

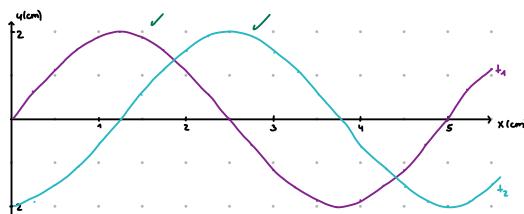
AB 2a) gegr:  $v_0 = 2,5 \frac{m}{s}$ ;  $x=0m$ ;  $S=50 \text{ Hz}$ ;  $\hat{q}=2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$ ;  $t_1=0,05 \text{ s}$ ;  $t_2=0,055 \text{ s}$

ges:  $\lambda = \frac{v_0}{S}$ ;  $T = \frac{1}{S}$

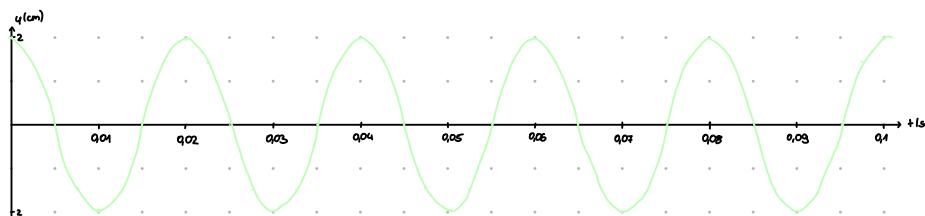
Lsg:  $\lambda = \frac{2,5 \frac{m}{s}}{50 \text{ Hz}} = 0,05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$  ✓

$T = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = 0,02 \text{ s}$

$\rightarrow q(x,t) = 2 \text{ cm} \cdot \sin(2\pi(\frac{t}{0,02 \text{ s}} - \frac{x}{0,05 \text{ m}}))$



b)



c) a) zeigt Welle zu speziellen Zeiten im gesammelten

b) zeigt Verlauf an einem speziellen Punkt zu unterschiedlichen Zeiten

1 gegr:  $v=5 \frac{m}{s}$ ;  $\lambda=50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$ ;  $\hat{q}=12 \text{ cm} = 0,12 \text{ m}$ ;  $x=15 \text{ m}$ ;  $x_d=8 \text{ m}$ ;  $t_d=5,5 \text{ s}$

a) ges:  $S=\frac{v}{\lambda}$ ;  $T=\frac{1}{S}$

Lsg:  $S = \frac{5 \frac{m}{s}}{0,5 \text{ m}} = 10 \text{ Hz}$  ✓

$T = \frac{1}{10 \text{ Hz}} = 0,1 \text{ s}$  ✓

b) ges:  $t = \frac{x}{v}$

Lsg:  $t = \frac{15 \text{ m}}{5 \frac{m}{s}} = 3 \text{ s}$  ✓

c)  $q(x,t) = 0,12 \text{ m} \cdot \sin(2\pi(\frac{t}{0,1 \text{ s}} - \frac{x}{0,5 \text{ m}}))$  ✓

d) ges:  $q(x,t) = \hat{q} \cdot \sin(2\pi(\frac{t}{0,1 \text{ s}} - \frac{x}{0,5 \text{ m}}))$

Lsg:  $q = 0,12 \text{ m} \cdot \sin(2\pi(\frac{5,5 \text{ s}}{0,1 \text{ s}} - \frac{8 \text{ m}}{0,5 \text{ m}})) = 0 \text{ m}$  ✓

## Übungsaufgaben

$$1) y(x,t) = \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}))$$

$$y(x,t) = \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{t}{T} + \frac{\pi}{2} - \frac{x}{\lambda}))$$

$$= \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot \frac{t}{T} + 2\pi \cdot 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda})$$

$$= \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot \frac{t}{T}) + \cancel{\sin(2\pi)} \cdot \sin(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda})$$

$$= \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot \frac{t}{T} - 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda})$$

$$= \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})) \quad \text{q.e.d.}$$

Ab

03.03.2023

1. geg:  $v_{ph} = 5 \frac{m}{s}$ ;  $\lambda = 0,5 \text{ m}$ ;  $\hat{y} = 0,12 \text{ m}$ ;  $x_1 = 15 \text{ m}$ ;  $x_2 = 8 \text{ m}$ ;  $t_1 = 5,53$

a) ges:  $f$ ; T      b) geg:  $v_{ph} = 5 \frac{m}{s}$ ;  $x_1 = 15 \text{ m}$       c)  $y(t_1) = \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}))$       d)  $\hat{y} = 0,12 \text{ m}$ ;  $t_2 = 5,68$ ;  $T = 0,18$ ;  $x_2 = 8 \text{ m}$ ;  $\lambda = 0,5 \text{ m}$

lsg:  $v_{ph} = \lambda \cdot f$  1:1:1

$$f = \frac{v_{ph}}{\lambda} = \frac{5 \frac{m}{s}}{0,5 \text{ m}} = 10 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10} \text{ s}$$

ges:  $t_1$

$$\text{lsg: } v_{ph} = \frac{x_1}{t_1} \quad | \cdot t_1 : v_{ph}$$

$$t_1 = \frac{x_1}{v_{ph}} = \frac{15 \text{ m}}{5 \frac{m}{s}} = 3 \text{ s}$$

c)  $y(t_1) = \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}))$

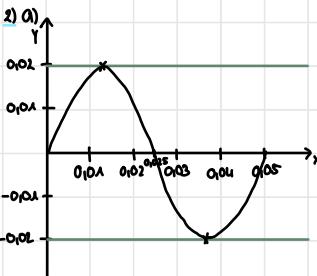
$$= 0,12 \text{ m} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{t}{0,18} - \frac{15 \text{ m}}{0,5 \text{ m}}))$$

ges:  $y$

$$\text{lsg: } y(5,53) = \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}))$$

$$= 0,12 \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{5,53}{0,18} - \frac{15 \text{ m}}{0,5 \text{ m}}))$$

$$= 0$$



$$x_1 = v_{ph} \cdot t_1 = 5 \frac{m}{s} \cdot 0,005 \text{ s}$$

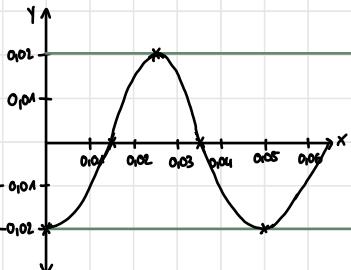
$$= 0,025 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{v_{ph}}{f} = \frac{5 \text{ m}}{10 \text{ Hz}} = 0,5 \text{ m}$$

$$y(0,025 \text{ m}, 0,005 \text{ s}) = \hat{y} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}))$$

$$= 0,02 \text{ m} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{0,005 \text{ s}}{0,018 \text{ s}} - \frac{0,025 \text{ m}}{0,5 \text{ m}}))$$

$$= 0 \text{ m}$$



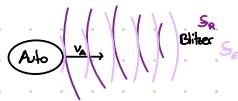
$$x_2 = v_{ph} \cdot t_2 = 5 \frac{m}{s} \cdot 0,005 \text{ s}$$

$$= 0,025 \text{ m}$$

$$y(0,025 \text{ m}, 0,005 \text{ s}) = 0,02 \text{ m} \cdot \sin(2\pi \cdot (\frac{0,005 \text{ s}}{0,018 \text{ s}} - \frac{0,025 \text{ m}}{0,5 \text{ m}}))$$

$$= -0,02 \text{ m}$$

- 1 Eine Transversalwelle breite sich in Richtung der positiven x-Achse mit der Geschwindigkeit  $5,0 \frac{m}{s}$  ungedämpft aus. Ihre Ausbreitung beginnt zum Zeitpunkt 0s im Koordinatenanfangspunkt. An diesem Ort ist die Elongation zu diesem Zeitpunkt 0m; sie wächst in der unmittelbar folgenden Zeit zunächst an. Die Wellenlänge beträgt 50cm, die Amplitude beträgt 12cm.
- Berechne die Frequenz und die Schwingungsdauer eines durch die Welle angeregten schwingenden Teilchens.
  - Berechne den Zeitpunkt, zu dem die Welle den Punkt mit der Koordinate erreicht 15m hat.
  - Stelle den Term der Wellenfunktion auf, die diese Welle beschreibt.
  - Berechne die Elongation, die am Ort mit der Koordinate 8,0m zum Zeitpunkt 5,5s vorliegt.
2. Eine Querwelle schreite mit der Geschwindigkeit  $2,5 \frac{m}{s}$  längs der +x-Achse fort. Der Erreger am Ort  $x=0\text{m}$  schwingt sinusförmig mit der Frequenz  $f=50\text{Hz}$  und der Amplitude  $y^*=2,0\text{cm}$  und befindet sich zur Zeit  $t=0\text{s}$  am Beginn einer neuen Schwingung in der Ruhelage.
- Zeichnen Sie die Welle zu den Zeiten  $t_1=0,050\text{s}$  und  $t_2=0,055\text{s}$ .
  - Zeichnen Sie das Diagramm der Teilchenschwingung am Ort  $x=3,75\text{cm}$  im Zeitraum  $t=0,00\text{s}$  bis  $t=0,10\text{s}$ .
  - Erläutere, welcher grundlegende Unterschied zwischen den Kurven der Teilaufgaben **a)** und **b)** besteht.



$$S_A = S_0(1 + \frac{U}{E})$$

$$S_E = \frac{S_0}{1 - \frac{U}{E}}$$

$$S_A \text{ in } S_E: \quad S_E = S_R \cdot (1 + \frac{U}{E})$$

$$S_E = S_R \cdot \frac{C+V}{C-V} \quad | : S_R$$

$$\frac{S_E}{S_R} = \frac{C+V}{C-V} \quad | (C-V)$$

$$CV = \frac{S_E}{S_R} \cdot (C-U) \quad | \cdot C$$

$$V = \frac{S_E}{S_R} C - \frac{S_E}{S_R} \cdot V - C \quad | + (\frac{S_E}{S_R} \cdot V)$$

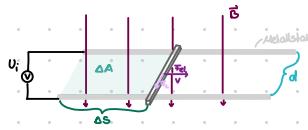
$$V(1 + \frac{S_E}{S_R}) = C - \frac{S_E}{S_R} \cdot C - C$$

$$V(1 + \frac{S_E}{S_R}) = C \left( \frac{S_E}{S_R} - 1 \right) \quad | : (1 + \frac{S_E}{S_R})$$

$$V = C \cdot \frac{\frac{S_E}{S_R} - 1}{1 + \frac{S_E}{S_R}}$$

# Die Induktion

16.3.2023



Herleitung von der Induced Spannung  $U_i$ :

$$F_{\text{el}} = F_L$$

$$qE = q \cdot v \cdot B$$

$$\frac{U_i}{d} = \frac{\Delta s}{dt} \cdot B$$

$$U_i: \frac{\Delta s}{dt} \cdot d \cdot B$$

$$U_i: \frac{\Delta A}{dt} \cdot B$$

$$U_i: n \frac{dA}{dt} \cdot B$$

$$U_i: n \cdot A \cdot B$$

$$E = \frac{U_i}{d} ; \quad V = \frac{\Delta s}{dt}$$

| d

$$\Delta s \cdot d = \Delta A$$

ne Anzahl Windungen

$$\frac{dA}{dt}$$

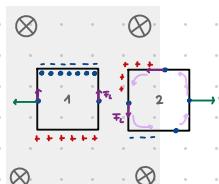
Flächenänderung der Fläche pro Zeit,

die von einem Magnetfeld oder magnet.

Flussdichte durchflossen wird.

Damit eine Spannung und somit ein Strom in die Schleife induziert wird, muss sich also die vom Magnetfeld durchflossene Fläche mit der Zeit ändern.

Erklärung:



Bei 1 werden die Leitungselektronen in der Schleife auf beiden Seiten mit der gleichen Lorentzkraft auf die Seite gedrückt.  
→ Es fließt kein Strom!  $U_i = 0$

Dadurch, dass bei 2 auf beide Seiten eine unterschiedlich geße Lorentzkraft wirkt, werden die Elektronen in eine Richtung beschleunigt. → Es entsteht ein elektrischer Strom.

Experiment:

Durchführung: Der Dauermagnet wird in die Spule ein- und ausgefahren

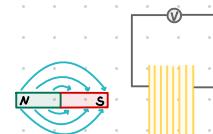
Beobachtung: Es wird Spannung in die Spule induziert.

- Liegt der Magnet still in der Spule, so wird keine Spannung induziert.

- Je schneller der Magnet ein- und ausgefahren wird, umso höher ist die induzierte Spannung.

- Je stärker das  $B$ -Feld ist, umso größer ist  $U_i$ .

- Je nach Ausrichtung der magnetischen Pole und nach Bewegungsrichtung (ein oder raus) ändert sich das Vorzeichen von  $U_i$ .



21.3.2023

Erklärung:

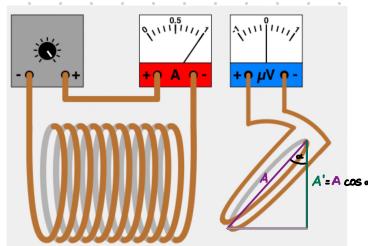
Ein sich veränderndes Magnetfeld induziert in einer Spule oder Leiterschleife eine Induced Spannung.

$$U_i = n \cdot A \cdot \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$= n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

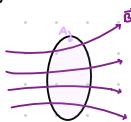
$$U_i = n \cdot A \cdot \dot{B}$$

Eine zeitliche Veränderung der magnetischen Flussdichte  $B$  erzeugt eine Veränderung der Induced Spannung.



# Der magnetische Fluss

Magnetischer Fluss  $\rightarrow$  Formelzeichen:  $\Phi$  (Phi) Einheit: 1 Wb (Weber)



$$\Phi = A \cdot B$$

$$B \perp A$$



$$\Phi = A \cdot B \cdot \cos \alpha$$

$$\Delta \Phi = \Delta A \cdot \Delta B$$

S.256 lesen / S.257 16, 3,4

3 geg:  $n=600$ ;  $I=45\text{cm}=0,45\text{m}$ ;  $r_{ind}=2400$ ;  $A_{ind}=6,8\text{ cm}^2=0,00068\text{ m}^2$ ;  $U_{ind}=5\text{mV}=5 \cdot 10^{-3}\text{V}$ ;  $\Delta I=1\text{A}$ ;  $\mu=4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

ges:  $\Delta t$   $U_{ind} = n_{ind} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$   $\Delta B = \mu \cdot \frac{\Delta I}{A}$

$$\Delta t = \frac{n_{ind} \mu \cdot r \cdot \Delta I \cdot A}{U_{ind}}$$

Lsg:  $\Delta t = \frac{-2400 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 600 \cdot 1\text{A} \cdot 0,00068\text{ m}^2}{5 \cdot 10^{-3}\text{V} \cdot 0,45\text{m}} \approx 0,555$

4 geg:  $\Delta I=1,5\text{A}$ ;  $I=0,65\text{m}=0,035\text{m}$ ;  $n=1500$

ges:  $\Phi = \Delta A \cdot \Delta B$ ;  $\Delta B = \mu \cdot \frac{\Delta I}{A}$ ;  $\Delta A = r^2 \cdot \pi c$

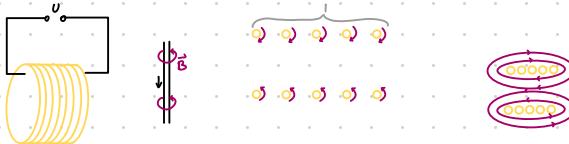
Lsg:  $\Phi = (0,035\text{m})^2 \cdot \pi c \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{1500 \cdot 1,5\text{A}}{0,035\text{m}} \approx 1,67 \cdot 10^{-5}\text{ Wb}$

$\Phi$  wird verfeindet  $\rightarrow (2)^2 \cdot \pi c = 4\pi^2 \cdot \pi c = 4\text{AA}$

$$x_L = 2 \quad x_3 = \frac{15}{44}$$

$$8x_2 + (14 - 4x_3)x_3 = 8k$$

$$x_2 + 4x_3 = 8k$$



$$B \sim n$$

$$B \neq 1 \rightarrow B \sim \frac{1}{l}$$

$$B \sim I$$

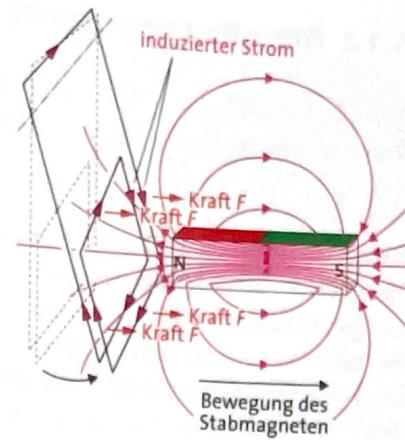
$$\rightarrow B = \mu_0 \cdot n \cdot \frac{I}{l}$$

**Versuch 2:** Eine leichte, kurzgeschlossene Spule aus dünnem Draht ist frei beweglich aufgehängt. Ein Stabmagnet, der sich in der Spule befindet, wird schnell aus der Spule herausgezogen (Abb. 253.1).

**Beobachtung:** Die Spule schwingt dem Magneten etwas hinterher.

**Erklärung:** Durch die Feldänderung wird in der Spule ein Strom induziert. Im Feld des Stabmagneten wirkt auf die vom induzierten Strom durchflossene Spule eine Kraft (Abb. 253.1). Nach dem Prinzip von Kraft und Gegenkraft übt auch die Spule auf den Magneten eine Kraft  $F$  aus, die dessen Bewegung entgegenwirkt. Längs des Weges  $\Delta s$  wird die mechanische Energie  $\Delta E = F \Delta s$  vom Magneten auf die Spule übertragen.

Wird der Magnet schnell in die Spule hineinbewegt, weicht die Spule vor dem Magneten zurück. Wiederum übt die Spule eine Kraft auf den Magneten entgegen dessen Bewegung aus, sodass auch jetzt Energie vom Magneten auf die Spule übertragen wird. ▶



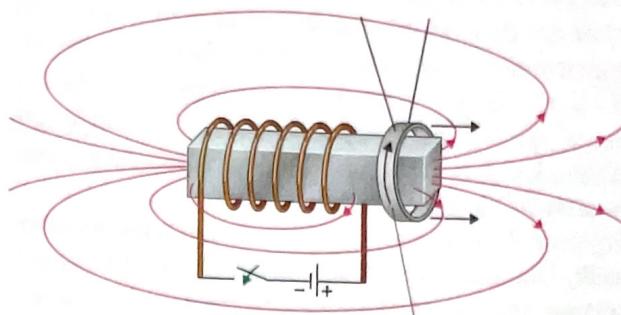
Die elektromagnetische Induktion kann mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln.

### Lenz'sche Regel

Beim Entfernen des Magneten folgt die Spule dem Magneten, beim Einbringen des Magneten weicht sie vor diesem zurück. Offensichtlich wirkt die Induktion ihrer Ursache – dem Entfernen bzw. Einbringen des Magnetfeldes – entgegen. Gleiches gilt auch für die Versuche 1a und 1b in Abb. 252.1. Der induzierte Strom ruft in der Spule ein nach unten gerichtetes Magnetfeld hervor, das dem eindringenden bzw. sich aufbauenden Feld entgegengerichtet ist und es dadurch schwächt. LENZ hat dies 1834 als allgemeines Prinzip formuliert:

**Lenz'sche Regel:** Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er seiner Ursache entgegenwirkt.

Der Thomson'sche Ringversuch in Abb. 253.2 ist ein weiteres Beispiel für die Lenz'sche Regel, die aus der Energieerhaltung folgt: Der Induktionsstrom gibt an das System, durch das er fließt und in dem er eine Wirkung hervorruft, Energie ab. Diese Energie wird von dem System geliefert, das ursächlich den Induktionsstrom auslöst. Bei der beweglich aufgehängten Spule ist der bewegte Magnet das Energie abgebende System, die in Bewegung gesetzte Spule das Energie aufnehmende System. Mit der Energieabgabe nimmt die kinetische Energie des Magneten ab, wodurch dessen Bewegung als Ursache der Induktion verlangsamt wird. Ohne diese Gegenwirkung würde der Induktionsstrom Energie an die Spule abgeben, ohne sie dem Magneten zu entnehmen; die Anordnung wäre ein *perpetuum mobile*.



Beim Einschalten induzierter Strom

**253.2 Thomson'scher Ringversuch:** Ein Aluminiumring ist beweglich über dem Weicheisenkern einer Spule aufgehängt. Die Spule ist über einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. Beim Einschalten des Spulenstroms schwingt der Ring von der Spule weg – unabhängig davon, wie die Pole der Spannungsquelle angeschlossen sind.

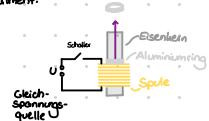
**Erklärung:** Der Aluminiumring wirkt wie eine kurzgeschlossene Induktionsspule mit einer Windung. Beim Einschalten des Spulenstroms wird der Weicheisenkern magnetisiert und sein starkes Magnetfeld tritt durch die Ringfläche. Nach der Lenz'schen Regel wird im Ring ein Kreisstrom induziert, dessen Feld dem eindringenden Magnetfeld entgegengerichtet ist. Auf den Ring wirkt deshalb im nach außen laufenden Streufeld eine Kraft, die ihn aus dem Feld hinaustreibt.

### Aufgaben

1. Erklären Sie mit der Lenz'schen Regel, warum im Versuch 1 (Abb. 252.1) der Strom seine Richtung umkehrt, wenn der Stabmagnet aus der Spule entfernt wird.
2. Der Thomson'sche Ringversuch in Abb. 253.2 soll genauer untersucht werden.
  - a) Erklären Sie, wie die Kraft entsteht, die den Ring beim Einschalten des Stroms von der Spule weg bewegt.
  - b) Nach dem Wegschwingen beim Einschalten kehrt der Ring nur langsam, ohne hin und her zu pendeln, in die Ruhelage zurück. Erklären Sie dieses Verhalten.
3. Beim Auseinanderbauen eines Fahrraddynamos werden Sie einen mehrpoligen Permanentmagneten finden, der in einer Spule gedreht wird. Erklären Sie, wodurch sich beim Drehen das Magnetfeld in der Spule ändert, sodass eine Spannung induziert wird.

# Die Lenz'sche Regel

Experiment:



Der Schalter wird geschlossen und die Spule von einem starken Strom durchflossen.

Der Aluring wird nach oben geschlossen.

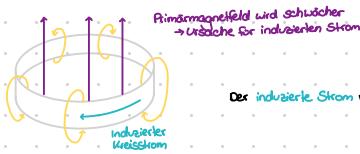
Ein nicht geschlossener, sondern geschlitzter Aluring bleibt ruhig liegen.

Erklärung: Durch das Schließen des Schalters baut sich in der Spule ein Magnetfeld auf, welches durch den Eisenkern verstärkt wird.

Das größer werdende Magnetfeld der Spule induziert im Aluring einen Kreisstrom, welcher wiederum selbst ein Magnetfeld erzeugt.



Beim Abschalten des Stroms:



Der induzierte Strom versucht mit seinem Magnetfeld das schwächer werden des Magnetfelds zu verhindern.

Fazit:

Der induzierte Strom wirkt stets seiner Ursache entgegen.

Lenz'sche Regel

S.253 14.1-3

2. a) Durch Einschalten des Stroms wird im Ring Spannung und damit ein wie das Feld des Eisenkerns gleiches B-Feld erzeugt. Diese stopfen sich gegenseitig ab, wodurch der Ring vom Magneten weg schwingt.  
b) Da sich der Ring nun vom Magneten weg bewegt, lenkt sich sein Feld um und Magnet und Ring ziehen sich gegenseitig an. Nach der Lenz'schen Regel wirkt das Feld U auf ein im Ring nach unten gerichtetes B-Feld hervor, das dem anderen entgegen gerichtet ist wodurch es nach und nach weiter geschwängt wird, wodurch der Ring setzt in die Ruhelage zurückgezogen.
1. Der induzierte Strom wirkt so die Lenz'sche Regel, immer seiner Ursache entgegen. Durch Entfernen des Magneten wird das B-Feld schwächer, wodurch ein dem B-Feld entgegengesetztes Feld im Aluring induziert wird.
3. Durch das Drehen des Magneten ändert sich das B-Feld ständig, wodurch eine Spannung induziert wird.

## Selbstinduktion

- Strom abschalten + kleiner werdendes B-Feld

↳ Spannung in Spule induziert

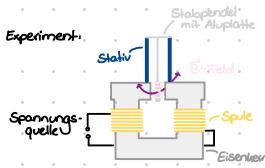
↳ Strom in Spule baut sich langsamer ab und auch auf



Wirkungsweise  
Skellt euch vor  
ihr seid diese  
Aluminiumscheibe und  
tretet jetzt in ein homogenes  
Magnetfeld ein

# Die Wirbelstrombremse

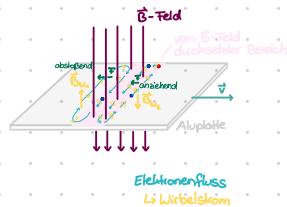
Experiment:



Das frei schwingende Pendel wird beim Einschalten der Spannungsquelle, beschleunigungsfrei abgebremst.

Je größer die Stromstärke in den Spulen und somit auch das  $B$ -Feld, umso stärker wird das Pendel abgebremst.

Erklärung:



Anwendung: Bremsen (LKW, ICE, Fahrgeschäfte)

→ Funktioniert auch zum Beschleunigen

S. 261 Nr. 1, 2

1) geg.:  $l = 70\text{cm} = 0,7\text{m}$ ;  $n = 500$ ;  $d = 12\text{cm} = 0,12\text{m}$ ;  $\Delta t = 2\text{s}$ ;  $I_1 = 1\text{A}$ ;  $I_2 = 8\text{A}$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ ;  $H = 1$

eigentlich  $1 + 1 \cdot 10^{-6} = 1,000004$

ges.:  $U_e = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ;  $L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n^2 A}{1}$ ;  $A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$

Leg.:  $A = \left(\frac{0,12\text{m}}{2}\right)^2 \cdot \pi = 0,01\text{m}^2$

$L = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{500^2 \cdot 0,01\text{m}^2}{0,7\text{m}} \approx 4,49 \cdot 10^{-3} \text{H}$

$U_e = 4,49 \cdot 10^{-3} \text{H} \cdot \frac{3\text{A}}{2\text{s}} \approx 0,02 \text{V}$

2) geg.:  $n = 300$ ;  $l = 30\text{cm} = 0,3\text{m}$ ;  $d = 4\text{cm} = 0,04\text{m}$ ;  $\mu_r \approx 200$ ;  $I = 5\text{A}$ ;  $\Delta t = 0,02\text{s}$

ges.:  $L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n^2 A}{1}$ ;  $U_e = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ;  $A = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi$

Leg.:  $A = \left(\frac{0,04\text{m}}{2}\right)^2 \cdot \pi \approx 1,26 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$

$L = 200 \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{300^2 \cdot 1,26 \cdot 10^{-3} \text{m}^2}{0,3\text{m}} \approx 0,52 \text{H}$

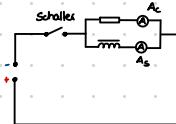
$U_e = 0,52 \text{ H} \cdot \frac{5\text{A}}{0,02\text{s}} = 130 \text{ V}$

3) geg.:  $A = 20\text{cm}^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$ ;  $n = 600$ ;  $l = 40\text{cm} = 0,4\text{m}$ ;  $I = 6\text{A}$ ;  $L = 2\text{H}$

ges.:  $L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n^2 A}{1}$ ;  $\mu_r = \frac{L}{n^2 A \mu_0}$

Leg.:  $\mu_r = \frac{2\text{H} \cdot 0,4\text{m}}{600 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs}}$   $\approx 884,49$

# Die Selbstinduktion



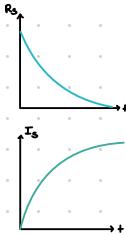
Wird der Stromkreis mittels des Schalters geschlossen, so steigt die Stromstärke  $A_s$  über den Widerstand schneller an, als die Stromstärke  $A_s$  über die Spule.

Wird der Schalter geöffnet, so wechselt die Stromstärke über den Widerstand für einen kurzen Moment die Richtung, während der Ausschlag für  $A_s$  für kurze Zeit weiter besteht.

Erklärung: Da beim Schließen des Schalters ein Strom durch die Spule fließt, erzeugt dieser ein Magnetfeld  $\vec{B}$  in der Spule.

Da das Magnetfeld sich von 0 auf maximale Stärke ändert, induziert es in der Spule auch einen Induktionsstrom, welcher seiner Ursache nach der Lenz'schen Regel (also dem Stärkerzenden des  $\vec{B}$ -Feldes) entgegengesetzt ist.

Somit besitzt die Spule zu Beginn einen sehr hohen Widerstand  $R_s$ , welcher mit der Zeit abnimmt, da das Magnetfeld sich nach kurzer Zeit auf den konstanten Maximalwert erhöht hat und sich von da an nicht mehr ändert.



# Die Induktivität einer Spule

Herleitung:

$$U_i(t) = n A \cdot B(t) \quad B(t) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n}{l} \cdot I(t) \quad \mu_r = \text{Permeabilitätszahl}$$

$$U_i(t) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n^2 A}{l} \cdot I(t)$$

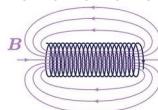
= Induktivität einer  
langen Spule

= Spulen spezifische Konstante

$$\rightarrow L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{n^2 A}{l} \quad \text{Induktivität einer langen Spule}$$

$$[L] = \frac{V_B}{A \cdot m} \cdot \frac{m^2}{m} = \frac{V_B}{A} = H \text{ (Henry)}$$

$\rightarrow U_i(t) = L \cdot \dot{I}(t)$  Selbstinduktion einer langen Spule

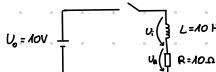


lange Spule besitzt  
ein homogenes  $\vec{B}$ -Feld  
 $\rightarrow$  Formel anwendbar



kurze Spule  $\rightarrow$  kaum  
homogenes  $\vec{B}$ -Feld im Inneren  
 $\rightarrow$  Formel nicht anwendbar

# Einschaltvorgang einer Spule

Im ersten Moment gilt:  $I = 0A$ Nach Einschaltvorgang gilt:  $I = \text{konstant} \rightarrow \dot{I} = 0$ 

$$U_0 = U_i + U_R$$

$$U_0 = U_i + U_R \quad U_R = R \cdot I = 0V$$

$$U_0 = U_i + 0$$

$$U_0 = U_i \quad U_i = L \cdot \dot{I}(t)$$

$$U_0 = L \cdot \dot{I}$$

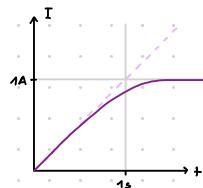
$$\dot{I} = \frac{U_0}{L} \quad \dot{I} = \frac{10V}{10H} = 1 \frac{A}{s}$$

Anfangsschleife

$$U_0 = L \cdot \dot{I} + R \cdot I = U_R$$

$$I = \frac{U_0}{R} \quad I = \frac{10V}{10\Omega} = 1A$$

maximale Stromstärke



$$U_0 = U_i + U_R$$

$$U_0 = L \cdot \dot{I} + R \cdot I$$

$$L \cdot \dot{I} = U_0 - R \cdot I$$

$$\dot{I}(t) = \frac{U_0}{L} - \frac{R}{L} \cdot I(t)$$

Anfangsschleife

$$\text{wird mit der Zeit wachsen (gegen } \infty)$$
  
$$\rightarrow I(t) = I_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

→ zeitlicher Verlauf des Stromstärke im L-R-Kreis

S.261

$$\begin{aligned}
 4 \text{ geg.: } & L = 3mA = 3 \cdot 10^{-3}A; R = 10\Omega = 1 \cdot 10^4\Omega; \frac{\frac{U_0}{I}}{I_{\max}} = \frac{1}{2} \\
 \text{ges.: } & \Delta t \quad I(t) = I_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad | : I_{\max} \\
 & \frac{1}{2} = 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \quad | -1 \quad | : (-1) \\
 & \frac{1}{2} = e^{-\frac{R}{L}t} \quad | \ln(\cdot) \quad | : (-\frac{R}{L}) \\
 & + = \ln(\frac{1}{2}) \cdot (-\frac{L}{R}) \\
 \text{Lsg.: } & t = \ln(\frac{1}{2}) \cdot \left( -\frac{3 \cdot 10^{-3}A}{1 \cdot 10^4\Omega} \right) = 2,08 \cdot 10^{-9}s
 \end{aligned}$$

S.287 Nr.1,2

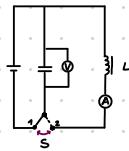
$$\begin{aligned}
 1 & C \rightarrow D \\
 U_C(t) & \rightarrow q(t) \\
 U_0 & \rightarrow \dot{q} \\
 E_0 & \rightarrow E_{kin} \\
 E_{kin} & \rightarrow E_{pot} \\
 L & \rightarrow m
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2 \text{ geg.: } & L = 600H; C = 40\mu F = 4 \cdot 10^{-5}F \\
 \text{ges.: } & T = \frac{2\pi}{\omega}; \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \\
 \text{Lsg.: } & T = 2\pi \sqrt{600H \cdot 4 \cdot 10^{-5}F} \approx 0,87s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3 \text{ geg.: } & S = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Hz}; C = 150nF = 1,5 \cdot 10^{-7}F \\
 \text{ges.: } & L \quad S = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad | : 2\pi \quad | : C \\
 & \frac{1}{5 \cdot 10^3} = \sqrt{LC} \quad | (\cdot)^2 \quad | : C \\
 & L = \frac{1}{5^2 \cdot 10^6 \cdot C} \\
 \text{Lsg.: } & L = \frac{1}{2,5 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,5 \cdot 10^{-7}F} \approx 0,027H
 \end{aligned}$$

# Der L-C-Schwingkreis

Schaltung:



Zunächst wird der Kondensator in der Schalterstellung 1 durch die Spannungsquelle aufgeladen.

Danach wird der Schalter in Position 2 gebracht und somit der Kondensator von der Spannungsquelle getrennt und mit der Spule in Reihe verbunden.

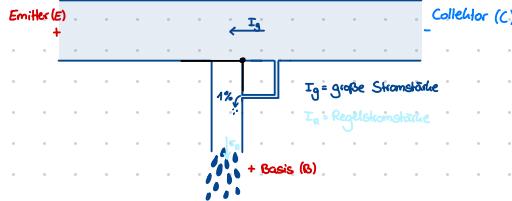
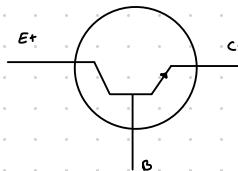
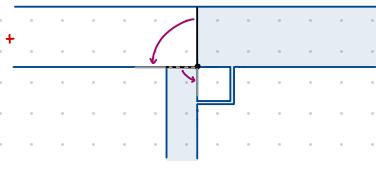
Sobald der Schalter in Position 2 gebracht wird, schwingen die Zeiger sowohl des Ampermeters, als auch des Voltmeters für kurze Zeit vom positiven Wert in den negativen hin und her.

Mit jeder Schwingung des Zeigers werden die Werte für die Stromstärke und die Spannung geringer, bis letztendlich die Schwingung ganz aufhört.

## Exkurs - Der Transistor

24.4.2023

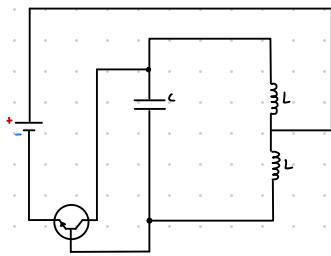
Wassermodell des Transistor



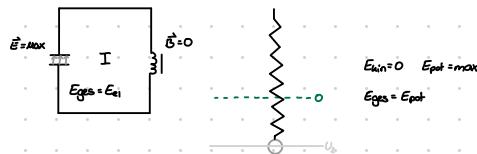
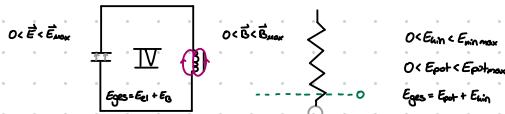
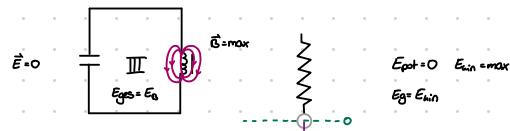
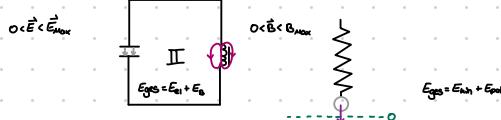
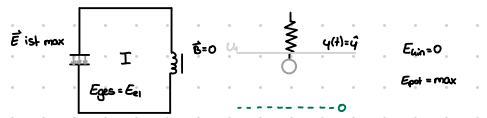
Damit ein großer „Schaltstrom“ fließen kann, muss ein geringer „Steuerstrom“ aus der Basis abfließen.

↪ Somit dient der Transistor sowohl als elektrischer Schalter, als auch als Verstärker für ein schwaches elektrisches Signal.

# Die selbstregulierende, rückgekoppelte Meißner-Schaltung



Analogie zu mechanischen Schwingungen



# Herleitung Thompson'sche Gleichung

28.4.2023



$$-U = U_C$$

$$U_C + U_L = 0$$

$$U_L + U_C = 0 \quad ; \quad U_C = \frac{Q}{C}$$

$$\frac{Q}{C} + L \cdot \dot{I} = 0 \quad ; \quad I = \frac{Q}{L}$$

$$\frac{1}{C} \cdot \frac{dQ}{dt} + L \cdot \frac{d^2 Q}{dt^2} = 0$$

$$* \frac{1}{C} \cdot I + L \cdot \ddot{I} = 0 \quad \text{DGL 2. Ordnung}$$

Lösung ist Sinusfunktion da nach 2-fachem Ableiten die Funktion sich selbst mit negativem Vorzeichen ergibt.

$$I = \hat{I} \cdot \sin(\omega t) \quad \ddot{I} = -\hat{I} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$$

Einsetzen in \* ergibt:

$$\frac{1}{C} \cdot \hat{I} \cdot \sin(\omega t) - L \cdot \hat{I} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$$

$$\left( \frac{1}{C} - L \cdot \omega^2 \right) \hat{I} \cdot \sin(\omega t) = 0$$

Gleichung wird  
erfüllt wenn

$$\frac{1}{C} \cdot L \cdot \omega^2 = 0 \quad \rightarrow \frac{1}{C} - L \cdot \omega^2 = 0$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad ; \quad \omega = 2\pi f$$

$$2\pi f \cdot S = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

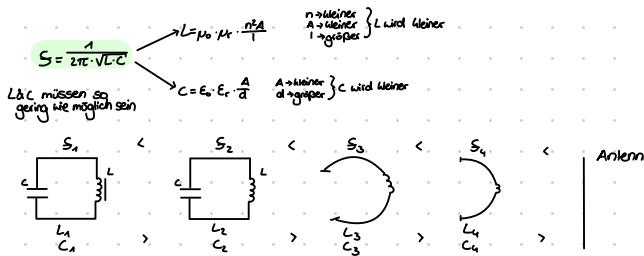
Thompson'sche Formel

$$S = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

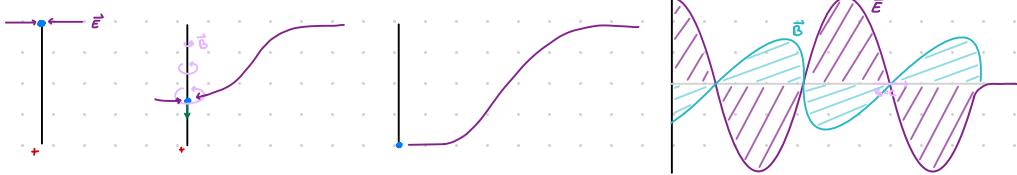
$$L=500 \mu H; C=50 \mu F \rightarrow S=1,01 \text{ Wb}$$

## Entstehung einer elektromagnetischen Welle

Wie erreichen wir hohe Frequenzen im Schwingkreis?



### Entstehung



Durch den ständigen schnellen Wechsel der Polarität  
der Antenne, löst sich die elektrische Welle von der Antenne  
und wird in den Raum abgestrahlt.

## 7.2.4 Elektromagnetische Wellen

Die 1888 von Heinrich HERTZ erstmals erzeugten und nachgewiesenen elektromagnetischen Wellen werden im Folgenden experimentell untersucht.

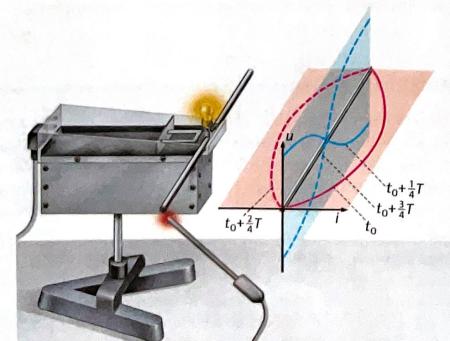
**Versuch 1:** Für die Experimente ist ein Hochfrequenz-Oszillator fest aufgebaut, dessen Frequenz zu  $f = 434 \text{ MHz}$  gemessen wird. Auf den HF-Oszillator wird ein Metallstab gelegt, der in der Mitte unterbrochen ist. Die Unterbrechung ist mit einem Glühlämpchen überbrückt (Abb. 292.1). Am Metallstab entlang wird ein Sensor für ein hochfrequentes elektrisches Feld geführt. Der Feldsensor besteht aus einer Glimmlampe, die über einen  $10 \text{ M}\Omega$ -Widerstand an die Wechselspannung des elektrischen Netzes angeschlossen ist. Die Netzspannung zündet die Glimmlampe, wegen des hohen Widerstandes leuchtet sie aber nur schwach.

**Beobachtung:** Das in der Mitte des Stabes eingebaute Glühlämpchen leuchtet, obwohl kein geschlossener Stromkreis besteht. Die Sensorlampe leuchtet hell auf, wenn sie an die Enden des Stabes gebracht wird.

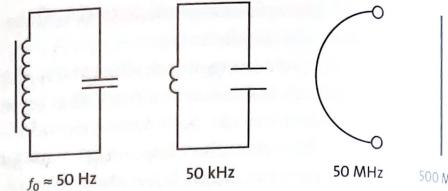
**Erklärung:** Der HF-Oszillator induziert im Stab einen hochfrequenten Wechselstrom von  $434 \text{ MHz}$ , der das Glühlämpchen leuchten lässt. Im Stab ist eine elektrische Schwingung angeregt, die die Enden des Stabes periodisch positiv und negativ auflädt. Dadurch entsteht um den Stab ein hochfrequentes elektrisches Wechselfeld, dessen Feldstärke an den Stabenden besonders groß ist. Dieses Feld regt in der Glimmlampe des Sensors eine intensive Gasentladung an. ▶

Ein zu hochfrequenten elektrischen Schwingungen angeregter Metallstab heißt **Hertz'scher Dipol**.

Wegen seiner Form wird der Hertz'sche Dipol als *offener Schwingkreis* bezeichnet. Es lässt sich eine lückenlose Folge von Schwingkreisen bilden, beginnend mit



292.1 Ein zu Schwingungen angeregter Hertz'scher Dipol

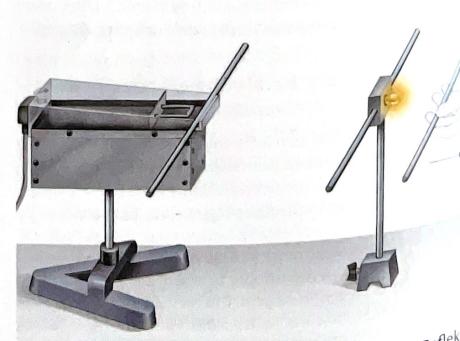


292.2 Schwingkreise mit zunehmender Eigenfrequenz

Schwingkreisen aus Spulen mit Eisenkern und Kondensatoren großer Kapazität, die im akustischen Frequenzbereich schwingen, bis zu Schwingkreisen im MHz-Bereich, wo die Spule nur noch aus einem Bügel und der Kondensator aus kleinen Platten besteht (Abb. 292.2). Beim Hertz'schen Dipol bleibt schließlich nur noch ein Metallstab als „Spule“ übrig. Die Enden des Stabes bilden den „Kondensator“. Die Maximalwerte von Strom und Spannung haben beim Hertz'schen Dipol die gleiche Phasendifferenz einer Viertelperiode wie bei einem niederfrequenten Schwingkreis (Abb. 292.1).

**Versuch 2:** Auf den HF-Oszillator wird ein Hertz'scher Dipol als *Sender* gelegt. Der zuerst benutzte Dipol mit Glühlampe wird als *Empfänger* in einiger Entfernung aufgestellt. Hinter den Stab mit Lampe wird ein weiterer Hertz'scher Dipol als *Reflektor* gehalten und langsam vom Empfänger weg bewegt (Abb. 292.3).

**Beobachtung:** Die Empfängerlampe leuchtet, wenn Sender- und Empfängerdiopol parallel sind. Beim Entfernen des Reflektors vom Empfänger nimmt die Helligkeit der Lampe zu und erreicht bei etwa 15 bis 20 cm Abstand ein Maximum. Beim weiteren Entfernen nimmt die Helligkeit der Lampe ab, bis sie bei 35 cm Abstand erlischt. Bei weiterem Entfernen leuchtet die Lampe wieder auf, und zwar am hellsten, wenn der Reflektor 35 cm von der Stelle entfernt ist, bei der die Lampe zuerst am hellsten leuchtete.



292.3 Hertz'sche Dipole als Sender, Empfänger und Reflektor

**Erklärung:** Der auf dem Oszillator liegende Sendedipol wird zu Schwingungen angeregt. Das davon ausgehende hochfrequente Feld regt den Empfängerdipol ebenfalls zu Schwingungen an, sodass dessen Lampe leuchtet. Die Beobachtungen beim Entfernen des Reflektors können mit der Interferenz von Wellen erklärt werden ( $\rightarrow$  3.4.5). Der Hertz'sche Dipol auf dem Oszillatator sendet eine Welle aus, die sowohl vom Empfänger als auch vom Reflektor empfangen wird. Der Reflektordipol wird von der Welle zu Schwingungen angeregt und sendet – weil ohne Lampe ungedämpft – ebenfalls eine Welle aus. Diese Welle läuft zum Teil zum Sender zurück und interferiert mit der ursprünglichen Welle. Zwischen Sender und Reflektor bildet sich eine stehende Welle mit Schwingungsbäuchen und Schwingungsknoten. Wird der Reflektor bewegt, gelangt die Lampe abwechselnd in Schwingungsbäuche und Schwingungsknoten, sodass sie abwechselnd hell aufleuchtet und ausgeht. Bäuche und Knoten haben einen Abstand von einer halben Wellenlänge, sodass sich aus  $\lambda/2 \approx 35 \text{ cm}$  die Wellenlänge zu  $\lambda \approx 0,7 \text{ m}$  ergibt. Mit der gemessenen Frequenz  $f = 434 \text{ MHz}$  folgt aus der Wellengleichung  $v = f\lambda$  ( $\rightarrow$  3.3.4) für die Ausbreitungsgeschwindigkeit

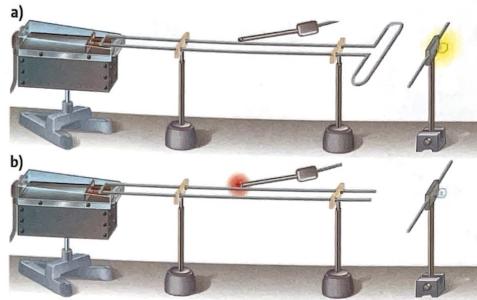
$$v = f\lambda = 434 \text{ MHz} \cdot 0,7 \text{ m} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = c. \blacktriangleleft$$

Ein Hertz'scher Dipol strahlt eine Welle ab, die sich mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  ausbreitet.

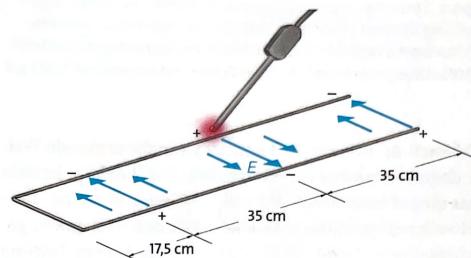
Die in den Versuchen benutzten Hertz'schen Dipole sind etwa eine halbe Wellenlänge lang. Eine Verlängerung oder eine Verkürzung verschlechtert die Abstrahlung bzw. den Empfang. Die Hertz'schen Dipole sind demnach auf eine halbe Wellenlänge abgestimmt.

Mit einer auf den deutschen Physiker Ernst LECHER zurückgehenden Versuchsanordnung kann die Welle genauer untersucht werden. Bei der sogenannten Lecher-Leitung sind zwei dünne Messingrohre parallel in 2 cm Abstand verlegt. Zur besseren elektrischen Leitfähigkeit sind die Rohre versilbert, denn bei hohen Frequenzen fließt der Strom nur an der Oberfläche, da die Induktion ein Eindringen in das Metall verhindert (sogenannter Skineffekt; skin, engl.: Haut). Die beiden parallelen Rohre sind an einem Ende miteinander verbunden, während das andere Ende offen ist.

**Versuch 3:** Das kurzgeschlossene Ende der Lecherleitung befindet sich über dem 434 MHz-Oszillatator. Vor dem offenen Ende der Leitung steht der Empfänger. Auf das offene Ende ist zunächst ein Schleifendipol gesteckt (Abb. 293.1a). Dann wird der Schleifendipol entfernt (Abb. 293.1b). In beiden Fällen wird die Lecher-Leitung mit dem Feldsensor untersucht.



293.1 a) Lecher-Leitung mit Schleifen- und Empfängerdiopol  
b) Lecher-Leitung mit offenem Ende



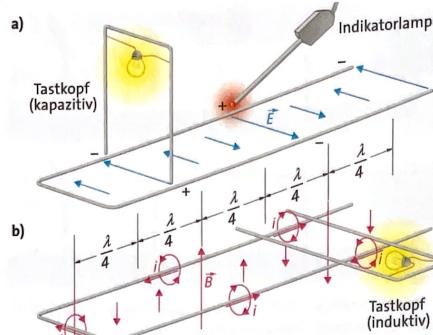
293.2 Stehende elektrische Welle auf der Lecher-Leitung

**Beobachtung:** Mit aufgestecktem Schleifendipol leuchtet die Empfängerlampe, ohne Schleifendipol nicht. Die Sensorlampe leuchtet mit Schleifendipol an keiner Stelle der Leitung, während sie ohne Schleifendipol am offenen Ende und an zwei weiteren Stellen im Abstand von 35 cm leuchtet. Das zweite Aufleuchten ist 17,5 cm vom geschlossenen Ende entfernt (Abb. 293.2).

**Erklärung:** Der Oszillatator regt am kurzgeschlossenen Ende eine Welle an, die von den parallelen Rohren zum Schleifendipol geleitet und dort abgestrahlt wird. Bei abgezogenem Schleifendipol wird die Welle am offenen Ende reflektiert, sodass sich hin- und herlaufende Welle zu einer stehenden Welle überlagern. Der Feldsensor weist die stehende elektrische Welle nach: Am offenen Ende und in Abständen von einer halben Wellenlänge  $\lambda/2 \approx 35 \text{ cm}$  bilden sich Schwingungsbäuche der elektrischen Feldstärke. Am geschlossenen Ende tritt ein Schwingungsknoten auf, d.h. die elektrische Feldstärke wird am geschlossenen Ende mit dem Phasensprung  $\pi$  reflektiert. Am offenen Ende wird die Welle ohne Phasensprung reflektiert, sodass sich dort ein Schwingungsbaukasten bildet.  $\blacktriangleleft$

Auf der Lecher-Leitung kann eine stehende Welle mit Schwingungsbäuchen und -knoten der elektrischen Feldstärke nachgewiesen werden.

## Elektrische Schwingungen und elektromagnetische Wellen



**294.1** Stehende elektromagnetische Wellen auf einer Lecher-Leitung können mit einem Tastkopf nachgewiesen werden:  
a) Nachweis des elektrischen Feldes mit aufrechtem Tastkopf  
b) Nachweis des magnetischen Feldes mit liegendem Tastkopf

**Versuch 4:** Mit einem Tastkopf kann die stehende Welle ebenfalls nachgewiesen werden. Der Tastkopf besteht aus einem kurzen Stück Lecher-Leitung, das eine Viertelwellenlänge misst. Mit einem offenen und einem geschlossenen Ende stellt diese kurze Lecher-Leitung einen abgestimmten Schwingkreis für die Sendefrequenz von 434 MHz dar. Zum Nachweis der Schwingung ist am geschlossenen Ende ein Glühlämpchen parallel geschaltet. Der Tastkopf wird zunächst aufrecht (**Abb. 294.1a**), dann liegend (**Abb. 294.1b**) über die Lecher-Leitung geführt.

**Beobachtung:** Wird der Tastkopf aufrecht über die Lecher-Leitung geführt, leuchtet das Glühlämpchen an den Stellen auf, an denen zuvor in Versuch 3 der Feldsensor die Schwingungsbäuche des elektrischen Feldes nachgewiesen hat.

Wird der Tastkopf liegend über die Leitung geführt, leuchtet das Lämpchen in der Mitte zwischen den Schwingungsbäuchen des elektrischen Feldes auf.

**Erklärung:** Befinden sich die Enden des aufrecht gehaltenen Tastkopfs in einem hochfrequenten elektrischen

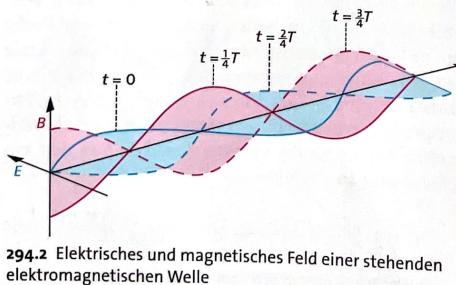
Feld, so regt dieses den Tastkopf zu Schwingungen an. Mit dem liegenden Tastkopf werden Schwingungsbäuche des magnetischen Feldes nachgewiesen. Ein hochfrequentes Magnetfeld vermag in dieser Stellung den Schwingkreis anzuregen, indem es den Tastkopf, der eine Spule mit einer Windung bildet, durchsetzt. Am geschlossenen Ende der Lecher-Leitung bildet sich ein Schwingungsbau des magnetischen Feldes, da dort ein Strom fließen kann. Am geschlossenen Ende wird das Magnetfeld ohne Phasensprung reflektiert, während am offenen Ende ein Phasensprung  $\pi$  erfolgt. ▲

Damit ist das vollständige Bild von stehenden elektromagnetischen Wellen bekannt (**Abb. 294.2**).

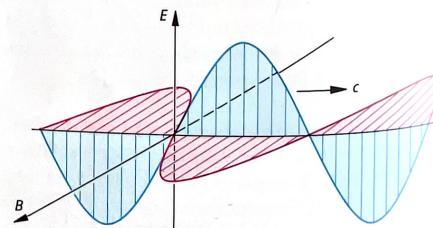
Bei stehenden elektromagnetischen Wellen kann eine elektrische und eine magnetische Feldkomponente nachgewiesen werden. Die Schwingungsbäuche des elektrischen und des magnetischen Feldes sind um  $\lambda/4$  gegeneinander verschoben.

Aus den Beobachtungen bei stehenden Wellen kann auf die Eigenschaften von laufenden elektromagnetischen Wellen geschlossen werden (**Abb. 294.3**): Elektrischer Feldvektor  $\vec{E}$  und magnetischer Feldvektor  $\vec{B}$  stehen ebenso wie bei der stehenden Welle senkrecht zueinander, sind aber bei der laufenden Welle in Phase. Die Ausbreitungsrichtung, die senkrecht auf  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  steht, kann mit der **Drei-Finger-Regel** ermittelt werden ( $\rightarrow$  6.1.3): Zeigt der abgespreizte rechte Daumen in  $\vec{E}$ , der Zeigefinger in  $\vec{B}$ -Richtung, so gibt der abgespreizte Mittelfinger die Richtung von  $\vec{c}$  an.

Diese Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen sind in Übereinstimmung mit den Maxwell'schen Gleichungen, aus denen in  $\rightarrow$  6.3.7 die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen hergeleitet wird. Dort wird gezeigt, dass zwischen den Feldstärken die Beziehung  $E = Bc$  gilt und die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  aus den Feldkonstanten  $\epsilon_0$  und  $\mu_0$  mit der Gleichung  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  berechnet werden kann.



**294.2** Elektrisches und magnetisches Feld einer stehenden elektromagnetischen Welle



**294.3** Elektrische Feldstärke  $E$  und magnetische Feldstärke  $B$  einer nach rechts laufenden elektromagnetischen Welle

Gekoppelte elektrische und magnetische Felder, die sich zeitlich und räumlich sinusförmig ändern, bilden eine **elektromagnetische Welle**.

Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  aus. Dabei stehen die zu einander senkrechten Feldvektoren  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$  senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Für die Beträge  $E$  und  $B$  der Feldvektoren gilt in jedem Moment und an jedem Ort die Beziehung

$$\vec{E} = \vec{B} c.$$

Lichtgeschwindigkeit  $c$ , elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0$  und magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  sind durch folgende Gleichung miteinander verbunden:

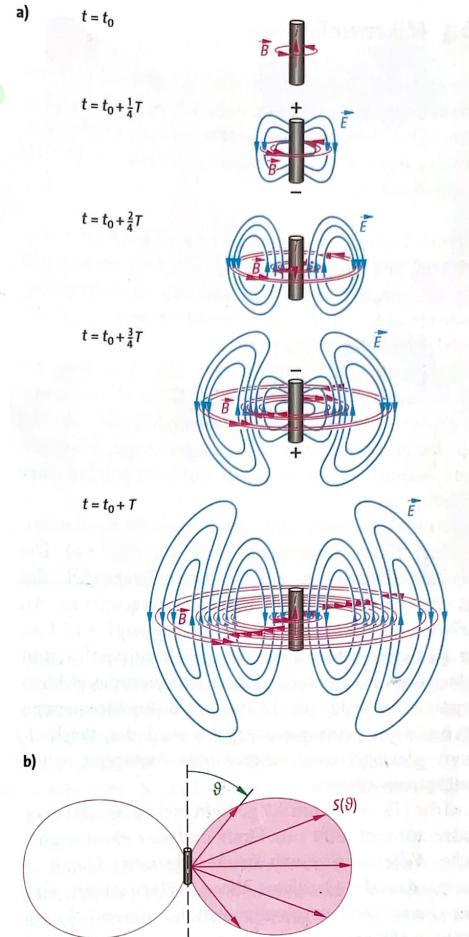
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Für die Intensität  $S$  (gemessen in  $\text{W/m}^2$ ) gilt mit den Amplituden  $\hat{E}$  und  $\hat{B}$  ( $\rightarrow$  6.3.7):

$$S = \frac{1}{2\mu_0} \hat{E} \hat{B} = \frac{1}{2\mu_0} \hat{E} \frac{\hat{E}}{c} = \frac{1}{2c\mu_0} \hat{E}^2$$

#### Abstrahlung von einem Hertz'schen Dipol

In Abb. 295.1a) sind Bilder von elektrischen und magnetischen Feldlinien wiedergegeben, wie sie zuerst von Heinrich HERTZ gezeichnet wurden. Zur Zeit  $t = t_0$  fließt ein hochfrequenter Wechselstrom  $i$  mit maximaler Stärke in einem Dipolstab nach oben. Dieser Strom, der von einem magnetischen Feld  $B$  umgeben ist, hat nach einer Viertelschwingungsdauer die Stabenden aufgeladen. Von den unterschiedlich aufgeladenen Enden geht ein elektrisches Dipolfeld  $E$  aus, das sich ebenso wie das magnetische Feld vom Dipol mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  entfernt. Nach einer weiteren Viertelschwingungsdauer sind die Stabenden wieder ungeladen, dafür fließt jetzt der maximale Strom in umgekehrter Richtung. Obwohl es nun keine Ladungen mehr gibt, ist das elektrische Feld nicht verschwunden: Das elektrische Feld hat sich vom Dipol abgeschnürt und bildet *geschlossene* Feldlinien, wie sie vom induzierten Feld bekannt sind ( $\rightarrow$  6.3.3). Auch das zuerst erzeugte magnetische Feld ist nach der Stromumkehr nicht verschwunden, sondern bleibt erhalten und entfernt sich zusammen mit dem elektrischen Feld: Eine elektromagnetische Welle hat sich gebildet und breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Abb. 295.1b) zeigt die Strahlungscharakteristik des Dipols.



295.1 a) Abstrahlung einer elektromagnetischen Welle durch einen Hertz'schen Dipol (Die Bilder sind rotations-symmetrisch zur Dipolachse zu denken.)

b) Strahlungscharakteristik eines Hertz'schen Dipols: Die Länge der Pfeile gibt die Intensität  $S$  der Strahlung an, die Dipol unter dem Winkel  $\vartheta$  zur Dipolachse aussendet.

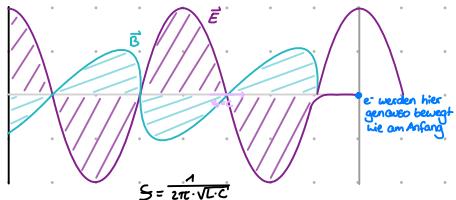
#### Aufgaben

1. Wenden Sie die Drei-Finger-Regel auf die Abstrahlung eines Hertz'schen Dipols an (Abb. 295.1a).
2. Der Maximalwert der elektrischen Feldstärke einer Radio-welle betrage 11 V/m. Berechnen Sie den Maximalwert der magnetischen Feldstärke und die Intensität der Welle.
3. Ein Sender strahle mit einer Richtantenne über eine Abstrahlfläche von  $A = 5 \text{ m}^2$  eine ebene Welle mit der Leistung  $P = 850 \text{ kW}$  ab. Berechnen Sie die Amplituden der elektrischen und magnetischen Feldstärke.
4. Bei Fernseh- und UKW-Antennen werden Hertz'sche Dipole als Direktoren und Reflektoren verwendet. Berechnen Sie die Länge eines Hertz'schen Dipols, der auf den UKW-Kanal 11 ( $f = 90,3 \text{ MHz}$ ) abgestimmt ist.
5. Das magnetische Feld einer elektromagnetischen Welle sei gegeben durch  $B_y = B_0 \sin 2\pi(x/\lambda + t/T)$ ,  $B_x = B_z = 0$ . Geben Sie die Gleichung für das zugehörige elektrische Feld  $E$  an. Skizzieren Sie in einem dreidimensionalen Koordinatensystem  $B$  und  $E$  für  $t = 0$  und  $t = T/8$ .

1 Dauern:  $\vec{E}$  / AbstehungZeigefinger:  $\vec{B}$ Mittelfinger:  $\vec{z}$ 2 geg:  $\hat{E} = M \frac{V}{m}$ ;  $L = 299\ 792\ 458 \frac{m}{s}$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{A}$ ges:  $S = \frac{1}{2\pi c} \cdot \hat{E}^2$ ;  $\hat{B} = \frac{S \cdot 2\pi c}{\hat{E}}$ 

$$\text{Lsg: } S = \frac{(M \frac{V}{m})^2}{2 \cdot 299\ 792\ 458 \frac{m}{s} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{A}} \approx 0,16 \frac{V}{m}$$

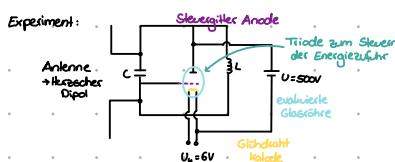
$$\hat{B} = \frac{0,16 \frac{V}{m} \cdot 2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{A}}{11 \frac{Vs}{m}} = 3,66 \cdot 10^{-8} T$$



Durch den ständigen schnellen Wechsel der Polarität der Antenne.

lässt sich die elektrische Welle von der Antenne und wird in den Raum abgestrahlt.

## Der Herz'sche Dipol



Ist das Steuergitter negativ geladen, gelangt die vom Glimmdraht freigesetzten Elektronen nicht an die Anode.

Erst wenn das Steuergitter positiv geladen ist, entwickelt sich ein Stromfluss von der Kathode zur Anode.

In diesem Moment werden auf die negativ geladene Seite noch weitere Elektronen aufgebracht.

→ ungedämpftes, offenes LC-Schwingkreis

geg.:  $d = 4\text{ cm} = 0,04\text{ m}$ ;  $l = 4,2\text{ cm} = 0,042\text{ m}$ ;  $n = 100$ ;  $C = 100\text{ pF} = 1 \cdot 10^{-10}\text{ F}$ ;  $\mu = 1$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{A}$ ges:  $\lambda = \frac{c}{S}$ ;  $S = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ ;  $L = \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{\pi n^2}{1}$ ;  $A = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi$ 

$$\text{Lsg: } L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{A} \cdot \frac{\left(\frac{100}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 100^2}{0,042\text{ m}} \approx 3,76 \cdot 10^{-6}\text{ H}$$

$$S = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^{-10}\text{ F} \cdot 3,76 \cdot 10^{-6}\text{ H}} \approx 820\ 778,95\text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{299\ 792\ 458 \frac{m}{s}}{820\ 778,95\text{ Hz}} \approx 365,25\text{ m}$$

## S. 289 Nr. 2, 3

2 geg:  $n = 340$ ;  $l = 0,6\text{ m}$ ;  $d = 0,08\text{ m}$ ;  $C = 0,1\text{ pF} = 1 \cdot 10^{-11}\text{ F}$ ges:  $S = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ ;  $L = \mu_0 \cdot \frac{(\frac{d}{2})^2 \pi \cdot n^2}{l}$ 

$$\text{Lsg: } L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{A} \cdot \frac{\left(\frac{0,08}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 340^2}{0,6\text{ m}} = 1,22 \cdot 10^{-3}\text{ H}$$

$$S = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^{-11}\text{ F} \cdot 1,22 \cdot 10^{-3}\text{ H}} = 455,66\text{ Hz}$$

3 geg:  $C = 47\text{ pF} = 4,7 \cdot 10^{-11}\text{ F}$ ;  $S = 3,7\text{ kHz} = 3,7 \cdot 10^3\text{ Hz}$ ges:  $L = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ ;  $1 \cdot 2\pi \cdot 10^{-11}$ 

$$\sqrt{LC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^{-11}}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 10^{-11})^2 \cdot C}$$

$$\text{Lsg: } L = \frac{1}{(2\pi \cdot 10^{-11})^2 \cdot 4,7 \cdot 10^{-11}\text{ F}} \approx 3,84 \cdot 10^{-2}\text{ H}$$

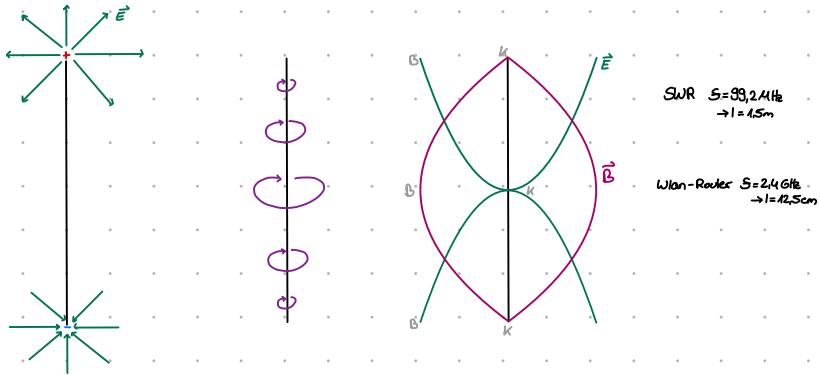
## S. 297 Nr. 2

geg:  $d = 1,24\text{ cm} = 0,0124\text{ m}$ ;  $C = 299\ 792\ 458 \frac{m}{s}$ ges:  $\lambda = d$ ;  $S = \frac{c}{\lambda}$ Lsg:  $\lambda = 0,0124\text{ m} = 0,0124\text{ m}$ 

$$S = \frac{299\ 792\ 458 \frac{m}{s}}{0,0124\text{ m}} \approx 2,42 \cdot 10^{10}\text{ Hz}$$

# Der Herz'sche Dipol und die Antennenlänge

8.5.2023



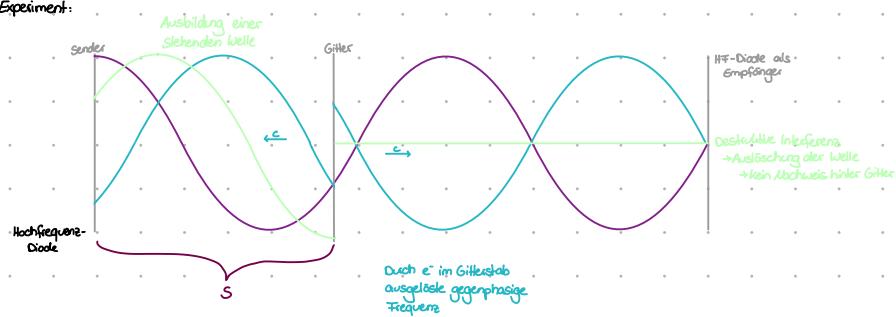
Auf der Antenne bildet sich eine stehende Welle aus. Daher ist die optimale Antennenlänge zum Senden und Empfangen  $l = \frac{\lambda}{2}$ .

## Die Eigenschaften der Mikrowelle

12.5.2023

Als Mikrowellen bezeichnen wir elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von etwa 10<sup>8</sup>-10<sup>9</sup> Hz.

Experiment:



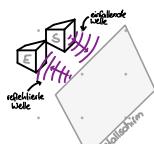
→ Die Mikrowelle wird von Anfang an als polarisierte Welle ausgestrahlt.



Im ersten Experiment steht der elektrische Feldvektor parallel zu den Gitterstäben. Somit fällt die einfallende elektromagnetische Welle durch die frei beweglichen e- in den Metallstäben eine gegenphasig orientierte neue elektromagnetische Welle aus. Diese interferiert hinter dem Gitter destruktiv mit der Primärwelle und lässt diese völlig aus. Dagegen kommt es zwischen Gitter und Sender zu einer stehenden Welle.

Dreht man jedoch das Metallgitter in einem speziellen Winkel zu dem elektrischen Feldvektor, so wird der parallele Anteil des Feldvektors ausgeschaltet und nur der senkrechte Teil bleibt erhalten.

Somit ist eine elektromagnetische Welle polarisierbar.



Mikrowellen werden an Metallkörpern reflektiert.

Dabei gilt: Einfallswinkel=Ausfallwinkel

## Elektrische Schwingungen und elektromagnetische Wellen

## 7.2.5 Mikrowellen

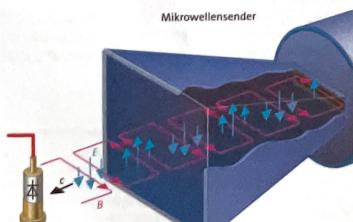
Versuche mit Mikrowellen sind geeignet, die Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen zu untersuchen. Der benutzte Generator erzeugt elektrische Schwingungen mit einer Frequenz von etwa  $f = 10 \text{ GHz}$  (1 Gigahertz =  $10^9 \text{ Hz}$ ).

**Versuch 1:** An den Generator ist eine trichterförmige Hornantenne angeschlossen. Vor der Antenne befindet sich in einigen Metern Abstand eine Hochfrequenzdiode (HF-Diode), die mit einem Strommesser ( $\mu\text{A}$ -Bereich) verbunden ist (Abb. 296.1).

**Beobachtung:** Das Messgerät zeigt einen Ausschlag, der sich bei Annäherung der HF-Diode an die Hornantenne vergrößert. Wird die aufrecht stehende Diode um die von der Hornantenne zur Diode gerichtete Achse gedreht, nimmt der Ausschlag ab und wird null bei einer Drehung um  $90^\circ$ .

**Erklärung:** Der Generator sendet über die Hornantenne eine elektromagnetische Welle aus (→ 7.2.4). Die HF-Diode besteht aus einem kleinen Drahtstück, das mit einer Kontaktstelle auf einen Halbleiter aufgesetzt ist. An der Kontaktstelle bildet sich ein pn-Übergang (→ 12.1.3), der als Gleichrichter wirkt. Ist der Draht parallel zum elektrischen Feldvektor gerichtet, induziert das elektromagnetische Feld im Draht einen hochfrequenten Wechselstrom. Am pn-Übergang wird der Wechselstrom gleichgerichtet, sodass das Messgerät einen Gleichstrom anzeigt.

Wird die HF-Diode um  $90^\circ$  gedreht, steht der elektrische Feldvektor senkrecht zum Draht und die elektromagnetische Welle kann keinen Strom induzieren. Damit ist gezeigt, dass der Oszillator über die Hornantenne eine polarisierte Transversalwelle abstrahlt, deren Feldlinienbild in Abb. 296.1 dargestellt ist. ▲



296.1 Ein HF-Oszillator strahlt über eine Hornantenne eine Mikrowelle ab, deren elektromagnetisches Feld in einer Hochfrequenz-Diode einen Strom induziert.

**Versuch 2:** Eine HF-Diode, die in eine Hornantenne eingebaut ist, wird als Empfänger dem Oszillator gegenübergestellt (wie Abb. 297.1a) ohne Gitter).

**Beobachtung:** Das Stommessgerät zeigt einen großen Strom als zuvor an.

**Erklärung:** Die Hornantenne des Empfängers leitet die gesamte auf die Öffnung einfallende Mikrowelle zur Diode. ▲

**Versuch 3:** Die Mikrowelle wird senkrecht auf eine dünne, ebene Metallwand gerichtet. Neben der Hornantenne des Senders steht, ebenfalls zur Metallwand gerichtet, die Antenne des Empfängers.

**Beobachtung:** Wie in Versuch 1 wird eine Mikrowelle empfangen. Die Anordnung stellt das Prinzip einer Radaranlage dar.

**Erklärung:** Die Mikrowelle wird an der Metallwand reflektiert. Dies geschieht dadurch, dass in der Metallwand wie zuvor beim Draht in der HF-Diode ein hochfrequenter Wechselstrom von der elektromagnetischen Welle induziert wird. Dieser Wechselstrom stellt einen großflächigen Oszillator dar, der eine elektromagnetische Welle abstrahlt. Hinter der Metallwand kann keine Welle nachgewiesen werden. Dies zeigt, dass der Wechselstrom nicht in der gesamten Platte fließt: Bei hohen Frequenzen verhindert die Induktion ein Eindringen der Welle in das Metall (Skin-Effekt). ▲

**Versuch 4:** Zwischen die beiden gegenüberstehenden Hornantennen von Sender und Empfänger wird ein Gitter aus Metallstäben gebracht. Das Gitter wird in der Gitterebene gedreht (Abb. 297.1a).

**Beobachtung:** Stehen die Stäbe horizontal und damit senkrecht zum elektrischen Feldvektor, zeigt sich kein Einfluss auf die Anzeige des an die HF-Diode angeschlossenen Strommessers. Stehen die Gitterstäbe vertikal und damit parallel zum elektrischen Feldvektor, wird hinter dem Gitter keine Mikrowelle empfangen. Vor den Gitterstäben können mit einer beweglichen HF-Diode Intensitätsmaxima und -minima nachgewiesen werden, wobei die Maxima einen Abstand von 1,5 cm haben. Bei den Gitterstäben tritt ein Intensitätsminimum auf.

**Erklärung:** Die elektromagnetische Welle induziert bei Parallelstellung mit dem  $E$ -Vektor in den Stäben hochfrequente Wechselströme, sodass die Stäbe als Hertz'sche Dipole elektromagnetische Wellen abstrahlen (→ 7.2.4). Einfallende und zurückgestrahlte Wellen überlagern sich wie bei der Lecher-Leitung zu einer stehenden Welle. Die Intensitätsmaxima (Schwingungsbüche) haben einen Abstand von einer halben Wellenlänge. Aus der Messung  $\lambda/2 = 1,5 \text{ cm}$  folgt für die Wellenlänge der Mikrowelle  $\lambda = 3 \text{ cm}$ . Mit der Frequenz  $f = 10 \text{ GHz}$  kann

**297.1** Einem Mikrowellensender mit Hornantenne steht ein Empfänger gegenüber. Zwischen beide Antennen wird ein Holzrahmen mit Metallstäben gebracht.

a) Die vertikal stehenden Gitterstäbe reflektieren die einfallende Mikrowelle, wenn deren elektrischer Feldvektor ebenfalls vertikal ausgerichtet ist. Vor dem Gitter lässt sich eine stehende Welle nachweisen.

b) Der um  $90^\circ$  gedrehte Empfänger weist eine Welle nach, wenn das Gitter in der Gitterebene gedreht wird.

**Elektrische Schwingungen und elektromagnetische Wellen**

die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle berechnet werden:

$$c = f\lambda = 10 \cdot 10^9 \text{ Hz} \cdot 0,03 \text{ m} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Es ist das gleiche Ergebnis, das sich in → Kap. 7.2.4 mit UKW-Wellen von  $\lambda = 70 \text{ cm}$  ergab: Elektromagnetische Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Warum kann hinter den Gitterstäben keine Welle nachgewiesen werden, obwohl die Hertz'schen Dipole auch nach hinten abstrahlen? An den Gitterstäben tritt ein Schwingungsknoten der elektrischen Feldstärke auf, d.h. die von den Gitterstäben ausgesandte Welle hat gegenüber der ankommenden Welle den Phasensprung  $\pi$ . Hinter den Gitterstäben hat die ankommende und zum Teil durch die Stäbe hindurchtretende Welle mit der von den Stäben abgestrahlten Welle die Phasendifferenz  $\pi$ , sodass sich die beiden Wellen auslöschen. ▲

**Versuch 5:** Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie in Versuch 3, die Empfängerantenne ist jedoch um  $90^\circ$  gedreht (Abb. 297.1b).

**Beobachtung:** Weder bei vertikaler noch bei horizontaler Stellung der Gitterstäbe kann ein Signal nachgewiesen werden. Wird das Gitter in der Gitterebene von der vertikalen in die horizontale Stellung gedreht, zeigt der Strommesser einen Ausschlag, der maximal ist bei einer Drehung um  $45^\circ$  und null bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$ .

**Erklärung:** Die einfallende Mikrowelle kann mit einem hochfrequent schwingenden elektrischen Feldvektor  $\vec{E}_1$  beschrieben werden, der in zwei Komponenten  $\vec{E}_1$

und  $\vec{E}_2$  parallel und senkrecht zu den Gitterstäben zerlegt wird. Die parallele Komponente  $\vec{E}_1$  wird hinter dem Gitter entsprechend Versuch 4 ausgelöscht. Die senkrechte Komponente  $\vec{E}_2$  tritt unbeeinflusst durch das Gitter. Der um  $90^\circ$  gedrehte Empfänger weist von  $\vec{E}_2$  die Komponente  $\vec{E}_2$  nach, die parallel zur Empfängerdiode gerichtet ist.

Mit Mikrowellen, deren Wellenlängen  $\lambda$  die Größenordnung Zentimeter besitzen, lassen sich die Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen wie Ausbreitung, Polarisation, Reflexion und Überlagerung zu stehenden Wellen demonstrieren. Mit einem Gitter aus Metallstäben, die als Hertz'sche Dipole wirken, kann die Vektoreigenschaft des elektrischen Feldes untersucht werden.

**Aufgaben**

1. Überprüfen Sie in Abb. 296.1 anhand der Feldvektoren des hochfrequenten elektromagnetischen Feldes, dass die Welle aus der Hornantenne herausläuft.

X Bei einer an einer Metallwand reflektierten Welle beträgt der Abstand der Intensitätsmaxima 1,24 cm. Berechnen Sie die Wellenlänge und die Frequenz der Mikrowelle.

3. In Abb. 297.1b sei  $a$  der Drehwinkel des Gitters gegenüber dem Vektor  $\vec{E}_1$  der einfallenden Welle. Geben Sie die nachgewiesene Feldkomponente  $E_2$  als Funktion des Drehwinkels  $a$  und des Vektors  $\vec{E}_1$  an. Skizzieren Sie das Ergebnis in einem Schaubild.

297

## Elektrische Schwingungen und elektromagnetische Wellen

## 7.2.5 Mikrowellen

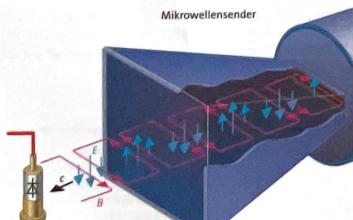
Versuche mit Mikrowellen sind geeignet, die Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen zu untersuchen. Der benutzte Generator erzeugt elektrische Schwingungen mit einer Frequenz von etwa  $f = 10 \text{ GHz}$  (1 Gigahertz =  $10^9 \text{ Hz}$ ).

**Versuch 1:** An den Generator ist eine trichterförmige Hornantenne angeschlossen. Vor der Antenne befindet sich in einigen Metern Abstand eine Hochfrequenzdiode (HF-Diode), die mit einem Strommesser ( $\mu\text{A}$ -Bereich) verbunden ist (Abb. 296.1).

**Beobachtung:** Das Messgerät zeigt einen Ausschlag, der sich bei Annäherung der HF-Diode an die Hornantenne vergrößert. Wird die aufrecht stehende Diode um die von der Hornantenne zur Diode gerichtete Achse gedreht, nimmt der Ausschlag ab und wird null bei einer Drehung um  $90^\circ$ .

**Erklärung:** Der Generator sendet über die Hornantenne eine elektromagnetische Welle aus (→ 7.2.4). Die HF-Diode besteht aus einem kleinen Drahtstück, das mit einer Kontaktstelle auf einen Halbleiter aufgesetzt ist. An der Kontaktstelle bildet sich ein pn-Übergang (→ 12.1.3), der als Gleichrichter wirkt. Ist der Draht parallel zum elektrischen Feldvektor gerichtet, induziert das elektromagnetische Feld im Draht einen hochfrequenten Wechselstrom. Am pn-Übergang wird der Wechselstrom gleichgerichtet, sodass das Messgerät einen Gleichstrom anzeigt.

Wird die HF-Diode um  $90^\circ$  gedreht, steht der elektrische Feldvektor senkrecht zum Draht und die elektromagnetische Welle kann keinen Strom induzieren. Damit ist gezeigt, dass der Oszillator über die Hornantenne eine polarisierte Transversalwelle abstrahlt, deren Feldlinienbild in Abb. 296.1 dargestellt ist. ▲



296.1 Ein HF-Oszillator strahlt über eine Hornantenne eine Mikrowelle ab, deren elektromagnetisches Feld in einer Hochfrequenz-Diode einen Strom induziert.

**Versuch 2:** Eine HF-Diode, die in eine Hornantenne eingebaut ist, wird als Empfänger dem Oszillator gegenübergestellt (wie Abb. 297.1a) ohne Gitter).

**Beobachtung:** Das Stommessgerät zeigt einen großen Strom als zuvor an.

**Erklärung:** Die Hornantenne des Empfängers leitet die gesamte auf die Öffnung einfallende Mikrowelle zur Diode. ▲

**Versuch 3:** Die Mikrowelle wird senkrecht auf eine dünne, ebene Metallwand gerichtet. Neben der Hornantenne des Senders steht, ebenfalls zur Metallwand gerichtet, die Antenne des Empfängers.

**Beobachtung:** Wie in Versuch 1 wird eine Mikrowelle empfangen. Die Anordnung stellt das Prinzip einer Radaranlage dar.

**Erklärung:** Die Mikrowelle wird an der Metallwand reflektiert. Dies geschieht dadurch, dass in der Metallwand wie zuvor beim Draht in der HF-Diode ein hochfrequenter Wechselstrom von der elektromagnetischen Welle induziert wird. Dieser Wechselstrom stellt einen großflächigen Oszillator dar, der eine elektromagnetische Welle abstrahlt. Hinter der Metallwand kann keine Welle nachgewiesen werden. Dies zeigt, dass der Wechselstrom nicht in der gesamten Platte fließt: Bei hohen Frequenzen verhindert die Induktion ein Eindringen der Welle in das Metall (Skin-Effekt). ▲

**Versuch 4:** Zwischen die beiden gegenüberstehenden Hornantennen von Sender und Empfänger wird ein Gitter aus Metallstäben gebracht. Das Gitter wird in der Gitterebene gedreht (Abb. 297.1a).

**Beobachtung:** Stehen die Stäbe horizontal und damit senkrecht zum elektrischen Feldvektor, zeigt sich kein Einfluss auf die Anzeige des an die HF-Diode angeschlossenen Strommessers. Stehen die Gitterstäbe vertikal und damit parallel zum elektrischen Feldvektor, wird hinter dem Gitter keine Mikrowelle empfangen. Vor den Gitterstäben können mit einer beweglichen HF-Diode Intensitätsmaxima und -minima nachgewiesen werden, wobei die Maxima einen Abstand von 1,5 cm haben. Bei den Gitterstäben tritt ein Intensitätsminimum auf.

**Erklärung:** Die elektromagnetische Welle induziert bei Parallelstellung mit dem  $E$ -Vektor in den Stäben hochfrequente Wechselströme, sodass die Stäbe als Hertz'sche Dipole elektromagnetische Wellen abstrahlen (→ 7.2.4). Einfallende und zurückgestrahlte Wellen überlagern sich wie bei der Lecher-Leitung zu einer stehenden Welle. Die Intensitätsmaxima (Schwingungsbüche) haben einen Abstand von einer halben Wellenlänge. Aus der Messung  $\lambda/2 = 1,5 \text{ cm}$  folgt für die Wellenlänge der Mikrowelle  $\lambda = 3 \text{ cm}$ . Mit der Frequenz  $f = 10 \text{ GHz}$  kann

297.1 Einem Mikrowellensender mit Hornantenne steht ein Empfänger gegenüber. Zwischen beide Antennen wird ein Holzrahmen mit Metallstäben gebracht.  
a) Die vertikal stehenden Gitterstäbe reflektieren die einfallende Mikrowelle, wenn deren elektrischer Feldvektor ebenfalls vertikal ausgerichtet ist. Vor dem Gitter lässt sich eine stehende Welle nachweisen.  
b) Der um  $90^\circ$  gedrehte Empfänger weist eine Welle nach, wenn das Gitter in der Gitterebene gedreht wird.

Elektrische Schwingungen und elektromagnetische Wellen

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle berechnet werden:  
 $c = f\lambda = 10 \cdot 10^9 \text{ Hz} \cdot 0,03 \text{ m} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Es ist das gleiche Ergebnis, das sich in → Kap. 7.2.4 mit UKW-Wellen von  $\lambda = 70 \text{ cm}$  ergab: Elektromagnetische Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Warum kann hinter den Gitterstäben keine Welle nachgewiesen werden, obwohl die Hertz'schen Dipole auch nach hinten abstrahlen? An den Gitterstäben tritt ein Schwingungsknoten der elektrischen Feldstärke auf, d.h. die von den Gitterstäben ausgesandte Welle hat gegenüber der ankommenden Welle den Phasensprung  $\pi$ . Hinter den Gitterstäben hat die ankommende und zum Teil durch die Stäbe hindurchtretende Welle mit der von den Stäben abgestrahlten Welle die Phasendifferenz  $\pi$ , sodass sich die beiden Wellen auslöschen. ▲

**Versuch 5:** Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie in Versuch 3, die Empfängerantenne ist jedoch um  $90^\circ$  gedreht (Abb. 297.1b).

**Beobachtung:** Weder bei vertikaler noch bei horizontaler Stellung der Gitterstäbe kann ein Signal nachgewiesen werden. Wird das Gitter in der Gitterebene von der vertikalen in die horizontale Stellung gedreht, zeigt der Strommesser einen Ausschlag, der maximal ist bei einer Drehung um  $45^\circ$  und null bei  $0^\circ$  und  $90^\circ$ .

**Erklärung:** Die einfallende Mikrowelle kann mit einem hochfrequent schwingenden elektrischen Feldvektor  $\vec{E}_1$  beschrieben werden, der in zwei Komponenten  $\vec{E}_1$

## Aufgaben

- Überprüfen Sie in Abb. 296.1 anhand der Feldvektoren des hochfrequenten elektromagnetischen Feldes, dass die Welle aus der Hornantenne herausläuft.
- Bei einer an einer Metallwand reflektierten Welle beträgt der Abstand der Intensitätsmaxima 1,24 cm. Berechnen Sie die Wellenlänge und die Frequenz der Mikrowelle.
- In Abb. 297.1b sei  $a$  der Drehwinkel des Gitters gegenüber dem Vektor  $\vec{E}_1$  der einfallenden Welle. Geben Sie die nachgewiesene Feldkomponente  $E_1$  als Funktion des Drehwinkels  $a$  und des Vektors  $\vec{E}_1$  an. Skizzieren Sie das Ergebnis in einem Schaubild.