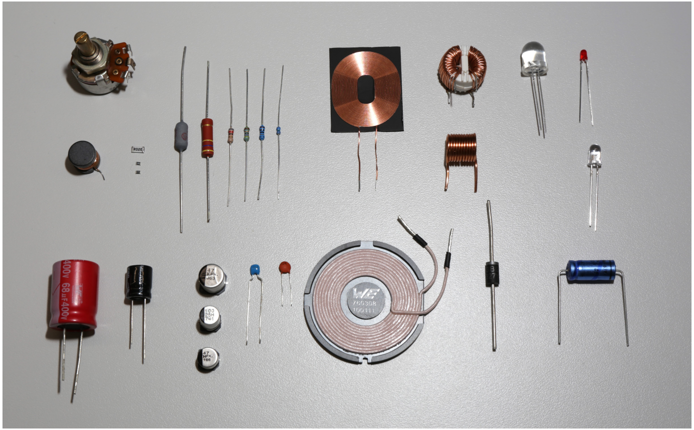
GET it digital

Modul 3: Elektrische Bauelemente

Stand: 2. September 2025

Elektrische Bauelemente



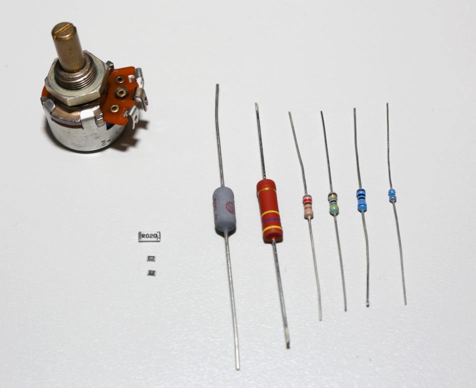
Lernziele: Leitfähigkeit und Widerstand

Die Studierenden

- kennen das elektrische Bauelement Widerstand.
- können die unterschiedlichen Bauteilausführungen von Widerständen erklären.
- können anhand des spezifischen Widerstand ρ oder des spezifischen Leitwertes κ Berechnungen durchführen.
- können die Unterschiede in der Leitfähigkeit verschiedener Materialien basierend auf deren atomarer Struktur und Temperatur analysieren.

Leitfähigkeit und Widerstand

- Unterschiedliche Bauteilausführungen von Widerständen



Aus Modul 1 ist die Definition der Stromdichte J und des Stromes I bekannt. Durch Einsetzen der Formeln 2 und 3 in Formel 1 ergibt sich die Formel 4:

Die elektrische Leitfähigkeit

Aus Modul 1 ist die Definition der Stromdichte J und des Stromes I bekannt. Durch Einsetzen der Formeln 2 und 3 in Formel 1 ergibt sich die Formel 4:

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta A} \tag{1}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

Aus Modul 1 ist die Definition der Stromdichte J und des Stromes I bekannt. Durch Einsetzen der Formeln 2 und 3 in Formel 1 ergibt sich die Formel 4:

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta A} \tag{1}$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{2}$$

Aus Modul 1 ist die Definition der Stromdichte J und des Stromes I bekannt. Durch Einsetzen der Formeln 2 und 3 in Formel 1 ergibt sich die Formel 4:

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta A} \tag{1}$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{2}$$

$$\Delta V = \Delta A \cdot \Delta x \Leftrightarrow \Delta A = \frac{\Delta V}{\Delta x} \tag{3}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

Aus Modul 1 ist die Definition der Stromdichte J und des Stromes I bekannt. Durch Einsetzen der Formeln 2 und 3 in Formel 1 ergibt sich die Formel 4:

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta A} \tag{1}$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{2}$$

$$\Delta V = \Delta A \cdot \Delta x \Leftrightarrow \Delta A = \frac{\Delta V}{\Delta x} \tag{3}$$

$$J = \frac{\Delta Q \cdot \Delta x}{\Delta t \cdot \Delta V} \tag{4}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

Durch Einsetzen der aus Modul 1 bekannten Driftgeschwindigkeit v_{el} und der Raumladungsdichte ρ in die Formel 4, ergibt sich die Formel 7 für die Stromdichte.

Die elektrische Leitfähigkeit

Durch Einsetzen der aus Modul 1 bekannten Driftgeschwindigkeit v_{el} und der Raumladungsdichte ρ in die Formel 4, ergibt sich die Formel 7 für die Stromdichte.

$$v_{el} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{5}$$

Durch Einsetzen der aus Modul 1 bekannten Driftgeschwindigkeit v_{el} und der Raumladungsdichte ρ in die Formel 4, ergibt sich die Formel 7 für die Stromdichte.

$$v_{el} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{5}$$

$$\rho = \frac{\Delta x}{\Delta V} \tag{6}$$

Durch Einsetzen der aus Modul 1 bekannten Driftgeschwindigkeit v_{el} und der Raumladungsdichte ρ in die Formel 4, ergibt sich die Formel 7 für die Stromdichte.

$$v_{el} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{5}$$

$$\rho = \frac{\Delta x}{\Delta V} \tag{6}$$

$$\vec{J} = \rho \cdot \vec{v_{el}} \tag{7}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

Durch Einsetzen der aus Modul 1 bekannten Driftgeschwindigkeit v_{el} und der Raumladungsdichte ρ in die Formel 4, ergibt sich die Formel 7 für die Stromdichte.

$$v_{el} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{5}$$

$$\rho = \frac{\Delta x}{\Delta V} \tag{6}$$

$$\vec{J} = \rho \cdot \vec{v_{el}} \tag{7}$$

Da die Geschwindigkeit immer einen Betrag und eine Richtung hat, ist die Stromdichte ebenfalls ein Vektor.

Die elektrische Leitfähigkeit

Die Driftgeschwindigkeit $\vec{v_{el}}$ der freien Ladungsträger verhält sich proportional zum elektrischen Feld $\vec{E}$, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Der Proportionalitätsfaktor wird auch als Elektronenbeweglichkeit μ_e bezeichnet.

Die Driftgeschwindigkeit $\vec{v_{el}}$ der freien Ladungsträger verhält sich proportional zum elektrischen Feld $\vec{E}$, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Der Proportionalitätsfaktor wird auch als Elektronenbeweglichkeit μ_e bezeichnet.

$$\vec{v_{el}} = -\mu_e \cdot \vec{E} \tag{8}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

Die Driftgeschwindigkeit $\vec{v_{el}}$ der freien Ladungsträger verhält sich proportional zum elektrischen Feld $\vec{E}$, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Der Proportionalitätsfaktor wird auch als Elektronenbeweglichkeit μ_e bezeichnet.

$$\vec{v_{el}} = -\mu_e \cdot \vec{E} \tag{8}$$

Die Raumladungsdichte ρ setzt sich aus der Elementarladung e^- und der Ladungsträgerdichte n_e, zusammen. Aufgrund der negativen Ladung von Elektronen, ergibt sich ein negatives Vorzeichen.

Die Driftgeschwindigkeit $\vec{v_{el}}$ der freien Ladungsträger verhält sich proportional zum elektrischen Feld $\vec{E}$, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Der Proportionalitätsfaktor wird auch als Elektronenbeweglichkeit μ_e bezeichnet.

$$\vec{v_{el}} = -\mu_e \cdot \vec{E} \tag{8}$$

Die Raumladungsdichte ρ setzt sich aus der Elementarladung e^- und der Ladungsträgerdichte n_e, zusammen. Aufgrund der negativen Ladung von Elektronen, ergibt sich ein negatives Vorzeichen.

$$\rho = -n_e \cdot e^- \tag{9}$$

Die Driftgeschwindigkeit $\vec{v_{el}}$ der freien Ladungsträger verhält sich proportional zum elektrischen Feld $\vec{E}$, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Der Proportionalitätsfaktor wird auch als Elektronenbeweglichkeit μ_e bezeichnet.

$$\vec{v_{el}} = -\mu_e \cdot \vec{E} \tag{8}$$

Die Raumladungsdichte ρ setzt sich aus der Elementarladung e^- und der Ladungsträgerdichte n_e, zusammen. Aufgrund der negativen Ladung von Elektronen, ergibt sich ein negatives Vorzeichen.

$$\rho = -n_e \cdot e^- \tag{9}$$

Das Einsetzen von $\vec{v_{el}}$ und ρ in die Formel 7 ergibt den folgenden Ausdruck:

Die Driftgeschwindigkeit $\vec{v_{el}}$ der freien Ladungsträger verhält sich proportional zum elektrischen Feld $\vec{E}$, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Der Proportionalitätsfaktor wird auch als Elektronenbeweglichkeit μ_e bezeichnet.

$$\vec{v_{el}} = -\mu_e \cdot \vec{E} \tag{8}$$

Die Raumladungsdichte ρ setzt sich aus der Elementarladung e^- und der Ladungsträgerdichte n_e, zusammen. Aufgrund der negativen Ladung von Elektronen, ergibt sich ein negatives Vorzeichen.

$$\rho = -n_e \cdot e^- \tag{9}$$

Das Einsetzen von $\vec{v_{el}}$ und ρ in die Formel 7 ergibt den folgenden Ausdruck:

$$\vec{J} = (-n_e \cdot e^-) \cdot (-\mu_e \cdot \vec{E}) \tag{10}$$

Die Minuszeichen heben sich auf und es ergibt sich folgende Formel für die Stromdichte $\vec{J}$:

Die Minuszeichen heben sich auf und es ergibt sich folgende Formel für die Stromdichte $\vec{J}$:

$$\vec{J} = n_e \cdot \mu_e \cdot e^- \vec{E} \tag{11}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

Die Minuszeichen heben sich auf und es ergibt sich folgende Formel für die Stromdichte $\vec{J}$:

$$\vec{J} = n_e \cdot \mu_e \cdot e^- \vec{E} \tag{11}$$

Die materialabhängigen Komponenten n_e und μ_e sowie die Naturkonstante e^- ergeben multipliziert die spezifische Leitfähigkeit κ:

Die Minuszeichen heben sich auf und es ergibt sich folgende Formel für die Stromdichte $\vec{J}$:

$$\vec{J} = n_e \cdot \mu_e \cdot e^- \vec{E} \tag{11}$$

Die materialabhängigen Komponenten n_e und μ_e sowie die Naturkonstante e^- ergeben multipliziert die spezifische Leitfähigkeit κ:

$$\kappa = n_e \cdot \mu_e \cdot e^- \tag{12}$$

Die Minuszeichen heben sich auf und es ergibt sich folgende Formel für die Stromdichte $\vec{J}$:

$$\vec{J} = n_e \cdot \mu_e \cdot e^- \vec{E} \tag{11}$$

Die materialabhängigen Komponenten n_e und μ_e sowie die Naturkonstante e^- ergeben multipliziert die spezifische Leitfähigkeit κ:

$$\kappa = n_e \cdot \mu_e \cdot e^- \tag{12}$$

Zusammengefasst ergibt diese Darstellung die Beschreibung des ohmschen Gesetzes:

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \leftrightarrow \vec{E} = \frac{\vec{J}}{\kappa} \tag{13}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

$$U_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \mathrm{d}\vec{s} \tag{14}$$

$$U_{12} = \int\limits_{P_1}^{P_2} \vec{E} \mathrm{d}\vec{s} \tag{14}$$

Da das elektrische Feld parallel zur Leitungslänge verläuft, ergibt sich das Skalarprodukt:

$$U_{12} = \int\limits_{P_1}^{P_2} \vec{E}\mathrm{d}\vec{s} \tag{14}$$

Da das elektrische Feld parallel zur Leitungslänge verläuft, ergibt sich das Skalarprodukt:

$$U_{12} = \int\limits_{x=0}^{x=l} \vec{E}\mathrm{d}\vec{x} \tag{15}$$

$$U_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \mathrm{d}\vec{s} \tag{14}$$

Da das elektrische Feld parallel zur Leitungslänge verläuft, ergibt sich das Skalarprodukt:

$$U_{12} = \int_{x=0}^{x=l} \vec{E} \mathrm{d}\vec{x} \tag{15}$$

Durch Einsetzen der umgestellten Formel 13 nach $\vec{E}$, folgt:

$$U_{12} = \int\limits_{P_1}^{P_2} \vec{E} \mathrm{d}\vec{s} \tag{14}$$

Da das elektrische Feld parallel zur Leitungslänge verläuft, ergibt sich das Skalarprodukt:

$$U_{12} = \int\limits_{x=0}^{x=l} \vec{E} \mathrm{d}\vec{x} \tag{15}$$

Durch Einsetzen der umgestellten Formel 13 nach $\vec{E}$, folgt:

$$U_{12} = \int\limits_{0}^{l} \frac{J}{\kappa} \mathrm{d}x \tag{16}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

Da es sich um ein homogenes Material handelt ist das κ konstant.

Die elektrische Leitfähigkeit

Da es sich um ein homogenes Material handelt ist das κ konstant.

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \int\limits_0^l J \mathrm{d}x \tag{17}$$

Die elektrische Leitfähigkeit

Da es sich um ein homogenes Material handelt ist das κ konstant.

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \int\limits_0^l J \mathrm{d}x \tag{17}$$

Die folgende Formel für die Stromdichte J ist aus Modul 1 bekannt:

Da es sich um ein homogenes Material handelt ist das κ konstant.

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \int_0^l J \mathrm{d}x \tag{17}$$

Die folgende Formel für die Stromdichte J ist aus Modul 1 bekannt:

$$J = \frac{I}{A} \tag{18}$$

Da es sich um ein homogenes Material handelt ist das κ konstant.

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \int\limits_{0}^{l} J \mathrm{d}x \tag{17}$$

Die folgende Formel für die Stromdichte J ist aus Modul 1 bekannt:

$$J = \frac{I}{A} \tag{18}$$

Duch Einsetzen der Formel ergibt sich folgender Ausdruck:

Da es sich um ein homogenes Material handelt ist das κ konstant.

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \int_0^l J \mathrm{d}x \tag{17}$$

Die folgende Formel für die Stromdichte J ist aus Modul 1 bekannt:

$$J = \frac{I}{A} \tag{18}$$

Duch Einsetzen der Formel ergibt sich folgender Ausdruck:

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \int_0^l \frac{I}{A} \mathrm{d}x \tag{19}$$

Da die Querschnittsfläche A ebenfalls konstant ist, kann das Integral aufgelöst werden:

Die elektrische Leitfähigkeit

Da die Querschnittsfläche A ebenfalls konstant ist, kann das Integral aufgelöst werden:

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{I}{A} \cdot l \tag{20}$$

Da die Querschnittsfläche A ebenfalls konstant ist, kann das Integral aufgelöst werden:

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{I}{A} \cdot l \tag{20}$$

Durch Umstellung ergibt sich:

Da die Querschnittsfläche A ebenfalls konstant ist, kann das Integral aufgelöst werden:

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{I}{A} \cdot l \tag{20}$$

Durch Umstellung ergibt sich:

$$U_{12} = \frac{l}{A \cdot \kappa} \cdot I \tag{21}$$

Da die Querschnittsfläche A ebenfalls konstant ist, kann das Integral aufgelöst werden:

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{I}{A} \cdot l \tag{20}$$

Durch Umstellung ergibt sich:

$$U_{12} = \frac{l}{A \cdot \kappa} \cdot I \tag{21}$$

Da $\frac{l}{A \cdot \kappa}$ der elektrische Widerstand ist, ergibt sich folgende Vereinfachung:

Die elektrische Leitfähigkeit

Da die Querschnittsfläche A ebenfalls konstant ist, kann das Integral aufgelöst werden:

$$U_{12} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{I}{A} \cdot l \tag{20}$$

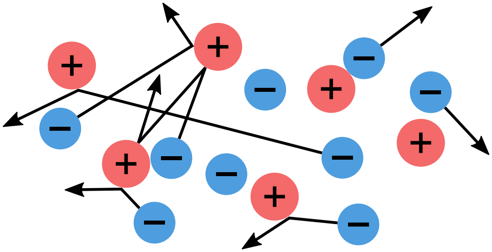
Durch Umstellung ergibt sich:

$$U_{12} = \frac{l}{A \cdot \kappa} \cdot I \tag{21}$$

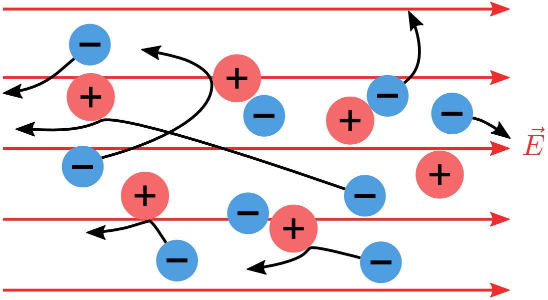
Da $\frac{l}{A \cdot \kappa}$ der elektrische Widerstand ist, ergibt sich folgende Vereinfachung:

$$U = R \cdot I \tag{22}$$

- Ungerichte Bewegung freier Elektronen (blau) zwischen positiv geladenen Atomrümpfen (rot)



- Gerichtete Bewegung von Elektronen entgegen der Richtung des elektischen Feldes $\vec{E}$



Mathematische Zusammenhänge der Leitfähigkeit

$$[\kappa] = 1\ \frac{\text{Siemens}}{\text{meter}} = 1\ \frac{\text{S}}{\text{m}} = 1\ \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}}$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho_{\mathrm{R}}}$$

$$\rho_{\mathrm{R}} = \rho_{20^\circ\mathrm{C}} \cdot (1 + \alpha(\vartheta - 20^\circ\mathrm{C}))$$

Spezifische Leitfähigkeiten und Temperaturkoeffizienten

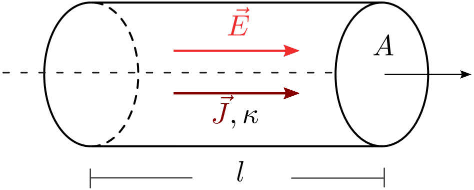
Material	**Spezifische Leitfähigkeit** $[\kappa] = \mathsf{S/m}$	**Temperaturkoeffizient** $[\alpha] = 1/\mathsf{K}$
Silber	$6.1 \cdot 10^7$	0.0038
Kupfer	$5.8 \cdot 10^7$	0.0038
Gold	$4.5 \cdot 10^7$	0.0034
Aluminium	$3.7 \cdot 10^7$	0.004
Eisen	$1.0 \cdot 10^7$	0.0065
Graphit	$3 \cdot 10^6$	-0.0002
Silizium (dotiert)	$1 - 10^6$	-0.075
Leitungswasser	$5.0 \cdot 10^{-3}$	-
Luft	$4.0 \cdot 10^{-15}$	-

Der Leitwert

$$[G] = 1\,\text{Siemens} = 1\,\text{S} = 1\,\frac{1}{\Omega}$$

$$G = \frac{1}{R}$$

- Länge l
- Querschnittsfläche A
- Spezifische Leitfähigkeit κ



Geometrische Eigenschaften

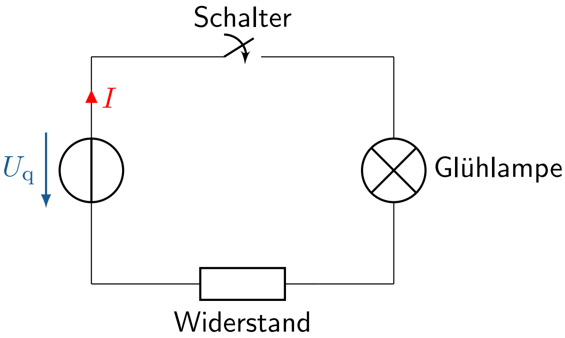
- Allgemeine Formel für den Widerstand in Bezug auf die Materialeigenschaften

$$[R] = 1\,\text{Ohm} = 1\,\Omega$$

$$R = \rho_{\mathrm{R}} \cdot \frac{l}{A}$$

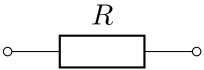
$$\begin{aligned} \rho_{\mathrm{R}} &: \text{spezifischer Widerstand des Materials } (\Omega\text{m}) \\ l &: \text{Länge des Materials } (\text{m}) \\ A &: \text{Querschnittsfläche des Materials } (\text{m}^2) \end{aligned}$$

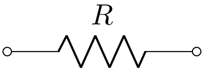
Einführung in die Darstellung von Schaltkreisen



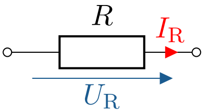
Widerstand als Bauelement

- Europäisches (links) und amerikanisches (rechts) Schaltelement für Widerstand

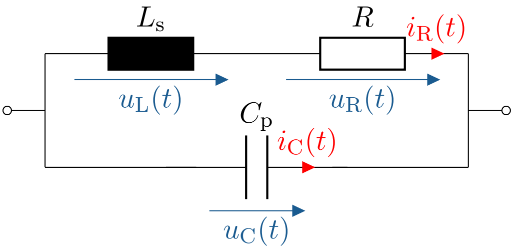




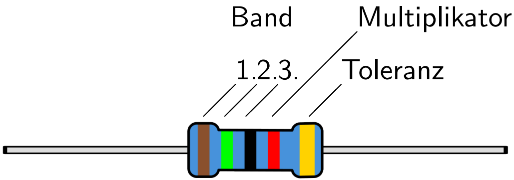
- Der idealer Widerstand als Schaltsymbol



- Ersatzschaltbild eines realen Widerstands mit C_p und L_s



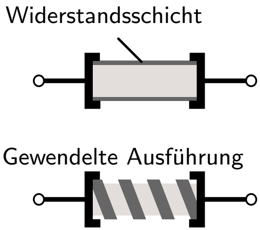
- Widerstandsfarbcodierung



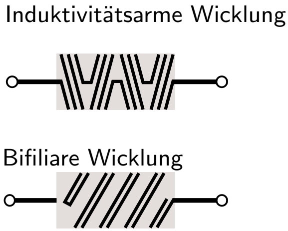
$$1 - 5 - 0 - 2 = 150 \cdot 100\,\Omega = 15\,\mathrm{k}\Omega \pm 5\%$$

Farbe	1. 2. 3. Band	Multiplikator	Toleranz
Schwarz	0	$1\,\Omega$	-
Braun	1	$10\,\Omega$	$\pm 1\,\%$
Rot	2	$100\,\Omega$	$\pm 2\,\%$
Orange	3	$1\,\mathrm{k}\Omega$	-
Gelb	4	$10\,\mathrm{k}\Omega$	-
Grün	5	$100\,\mathrm{k}\Omega$	$\pm 0.5\,\%$
Blau	6	$1\,\mathrm{M}\Omega$	$\pm 0.25\,\%$
Violett	7	$10\,\mathrm{M}\Omega$	$\pm 0.1\,\%$
Grau	8	-	$\pm 0.05\,\%$
Weiß	9	-	-
Gold	-	$0.1\,\Omega$	$\pm 5\,\%$
Silber	-	$0.01\,\Omega$	$\pm 10\,\%$

- Verschiedene Ausführungen von bedrahteten/THT Widerständen



(a) Schichtwiderstände

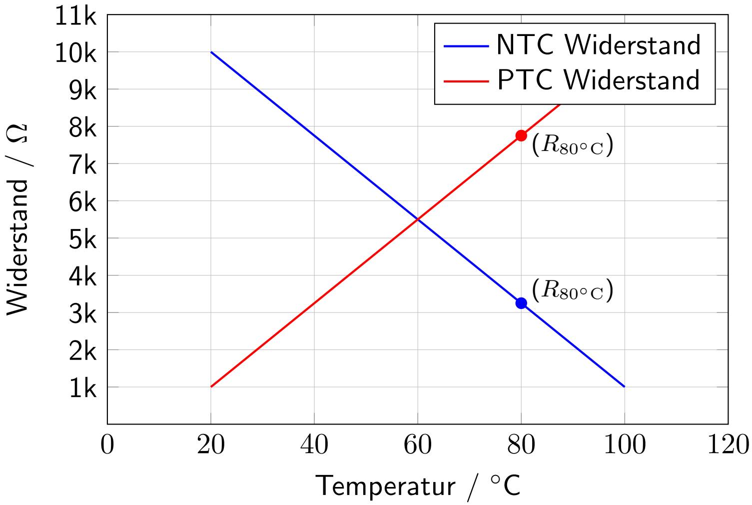


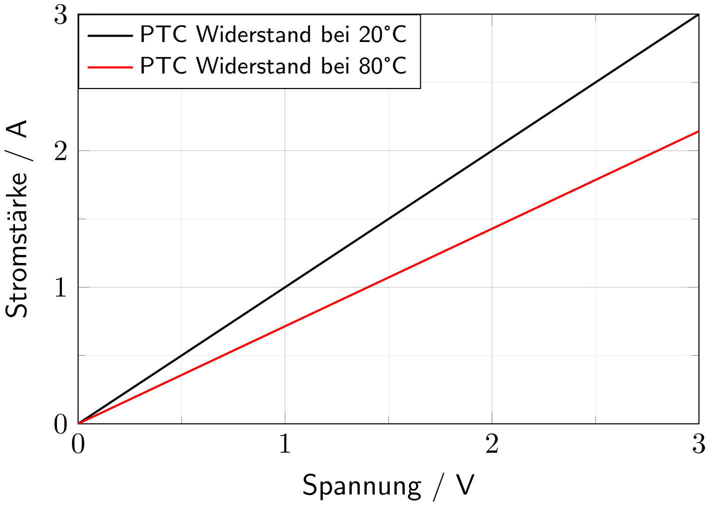
(b) Drahtwiderstände

Merksatz: Widerstand als Bauelement

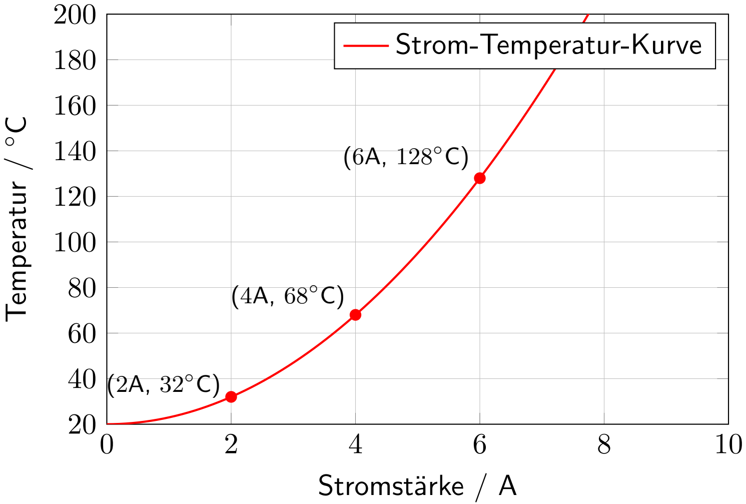
Merke:

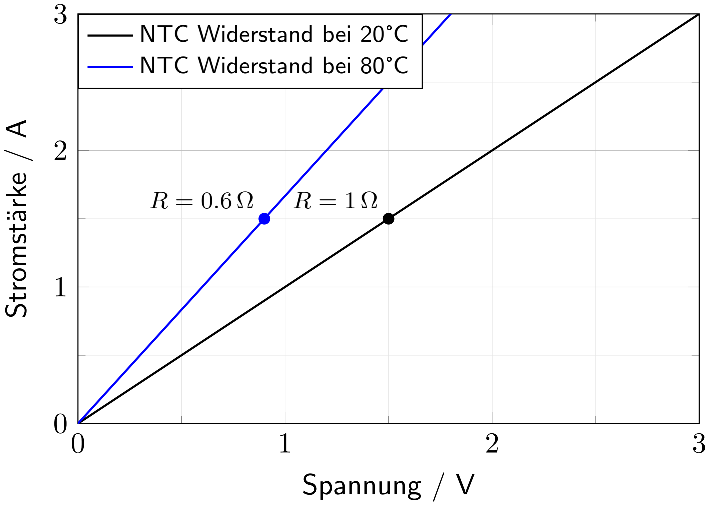
Der Widerstandswert eines Materials ist abhängig von dessen geometrischen und spezifischen Eigenschaften.


NTC Widerstand
PTC Widerstand
$(R_{80^\circ\mathrm{C}})$
$(R_{80^\circ\mathrm{C}})$
11k
10k
9k
8k
7k
6k
5k
4k
3k
2k
1k
0
20
40
60
80
100
120
Widerstand / Ω
Temperatur / °C


PTC Widerstand bei 20°C
PTC Widerstand bei 80°C
Stromstärke / A
Spannung / V
0
1
2
3
0
1
2
3

Temperaturabhängige Widerstände




NTC Widerstand bei 20°C
NTC Widerstand bei 80°C
$R = 0.6\,\Omega$
$R = 1\,\Omega$
Stromstärke / A
Spannung / V
0
1
2
3
0
1
2
3

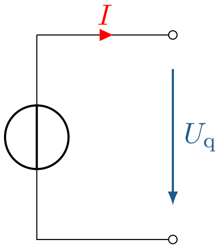
Lernziele: Spannungs- und Stromquelle

Die Studierenden können

- zwischen Spannungs- und Stromquellen unterscheiden und kennen deren Schaltsymbole.
- reale Spannungs- und Stromquellen modellieren.
- Beispiele für verschiedene Quellen benennen.

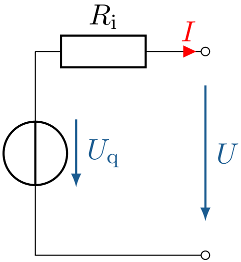
Spannugsquelle

- Ideale Spannungsquelle, liefert stets eine konstante Spannung U_q, unabhängig von der Last oder dem Strom



Spannungsquelle

- Reelle Spannungsquelle. Die Spannung U_q wird durch den Innenwiderstand R_i beeinflusst und ist an den Ausgangsklemmen dadurch geringer

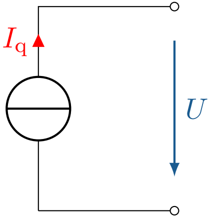


Merksatz: Spannungsquelle

Merke:

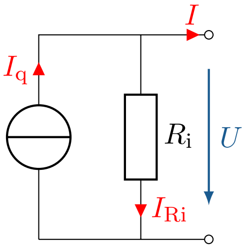
- Eine Spannungsquelle darf nie kurzgeschlossen werden!
- Bei Spannungsquellen stellt sich immer der Strom ein.

- Ideale Stromquelle



Stromquelle

- Reelle Stromquelle mit Innenwiderstand. Der Strom I_q wird durch den Innenwiderstand R_i beeinflusst und ist an den Ausgangsklemmen geringer



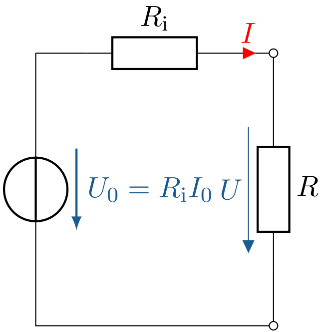
$$I = I_q - I_{R_i} = I_q - \frac{U}{R_i}$$

Merksatz: Stromquelle

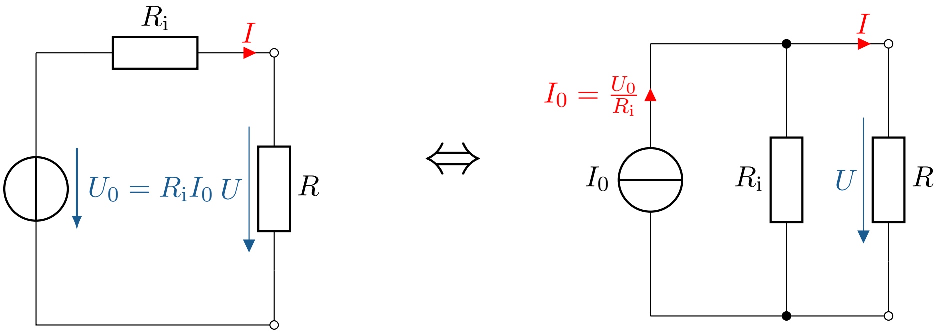
Merke:

- Eine Stromquelle darf nie im Leerlauf betrieben werden!
- Bei Stromquellen stellt sich immer die Spannung ein.

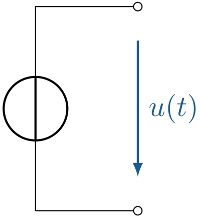
Umwandlung einer Spannungsquelle in eine Stromquelle



Umwandlung einer Spannungsquelle in eine Stromquelle

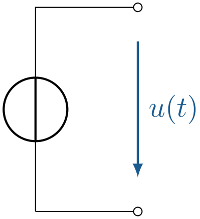


Verschiedenen Spannungs- und Stromquellen

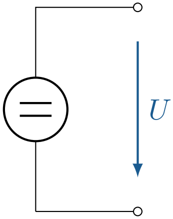


Allgemeine
Spannungsquelle

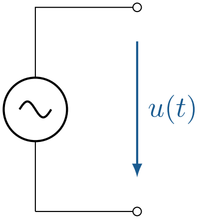
Verschiedenen Spannungs- und Stromquellen



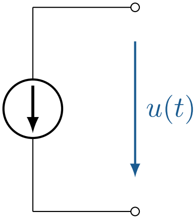
Allgemeine Spannungsquelle



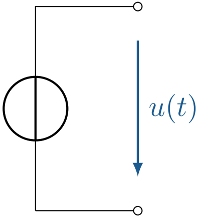
Gleichspannungsquelle



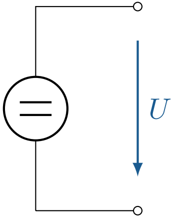
Wechselspannungsquelle



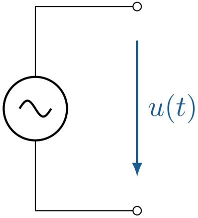
Zeitlich beliebig veränderliche Spannungsquelle



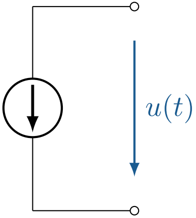
Allgemeine Spannungsquelle



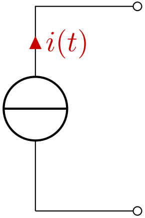
Gleichspan-nungsquelle



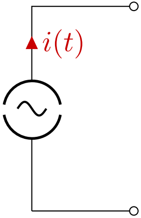
Wechselspan-nungsquelle



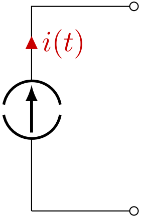
Zeitlich beliebig veränderliche Spannungsquelle



Allgemeine



Wechselstrom-



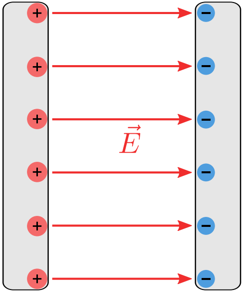
Zeitlich beliebig

Lernziele: Kapazität und Kondensator

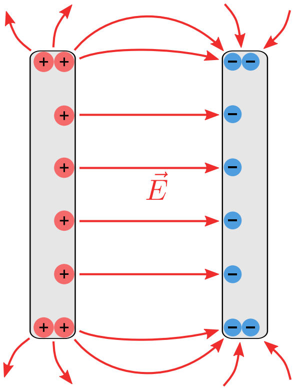
Die Studierenden

- können zwischen Kapazität und Kondensator differenzieren.
- kennen die wichtigsten Parameter rund um den Kondensator und die Kapazität.
- können die Kapazität eines Kondensators berechnen.

- Der ideale Plattenkondensator



- Der reale Plattenkondensator



Die elektrische Kapazität

$$[C] = 1\,\mathsf{Farad} = 1\,\mathsf{F} = 1\,\frac{\mathsf{C}}{\mathsf{V}} = 1\,\frac{\mathsf{As}}{\mathsf{V}}$$

$$C = \frac{Q}{U}$$

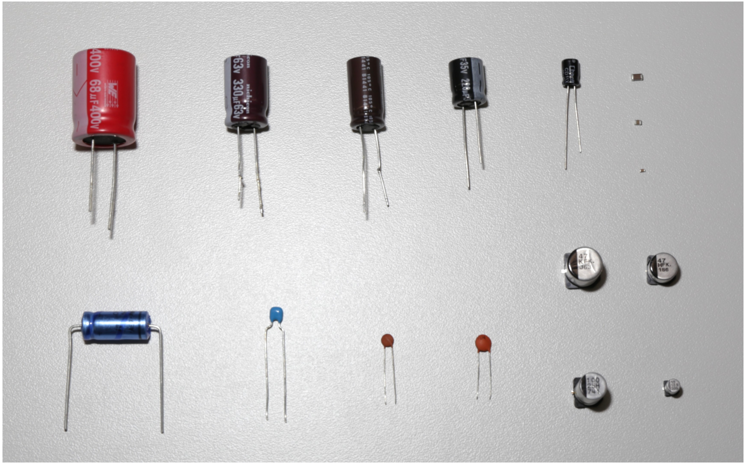
Die elektrische Kapazität

$$[C] = 1\,\text{Farad} = 1\,\text{F} = 1\,\frac{\text{C}}{\text{V}} = 1\,\frac{\text{As}}{\text{V}}$$

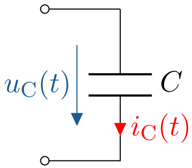
$$C = \frac{Q}{U}$$

$$Q = C \cdot U \quad \Rightarrow \quad C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon \cdot \iint \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{A}}{\int \vec{E}\mathrm{d}\vec{s}}$$

- Verschiedene Arten und Bauformen von Kondensatoren

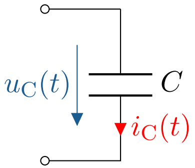


- Idealer Kondensator

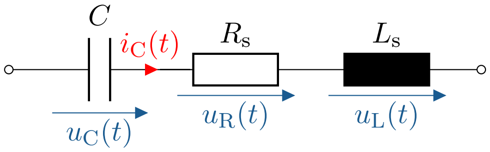


Der Kondensator als Bauelement

- Idealer Kondensator



- Ersatzschaltbild eines realen Kondensators

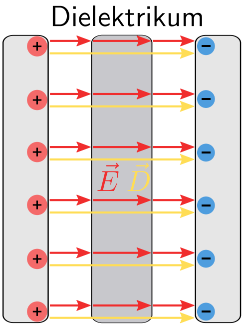


Merksatz: Der Kondensator als Bauelement

Merke:

Der Kondensator ist der verzweifelte Versuch eine Kapazität nachzubilden.

Das Dielektrikum



- Relative Dielektrizitätszahl verschiedener Materialien

Material	$\varepsilon_\mathbf{r}$
Vakuum	1
Luft (bei STP)	1.0006
Kunststoff (PE)	2.25-2.3
Glas	3-10
Keramik	5-300
Silizium	11.7
Tantaloxid	25-30
Wasser	81

Das Dielektrikum

$$[\varepsilon] = 1\,\frac{\text{Farad}}{\text{m}} = 1\,\frac{\text{F}}{\text{m}} = 1\,\frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_\mathrm{r}$$

ε : Dielektrizitätskonstante

ε_0 : Elektrische Feldkonstante ($8.85421878 \cdot 10^{-12}$)

ε_r : Relative Dielektrizitätszahl

Der Kondensator als Bauelement

$$[C] = 1\,\mathsf{F}$$

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

A : Querschnittsfläche des Materials (m^2)

d : Abstand der Elektroden (m)

Die elektrische Flussdichte $\vec{D}$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} + P$$

Die elektrische Flussdichte $\vec{D}$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} + P$$

- Im statischen Fall kann die Polarisation P oft vernachlässigt werden

Die elektrische Flussdichte $\vec{D}$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} + P$$

- Im statischen Fall kann die Polarisation P oft vernachlässigt werden

$$[D] = 1\,\frac{\text{Coulomb}}{\text{m}^2} = 1\,\frac{\text{C}}{\text{m}^2} = 1\,\frac{\text{As}}{\text{m}^2}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$$

Einführung in die zeitabhängige Vorgänge

- $$Q = C \cdot U$$

Einführung in die zeitabhängige Vorgänge

- $$Q = C \cdot U$$
- $$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = C \cdot \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}$$

- $$Q = C \cdot U$$
- $$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = C \cdot \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}$$
- $$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = i(t)$$

Einführung in die zeitabhängige Vorgänge

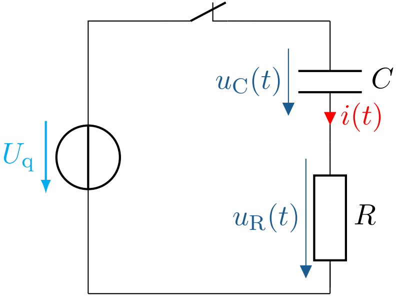
- $$Q = C \cdot U$$
- $$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = C \cdot \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}$$
- $$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = i(t)$$
- $$i_{\mathrm{c}}(t) = C \cdot \frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{c}}(t)}{\mathrm{d}t}$$

Einführung in die zeitabhängige Vorgänge

- $$Q = C \cdot U$$
- $$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = C \cdot \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}$$
- $$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = i(t)$$
- $$i_\mathrm{c}(t) = C \cdot \frac{\mathrm{d}u_\mathrm{c}(t)}{\mathrm{d}t}$$
- $$u_\mathrm{c}(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_\mathrm{c}(t)\mathrm{d}t$$

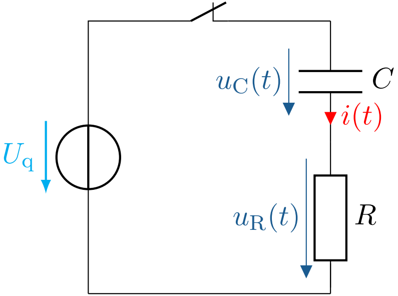
- $I_{\max} = \dfrac{U_q}{R}$

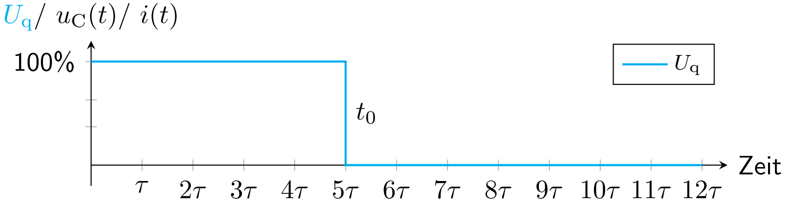
Schalter wird bei $t_0 = 5\tau$ geöffnet



- $I_{\max} = \dfrac{U_q}{R}$

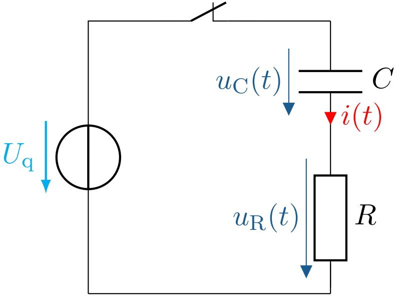
Schalter wird bei $t_0 = 5\tau$ geöffnet

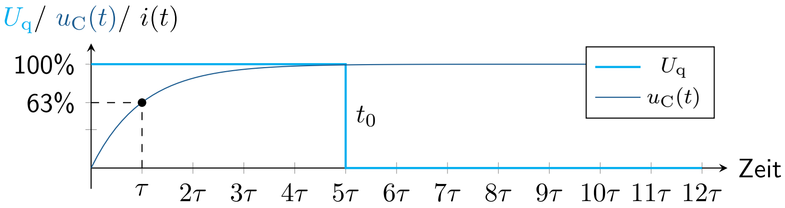




- $I_{\max} = \dfrac{U_q}{R}$

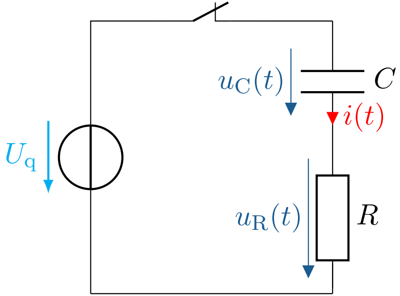
Schalter wird bei $t_0 = 5\tau$ geöffnet

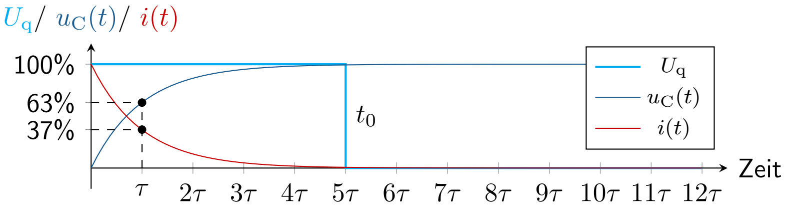




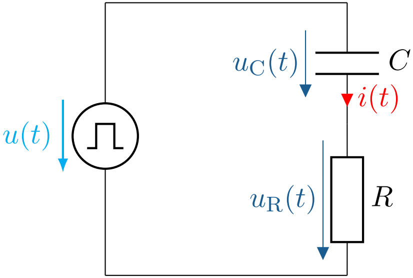
- $I_{max} = \frac{U_q}{R}$

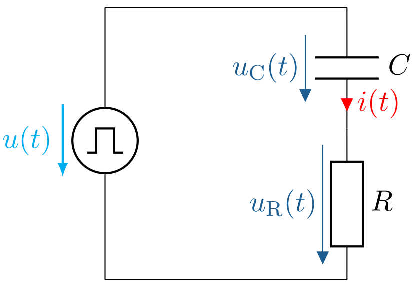
Schalter wird bei $t_0 = 5\tau$ geöffnet

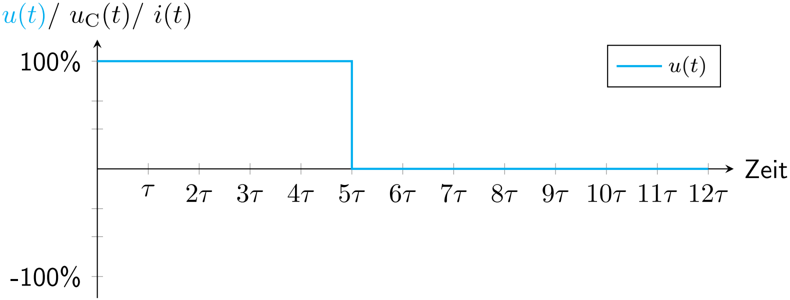




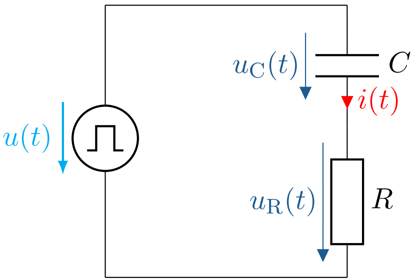
Schaltverhalten eines Kondensators: Entladen

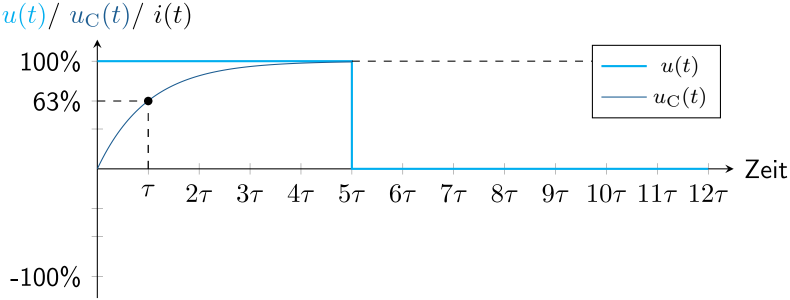



$u_\mathrm{C}(t)$
C
$i(t)$
$u(t)$
$u_\mathrm{R}(t)$
R

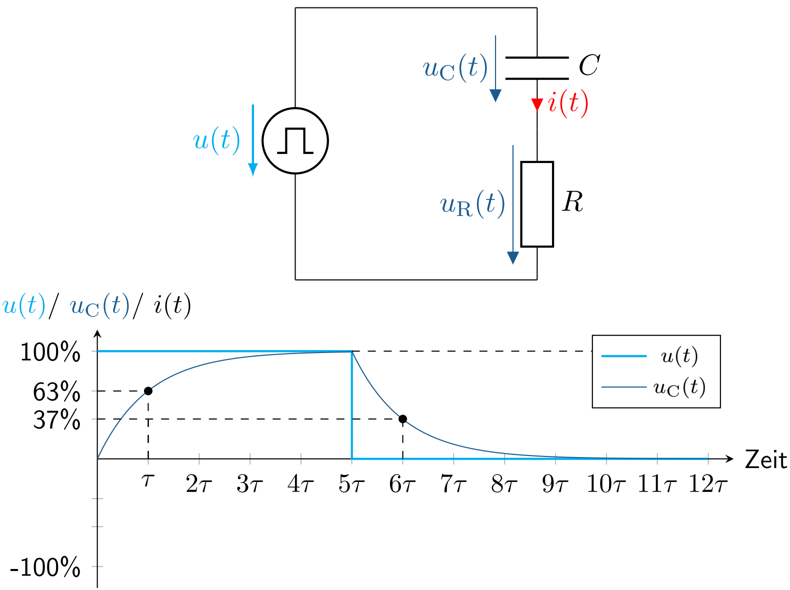

$u(t)$/ $u_\mathrm{C}(t)$/ $i(t)$
100%
-100%
$u(t)$
Zeit
τ 2τ 3τ 4τ 5τ 6τ 7τ 8τ 9τ 10τ 11τ 12τ

Schaltverhalten eines Kondensators: Entladen

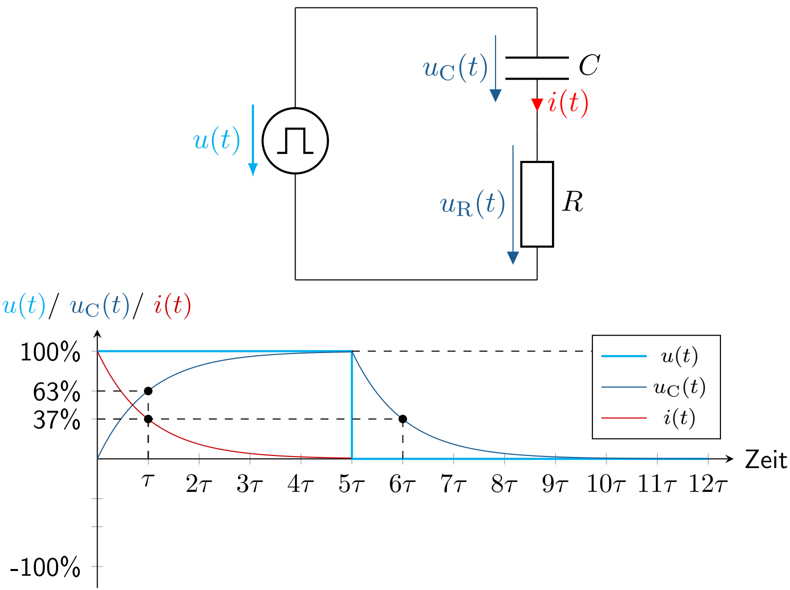




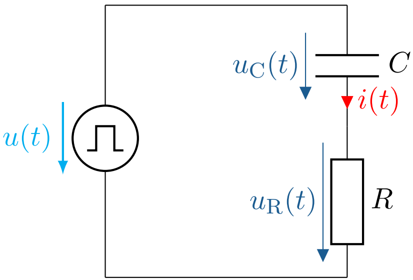
Schaltverhalten eines Kondensators: Entladen

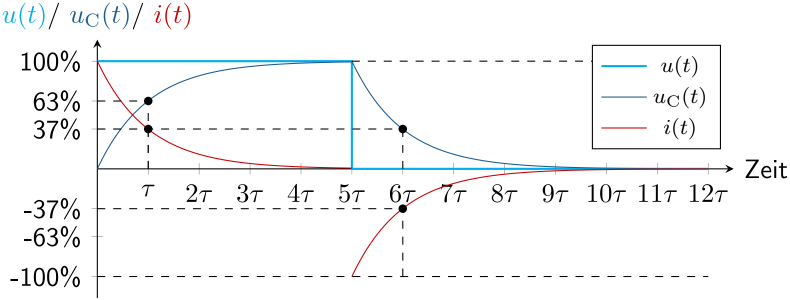


Schaltverhalten eines Kondensators: Entladen



Schaltverhalten eines Kondensators: Entladen





Beispielrechnung Kapazität

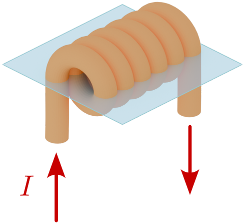
- Ladung auf Platten $Q = \sigma \cdot A = \varepsilon \cdot E \cdot A$
- Kapazität mit $C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$ berechnen
- Gespeicherte Energie $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$
- Kapazität zweier Kondensatoren mit verschiedenen ε_r über $\vec{D}$ berechnen

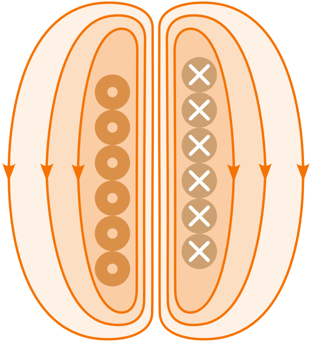
Lernziele: Induktivität und Spule

Die Studierenden

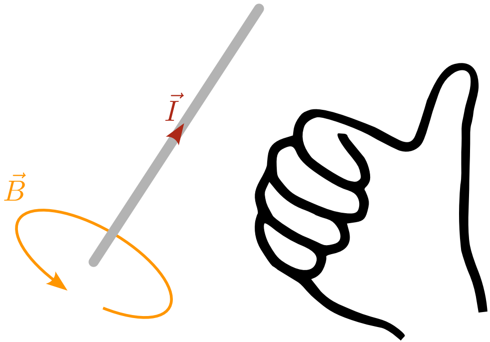
- können zwischen Induktivität und Spule differenzieren.
- kennen die wichtigsten Parameter rund um die Induktivität und die Spule.
- können die Induktivität einer Spule berechnen.

Magnetisches Feld einer Zylinderluftspule





Die Rechte-Hand-Regel



Induzierte Spannung

$$U_\mathrm{i} \sim \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$$

$$U_\mathrm{i} = -N \cdot \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$$

$$U_\mathrm{i} \sim \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

$$U_\mathrm{i} = -L \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

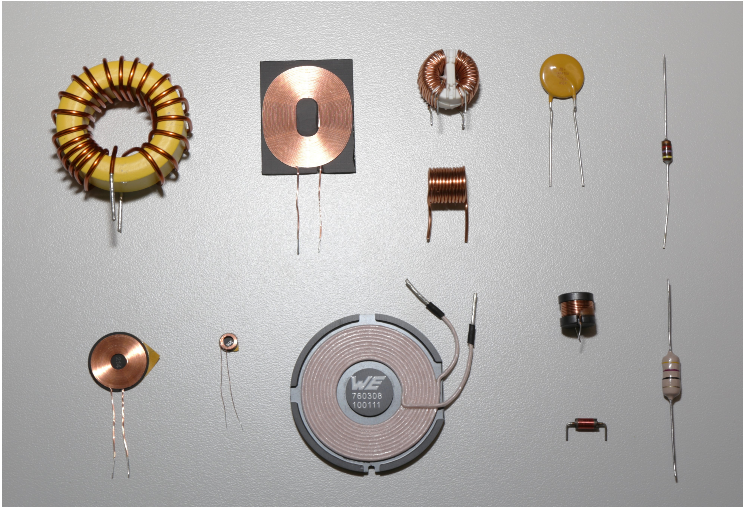
Zeitabhängige Formeln der Induktivität

- Spannung über der Induktivität

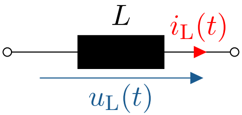
$$u_{\mathrm{L}}(t) = L \cdot \frac{di_{\mathrm{L}}(t)}{dt}$$

- Strom durch die Induktivität

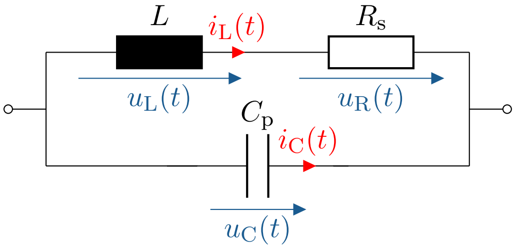
$$i_{\mathrm{L}}(t) = \frac{1}{L} \cdot \int u_{\mathrm{L}}(t)\, dt$$


WE
760308
100111

Die Induktivität als Schaltugselement



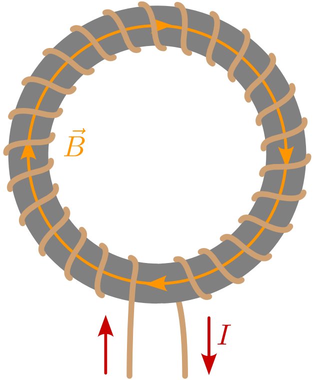
Die Spule als Schaltugselement



Merkesatz: Die Spule als Bauteil

Merke:

Die Spule ist der verzweifelte Versuch, eine Induktivität nachzubilden.


$\vec{B}$
I

Die Permeabilität

Material	$\boldsymbol{\mu_{\mathrm{r}}}$
Supraleiter 1. Art	0
Vakuum	1
Luft (bei STP)	1.00000037
Kupfer	0.999994
Gold	0.999964
Aluminium	1.000022
Eisen	$300 - 10000$
Ferrit	$4 - 15000$

Die Permeabilität

$$\mu = \mu_\mathrm{r} \cdot \mu_0 \quad , \quad [\mathsf{H/m}]$$

μ : Permeabilitätskonstante [H/m]

μ_0 : Magnetische Feldkonstante ($\approx 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

μ_r : Relative Permeabilität des Materials (Einheitenfrei)

Die magnetische Flussdichte

$$B = \frac{\mu \cdot I \cdot N}{l}$$

$$[B] = \frac{\mathrm{H/m} \cdot \mathrm{A} \cdot 1}{\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{H} \cdot \mathrm{A}}{\mathrm{m}^2} = \frac{(\mathrm{V} \cdot \mathrm{s} \,/\, \cancel{\mathrm{A}}) \cdot \cancel{\mathrm{A}}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{m}^2} = \mathrm{T}\ (\mathrm{Tesla})$$

μ : Permeabilitätskonstante]

I : Elektrische Stromstärke

N : Anzahl der Windungen

l : Länge des Magnetkreises

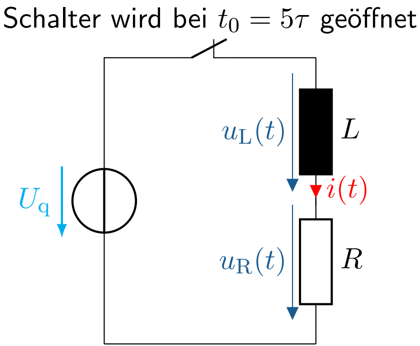
$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

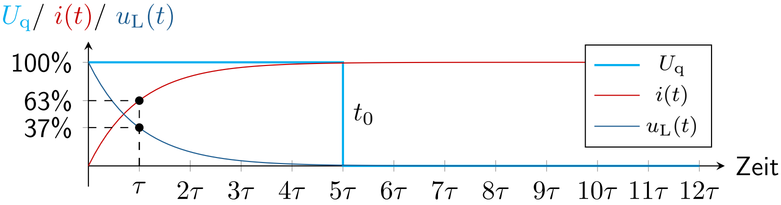
Die Induktivität

$$[L] = 1\,\text{Henry} = 1\,\text{H} = 1\,\frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

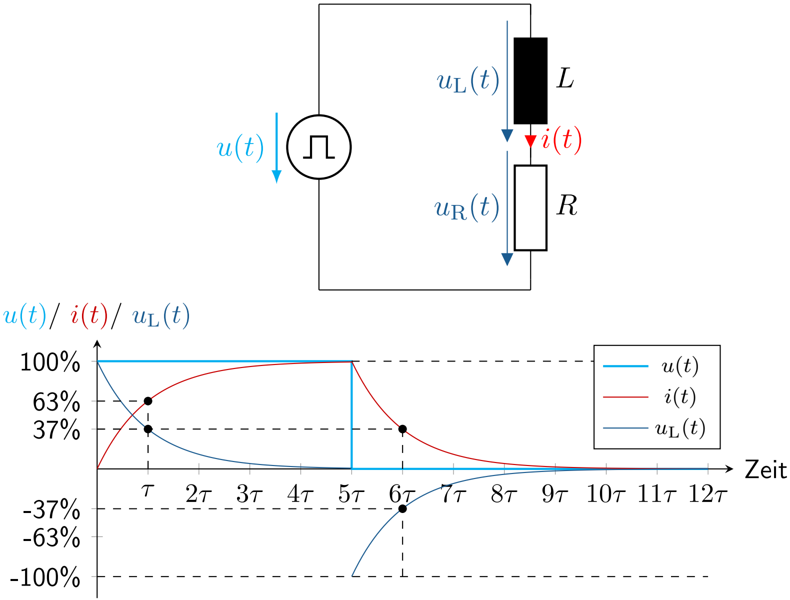
$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

Schaltverhalten einer Spule: Aufladen





Schaltverhalten einer Spule: Entladen



Beispielrechnung Induktivität

- Berechnung der Induktivität L
- Berechnung der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$
- Gespeicherte Energie im Magnetfeld E_m ?