6.3 Elektromagnetismus

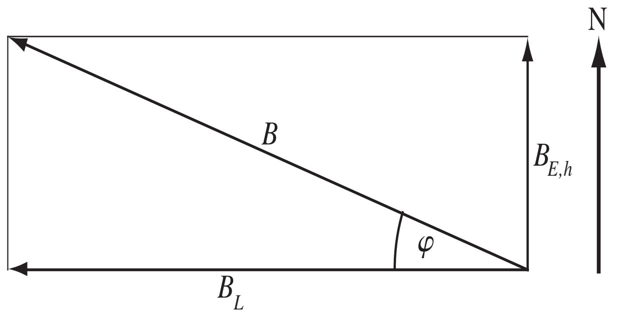
Magnetisches Feld

109

a) Das Erd-Magnetfeld zeigt geografisch von Süden nach Norden. Im Osten des stromdurchflossenen Drahtes zeigt das von ihm erzeugte Magnetfeld von Norden nach Süden. Den Abstand vom Leiter findet man aus

$$B_{E,h} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \Rightarrow r = \frac{\mu_0 I}{2\pi B_{E,h}} = 19 \text{ cm.}$$

b) 5.0 cm südlich vom Draht hat das Magnetfeld des stromdurchflossenen Drahtes die Stärke $B_L = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = 8.0 \cdot 10^{-5}$ T und zeigt von Osten nach Westen. Die Kompassnadel weicht von dieser Richtung um den Winkel $\varphi = \arctan \frac{B_{E,h}}{B_L} = 15^\circ$ nach Norden ab.



110

$I = \frac{P}{U}$;   667 A

$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$; $3.81 \cdot 10^{-5}$ T, das liegt in der Grössenordnung des Erdmagnetfelds.
Eine angebrachte Kompassnadel schlägt tatsächlich auch aus.

111

Das Netzkabel ist zweiadrig und führt den Strom sowohl zum Staubsauer hin als auch wieder zurück. Da sich die beiden Adern so nahe beieinander befinden, hebt das Magnetfeld der zurückführenden Ader dasjenige der zuleitenden Ader auf. Zudem führen beide Adern Wechselstrom. Die träge Kompassnadel könnte sich selbst bei einem einadrigen Kabel nicht dem rasch ändernden Magnetfeld angleichen.

112

$\frac{N}{l} \approx \frac{B}{\mu_0 I}$; 19.1 cm^{-1}

113

a) Widerstand des Kupferdrahts: $R = \rho_{\text{el}} \dfrac{l}{A} = \rho_{\text{el}} \dfrac{4l}{\pi d^2}$; 2.4 Ω

Stromstärke im Kupferdraht: $I = \dfrac{U}{R + R_i}$; 1.1 A

b) Anzahl Windungen: $N = \dfrac{l}{\pi D}$; 200

Länge L der Spule: $L = Nd$; 10 cm

Magnetische Flussdichte (angenähert mit der Formel für eine schlanke Spule):

$B \approx \mu_0 \dfrac{N}{L} I$; 2.9 mT

c) Das Magnetfeld der Spule ist 100-mal stärker als das Erdmagnetfeld. Der Ausschlag kann also beobachtet werden.

114

a) Die Nadel richtet sich nach dem resultierenden Feld aus. Neben dem Erdmagnetfeld erzeugt die Spule ein Feld im rechten Winkel dazu. Je stärker dieses Feld ist, desto mehr wird die Nadel abgelenkt (Vektoraddition der beiden Flussdichten).

b) Trigonometrie: $\dfrac{B_{\text{Spule}}}{B_{E,h}} = \tan\alpha$

Schlanke Spule: $B_{\text{Spule}} \approx \mu_0 \dfrac{N}{l} I$ $\qquad B_{E,h} = \dfrac{\mu_0 \frac{N}{l} I}{\tan\alpha}$; $2.1 \cdot 10^{-5}$ T

115

a) $\tan\alpha = \dfrac{B}{B_{E,h}} \Rightarrow B = B_{E,h} \tan\alpha = k \cdot I \Rightarrow \dfrac{I}{\tan\alpha} = \text{konstant}$

Da $B = B_{E,h} \tan\alpha$ ist, ist B proportional zu I, wenn $\dfrac{I}{\tan\alpha}$ konstant ist.

I	0	30 mA	60 mA	90 mA	120 mA	150 mA	180 mA
α	0	13°	25°	34°	43°	50°	55°
$I/\tan\alpha$	-	0.130 A	0.129 A	0.133 A	0.129 A	0.126 A	0.126 A

Das Verhältnis $I/\tan\alpha$ ist ziemlich konstant und beträgt (0.129 ± 0.003) A. Daher ist B proportional zu I.

b) Aus $B = B_{E,h} \cdot \tan\alpha \approx \mu_0 \dfrac{N}{l} I$ erhalten Sie mit $\dfrac{I}{\tan\alpha} = (0.129 \pm 0.003)\text{A}$

$B_{E,h} = 21.6\ \mu\text{T} \pm 0.5\ \mu\text{T}$

116

a) Die Feldlinien sind kreisförmig und verlaufen ganz im Inneren des Ringes.

b) $B \approx \mu_0 \frac{N}{l} I$; wobei l die mittlere Länge einer Feldlinie ist; $1.3 \cdot 10^{-3}$ T

117

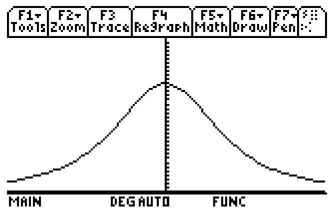
Formel für eine flache Spule: $B = \mu_0 \frac{N}{2r} I$

$I = \frac{2rB}{\mu_0 N}$; 11 A

118

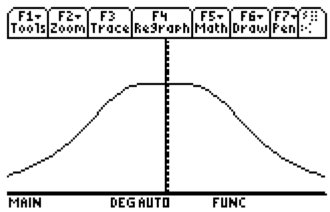
a) $B_0 = \frac{\mu_0 IN}{2R}$

b)

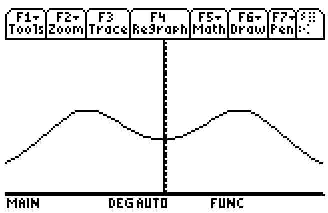


c) $B_0 = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 NI}{R}$

d)



e)

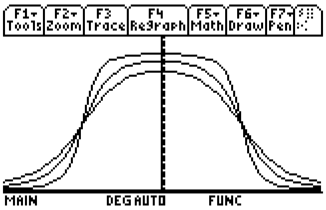


$B_0 = \frac{\sqrt{2}}{4} \frac{\mu_0 NI}{R}$

Beträgt der Spulenabstand $2R$, dann ist die magnetische Flussdichte im Zentrum in z-Richtung inhomogen (Fall e)).
Beträgt der Spulenabstand R, dann ist das Magnetfeld im Zentrum in z-Richtung homogen (Fall d)).

119

a) $B_0 = \frac{\mu_0 IN}{\sqrt{l^2 + d^2}}$ (dies geht für schlanke Spulen in $B \approx \frac{\mu_0 IN}{l}$ über) b)



c) $B_0 = \dfrac{\mu_0 IN}{\sqrt{4l^2 + d^2}}$, dies geht für schlanke Spulen in $B \approx \dfrac{\mu_0 IN}{2l}$ über, das heisst, das Magnetfeld ist am Ausgang von schlanken Spulen nur halb so gross wie im Zentrum.

d) $\dfrac{d}{l} \geq 0.14$

Kraft auf Leiter im Magnetfeld

120

a) $s = N\pi D = 25\text{ m}$

b) $R = \rho \dfrac{4s}{\pi d^2} = 8.5\ \Omega$

c) $I = \dfrac{U}{R} = 0.31\text{A}$

d) $F = IsB = 0.15\text{N}$

121

a) Die Lorentzkraft ist maximal, wenn die Leitung von Ost nach West verläuft.
Die Lorentzkraft ist null, wenn die Leitung von Nord nach Süd verläuft.

b) $F = IsB$; 0.38 N

c) Nein, die Lorentzkraft ist viel kleiner als die Gewichtskraft.

122

Der Strom durch die Aufhängung erzeugt keine vertikale Kraftkomponente. Einzig das horizontale Leiterstück erzeugt eine vertikale Kraftkomponente.

$$F = IsB = \Delta m \cdot g \Rightarrow B = \frac{\Delta mg}{Is} = 0.34\text{ T}$$

123

a) $F = N_1 I_1 s_1 \mu_0 \dfrac{N_2 I_2}{l_2} \Rightarrow \mu_0 = \dfrac{Fl_2}{N_2 I_2 N_1 I_1 s_1}$; $1.23 \cdot 10^{-6}\text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$

b) $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$; Abweichung nur rund 2.2 %

124

a) Am Ort des zweiten Drahtes erzeugt der erste Draht ein Magnetfeld mit der Stärke $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$.

In diesem Magnetfeld erfährt der zweite Draht die Lorentz-Kraft $F = IsB = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{s}{r} I^2$.

Mit $s = r = 1$ m, $I = 1$ A und $F = 2 \cdot 10^{-7}$ N erhält man $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\mathrm{VsA^{-1}m^{-1}}$ q.e.d.

b) Im ersten Versuch stossen sich die Drähte gegenseitig ab, im zweiten ziehen sie sich gegenseitig an.

c) Mit $r = s = 1.0$ cm und $I = 50$ A erhält man $F = 0.50$ mN, eine schwache, jedoch gut beobachtbare Wirkung (siehe Abbildung bei der Aufgabe im Buch).

125

a) Wenn die Normale zur Spulenebene senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes steht, tritt das grösste Drehmoment auf. Die längeren Rechteckseiten erfahren antiparallele Kräfte, die ein Drehmoment um die Drehachse erzeugen.

b) $M_{\max} = Fa = NbIBa = NI\Phi$

Der magnetische Fluss Φ durch die Spule ist $\Phi = abB = 3.6 \cdot 10^{-6}$ Vs.

Das maximale Drehmoment beträgt $3.6 \cdot 10^{-6}$ Nm.

c) $M = M_{\max} \cdot \sin\alpha = 1.8 \cdot 10^{-6}$ Nm

d) Es tritt kein Drehmoment mehr auf. Alle 4 Seiten des Rechtecks erfahren Kräfte zum Zentrum des Rechtecks hin. Das Magnetfeld versucht die Spule zu ihrem Mittelpunkt hin zu kontrahieren oder vom Mittelpunkt weg zu expandieren, je nach Stromrichtung.

Kraft auf Teilchen im Magnetfeld

126

a) $E_{\mathrm{el}} = E_{\mathrm{kin}},\; eU = \frac{1}{2} m v^2 \Rightarrow v = \sqrt{2 \frac{e}{m_e} U}$; $8.6 \cdot 10^6$ m/s

b) $evB = m_e \frac{v^2}{r} \Rightarrow B = \frac{m_e}{e} \frac{v}{r}$; 1.2 mT

127

Lorentzkraft = Zentripetalkraft: $eBv = m_e \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \frac{eBr}{m}$

Die Geschwindigkeit v erhält man auch aus der Beziehung $eU = \frac{m_e}{2} v^2 \Rightarrow v = \sqrt{2 \frac{e}{m_e} U}$.

Setzen wir die beiden Ausdrücke für die Geschwindigkeit gleich, so erhalten wir daraus
$\frac{e}{m_e} = \frac{2U}{B^2 r^2}$; $1.8 \cdot 10^{11}$ C/kg

128

Lorentzkraft = Zentripetalkraft: $qBv = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \frac{qBr}{m}$

Mit $q = 2 \cdot 1.60 \cdot 10^{-19}$ C und $m = 4u = 6.6 \cdot 10^{-27}$ kg erhält man $v = 4.9 \cdot 10^6$ m/s.

129

a) $r = \frac{m_p v}{eB}$ b) $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m_p}{eB} \neq f(r, v, E_{\text{kin}})$

130

a) $v = \sqrt{\frac{2E}{m_P}}$; $6.2 \cdot 10^7$ m/s b) $B = \frac{m_P v}{re}$; 0.29 T

131

a) $E_{\text{kin}} = E_{\text{el}} = QU \neq f(m)$

b) $v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U}$

$r = \frac{mv}{eB} = \sqrt{\frac{2mU}{eB^2}} = f(m)$

c) $r_H : r_D : r_T = \sqrt{m_H} : \sqrt{m_D} : \sqrt{m_T}$; $\approx 1 : \sqrt{2} : \sqrt{3}$

132

Die negativ geladenen Elektronen fliegen «von hinten» auf den Bildschirm. Der Hufeisenmagnet baut zwischen den beiden Polen ein Magnetfeld auf, welches vom roten zum grünen Pol zeigt. Gemäss der Regel der rechten Hand wirkt auf die Elektronen eine Kraft nach links. Das verursacht die dicke Backe. Der rote Pol des Magneten befindet sich oben, der grüne unten.

133

a) Die Bewegung des Teilchens kann in zwei Komponenten zerlegt werden. Die erste Komponente $v_p = v \cdot \cos\varphi$ des Geschwindigkeitsvektors $\vec{v}$ verläuft parallel zu den Feldlinien, die zweite v_s senkrecht. Parallel zu den Feldlinien wirkt keine Lorentzkraft. v_p verändert sich deshalb nicht. Die Komponente $v_s = v \cdot \sin\varphi$ wird durch die Lorentzkraft in einer Ebene, die senkrecht zu den Feldlinien verläuft, gedreht. Das Teilchen bewegt sich in dieser Ebene mit der konstanten Geschwindigkeit $v_s = v \cdot \sin\varphi$ auf einer Kreisbahn. Zugleich verschiebt sich die Ebene mit der konstanten Geschwindigkeit $v_p = v \cdot \cos\varphi$ in Richtung der Feldlinien.

b) Den Radius der Kreisbahn erhält man aus der Beziehung «Lorentzkraft = Zentripetalkraft»: $qBv\sin\varphi = m\dfrac{v^2\sin^2\varphi}{r} \Rightarrow r = \dfrac{mv\sin\varphi}{qB}$

In der Umlaufszeit $T = \dfrac{2\pi r}{v_s} = \dfrac{2\pi m}{qB}$ verschiebt sich das Teilchen um die Strecke

$s_p = Tv\cos\varphi = \dfrac{2\pi mv\cos\varphi}{qB}$. Das ist die Ganghöhe der Schraubenlinie.

134

a) Aus dem Kräftegleichgewicht $F_{\mathrm{el}} = F_L$, d.h. $qE = qvB$ und $U_H = Eb$ folgt

$v = \dfrac{E}{B} = \dfrac{U_H}{Bb}$; 2.0 mm/s

(Aus der Energieerhaltung $F_L b = U_H q$ folgt dasselbe.)

b) $n = \dfrac{I}{Aqv} = \dfrac{IB}{dqU_H}$; $1.2\cdot 10^{29}\ \mathrm{m}^{-3}$

c) $n_{\mathrm{Cu}} = \rho_{\mathrm{Cu}}\dfrac{N_A}{M_{\mathrm{Cu}}}$; $8.5\cdot 10^{28}\ \mathrm{m}^{-3}$

$x = \dfrac{n}{n_{Cu}}$; 1.4 Elektronen pro Kupferatom!

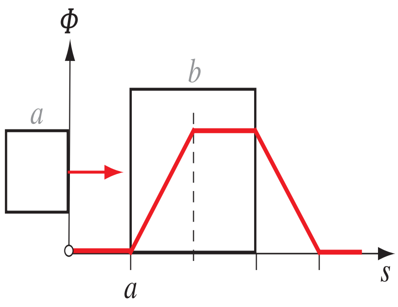
135

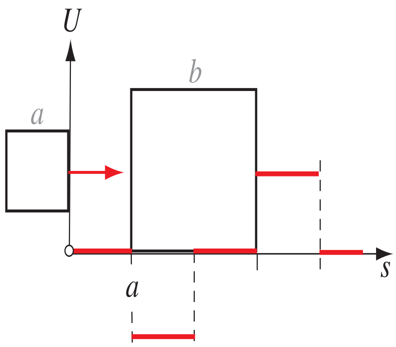
Aus $I = qnAv$ und $qE_H = qvB$ und $U_H = E_H b$ folgt mit $A = bd$ und $q = e$:

$$B = \frac{E_H}{v} = \frac{U_H}{bv} = \frac{U_H}{b\dfrac{I}{nebd}} = \frac{U_H nde}{I};\quad 0.08\ \mathrm{T}$$

Elektromagnetische Induktion

136





137

Es funktioniert nicht. Es entsteht keine Induktionsspannung, weil der magnetische Fluss durch die Spule auch beim Fahren des Zuges konstant ist. Damit eine Induktionsspannung entsteht, muss sich der magnetische Fluss durch die Spule ändern.

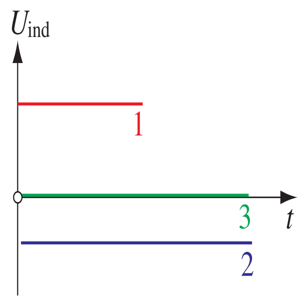
138

Draht, Feld und Bewegung senkrecht zueinander

$U = Bvl$; 0.36 V

139

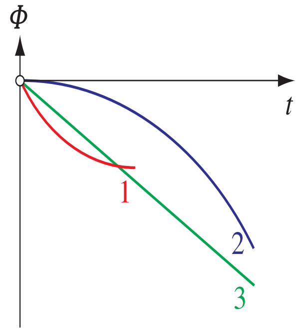
a)



b) Zu **1**: eine rechteckige Leiterschleife mit einer Kante voran und mit konstanter Geschwindigkeit aus einem begrenzten, homogenen Magnetfeld herausziehen. Oder mit einem Elektromagneten ein konstant abnehmendes Magnetfeld in der Leiterschleife erzeugen.
Zu **2**: eine rechteckige Leiterschleife mit einer Kante voran und mit konstanter Geschwindigkeit in ein begrenztes, homogenes Magnetfeld hineinstossen. Oder mit einem Elektromagneten ein konstant zunehmendes Magnetfeld in der Leiterschleife erzeugen.
Zu **3**: eine Leiterschleife in einem Magnetfeld ruhen lassen.

140

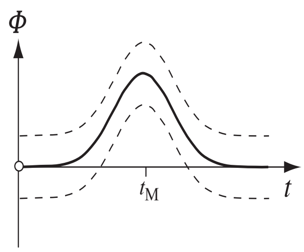
a)



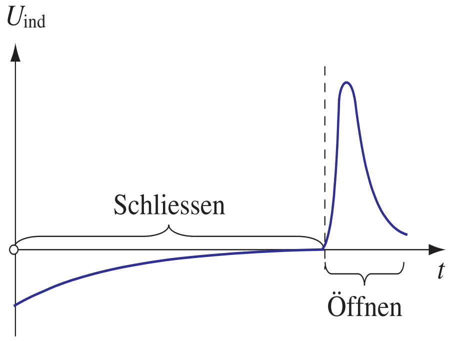
b) Zu **1**: eine rechteckige Leiterschleife mit einer Seite voran und mit konstanter Verzögerung in ein begrenztes, homogenes Magnetfeld hineinstossen.
Oder eine dreieckige, rechtwinklige Leiterschleife mit einer Kathete voran mit konstanter Geschwindigkeit in ein begrenztes, homogenes Magnetfeld hineinstossen.
Zu **2**: eine rechteckige Leiterschleife mit einer Seite voran und mit konstanter Beschleunigung in ein begrenztes, homogenes Magnetfeld hineinstossen.
Oder eine dreieckige, rechtwinklige Leiterschleife mit der Spitze voran parallel zu einer Kathete mit konstanter Geschwindigkeit in ein begrenztes, homogenes Magnetfeld hineinstossen.
Zu **3**: eine rechteckige Leiterschleife mit einer Seite voran und mit konstanter Geschwindigkeit in ein begrenztes, homogenes Magnetfeld hineinstossen.
Oder mit einem Elektromagneten ein konstant zunehmendes Magnetfeld in der Leiterschleife erzeugen.

141

Gesucht ist die Kurve, deren negative Ableitung $U_{\text{ind}}(t)$ ergibt. Die Kurve sieht etwa so aus, wie die abgebildete durchgezogene Linie. Mathematisch betrachtet könnte sie nach oben oder unten verschoben sein (gestrichelte Linien). Es kommt also eine ganze Kurvenschar in Frage. Auch physikalisch würde ein zusätzlicher, konstanter magnetischer Fluss (z.B. vom Erdmagnetfeld) keinen Einfluss auf die Induktionsspannung haben.



142



Den Verlauf von $U_{ind}(t)$ finden Sie, indem Sie mit einem Lineal tangential an der Funktion $\Phi(t)$ entlangfahren und so die Steigung der Kurve feststellen. An der gestrichelten Linie zwischen Öffnen und Schliessen z.B. ist die Steigung von $\Phi(t)$ null und daher ist auch $U_{ind}(t)$ dort null. Kurz nach dem Beginn des Öffnens ist $\Phi(t)$ am steilsten. Deshalb ist dort der Betrag von $U_{ind}(t)$ am grössten. In der Praxis erfolgt zu diesem Zeitpukt die Zündung im Zylinder des Motors.

143

Induktionsgesetz: $U_{\text{ind}} = -\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\dfrac{Bsv\Delta t}{\Delta t} = -Bsv = -RI$

Lorentzkraft: $F = IsB$

Gleichgewicht der Kräfte:

$$mg\sin\alpha - \mu_G mg\cos\alpha = IsB = \frac{s^2B^2v}{R} \Rightarrow v = \frac{mg(\sin\alpha - \mu_G\cos\alpha)R}{s^2B^2}; \quad 2.6 \text{ m/s}$$

144

a) Durch das Drehen der Ankerspule wird in dieser eine Gegenspannung induziert, die bei der maximalen Drehzahl im Leerlauf maximal ist und mit dem Sinken der Drehzahl bei zunehmender Belastung abnimmt. Die Spannung am Anker ist damit beim Leerlauf am kleinsten und nimmt mit zunehmender Belastung zu. Die Stromstärke ist proportional zur Spannung am Anker. Damit nimmt die elektrische Leistung mit zunehmender Belastung zu.

b) Beim Einschalten steht der Anker noch still. Die induzierte Gegenspannung ist null. Daher sind die Spannung am Anker und die Stromstärke kurzzeitig sehr gross.

c) Der Mixer darf nicht blockieren. Steht ein Elektromotor still, wird keine Gegenspannung induziert, und die Stromstärke wird sehr gross. Wenn keine Sicherung den Strom unterbricht, kann der Motor «durchbrennen».

145

a) $U_A = R_A I_A$; 6.30 V; $|U_{\text{ind}}| = U_{\text{tot}} - U_A$; 17.7 V

b) $P = UI$; 40.3 W; 29.7 W; 10.6 W

c) $\eta = \dfrac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{elektrisch}}} = \dfrac{\left|U_{\text{ind}}\right|}{U_{\text{tot}}}$; 73.8 %

d) Ein Teil der berechneten mechanischen Leistung wird zur Überwindung der Reibung benötigt.

146

a) Nach Schliessen des Stromkreises beginnt elektrische Ladung zu fliessen. In der Spule entsteht ein magnetisches Feld. Der magnetische Fluss durch die Spule nimmt zu. Nach dem Induktionsgesetz führt dies zu einer Induktionsspannung zwischen den Enden der Spule. Nach der Lenz'schen Regel wirkt diese Induktionsspannung ihrer Ursache entgegen. Die Induktionsspannung ist also so gerichtet, dass sie den Strom behindert.

b) Nach den Aussagen in a) muss beim Schliessen der Betrag der Induktionsspannung immer kleiner als der Betrag der angelegten Spannung sein, weil andernfalls der Strom nicht einsetzen bzw. nicht zunehmen würde. Die Stromstärke wiederum kann nicht beliebig schnell zunehmen, weil sonst die bremsende Wirkung der Induktionsspannung zu gross wird. Beim Öffnen des Stromkreises ist nach der Lenz'schen Regel die Induktionsspannung gleichgerichtet wie die vor dem Öffnen an der Spule anliegende Spannung. Die Spannung kann beliebig hohe Werte annehmen, wenn die Stromstärke schnell genug abnimmt. In der Praxis kommt es zu Überschlägen in der Luft (Funken) oder eben zum Stromfluss durch das Gas der Leuchtstofflampe.

c) Der magnetische Fluss Φ ist das Produkt aus Flussdichte B und Spulenquerschnittsfläche A: $\Phi = BA$

Die Flussdichte in einer langen Spule ist: $B = \mu_0 \mu_r \dfrac{N}{l} I$

Daher ist: $\Phi = \mu_0 \mu_r \dfrac{N}{l} AI$

Mit $U_{\text{ind}} = -N \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ und weil die Stromstärke I die einzige veränderliche Grösse ist,

folgt: $U_{\text{ind}} = -\mu_0 \mu_r \dfrac{N^2}{l} A \dfrac{\Delta I}{\Delta t}$

Die Selbstinduktionsspannung ist proportional zum Quadrat der Windungszahl N und zur Spulenquerschnittsfläche A. Sie ist umgekehrt proportional zur Länge l der Spule.

(Bemerkung: Der Ausdruck $\mu_0 \mu_r \dfrac{N^2}{l} A$ wird Induktivität L der Spule genannt.)

147

a) $B = \mu_0 \mu_r I \dfrac{N}{l} \Rightarrow \mu_r = \dfrac{Bl}{\mu_0 NI}$; 200

b) $\Phi = BA = \mu_0 \mu_r I \dfrac{N}{l} \pi r^2$; $1.52 \cdot 10^{-3}$ Wb

c) $L = \mu_0 \mu_r \dfrac{N^2 \pi r^2}{l}$; 0.319 H

d) $L' = 4L$; $B' = B$; $\Phi' = 4\Phi$

Wechselspannung, Wechselstrom

148

$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B\pi r^2 \cdot \cos\varphi$;

$3.2 \cdot 10^{-5}$ Wb; $2.3 \cdot 10^{-5}$ Wb; $1.6 \cdot 10^{-5}$ Wb; 0; $-1.6 \cdot 10^{-5}$ Wb; $-3.2 \cdot 10^{-5}$ Wb

149

$$\Phi = BA\cos(\omega t) = B_{\max}\sin(\omega t) \cdot A\cos(\omega t) = \frac{1}{2}B_{\max}A\sin(2\omega t)$$

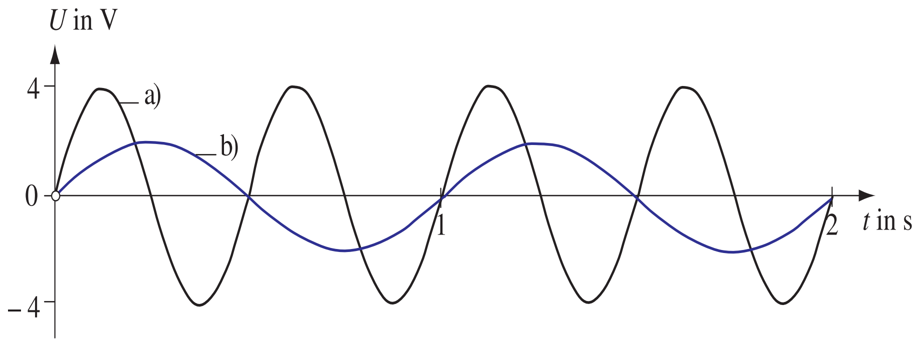
Die Frequenz des magnetischen Flusses ist doppelt so gross wie die gewählte Frequenz.

150

a) Der Strom, der durch die Lampe fliesst, fliesst auch durch die Spulenwindungen des Generators. Dadurch entsteht nach der Lenz'schen Regel eine bremsende Kraft auf den Rotor des Generators. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen antreibendem und bremsendem Drehmoment ein, was zu einer konstanten Drehzahl führt. Die zweite Lampe führt vorübergehend zur Zunahme von Stromstärke und Bremswirkung. Durch den Rückgang der Drehzahl gehen auch die Spannung und die Stromstärke zurück, bis sich erneut eine konstante Drehzahl einstellt.

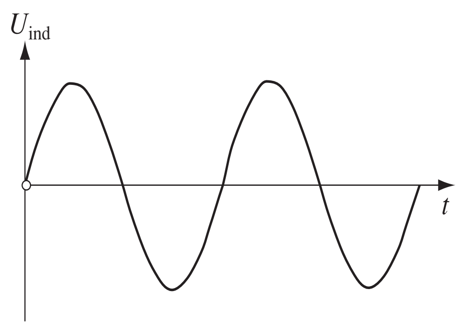
b) Die Wassermenge, die auf die Turbinenschaufeln trifft, wird mit einem elektrisch betriebenen Ventil reguliert, so dass die Drehzahl konstant gehalten werden kann.

151

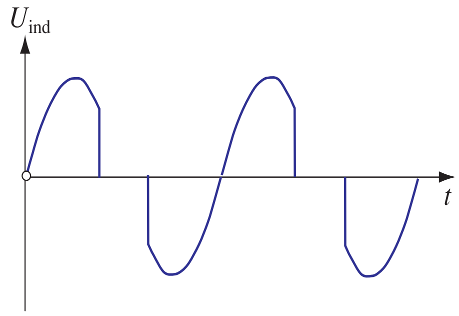


152

a)



b)



c) Wenn die Leiterschleife geschlossen ist, fliesst ein Strom. Dadurch wirkt auf die Leiterschleife nach der Lenz'schen Regel eine bremsende Kraft. Anders gesagt wird hier die Schwingungsenergie über den Weg der elektrischen Arbeit in Wärme umgewandelt. Bei einer offenen Leiterschleife gibt es zwar eine Wechselspannung, aber keinen Strom. So geht auf diesem Weg keine Energie verloren, und die Dämpfung der Schwingung ist geringer.

d) $\hat{U} = \dfrac{Bl\hat{s}}{\sqrt{m/D}}$; 0.82 mV

153

a) Die Drehachse muss in Ost-West-Richtung verlaufen.

b) Für den Scheitelwert einer im homogenen Magnetfeld mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotierenden Spule gilt $\hat{U} = ANB\omega$.

$AN = \dfrac{\hat{U}T}{2\pi B}$; 2260 m^2 (also z.B. 4520 Windungen bei 0.500 m^2 Spulenfläche)

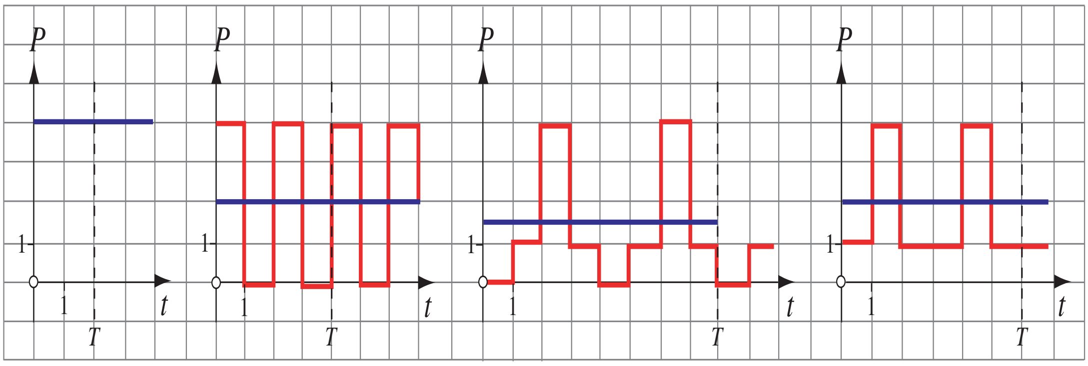
c) $l = 2\pi N\sqrt{\dfrac{A}{\pi}} = \sqrt{\dfrac{2N\hat{U}T}{B}} = 168\ \text{m}\cdot\sqrt{N}$

Für $N = 1$ ist die Fläche sehr gross und folglich auch der Durchmesser (54 m). Es gibt Probleme mit der Stabilität und der Luftreibung. Mit zunehmender Windungszahl muss der Draht immer länger werden. Damit nimmt auch die Masse der Spule zu. Das kann zu Problemen mit der Trägheit und der Lagerreibung führen. Wenn Sie besonders dünnen Draht für eine leichte Spule verwenden, hat Ihr Generator einen sehr hohen Ohm'schen Innenwiderstand.

154

a) Der Effektivwert ist diejenige Gleichspannung, die in einem Ohm'schen Widerstand die gleiche Leistung erzeugen würde, wie die betreffende Wechselspannung im Mittel erzeugt.

b)



Leistung P in Watt mit 1 W = 1 Häuschen, Zeit t in Sekunden mit 1 s = 1 Häuschen

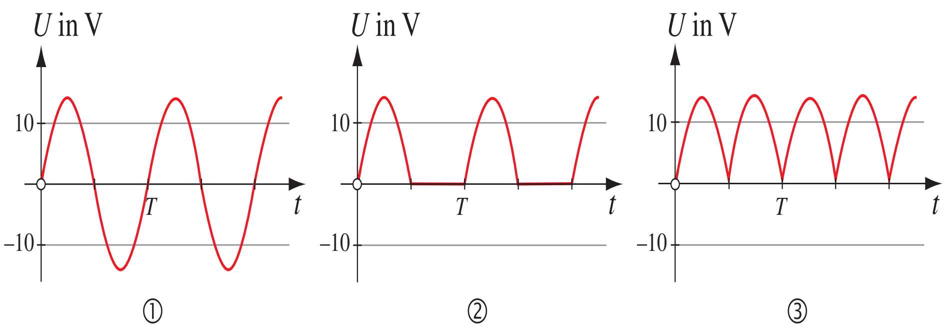
$T_1 = 2.0$ s; $T_2 = 4.0$ s; $T_3 = 8.0$ s; $T_4 = 6.0$ s

$\overline{P}_1 = 4.0$ W $\overline{P}_2 = 2.0$ W; $\overline{P}_3 = 1.5$ W; $\overline{P}_4 = 2.0$ W

c) $P = \dfrac{U^2}{R} \Rightarrow U_{\text{eff}} = \sqrt{R\overline{P}}$; 2.0 V; 1.4 V; 1.2 V; 1.4 V

155

a)



b) $\hat{U} = \sqrt{2} \cdot U_1$; 14.1 V

c) $\overline{P}_2 = \dfrac{1}{2}\overline{P}_1 \Rightarrow U_2 = \dfrac{\sqrt{2}}{2}U_1 = \dfrac{1}{2}\hat{U}$; 7.07 V;

Nur jede zweite Halbwelle wird ausgenützt, die Spannung hat eine grosse Welligkeit.

d) $U_3 = U_1$; 10.0 V

156

a) Sinusförmige Wechselspannung mit der Frequenz 50 Hz.
Der Effektivwert der Wechselspannung ist 230 V bzw. 400 V.

b) Der Scheitelwert der Spannung ist die Amplitude der sinusförmigen Wechselspannung.
Der Effektivwert ist diejenige Gleichspannung, welche in einem Ohm'schen Widerstand die gleiche Leistung erzeugen würde, wie die betreffende Wechselspannung im Mittel erzeugt.

c) Fünfpolige Steckdosen werden für Elektrogeräte hoher Leistung verwendet, z.B. Kochherde. Diese werden mit der Spannung 400 V betrieben.

d) Bei einer fünfpoligen Steckdose (Typ 15) bilden die drei runden Löcher mit der Phase L1, dem Neutralleiter N und dem Schutzleiter PE (= Erde) eine «gewöhnliche» 230-V-Steckdose. Dort kann Sebastian den dreipoligen Stecker seiner Verstärkeranlage anschliessen.

157

a) $I = \dfrac{P}{U}$; 110 mA
b) Wenn ein zweiter Schalter geschlossen wird, bleibt die Stromstärke 110 mA.
c) Wenn alle drei Schalter geschlossen sind, ist die Stromstärke 0 mA.
d) Die drei Glühlampen leuchten normal weiter.
e) Die sinusförmigen Wechselströme von den drei Phasen zum Neutralleiter sind um je 120° phasenverschoben. Die Summe von zwei Strömen hat den gleichen Scheitelwert, ist aber um 60° zu den beiden Teilströmen phasenverschoben. Die Summe aller drei Teilströme ist zu jedem Zeitpunkt null.

158

a) A, B und C leuchten normal, D leuchtet nicht.
b) B und D leuchten schwach, da in Serie an 230 V.
c) A und C leuchten fast normal, da in Serie an 400 V.
d) A, B und C leuchten normal, D leuchtet nicht.

159

a) $U_2 = \dfrac{U_{\text{out}}}{\sqrt{2}}$; 11 V

b) $n_2 = n_1 \dfrac{U_2}{U_{\text{in}}}$; 59

c) Das Netzgerät wird warm.

160

a) $n_1 = n_2 \dfrac{U_1}{U_2}$; 180

b) $I_1 = \dfrac{P_1}{U_1}$; 3.6 kA; $I_2 = \dfrac{\eta_{\text{Trafo}} P_1}{U_2}$; 0.22 kA

c) $P_{\text{Wärme}} = \rho_{\text{el}} \dfrac{l}{A} I_2^2$; $(1-\eta_{\text{tot}}) = 5\% + \dfrac{P_{\text{Wärme}}}{\eta_{\text{Trafo}} P_1}$; 0.21 MW; 5.2 %

d) $P'_{\text{Wärme}} = \rho_{\text{el}} \dfrac{l}{A} I_1^2$; $(1-\eta'_{\text{tot}}) = \dfrac{P'_{\text{Wärme}}}{P_1}$; 59 %

161

a) $U_{\text{ind}} = -\dfrac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -A\hat{B}\omega \cos \omega t$, $R = \rho_{\text{el}} \dfrac{2\pi r}{b^2}$, $A = \pi r^2$

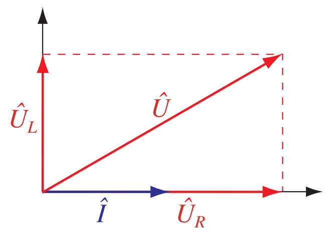
Der zeitliche Mittelwert von $\sin^2$, bzw. $\cos^2$ beträgt $\dfrac{1}{2}$.

$$\overline{P} = \frac{\overline{U_{\text{ind}}{}^2}}{R} = \frac{A^2 \hat{B}^2 \frac{1}{2} \omega^2 b^2}{\rho_{\text{el}} 2\pi r} = \frac{\pi r^3 b^2 \omega^2 \hat{B}^2}{4\rho_{\text{el}}}$$

b) $Pt = cm\Delta\vartheta$, $m = \rho V = \rho b^2 2\pi r$, (mit $V \approx 2\pi r b^2$)

$t = \dfrac{8\rho c \Delta\vartheta \rho_{\text{el}}}{\left(r\omega\hat{B}\right)^2}$; 6.2 min

162



a) Es handelt sich um eine Reihenschaltung von ohmschem Widerstand und Spule. In einem Zeigerdiagramm wird der Zusammenhang zwischen Netzspannung und den anderen Spannungen im Stromkreis ermittelt (Wir wählen willkürlich den Zeitpunkt, in dem der Zeiger für die Stromstärke nach rechts weist):

$\hat{U}^2 = \hat{U}_R{}^2 + \hat{U}_L{}^2$

Der induktive Widerstand der Spule ist $R_L = \dfrac{\hat{U}_L}{\hat{I}} = \omega L$, wobei L die Selbstinduktivität der Spule ist.

Mit den Beziehungen $P = U_{\text{R,eff}} I_{\text{eff}}$, $\hat{I} = I_{\text{eff}}\sqrt{2}$ und $\hat{U} = U_{\text{eff}}\sqrt{2}$ finden wir:

$$L = \frac{1}{\hat{I}\omega}\sqrt{\hat{U}^2 - \hat{U}_R{}^2} = \frac{1}{I_{\text{eff}}\sqrt{2}\cdot\omega}\sqrt{2}\sqrt{U_{\text{eff}}^2 - U_{\text{R,eff}}^2} = \frac{U_{\text{R,eff}}}{P\cdot 2\pi f}\sqrt{U_{\text{eff}}^2 - U_{\text{R,eff}}^2} = 2.5\ \text{H}$$

b) Bei gleichem Scheinwiderstand (Impedanz) Z zur Strombegrenzung verringert sich nach $L = \dfrac{Z}{2\pi f}$ die benötigte Induktivität. Damit kann die Grösse der Spule drastisch verringert werden ($L = \mu_0 \mu_r \cdot \dfrac{n^2 A}{l}$).

Elektromagnetische Schwingungen

163

a) Federpendel: Potentielle und kinetische Energie,
Schwingkreis: Elektrische und magnetische Energie

b) Die Trägheit der Kugel (Masse *m*) entspricht der Induktivität der Spule.
Die Härte der Feder (Federkonstante *D*) entspricht dem reziproken Wert der Kapazität des Kondensators.

c) Der Ohm'sche Widerstand bewirkt eine Dämpfung; er entspricht der Reibung.

164

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \quad 2.0\ \text{Hz}$$

165

a) $$T = 2\pi\sqrt{LC} = \frac{1}{f} \Rightarrow C = \frac{1}{4\pi^2 L f^2}; \quad 9.83\ \text{pF}$$

b) $$\alpha = \frac{f_{\max}^2 \cdot (f_s^2 - f_{\min}^2)}{f_s^2 \cdot (f_{\max}^2 - f_{\min}^2)} \cdot 180° = \frac{1 - \dfrac{f_{\min}^2}{f_s^2}}{1 - \dfrac{f_{\min}^2}{f_{\max}^2}} \cdot 180°; \quad 133°$$

166

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}, \quad \frac{T_1}{T_0} = \frac{\sqrt{C + C_1}}{\sqrt{C}} = \frac{f_0}{f_1} \Rightarrow C = C_1 \cdot \frac{f_1^2}{f_0^2 - f_1^2}; \quad 32.0\ \text{pF};$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C}; \quad 2.20\ \text{mH}$$