1 Ladung

1.1 Elektronenstrom (in Leitern)

Elektron: $Q_{e-} = -1.602 \cdot 10^{-19}\, As\ oder\ C$ $[Q_{e-}] = C \quad (Coulomb)$

Elektronen pro Coulomb: $1\,C \mathrel{\hat{=}} 6.242 \cdot 10^{18}\, e-$

1.2 Ionenstrom (in Elektrolyten, Schmelzen oder Ionisierten Gasen)

Proton: $Q_{e+} = 1.602 \cdot 10^{-19}\, As\ oder\ C$

2 Strom

Strom ist Ladungsverschiebung pro Zeit:

$$I = \frac{Q}{t} \qquad I = \lim_{\Delta t \to 0}\left(\frac{\Delta q}{\Delta t}\right) = \frac{dq}{dt} \qquad [I] = A \quad (Ampère)$$

2.1 Stromdichte

$$J = \frac{I}{q} = \frac{I}{A} \qquad [J] = \frac{A}{mm^2}$$

Wert für Stromdichte nach VDE: $J \leq 6.4 \frac{A}{mm^2}$

3 Spannung

... entsteht durch Trennung von Ladungen mit z.B. Bandgenerator folglich ist Spannung Ausgleichsbestreben zwischen verschiedenen Potenzialen. (Elektronenüberschuss am –Pol)
Aus $W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t$ erhalten wir für die Spannung:

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{W}{I \cdot t} = \frac{F \cdot s}{I \cdot t} = \frac{m \cdot s \cdot s}{I \cdot t^3} \Rightarrow \qquad [U] = \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3} = V \quad (Volt)$$

Elektrischer Widerstand

…ist das „sich widersetzen“ eines Leiters gegenüber des Stromflusses.

Widerstand: $R = \frac{U}{I}$ $\qquad [R] = \Omega \quad (Ohm)$

Leitwert: $G = \frac{1}{R}$ $\qquad [G] = S \quad (Siemens)$

3.1 Spezifischer Widerstand eines Leiters

… ist abhängig von seiner Länge, seinem Querschnitt und seinem Material.

Spezifischer Widerstand: $\rho = \frac{R \cdot q}{l}$ $\qquad [\rho] = \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} = 10^{-6}\,\Omega \cdot m$

Spezifischer Leitwert: $\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{R \cdot q} = \frac{G \cdot l}{q}$ $\qquad [\kappa] = \frac{m}{\Omega \cdot mm^2} = \frac{S \cdot m}{mm^2}$

3.2 Temperaturabhängigkeit

…heisst, dass der Widerstand in Abhängigkeit seines Temperaturkoeffizienten von seiner Umgebungstemperatur abhängt.

$R_\vartheta = R_{20} + \Delta R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta)$ $\qquad [\alpha] = K^{-1} \qquad [\vartheta] = K$

4 Kirchhoffsche Gesetze

4.1 1. Kirchhoffsche Gesetz (Knotenregel)

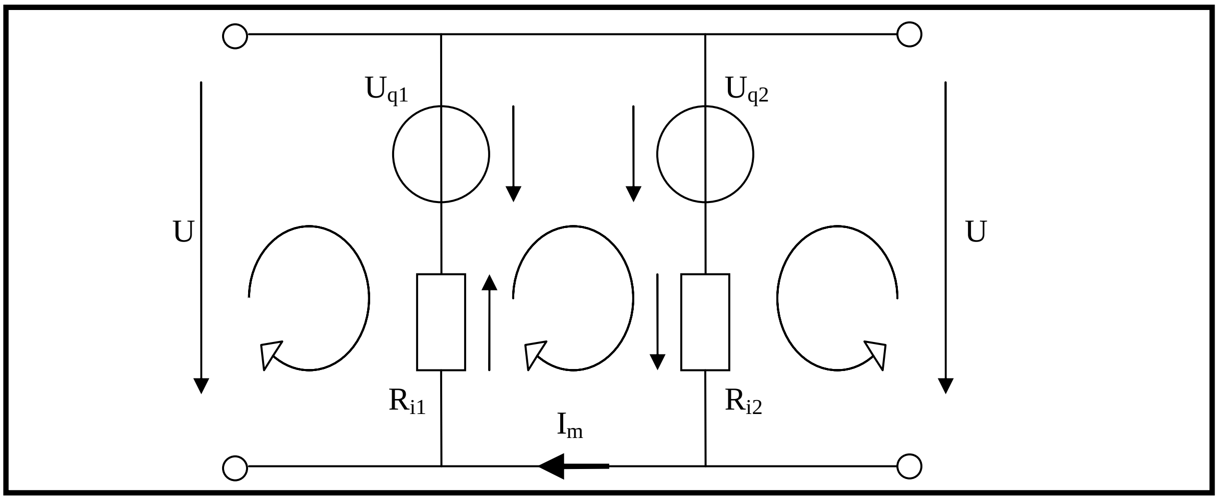
$$\sum_{k=1}^{n} I_k = I_1 + I_2 + I_3 ... + I_n = 0$$

Die Summe der zufliessenden und der abfliessenden Ströme ist gleich Null.

4.2 2. Kirchhoffsche Gesetz (Maschenregel)

$$\sum_{k=1}^{n} U_k = U_1 + U_2 + U_3 ... + U_n = 0$$

Die Summe der Spannungen in einer Masche ist gleich Null. Ist die Stromrichtung vorgegeben, muss die Richtung der Masche danach gerichtet werden. Wobei U_n wahlweise auch durch $I_m \cdot R_n$ ersetzt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die Pfeile der Masche, des Stroms und der Widerstände in die gleiche und die Quellen in Einbaurichtung gezeichnet werden. Widerstände sind passiv und richten sich somit nach dem Strom.



$$R_{i1} \cdot I_m - U_{q1} + U_{q2} + R_{i2} \cdot I_m = 0 \quad \rightarrow \quad I_m = \frac{U_{q1} - U_{q2}}{R_{i1} + R_{i2}}$$

$$\left.\begin{aligned} -U + U_{q1} - R_{i1} \cdot I_m &= 0 \\ -U + U_{q2} + R_{i2} \cdot I_m &= 0 \end{aligned}\right\} \quad \rightarrow \quad U = U_{q1} - R_{i1} \cdot I_m = U_{q2} + R_{i2} \cdot I_m$$

5 Arbeit und Leistung

(Herleitung siehe: 8)

$W = U \cdot I \cdot t$ [W] = Ws = J = Nm

$P = U \cdot I = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = \frac{m \cdot a \cdot s}{t}$ [P] = W

$$\left.\begin{array}{l} U = R \cdot I \\ P = U \cdot I \end{array}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{array}{lll} R = \frac{U^2}{P} & P = \frac{U^2}{R} & U = \sqrt{P \cdot R} \\ R = \frac{P}{I^2} & P = R \cdot I^2 & I = \sqrt{\frac{P}{R}} \end{array}\right.$$

5.1 Kosten

$K = k \cdot W$ [K] = Fr. [k] = $\frac{\text{Fr}}{\text{kWh}}$

[W] = P · t = J = WS kWh = 60^2 kWs = 3660 kWs = 3660 kJ

6 Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{zu} - P_{verlust}}{P_{zu}} = \frac{P_{ab} \cdot t}{P_{zu} \cdot t} = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \left(\frac{Q_{aufgewendet}}{Q_{genutzt}}\right) \qquad \eta < 1$$

7 Wärmekapazität

$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$ [Q] = J [c] = $\frac{J}{kg \cdot K}$ [m] = kg

c$_{\text{Wasser}}$ = 4.19 $\frac{J}{kg \cdot K}$

7.1 Mischtemperatur

$m_1 \cdot c \cdot (\vartheta_1 - \overline{\vartheta}) = m_2 \cdot c \cdot (\overline{\vartheta} - \vartheta_2)$ $\overline{\vartheta}$ = Mischtemperatur

$$\overline{\vartheta} = \underline{\underline{\frac{m_1\vartheta_1 + m_2\vartheta_2}{m_2 + m_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{c(m_2 + m_1)}}}$$

8 Elektrisches Feld

Misst man die Kraft auf eine Probeladung zwischen 2 geladenen Punkten im Raum lassen sich dadurch Rückschlüsse auf das Elektrische Feld ziehen. Gesucht ist nun eine Darstellungsform die unabhängig von der Grösse der Probeladung ist. Teilen wird die Kraft $\vec{F}$ durch den Betrag der Probeladung, so erhalten wird einen von der Grösse der Probeladung unabhängige Grösse, die sich zur Beschreibung des elektrischen Feldes benutzen lässt.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \qquad [\vec{E}] = \frac{N}{C}$$

diese ist nicht an jedem Punkt im Raum gleich ausser zwischen zwei unterschiedlich geladenen (unendliche) Flächen im Raum (Kondensator), dort entsteht ein homogenes elektrisches Feld. Dieses Feld ist von der Spannungsdifferenz U und ihrem Abstand d abhängig.

$$E = \frac{U}{d} \qquad [\mathrm{E}] = \frac{V}{m}$$

Durch Gleichsetzen erhalten wir eine Gleichung, die elektrische und mechanische Arbeit gleichsetzt:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{U}{d} \quad \Rightarrow \quad W = \vec{F} \cdot d = U \cdot q \qquad [\mathrm{W}] = N \cdot m = V \cdot C = V \cdot A \cdot s$$

9 Reale Spannungsquellen

Im Gegensatz zu idealen Spannungsquellen besitzen Reale Spannungsquellen einen Innenwiderstand, der sich einerseits aus der Spannung im unbelasteten Zustand (U_q) und dem Kurzschlussstrom (I_k) berechnen lässt

$$R_i = \frac{U_q}{I_k}$$

oder aus der Spannung (U_L) über einem Vorgeschalteten Lastwiderstand (R_L)

$$U_i = U_q - U_L \quad \Rightarrow \quad R_i \cdot I_M = U_q - U_L \quad \wedge \quad I_M = \frac{U_q}{R_i + R_L}$$

$$R_i \cdot \frac{U_q}{R_i + R_L} = U_q - U_L \quad \Rightarrow \quad U_L R_i = U_q R_L - U_L R_L$$

$$R_i = \frac{U_q R_L - U_L R_L}{U_L} \quad \Rightarrow \quad R_i = \underline{\underline{\frac{R_L (U_q - U_L)}{U_L}}}$$

10 Magnetismus

10.1 Permanent Magnet

Ausgerichtete “Weisssche Bezirke” führen dazu, dass sich ihre Magnetfelder nicht gegenseitig aufheben. Man spricht von einem Permanentmagnet. (Stoffe: FE, Ni, Co)

10.2 Strom durchflossner Leiter

Wird ein Leiter mit Strom durchflossen entsteht auch ein Magnetfeld. (Schraubenregel)

10.2.1 Durchflutung (Magnetische Spannung)

$\Theta = n \cdot I = H \cdot l$ $\qquad [\Theta] = A$

Mit Luftspalt oder Versch. Materialien

$$\Theta = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 ... H_n \cdot l_n = \sum_i H_i \cdot l_i$$

10.2.2 Magnetische Feldstärke

$H(r) = \frac{n \cdot I}{l} = \underbrace{\frac{n \cdot I}{2\pi r}}_{Ringspule}$ $\qquad [\mathrm{H}] = \frac{A}{m}$ $\qquad$ [l] = m (mittlere Feldlinienlänge)

Magnetfelder können vektoriell addiert werden.

$\vec{H}_{tot} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2$ $\qquad H(\vec{r}) = \begin{pmatrix} -\sin(2\pi\varphi) \\ \cos(2\pi\varphi) \end{pmatrix} \frac{n \cdot I}{2\pi r}$

10.2.3 Magnetische Feldkonstante (Induktionskonstante)

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1.256637 \cdot 10^{-6} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$$

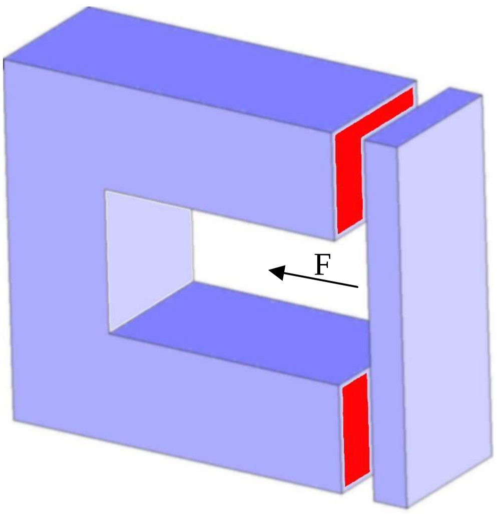
10.2.4 Magnetische Flussdichte (Induktion)

$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ $\qquad [B] = \frac{V \cdot s}{m^2} = T\ (Tesla)$

10.2.5 Magnetischer Fluss |Magnetischer Strom|

$\Phi = A \cdot \mathrm{B}$ $\qquad [\Phi] = Vs$

10.2.6 Kraftwirkung

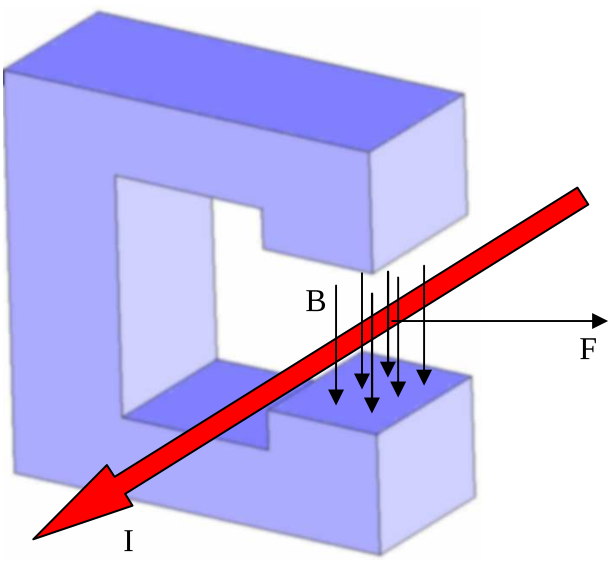


$$F = 40 \cdot B^2 \cdot A$$

F: Kraft in Pfeilrichtung

B: Flussdichte [T]
A: Gesammtfläche (rot) in [cm^2]

10.2.7 Kraftwirkung auf einen Leiter



$$F = I \cdot l \cdot B$$

F: Kraft in Pfeilrichtung [N]

I: Strom im Leiter [A]
l: Länge des Leiters im Feld [m]
B: Flussdichte [T]

10.3 Induktionsgesetz

Induzierte Spanngung

$$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (\underline{\text{Flusszunahme, Flussabnahme}})$$

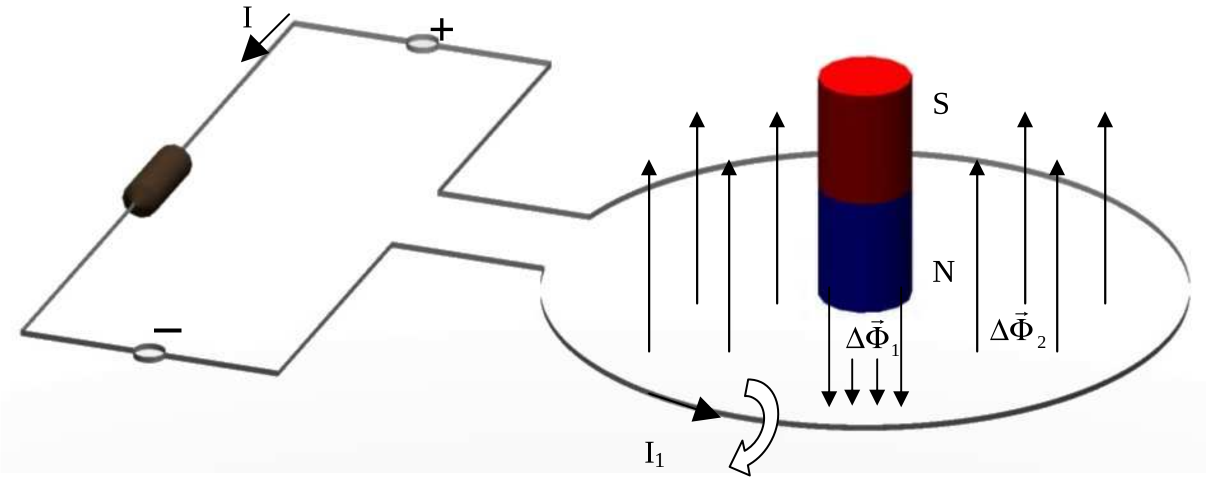
mehrere Windungen

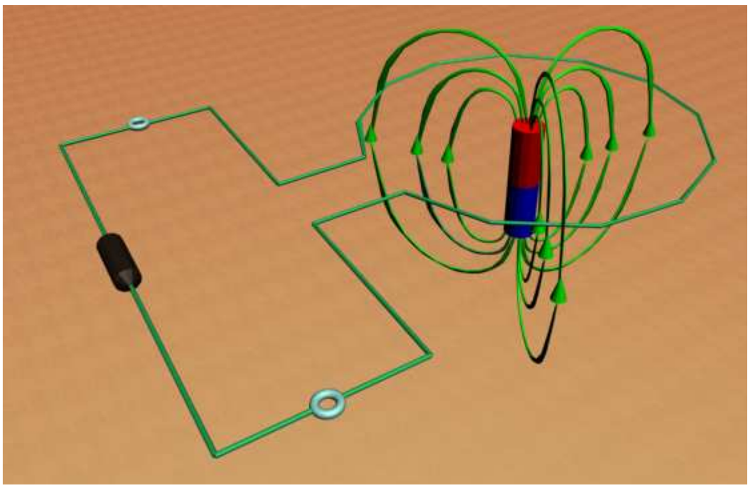
$$U = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Der Richtungssinn eines durch Induktion hervorgerufenen Stroms ist stets so gerichtet, dass sein Magnetfeld der Induzierenden Flussrichtung $\Delta\Phi$ $(\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1)$ entgegenwirkt.

10.4 Lenzsche Regel

Der Induktionsstrom (I) stets so gerichtet ist, dass er der Ursache seiner Entstehung entgegenwirkt. D.h. Durch die Bewegung des Magneten nach Unten entsteht eine Flussrichtungsänderung $\Delta\vec{\Phi}_1$, stellt man sich nun eine entgegen gesetzte Grösse vor $\Delta\vec{\Phi}_2$, findet man so den resultierenden Strom I.



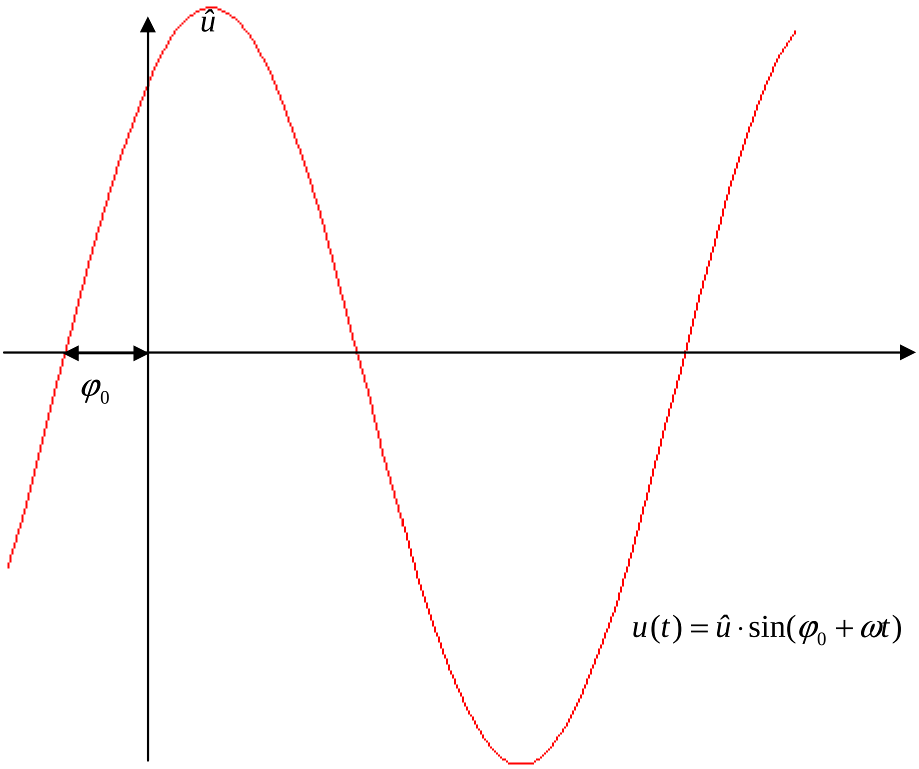


11 Wechselstrom

11.1 Nicht Periodische Wechselströme

11.2 Periodische wechselströme

11.2.1 Periodische Sinusförmige Wechselströme



$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot \frac{1}{T} = \frac{b}{rt} \quad \left[\frac{rad}{s}\right]$$

Oder auch Umfangsgeschwindigkeit/Radius

$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\varphi_0 + \omega t)$ $\quad 0 = \hat{u} \cdot \sin(\varphi_0 + \omega t)$ $\quad 0 = \sin(\varphi_0 + \omega t)$ $\quad 0 = \varphi_0 + \omega t$

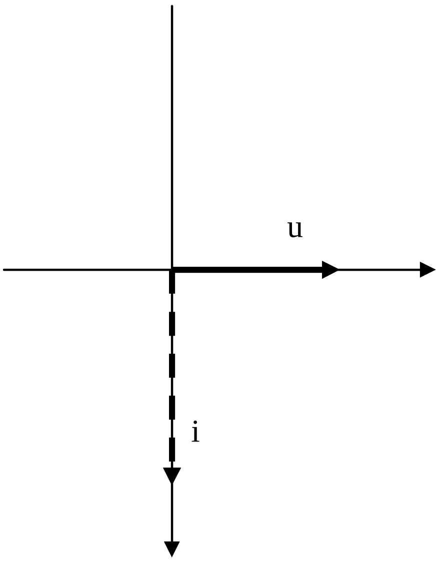
$\boxed{\varphi_{0_{rad}} = -\omega t}$ $\quad \boxed{\varphi_{0^\circ} = -\omega t \cdot \frac{360}{2\pi}}$ $\quad \boxed{t = \frac{-\varphi_{0_{rad}}}{\omega}}$

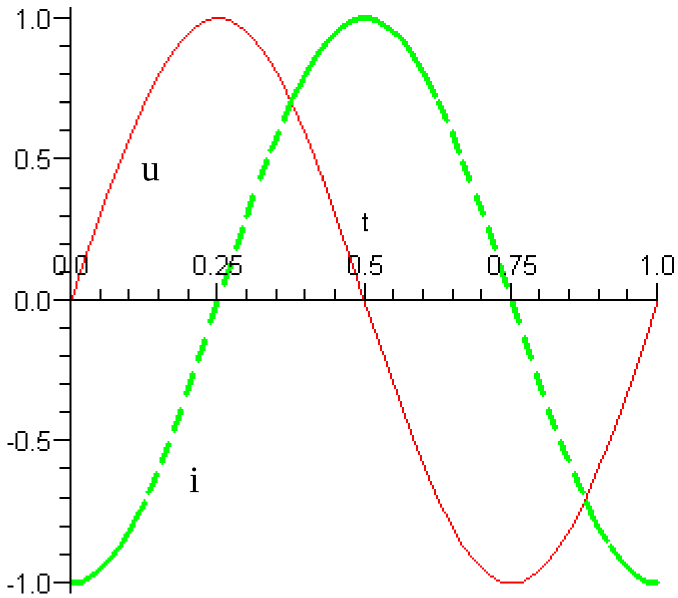
11.3 Phasenverschiebung zwischen u und i

Sind neben den Wirkwiderständen Blindwiderstände beteiligt, wird Energie von diesen Blindwiderständen aufgenommen und danach wieder ins Netz zurück gespiesen. Auch wenn (fast) keine Energie dabei verbraucht wird, müssen die Leitungen dennoch dafür ausgelegt werden.

11.3.1 Ideale Spule (Induktiver Blindwiderstand)

Durch den Strom (I_1) der durch die Spule geschickt wird ein Magnetischer Fluss erzeugt. Die Flussänderung $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ erzeugt in der Spule nach der Lenzschen Regel eine entgegen gesetzte Spannung und somit fliesst auch ein entgegen gesetzter Strom (I_2). Folglich fliesst in wirklichkeit nur $I = I_1 - I_2$ betrachten wird das im Ohmschen Gesetz $R = \frac{U}{\mathrm{I}_1 - \mathrm{I}_2}$ sehen wird, dass dadurch der Widerstand grösser wird.





$u = 1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t)$ $\qquad$ $u = 1 \cdot \sin(-\frac{\pi}{2} + 2 \cdot \pi \cdot t)$

Phasenverschiebung: $\varphi = 90°$ (Der Strom eilt der Spannung um 90° nach.)

Induktiver Blindwiderstand: $X_L = \frac{U_L}{I_L}$ (Effektivwerte)

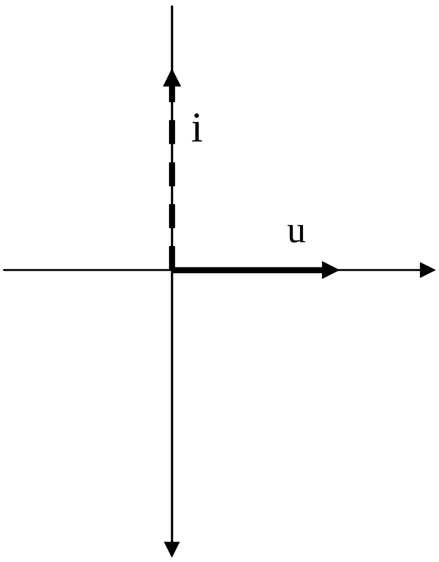
Genaugenommen misst man den Scheinwiederstand, da noch der ohmsche Widerstand des Drahtes dazukommt!

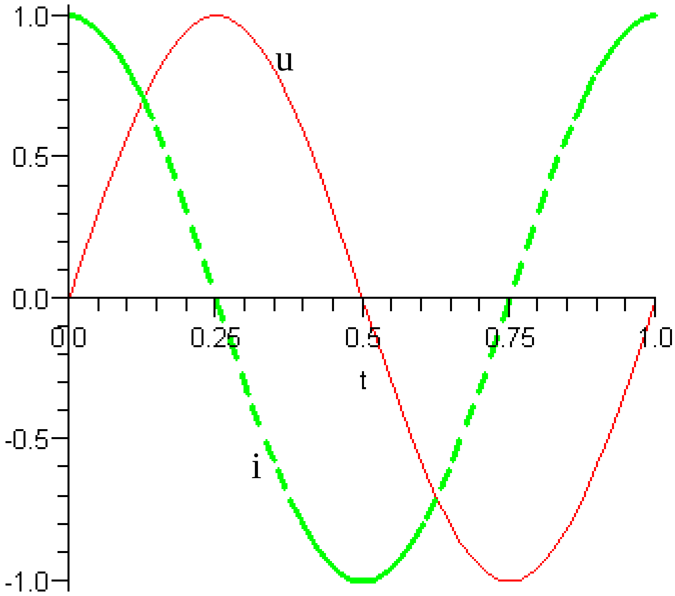
$$Z = \frac{U}{I}$$

Berechnung aus L und f: $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L$

Idealer Kondensator (Kapazitiver Blindwiderstand)

Der Strom eilt der Spannung um 90° voraus.





$u = 1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t)$ $\qquad$ $i = 1 \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + 2 \cdot \pi \cdot t)$

Phasenverschiebung: $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -90°$

Induktiver Blindwiderstand: $X_L = \frac{U_L}{I_L}$ (Effektivwerte)

Genaugenommen misst man den Scheinwiederstand, da noch der ohmsche Widerstand des Drahtes dazukommt!

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

Berechnung aus L und f: $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L$

11.4 Periodische, nicht Sinusförmige Wechselströme

Approximation durch Fourier Analyse (Harmonische Analyse)