht aus zwei Leiterplatten, die durch einen Isolator getrennt sind. Kondensatoren können elektrische Ladung und elektrische Energie speichern. Die **Kapazität** C gibt an, wie viel Ladung ein Kondensator bei einer bestimmten Spannung speichern kann:

$C = Q / U$. Die Einheit der Kapazität ist Farad (F): $1 \text{ F} = 1 \text{ C} / \text{V}$.

Der Isolator zwischen den zwei Leitern wird als **Dielektrikum** bezeichnet. Ein Dielektrikum erhöht die Kapazität des Kondensators.

Schließt man einen ungeladenen Kondensator an eine Spannungsquelle an, fließt die Ladung abhängig vom Widerstand in der Zuleitung mehr oder weniger schnell auf den Kondensator. Spannung und Ladung am Kondensator nähern sich asymptotisch ihrem Endwert. Bei der **Entladung** eines Kondensators klingen die Werte von Spannung und Ladung allmählich auf null ab. Dieses Verhalten kann durch eine exponentielle Zeitfunktion beschrieben werden. Bei der **Parallelschaltung** von mehreren Kondensatoren vergrößert sich die Kapazität. Die Gesamtkapazität ergibt sich aus der Summe der Einzelkapazitäten:

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n.$$

Schaltet man Kondensatoren in **Reihe**, ist die Gesamtkapazität der Schaltung kleiner als jede der Einzelkapazitäten. Die Kehrwerte der Einzelkapazitäten addieren sich zum Kehrwert der Gesamtkapazität:

$$\frac{1}{C_{\text{ges}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$



4. Warum hat ein Kondensator im Wechselstromkreis einen anderen elektrischen Widerstand als im Gleichstromkreis?

Von welchen Größen hängt dieser kapazitive Widerstand ab?

Ein Kondensator besitzt im Gleichstromkreis einen unendlich großen Widerstand, da er verhindert – abgesehen vom Einschaltvorgang –, dass ein Gleichstrom fließt. Beim Anlegen einer Wechselspannung kommt es dagegen zu einem Stromfluss, da der Kondensator ständig aufgeladen und wieder entladen wird. Der damit verbundene kapazitive Widerstand R_C beträgt:

$$R_C = \frac{1}{\omega C}, \text{ wobei } \omega = \text{Kreisfrequenz der Wechselspannung.}$$

In einem Wechselstromkreis mit einem kapazitiven Widerstand gibt es eine Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung, da erst einmal ein Ladestrom fließen muss, um den Kondensator aufzuladen. Daher erreicht die Stromstärke ihren Maximalwert vor der Spannung.



7. Welche Aussagen beinhaltet das **Induktionsgesetz**?

Bei jeder zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses Φ durch eine Spule mit N Windungen wird in dieser eine Spannung induziert:

$$U_{\text{ind}} = -N \frac{d\Phi}{dt}.$$

Das Minuszeichen berücksichtigt das **Lenz'sche Gesetz**.

