



Elektronik

Vorlesungsskript

Falk Jonatan Strube

Vorlesung von Prof. Dr.-Ing. Flach (bis 12/2015)

3. Dezember 2015

Inhaltsverzeichnis

Einführung

Passwort Materialien: lvf_ws2015

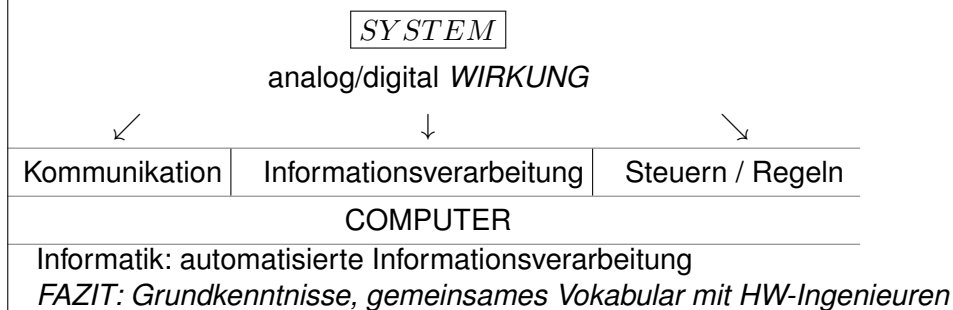
Prüfung: 1 Blatt A4 hanbeschrieben, doppelseitig beschrieben

1 Anliegen der Lehrveranstaltung

Analyse/Synthese

- Modellbildung
- unterschiedliche Anregungen

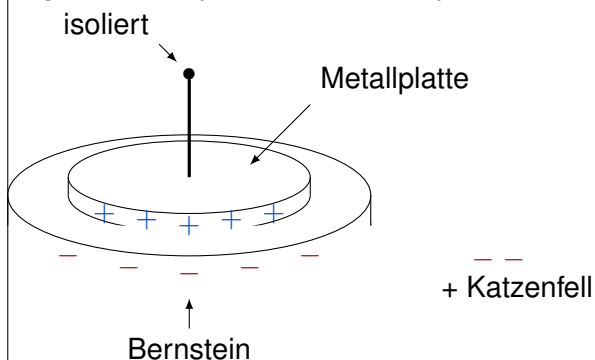
- Bauelemente
aktiv, passiv, Halbleiter
- Netzwerke (linear, nichtlinear)
- Schaltungen (analog, digital)



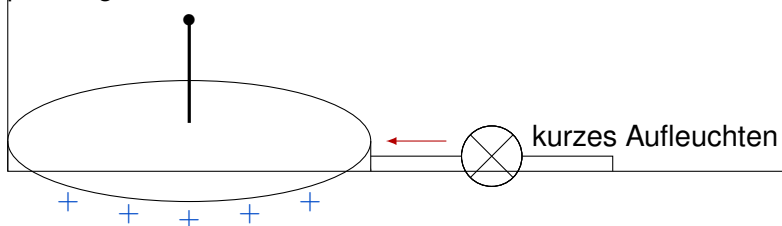
2 Grundlagen der Elektrotechnik

2.1 Grundgrößen und Grundbeziehungen

Bsp.: Elektrophor mit Bernsteinplatte und Katzenfell



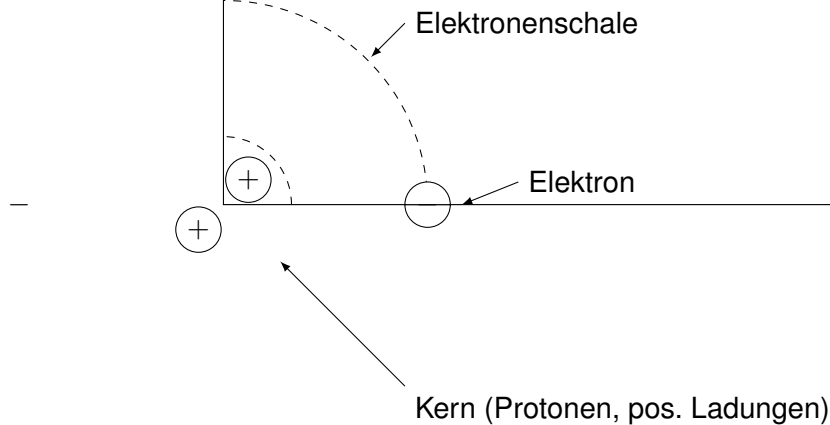
Bernstein mit Katzenfell einreiben, dann Metallplatte anfassen: Elektronen fließen ab, Bernstein ist positiv geladen.



Modellbildung: Erklärung für beobachteten Sachverhalt

- möglichst einfaches Modell
- vollständige widerspruchsfreie Definition
- Beschreibung über mathematische Gleichung

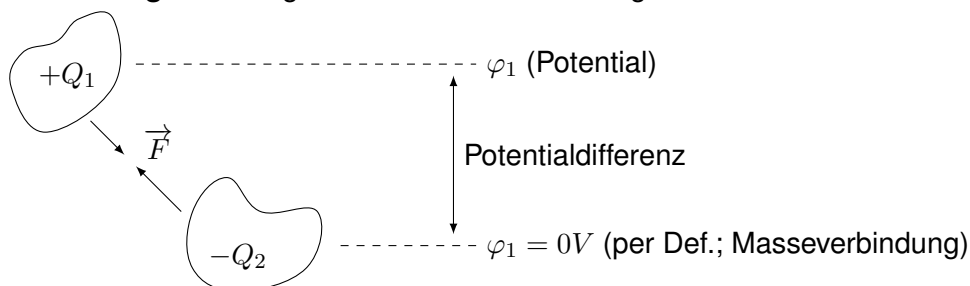
Bohr-Sommerfeldsches Atommodell:



Atommodell ist elektrisch neutral. Aber:

- unter bestimmten Bedingungen entstehen positive und negative Ladungen (Energiezufuhr)
- Elementarladung $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$

Beobachtung: Ladungen ziehen sich an / Ladung stoßen sich ab.



Kraftwirkung

$$F \sim Q_1 \cdot Q_2$$

$$F \sim \frac{1}{r^2}$$

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

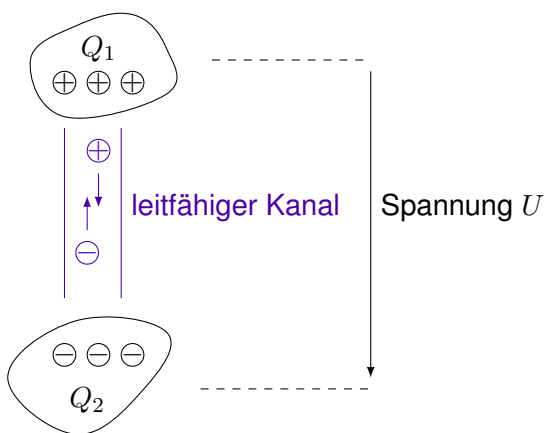
2.2 Potential und Spannung

- Ladungen im elektrischen Feld haben unterschiedliche Potenziale.
- Einheit des Potenzial: Volt [V]
- Spannung ist Potentialdifferenz
- Einführen eines Bezugspotentials $\varphi = 0V$

Beispiele für Spannungen:

- Antennen ... μV
- Microfon ... mV
- Batterie (AA) ... $1,2V$
- Netzteile ... $\pm 5V, \pm 12V$
- Haushalt ... $230V$
- Freileitungen ... $380kV$

2.3 Stromfluss, Ladungsausgleich



- Strom $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, $i(t) = \frac{dQ}{dt}$
- Ursache: Potentialdifferenz
- Voraussetzung: leitfähiger Kanal, bewegliche Ladungen
- „Fließgeschwindigkeit“ bestimmt Größe des Stroms

Analogie: Fluß

Höhenunterschied - Potential

Flussbett - Leitung

Wasser - Leiter

2.4 Widerstand

Beobachtung: $I \sim U$, $I = G \cdot U$ mit $G \dots$ Leitwert

je größer der Leitwert, desto kleiner der Widerstand $\Rightarrow G = \frac{1}{R}$ mit $R \dots$ ohmscher Widerstand

Ohmsches Gesetz: $R \left(= \frac{U}{I} \right) = \text{const.}$ $U = R \cdot I$ $I = \frac{U}{R}$

mit $[I] = A$ (Ampere) $[U] = V$ (Volt) $[R] = \frac{V}{A} = \Omega$ (Ohm) $[G] = \frac{A}{V} = S$ (Siemens)

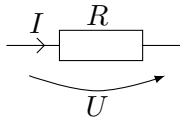
Widerstand ist eine Materialeigenschaft.

$R \sim l$ $R \sim \frac{1}{A}$ $R = k \cdot \frac{l}{A}$ mit $k = \rho \dots$ spezifischer Widerstand $[\rho] = \Omega \cdot m = \Omega \frac{mm^2}{m}$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{A}{\varrho \cdot l} = \frac{\kappa A}{l} \text{ mit } \kappa = \frac{1}{\varrho}$$

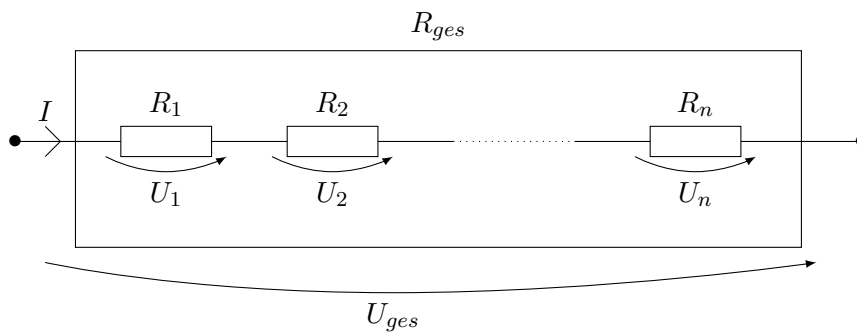
Widerstand ist ...

- Materialeigenschaft
- Bauelement



2.5 Zusammenschaltung von Widerständen

a) Reihenschaltung



$$\text{Maschensatz: } \sum_{\bigcirc} U = 0$$

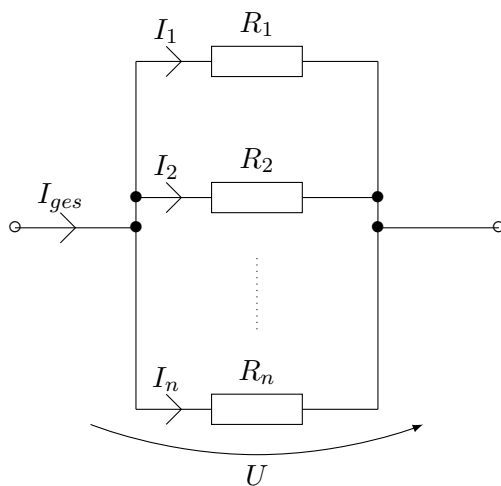
$$U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$U_{ges} = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$$

$$\frac{U_{ges}}{I} = R_{ges} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$R_{ges} = \sum_{i=1}^n R_i$$

b) Parallelschaltung



Knotensatz: $\sum I = 0$

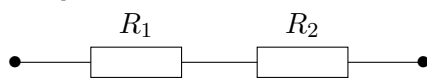
$$I_{ges} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$I_{ges} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n}$$

$$\frac{I_{ges}}{U} = \frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$\boxed{\frac{1}{R_{ges}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}$$

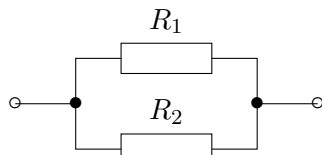
Beispiele:



$$R_{ges} = R_1 + R_2$$

$$R_1 = R_2 = R \Rightarrow R_{ges} = 2R$$

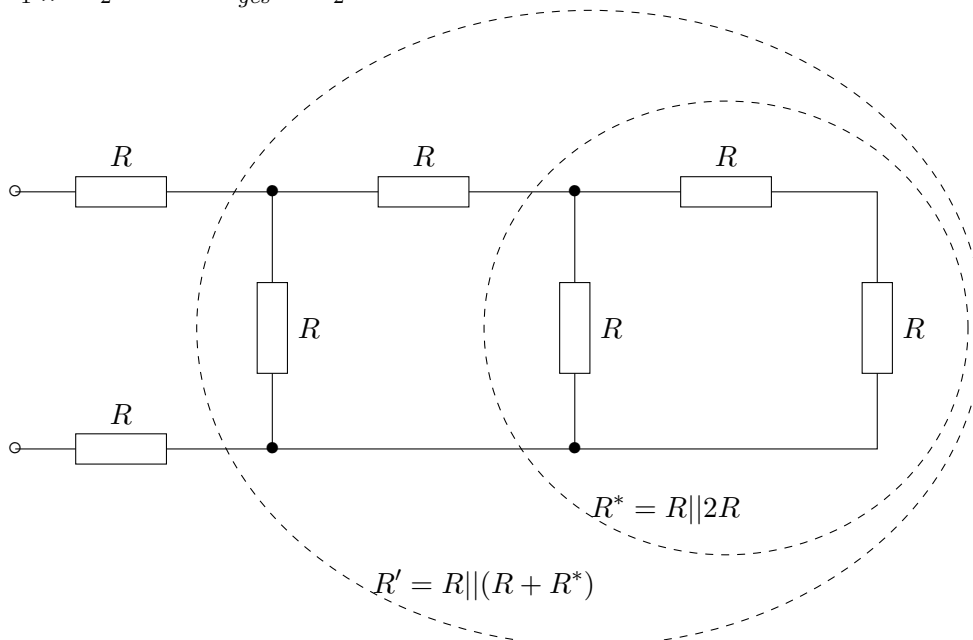
$$R_1 \gg R_2 \Rightarrow R_{ges} \approx R_1$$



$$R_{ges} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_1 = R_2 = R \Rightarrow R_{ges} = \frac{R}{2}$$

$$R_1 \gg R_2 \Rightarrow R_{ges} \approx R_2$$

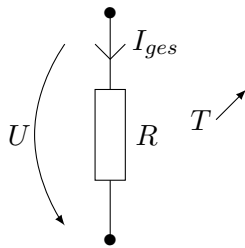


$$R^* = R || 2R = \frac{2R \cdot R}{3R} = \frac{2}{3}R$$

$$R' = R || (R + R^*) = \frac{R \cdot \frac{5}{3}R}{\frac{8}{3}R} = \frac{5}{8}R$$

$$R_{ges} = R + R' + R = 2R + \frac{5}{8}R = \frac{21}{8}R$$

2.6 Leistung und Energie



$$P = U \cdot I \stackrel{U=R \cdot I}{=} I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$$

2.7 Stromkreise und Schaltbilder

- Modellierung elektronischer Erscheinungen
- Berechnung von Stromkreisen

ABB 27

Bsp.: Ein Kondensator wird zum Aufladen an eine Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand R_i angeschlossen und zum Entladen an einen Widerstand R_E . Das Laden erfolgt über den Strombegrenzungswiderstand R_L .

- Umschalter
- Kondensator C , Widerstand R_i , R_E , R_L
- Spannungsquelle

ABB28

3 Berechnung von Stromkreisen

3.1 Spannungsteiler

ABB29

$$U_{R_1} = I R_1 \quad U_{R_2} = I R_2 \quad U_q = I(R_1 + R_2)$$

$$\frac{U_{R_2}}{U_q} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \frac{U_{R_1}}{U_{R_2}} = \frac{R_1}{R_2}$$

Anwendungsbeispiel: Potenziometer

ABB210

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{x \cdot R_{Pot}}{R_{Pot}} \Rightarrow U_{out} = x \cdot U_{in}$$

belasteter Spannungsteiler: ABB211

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_2 || R_L}{R_1 + R_2 || R_L}$$

Bspw.: $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = R_L = 5\Omega$

$$\text{unbelasteter Fall: } \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{5\Omega}{10\Omega} \Rightarrow U_{out} = 5V$$

$$\text{belasteter Fall: } \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{2,5\Omega}{7,5\Omega} \Rightarrow U_{out} = 3,33V$$

doppelter Spannungsteiler ABB212

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_2 || (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 || (R_3 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$\underbrace{\frac{R_2 || (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 || (R_3 + R_4)}}_{\frac{U_{R_2}}{U_{in}}} = \underbrace{\frac{R_4}{R_3 + R_4}}_{\frac{U_{out}}{U_{R_2}}}$$

gesteuerter Spannungsteiler ABB31
3.2 Stromteiler

ABB 32

$$U_{out} = I_3 \cdot R_3 = I_2 \cdot R_2 = I_1 \cdot (R_2 || R_3)$$

$$\frac{I_3}{I_2} = \frac{R_2}{R_3}$$

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{R_2 || R_3}{R_3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{(R_2 + R_3) \cdot R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_2 || R_3}{R_2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

Beispiel: geg.: ABB 33

ges.: R_{AB} , R_{CD} , u_{out} , alle Ströme

$$R_{AB} = R_1 + R_2 || (R_3 + R_4)$$

$$R_{CD} = R_4 || (R_3 + R_2)$$

$$\frac{U_{out}}{U_h} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{U_h}{U_{in}} = \frac{R_2 || (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 || (R_3 + R_4)}$$

$$U_{out} = U_{in} \frac{R_2 || (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 || (R_3 + R_4)} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$I_1 = \frac{U_{in}}{R_{AB}}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} \Rightarrow I_2 = \frac{U_{in}}{R_{AB}} \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4}$$

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4} \Rightarrow I_3 = \frac{U_{in}}{R_{AB}} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3 + R_4}$$

3.3 Strom-Spannungskennlinie

Ziel: anschauliche Beschreibung des Klemmverhaltens von Bauelementen

ABB 34

- Verbraucher: ohmscher Widerstand

ABB 35

$$R = \frac{U}{I} \quad I = f(U) = \frac{1}{R} \cdot U = G \cdot U$$

- Verbraucher: Diode

ABB 36

? \Rightarrow nichtlinear

$$I = f(U) = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

 I_s ... Sperrstrom

 U_T ... Temperaturspannung

3.4 Spannungsquelle

Was ist eine Spannungsquelle?

Batterie, Netzteil, Antenne, Mikrophon, Steckdose, ...

Unterteilung in:

- Signalquellen (irgendein $u(t)$, wenig Energie)
- Spannungsquellen (Gleichspannung/Wechselspannung)

Modell:

1.) ABB 37 Quelle im Leerlauf

2.) ABB 38 Quelle kurzgeschlossen

Ersatzschaltbild einer realen Quelle:

ABB 39 (mit $I_k = \frac{U_q}{R_i}$)

U_q ... Leerlaufspannung

R_i ... Innenwiderstand

I_k ... Kurzschlussstrom

3.5 Grundstromkreis

reale Quelle + Verbraucher

ABB 310

Strom-Spannungs-Kennlinienfeld des Grundstromkreises

Last: $I = f(U) = \frac{U_{AB}}{R_V}$

Quelle: $I = f(U)$

(mit Maschensatz: $I \cdot R_i + U_{AB} - U_q = 0$ $I = \frac{1}{R_i}(U_q - U_{AB}) = -\frac{1}{R_i}U_{AB} + I_k$)

ABB 311

Grundstromkreis mit nichtlinearem Verbraucher

ABB 312

Leistung am Lastwiderstand

ABB 313

$\rightarrow P_V = I \cdot U_{AB}$ mit $U_{AB} = U_q - I \cdot R_i$ $I \cdot R_i + U_{AB} - U_q = 0$

$P_V = U_q \cdot I + I^2 \cdot R_i$ $I = \frac{U_{AB}}{R_V}$

$P_V = f(R_V)$

maximale Leistung am Verbraucher: $\frac{dP_V}{dR_V} = 0 \Rightarrow P_{V,max}$ für $R_V = R_i$ (dann $P_{V,max} = \frac{I_k \cdot U_q}{4}$)

3.5.1 Betrachtung der Leistung im Grundstromkreis

ABB 41

Generator

Verbraucher

- | | |
|----------------------------|------------------------|
| • soll sich nicht erwärmen | • P_L möglichst groß |
| • P_i möglichst klein | • Wirkungsgrad groß |

Leistung am Lastwiderstand:

$$P_L = U_{AB} \cdot I = \frac{U_{AB}^2}{R_L} = I^2 \cdot R_L$$

mögliche Lastfälle:

ABB 42

1.) Leerlauf: $R_L \rightarrow \infty$

$$AP_{\text{Leerlauf}}: U_{AP} = U_q, I_{AP} = 0, P_{AP} = 0$$

2.) Kurzschluss: $R_L = 0$

$$AP_{\text{Kurzschluss}}: U_{AP} = 0, I_{AP} = I_K, P_{AP} = 0$$

3.) großer Lastwiderstand:

$$AP_{gr}: U_{AP} = U_{AP,gr}, I_{AP} = I_{AP,gr}, P_{AP,gr} > 0$$

4.) kleiner Lastwiderstand:

$$AP_{kl}: U_{AP} = U_{AP,kl}, I_{AP} = I_{AP,kl}, P_{AP,gr} > 0$$

Zwei realistische Betriebsfälle:

- Wirkungsgrad groß, dafür nicht maximale Leistung
- Wirkungsgrad bei 50% und maximale Leistung

3.6 Spannungszeitfunktion

Verlauf einer Spannung über der Zeit.

- Gleichspannung $U = \text{const} \neq f(t)$ (Batterien, Stromversorgung für elektrische Geräte)
- Wechselspannung (Steckdose)

ABB 43

Kenngößen: $\hat{U} = 325V$ (Spitzenwert), $U = 230V$ (Effektivwert), $f = 50Hz$ ($T = \frac{1}{f} = 20ms$,

$\omega = 2\pi f$ [Kreisfrequenz]), φ_0 Phasenverschiebung/Nullphasenwinkel

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

- zur Informationsübertragung können \hat{U} , ω und φ_0 variiert werden.
- unterschiedliche Wechselspannungen können gemischt werden.
- harmonische Spannungen (bestehen aus Sinusschwingungen).

Grundtypen von Spannungszeitfunktionen

- periodische Spannungen
ABB 44
- impulsförmige Spannungen
ABB 45

3.7 Kondensator, Kapazität

Kapazität

→ Fähigkeit, Ladungen zu speichern

→ konkretes elektrisches Bauelement (kann Ladungen speichern) \Rightarrow Kondensator

Einsatz: Energiespeicherung, Ausnutzung des frequenzabhängigen Verhaltens

Wirkungsweise:

ABB 46

Beobachtung: $Q \sim U \Rightarrow Q = C \cdot U$

mit C = Proportionalitätsfaktor \Rightarrow Kapazität C mit $[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{As}{V} = F$ (Farrad)

relevante Werte: zwischen $10^{-6}_{\mu} \dots 10^{-9}_n \dots 10^{-6}_p F$

Bemessungsgleichung (für C)

$$C \sim A, C \sim \frac{1}{d}, C \sim \frac{A}{d} \Rightarrow C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

($\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \dots \varepsilon_0$: Dielektrizitätskonstate des Vakuums = $8,856 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$)

Symbol: ABB 47

3.7.1 Strom-Spannungs-Beziehung am Kondensator

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt$$

$$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$$

Konsequenzen: $u(t) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow i_C(t) = \underbrace{\hat{U} \cdot \omega C}_{=\hat{I}} (\sin(\omega t) + 90^\circ)$

Scheinwiderstand des Kondensators: $X_C = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = \frac{\hat{U}}{\hat{U} \omega C} = \frac{1}{\omega C}$

ABB 48

Anwendung des frequenzabhängigen Verhaltens:

ABB 49