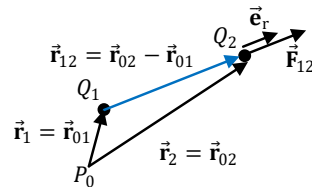


# Elektrotechnik I

## Formelsammlung

### 1 Das elektrostatische Feld

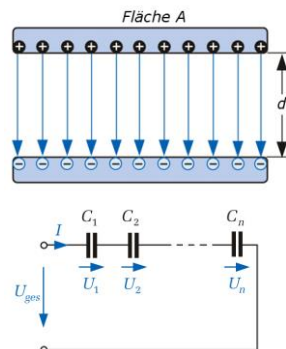
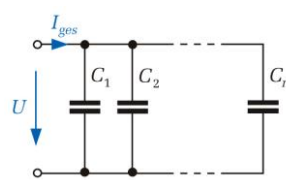
Coulomb'sches Gesetz  $\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{|\vec{r}_{12}|^3} \vec{r}_{12}$



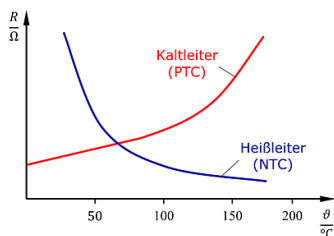
Kraft von 1 auf 2,  
 $Q$ , Ladung [C]=[As]

Skalare Variante

	$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$	
Ladungsverteilung	$\rho = \frac{dQ}{dV}$ $\sigma = \frac{dQ}{dA}$ $\lambda = \frac{dQ}{dl}$	Raumladungsdichte [C/m <sup>3</sup> ] Flächenladungsdichte [C/m <sup>2</sup> ] Linienladungsdichte [C/m]
Elektrisches Feld	$\vec{F} = Q \vec{E}$ $\vec{E}(\vec{r}_p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{Q_i}{ \vec{r}_p - \vec{r}_i ^3} (\vec{r}_p - \vec{r}_i)$ $\vec{E}(\vec{r}_p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \rho(\vec{r}') \frac{\vec{r}_p - \vec{r}'}{ \vec{r}_p - \vec{r}' ^3} d\vec{r}'$	$\vec{E}$ , elektrisches Feld [V/m] E-Feld zeigt von + nach - Superposition von Punktladungen am Ort $\vec{r}_i$ , Feld am Punkt $\vec{r}_p$ Allg. Superposition
Eigenschaften des el. Feldes (konservatives Kraftfeld, nur im statischen Fall)	$\int_{C_1} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{C_2} \vec{E} \cdot d\vec{s}$ $\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$ $\nabla \times \vec{E} = 0$	Arbeit ist weginvariant, nur abhängig vom Anfangs- und Endpunkt. Arbeit entlang eines geschlossenen Pfades verschwindet Rotation des Feldes = 0 (nur in Elektrostatik!)
El. Arbeit	$W_{e12} = Q_1 \int_{r_1}^{r_2} (-\vec{E}) \cdot d\vec{s}$	$W_e$ Arbeit um $Q_1$ von 1 nach 2 [J]
Potential	$\varphi = \frac{W_e}{Q}$ $\varphi(P_B) = - \int_{\infty}^{P_B} \vec{E} \cdot d\vec{s}$ $\vec{E} = -\nabla\varphi$ $U_{12} = \varphi(P_1) - \varphi(P_2) = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{s}$	$\varphi$ , Potential [V], Bezugspunkt üblicherweise im Unendlichen $U$ , Spannung [V]

Elektrische Flussdichte	$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$	$\vec{D}$ , elektrische Flussdichte [C/m <sup>2</sup> ] $\epsilon_r$ , Dielektrizitätskonstante, einheitslos
	$\oiint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q$	Gauss'sches Gesetz (Integralform)
	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	Gauss'sches Gesetz (Differentialform)
Randbedingungen	$\vec{E}_{t1} = \vec{E}_{t2}$	Tangentialkomponente
	$D_{n2} - D_{n1} = \sigma$	Normalkomponente
Kapazität, Kondensatoren	$C = \frac{Q}{U}$	$C$ , Kapazität, [F]=[As/V]
	$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$	Plattenkondensator
Serienschaltung	$C_{\text{ser}}^{-1} = \sum_{k=1}^n C_k^{-1}$	 <p>The top diagram shows a parallel plate capacitor with two plates of area A separated by distance d. The top plate has positive charges (+) and the bottom plate has negative charges (-). Blue arrows represent the electric field pointing downwards. The bottom diagram shows a series circuit with capacitors C1, C2, ..., Cn. A total voltage U_ges is applied across the series combination. Individual voltages U1, U2, ..., Un are indicated across each capacitor.</p>
	$C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	
Spannungsteiler	$U_i = U_{\text{ges}} \frac{C_i^{-1}}{\sum_n C_n^{-1}}$	Spezialfall für zwei Kondensatoren
	$U_1 = U_{\text{ges}} \frac{C_2}{C_1 + C_2}$	
Parallelschaltung	$C_{\text{parr}} = \sum_{k=1}^n C_k$	 <p>The diagram shows a parallel circuit with capacitors C1, C2, ..., Cn connected to a voltage source U. The total current I_ges is shown entering the top terminal. Individual currents through each capacitor are not explicitly labeled, but the voltage U is the same across all.</p>
	$Q_i = Q_{\text{ges}} \frac{C_i}{\sum_n C_n}$	
Ladungsteiler	$Q_1 = Q_{\text{ges}} \frac{C_1}{C_1 + C_2}$	Spezialfall für zwei Kondensatoren
Energie	$W_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CU^2$	$W_e$ , Energie im Kondensator [J]

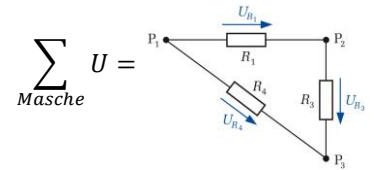
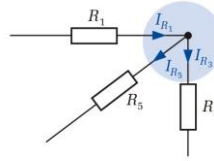
## 2 Das stationäre elektrische Strömungsfeld

Elektrischer Strom	$I(t) = \frac{dQ}{dt}$ $I = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \kappa \iint_A \vec{E} \cdot d\vec{A}$	$I$ , Strom [Ampere, A] $Q$ , el. Ladung, [Coulomb, C]
Elektrische Stromdichte	$I = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$ $I = \vec{J} \cdot \vec{A}, \text{ wenn } J = \text{konstant auf } A$ $\vec{J} = \frac{\Delta I}{\Delta A} \vec{e}_v = \rho \cdot \vec{v}$ $\vec{J}_v = \frac{d}{dt} \vec{D}$	$J$ , Stromdichte, [A/m <sup>2</sup> ]  Konvektionsstrom  Verschiebungsstrom
Kontinuitätsgleichung	$\frac{d\rho}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$ $\oiint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = 0$ (geschlossene Fläche A!)	Spezialfall: ohne Ladungsträger-Generation, Senke
Materialeigenschaften	$\mu_e \vec{E} = \vec{v}_e, \mu_h \vec{E} = \vec{v}_h$ $\kappa = ne \mu_e$ $\rho_R = \frac{1}{\kappa}$	$\mu_e, \mu_h$ , Mobilität Elektronen & Löcher, [m <sup>2</sup> /Vs]  $\kappa$ , Leitfähigkeit, [S/m]  $\rho_R$ , Spez. Widerstand, [Ωm]
Im elektrischen Leiter	$\vec{E} = \rho_R \vec{J}$ $\vec{J} = \kappa \vec{E}$	
Widerstand, Leitwert	$R = \rho_R \frac{L}{A}$ $G = \frac{1}{R}$ $R(T) = \frac{l}{A} \rho_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2)$	$\rho_{20}$ , spez. Widerstand bei 20°C  
Ohm'sches Gesetz	$U = RI$ $I = GU$	$U$ , Spannung, [Volt, V] $R$ , Widerstand [Ohm, Ω]  $G$ , Leitwert [Siemens, S]
Leistung	$P = UI$ $p = \frac{dP}{dV} = \vec{J} \cdot \vec{E}$	$P$ , Leistung, [Watt, W]  $p$ , Leistungsdichte pro Volumen, [W/m <sup>3</sup> ]

### 3 Elektrische Netzwerke

Kirchhoff'sche  
Gleichungen

$$\sum_{\text{Knoten}} I = 0$$



Widerstandsnetze

Serie / Reihe

$$R_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^n R_k$$

Gesamtwiderstand

Parallel

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$$

$$G_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^n G_k$$

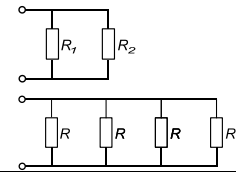
Gesamtleitwert

2 parallele Widerstände

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

N gleiche, parallele  
Widerstände

$$R_{\text{ges}} = \frac{R}{n}$$



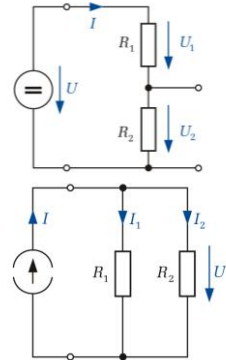
Teiler

Spannungsteiler

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}$$

Stromteiler

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I} &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ &= \frac{G_1}{G_1 + G_2} \end{aligned}$$



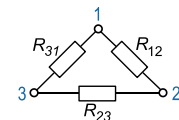
Umwandlung

Dreieck → Stern

$$R_{1N} = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_{2N} = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_{3N} = \frac{R_{23} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

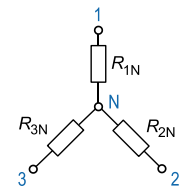


Stern → Dreieck

$$R_{12} = R_{1N} + R_{2N} + \frac{R_{1N} R_{2N}}{R_{3N}}$$

$$R_{23} = R_{2N} + R_{3N} + \frac{R_{2N} R_{3N}}{R_{1N}}$$

$$R_{31} = R_{1N} + R_{3N} + \frac{R_{1N} R_{3N}}{R_{2N}}$$



Superpositions-  
prinzip Quellen:  
Die Gesamtquelle  
ist die lineare  
Superposition der  
Teillösungen von  
jeder einzelnen  
Quelle

Spannungsquelle

Einzelne Quelle bestimmen:  
Ersatz durch Kurzschluss

Es darf bei Teillösungen  
keine zusätzliche Spannung  
über der Quelle abfallen

Stromquelle

Einzelne Quelle bestimmen:  
Ersatz durch Unterbruch

Es darf bei Teillösungen kein  
zusätzlicher Strom durch die  
Quelle fließen.

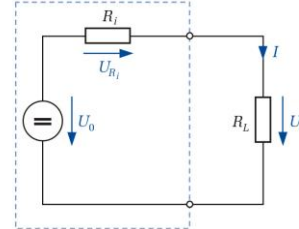
Ideale Spannungsquelle			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konstante Spannung unabh. von Strom</li> <li>- Innenwiderstand 0</li> <li>- Unphysikalisch bei Kurzschluss</li> </ul>
Ideale Stromquelle			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konstanter Strom unabh. von Spannung</li> <li>- Innenwiderstand unendlich</li> <li>- Unphysikalisch wenn offen</li> </ul>
Reale (lineare) Quelle			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Endlicher Innenwiderstand</li> <li>- Kein unphysikalisches Verhalten</li> <li>- <math>U = U_0 - R_i I</math></li> <li>- <math>I = I_K - U/R_i</math></li> </ul>
Beliebige Kombination von Quellen können durch eine äquivalente Quelle ersetzt werden.	Thévenin-Äquivalent: 		Nach Norton-Äquivalent: 
Verfahren zum Finden äquivalenter Quellen: Finde 2 der 3 Grössen $U_0, I_K, R_i$	$U_0 = I_K R_i$	$I_K = \frac{U_0}{R_i}$	$R_i = \frac{U_0}{I_K}$
Leerlaufspannung $U_0$ finden durch	Ausgang offen lassen	Spannung berechnen	
Kurzschlussstrom $I_K$ finden durch	Ausgang kurzschliessen	Strom berechnen	
Innenwiderstand $R_i$ finden durch	Alle Quellen ausschalten	Äquivalenten Widerstand berechnen	

Identische Quellen	Leerlaufspannung	Kurzschlussstrom	Innenwiderstand
Serienschaltung	$U_{0,n} = n U_0$	$I_{K,n} = I_K$	$R_{i,n} = n R_i$
Parallelschaltung	$U_{0,n} = U_0$	$I_{K,n} = n I_K$	$R_{i,n} = \frac{R_i}{n}$

### Leistungsanpassung

Von Spannungsquelle an  
Last abgegebene Leistung

$$P_L = \left( \frac{U_0}{R_i + R_L} \right)^2 R_L$$



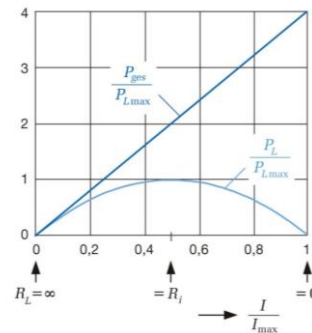
Bei Leistungsanpassung:  $R_L = R_i$

Maximal abgegebene  
Leistung

$$P_{L,max} = \frac{U_0^2}{4R_i}$$

bei  
Leistungsanpassung

$$R_L = R_i$$



Wirkungsgrad einer  
Spannungsquelle

$$\eta = \frac{P_L}{P_{ges}} = \frac{R_L}{(R_i + R_L)} = \frac{U_L}{U_0}$$

Wirkungsgrad einer  
Stromquelle

$$\eta = \frac{P_L}{P_{ges}} = \frac{R_i}{(R_i + R_L)} = \frac{I_L}{I_K}$$

### Knotenpotentialverfahren

Allgemein

- 1) Knoten & Potentiale  
numerieren
  - Potential 0: «GND»
  - k-1 freie

$$\varphi_i = U_{i0}$$

- 2) Knotengleichungen

$$\sum_{j \neq i} I_{ij} = 0$$

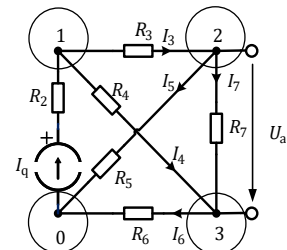
- 3) Leitwerte & Potentiale  
einsetzen
  - Stromquellen auf die rechte Seite

$$\sum_{j \neq i} G_{ij}(\varphi_i - \varphi_j) = \sum_{j \neq i} I_{q,ij}$$

- 4) Nach Potentialen  
gruppieren

$$\left( \sum_{j \neq i} G_{ij} \right) \varphi_i - \sum_{j \neq i} G_{ij} \varphi_j = \sum_{j \neq i} I_{q,ij}$$

Beispiel



$$1: I_3 + I_4 - I_q = 0$$

$$1: G_3(\varphi_1 - \varphi_2) + G_4(\varphi_1 - \varphi_3) = I_q$$

$$2: (G_3 + G_4)\varphi_1 - G_3\varphi_2 - G_4\varphi_3 = I_q$$

5) Matrixform

- Leitwertmatrix  $M$
- Quellenstromvektor  $\vec{I}$

$$M_{ij} = \begin{cases} -G_{ij} & j \neq i \\ \sum_{l \neq i} G_{il} & j = i \end{cases}$$

$$\vec{I}_i = \sum_{l \neq i} I_{q,il}$$

$$M = \begin{bmatrix} G_3 + G_4 & -G_3 & -G_4 \\ -G_3 & G_3 + G_5 + G_7 & -G_7 \\ -G_4 & -G_7 & G_4 + G_6 + G_7 \end{bmatrix}$$

$$\vec{I} = \begin{bmatrix} I_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

6) Matrixgleichung lösen

$$M\vec{\varphi} = \vec{I}$$

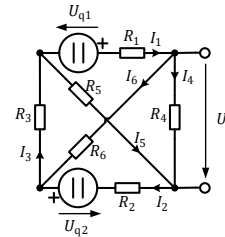
Maschenstromverfahren

Allgemein

Beispiel

1) (Zweig-) Strompfeile definieren

$I_1$  bis  $I_z$ ,  $z$  Zweige

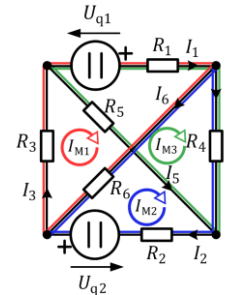


2) Lin. unabhängige Maschen finden

$M_1$  bis  $M_m$ ,  $m$  Maschen

3) Maschenstrom für jede Masche definieren

$I_{M1}$  bis  $I_{Mm}$



4) Zweigströme als Kombination der Maschenströme schreiben

$$\forall i \in \{1, \dots, k\}, I_i = \sum_{n=1}^m b_n I_{Mn}, \text{ mit } b_n \in \{0, \pm 1\}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{M1} + I_{M3} \\ I_3 &= I_{M1} \\ I_6 &= I_{M1} - I_{M2} \end{aligned} \quad \text{etc.}$$

$$\Rightarrow \vec{I} = A\vec{I}_M$$

5) Für jede Masche Maschengleichung aufstellen.

$$\forall m \sum_{U \in M_m} U = 0$$

$$U_1 + U_6 + U_3 - U_{q1} = 0$$

6) Ohm'sches Gesetz anwenden. Ströme durch Maschenströme gemäss (4) ersetzen.

$$U = \begin{cases} R_i I_i = R_i \sum_{n=1}^m b_n I_{Mn} & , \Omega\text{-Law} \\ U_q & , \text{Quellen} \end{cases}$$

$$R_1(I_{M1} + I_{M2}) + R_6(I_{M1} - I_{M2}) + R_3 I_3 = U_{q1}$$

7) Finde Maschenströme

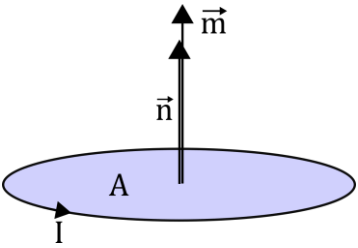
$$R\vec{I}_M = \vec{Q}$$

$$\begin{bmatrix} -R_6 & R_2 + R_6 + R_4 & R_4 \\ R_1 + R_3 + R_6 & -R_6 & R_1 \\ R_1 & R_4 & R_4 + R_5 + R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{M1} \\ I_{M2} \\ I_{M3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{q2} \\ U_{q1} \\ U_{q1} \end{bmatrix}$$

8) Finde Zweigströme

$$\vec{I} = A\vec{I}_M = A R^{-1} \vec{Q}$$

## 4 Das stationäre Magnetfeld

Lorentz-Kraft auf bewegte Ladung	$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$	$q$ , Elementarladung [C] $\vec{v}$ , Geschwindigkeitsvektor [m/s] $\vec{B}$ , Magnetische Flussdichte [T]
Lorentz-Kraft auf Leiter	$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$	$\vec{l}$ , Gerichtetes Leiterstück der Länge $l$
Gesetz von Oersted	$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum_k I_k = \theta$	$\vec{H}$ , Magnetische Feldstärke [A/m] $\theta$ , Durchflutung [A]
Durchflutungsgesetz/ Ampèresches Gesetz	$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A \vec{j} \cdot d\vec{A} := \theta$ $\nabla \times \vec{H} = \vec{j}$	
Magnetische Feldstärke im Vakuum	$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$	$\mu_0$ , Magnetische Feldkonstante [H/m=N/A <sup>2</sup> ]
Magnetische Spannung	$V_{m,AB} = \int_A^B \vec{H} \cdot d\vec{s}$	$V_{m,AB}$ , Magnetische Spannung zwischen den Punkten $A$ und $B$ [A]
Magnetischer Fluss	$\Phi_A = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$	$\Phi_A$ , Magnetischer Fluss durch Fläche $A$
Magnetische Feldstärke eines unendlich langen geraden Leiters	$\vec{H}(\rho) = \begin{cases} \vec{e}_\varphi \frac{I}{2\pi a^2} \rho & \rho \leq a \\ \vec{e}_\varphi \frac{I}{2\pi \rho} & \rho > a \end{cases}$	$\rho$ , Abstand zum Zentrum des Leiters $a$ , Radius des Leiters $\vec{e}_\varphi$ , Einheitsvektor in $\varphi$ -Richtung in Zylinderkoordinaten
Magnetische Feldstärke im Inneren einer idealisierten Toroidspule	$\vec{H}(\rho) = \vec{e}_\varphi \frac{NI}{2\pi \rho}$	$\rho$ , Abstand zum Zentrum der Spule $N$ , Wicklungszahl $\vec{e}_\varphi$ , Einheitsvektor in $\varphi$ -Richtung in Zylinderkoordinaten
Magnetische Feldstärke im Inneren einer idealisierten langgestreckten Zylinderspule	$\vec{H} = \vec{e}_x \frac{NI}{l}$	$N$ , Wicklungszahl $l$ , Spulenlänge $\vec{e}_x$ , Einheitsvektor in $x$ -Richtung
Gesetz von Biot-Savart	$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \vec{j}(\vec{r}') \times \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{ \vec{r} - \vec{r}' ^3} dV'$	$\vec{r}$ , Ortsvektor des Berechnungspunkts $\vec{r}'$ , Ortsvektor des Leiterstücks
Magnetisches Moment	$\vec{m} = \vec{n}IA = I\vec{A}$	
Magnetisierung	$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^N \vec{m}_n$	
Magnetische Polarisation	$\vec{j} = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^N \vec{j}_n = \mu_0 \vec{M}$	
Beziehung zwischen magnetischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte	$\vec{B} = \mu \vec{H}$ $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + (\mu - \mu_0) \vec{H} = \mu_0 \vec{H} + \vec{j}$	$\mu$ , Magnetische Permeabilität
Beziehungen zwischen den Feldgrößen, der Magnetisierung $\vec{M}$ und	$\vec{j} = (\mu - \mu_0) \vec{H} = \mu_0(\mu_r - 1) \vec{H}$ $= \mu_0 \chi \vec{H}$ $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$	$\mu$ , Magnetische Permeabilität $\mu_r$ , Relative Permeabilität $\vec{M}$ , Magnetisierung



der magnetischen  
Polarisation  $\vec{J}$

$$\vec{\mathbf{M}} = \chi \vec{\mathbf{H}}$$

 $\chi$ , Magnetische Suszeptibilität

## Feldgrössen an Grenzflächen

$$\overline{B_{n1}} = B_{n2}$$

$$\mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2}$$

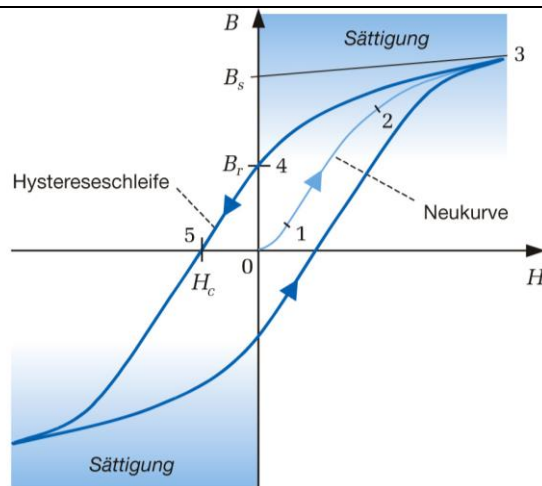
$$H_{t1} = H_{t2}$$

$$\frac{B_{t1}}{B_{t2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

n, Normalkomponente

t, Tangentialkomponente

$\mu$ , Magnetische Permeabilität

 $B_s$ , Sättigungsflussdichte

$B_r$ , Remanenzflussdichte

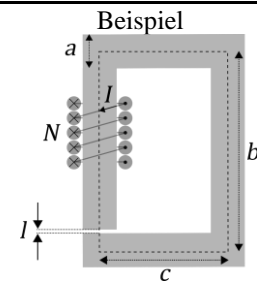
 $H_c$ , Koerzitivfeldstärke

	Bezeichnung	Elektrisches Netzwerk	Magnetisches Netzwerk
	Leitfähigkeit	$\kappa$	$\mu$
	Widerstand	$R = \frac{l}{\kappa A}$	$R_m = \frac{l}{\mu A}$
	Leitwert	$G = \frac{1}{R}$	$\Lambda_m = \frac{1}{R_m}$
	Spannung	$U_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{s}$	$V_{m12} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{H} \cdot d\vec{s}$
	Strom bzw. Fluss	$I = \iint_A \vec{j} \cdot d\vec{A} = \kappa \iint_A \vec{E} \cdot d\vec{A}$	$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \mu \iint_A \vec{H} \cdot d\vec{A}$
	Ohm'sches Gesetz	$U = R I$	$V_m = R_m \Phi$
	Maschengleichung (Abb. 5.26)	$U_0 = \sum_{Masche} R I$	$\Theta = \sum_{Masche} R_m \Phi$
	Knotengleichung	$\sum_{Knoten} I = 0$	$\sum_{Knoten} \Phi = 0$

Magnetischer Kreis

## Verfahren magnetischer Kreis

## Allgemein



## Netzwerkgleichungen des magnetischen Kreises

i) Knotenregel

$$\sum_{\text{Knoten } i} \Phi_i = 0$$

$$\Phi_K - \Phi_L = 0$$

$$\rightarrow \Phi \equiv \Phi_K = \Phi_L$$

ii) Maschenregel

$$\Theta = \sum_{\text{Masche } i} V_{m,i} = \sum_i R_{m,i} \Phi_i$$

$$\Theta = \Phi (R_{m,K} + R_{m,L})$$

iii) Ohm'sches Gesetz

$$V_{m,i} = \Phi_i R_{m,i}$$

$$V_{m,K} = \Phi R_{m,K},$$

$$V_{m,L} = \Phi R_{m,L}$$

Jetzt noch die fehlenden Grössen bestimmen:

 iv) Durchflutung  $\Theta$  via Ampère.  
 (i.e. Quellen bestimmen &  
 Vorzeichen beachten!)

$$\Theta = \sum_i H_i l_i = \sum_i N_i I_i$$

$$\Theta = NI$$

 v) Magnetische Widerstände  
 $R_{m,i}$  bestimmen

$$R_{m,i} = \frac{l_i}{\mu_0 \mu_{r,i} A_i}$$

$$R_{m,K} = \frac{2(b+c) - l}{\mu_0 \mu_r a^2}$$

$$R_{m,L} = \frac{l}{\mu_0 a^2}$$

 $\rightarrow$  Nach gewünschter Grösse auflösen

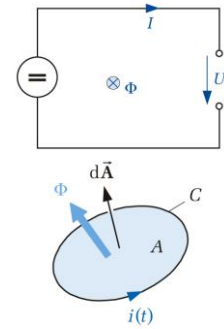
$$\text{z.B. } \Phi = \frac{NI}{R_{m,K} + R_{m,L}}$$

Mit der Spule verketteter Fluss	$\Phi = N \Phi_A$	$N$ , Windungszahl
Induktivität	$L = \frac{\Phi}{I}$	$L$ , Induktivität [H]
Induktivität aus Reluktanzmodell	$L = \frac{N^2}{R_m}$	
Induktivität einer Ringkernspule	$L = N^2 \frac{\mu h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$ $\approx N^2 \frac{\mu h}{2\pi} \frac{b-a}{a}, b-a \ll a$	$N$ , Windungszahl $\mu$ , Magnetische Permeabilität $h$ , Kernhöhe $b$ , Äusserer Radius $a$ , Innerer Radius
Induktivität einer Doppelleitung pro Längeneinheit	$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right)$	$\mu_0$ , Permeabilitätskonstante $b$ , Leiterabstand $a$ , Leiterradius

## 5 Das zeitlich veränderliche elektromagnetische Feld

Induzierte Spannung in  
der Leiterschleife gemäss  
Abbildung

$$U = -\frac{d\Phi}{dt}$$



Faraday'sche  
Induktionsgesetz

$$\oint_C \vec{E}' \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Lenz'sche Regel

*Der induzierte Strom ist so gerichtet,  
dass er die Ursache seines  
Entstehens zu verhindern sucht*

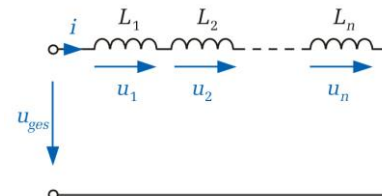
Induktivität

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

$L$ , Induktivität [Henry, H]

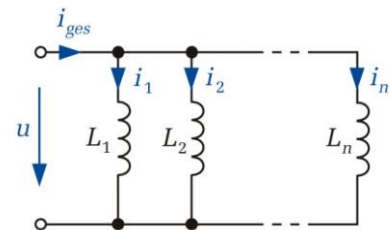
Serienschaltung

$$L_{\text{ser}} = \sum_{k=1}^n L_k$$



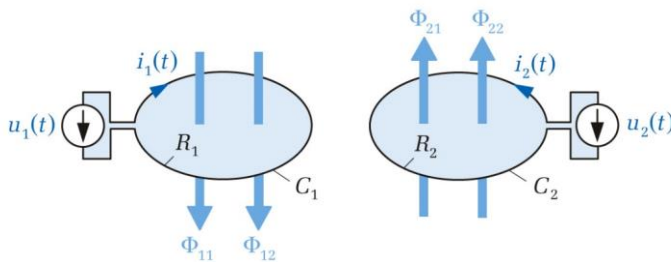
Parallelschaltung

$$L_{\text{parr}}^{-1} = \sum_{k=1}^n L_k^{-1}$$



$$L_{\text{parr}} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

Spezialfall für zwei Induktivitäten



$\Phi_{11}$ , Fluss durch  $C_1$  aufgrund  $i_1(t)$   
 $\Phi_{12}$ , Fluss durch  $C_1$  aufgrund  $i_2(t)$   
 $\Phi_{21}$ , Fluss durch  $C_2$  aufgrund  $i_1(t)$   
 $\Phi_{22}$ , Fluss durch  $C_2$  aufgrund  $i_2(t)$

Gekoppelte  
Leiterschleifen

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt}$$

$L_{11}, L_{22}$ , Selbstinduktivität  
 $L_{12}, L_{21}$ , Gegeninduktivität

Gegeninduktion

$$M = L_{ik} = L_{ki}$$

Gegeninduktivität zweier  
 Doppelleitungen

$$L_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln\left(\frac{bc}{ad}\right)$$

Kopplungsfaktoren

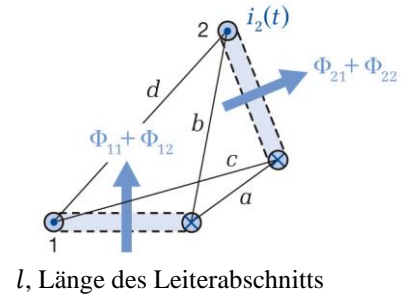
$$k_{12} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{22}} = \frac{M}{L_{22}}$$

$$k_{21} = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}} = \frac{M}{L_{11}}$$

$$k = \pm \sqrt{k_{12} k_{21}}$$

Streuung

$$\sigma = 1 - k^2$$


 $k$ , Kopplungsfaktor

 Energieinhalt  
 Induktivitäten

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \Phi I$$

Einzelne Spule

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n L_{ik} I_i I_k$$

Gekoppelte Spulen

Energiedichte

$$w_m = \int_0^B H dB = \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B}$$

 $w_m$ , Energiedichte [ $\text{VAsm}^{-3}$ ]

Magnetische Energie

$$W_m = \iiint_V w_m dV = \frac{1}{2} \iiint_V \vec{H} \cdot \vec{B} dV$$

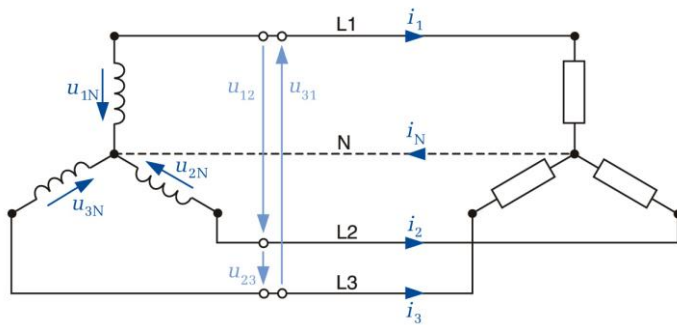
 Rotierende Leiterschleife  
 im Magnetfeld

$$\Phi = \hat{\Phi} \cos(\omega t)$$

 $\hat{\Phi}$ , der maximale magnetische Fluss  
 $\omega$ , Kreisfrequenz  
 $t$ , Zeit

Wechselspannung

$$u(t) = -\frac{d}{dt} \Phi(t) = \hat{u} \sin(\omega t)$$

 $\hat{u}$ , Spitzenspannung  
 $\omega$ , Kreisfrequenz

 $u_{1N}$ , Strangspannung L1 nach N  
 $u_{2N}$ , Strangspannung L2 nach N  
 $u_{3N}$ , Strangspannung L3 nach N  
 $u_{12}$ , Leiterspannung L1 nach L2  
 $u_{23}$ , Leiterspannung L2 nach L3  
 $u_{31}$ , Leiterspannung L3 nach L1  
 $i_1$ , Leiterstrom in L1  
 $i_2$ , Leiterstrom in L2  
 $i_3$ , Leiterstrom in L3  
 $i_N$ , Neutraleiterstrom

 Sternschaltung  
 Strangspannung

$$u_{kN} = \hat{u} \sin\left(\omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3}\right)$$

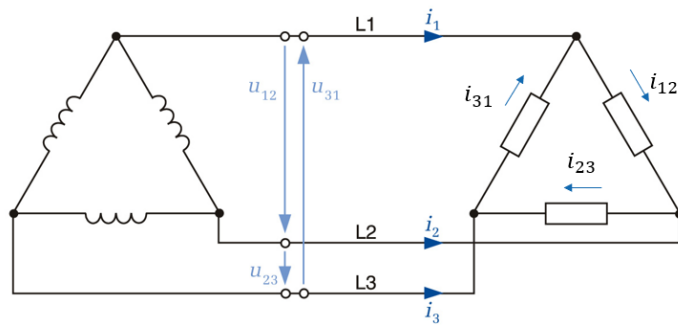
 $\hat{u}$ , maximale Spannung  
 (Spitzenspannung)  
 $k$ , Index der Leitung  $k \in \{1, 2, 3\}$ 

 Leiterspannung  
 Spitzenwert

$$\hat{u}_{12} = \hat{u}_{23} = \hat{u}_{31} = \sqrt{3} \hat{u}$$

 Neutraleiterstrom bei  
 symmetrischer Last

$$i_N = i_1 + i_2 + i_3 = 0$$



$u_{12}$ , Leiterspannung L1 nach L2  
 $u_{23}$ , Leiterspannung L2 nach L3  
 $u_{31}$ , Leiterspannung L3 nach L1  
 $i_1$ , Leiterstrom in L1  
 $i_2$ , Leiterstrom in L2  
 $i_3$ , Leiterstrom in L3  
 $i_{12}$ , Strangstrom L1 nach L2  
 $i_{23}$ , Strangstrom L2 nach L3  
 $i_{31}$ , Strangstrom L3 nach L1

Dreieckschaltung  
Leiterspannung

$$u_{12} = \hat{u} \sin(\omega t)$$

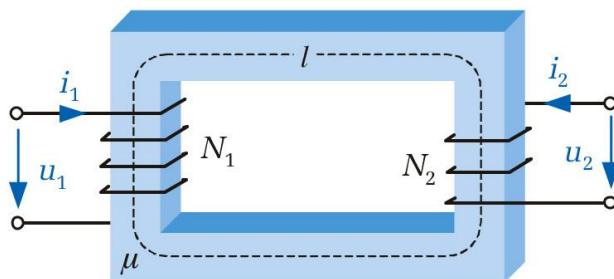
$$u_{23} = \hat{u} \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

$$u_{31} = \hat{u} \sin(\omega t + 4\pi/3)$$

Leiterstrom Spitzenwert  
bei symmetrischer Last

$$\hat{i}_k = \sqrt{3}\hat{i}_{12} = \sqrt{3}\hat{i}_{23} = \sqrt{3}\hat{i}_{31}$$

$k$ , Index der Leitung  $k \in \{1,2,3\}$



$u_1$ , Spannung an der Primärseite  
 $u_2$ , Spannung an der Sekundärseite  
 $i_1$ , Strom auf der Primärseite  
 $i_2$ , Strom auf der Sekundärseite  
 $N_1$ , Anzahl Windungen auf der Primärseite  
 $N_2$ , Anzahl Windungen auf der Sekundärseite

Der verlustlose streufreie  
Transformator

$$\frac{u_1}{u_2} = \pm \frac{N_1}{N_2}$$

Der ideale Transformator

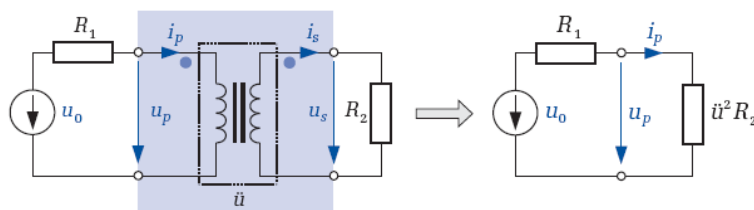
$$\frac{i_1}{i_2} = \mp \frac{N_2}{N_1}$$

$$P_1 = P_2$$

$P_1$ , Leistung auf der Primärseite  
 $P_2$ , Leistung auf der Sekundärseite

Übersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2}$$



Widerstands-  
Transformation

$$R_E = \frac{u_1}{i_1} = \ddot{u} u_2 \frac{\ddot{u}}{i_2} = \ddot{u}^2 R_2$$

$R_2$ , Widerstand auf Sekundärseite  
 $R_E$ , Ersatzwiderstand auf Primärseite

## 6 Wechselstrom

Mittelwert	$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt$	
Effektivwert	$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\varphi=\varphi_0}^{\varphi_0+2\pi} u^2(\varphi) d\varphi}$	
	$I_{\text{eff}} = \hat{i}/\sqrt{2}, \quad U_{\text{eff}} = \hat{u}/\sqrt{2}$	Sinusförmige Anregung
Instantane Leistung	$p(t) = u(t) \cdot i(t)$	
Mittlere Leistung	$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$	

### Zusammenhang zwischen Strang- und Außenleitergrößen

Komponente	Spannung	Strom	Gleichung
------------	----------	-------	-----------

	$u(t) = R i(t)$	$i(t) = \frac{1}{R} u(t)$	(7.3)
--	-----------------	---------------------------	-------

	$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$	$i_L(t) = \frac{1}{L} \int u_L(t) dt$	(7.4)
--	---------------------------------	---------------------------------------	-------

	$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt$	$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$	(7.5)
--	---------------------------------------	---------------------------------	-------

Komplexe Amplitude	$u(t) = \hat{u} \cos(\omega t + \varphi) = \text{Re}\{\hat{u} \cdot e^{j\omega t}\}$
--------------------	--

	$i(t) = \hat{i} \cos(\omega t + \varphi) = \text{Re}\{\hat{i} \cdot e^{j\omega t}\}$
--	--

### Strom- und Spannungsbeziehungen an den linearen, passiven Netzwerkelementen

Komponente	Spannung	Strom	Impedanz	Admittanz	Gl.
------------	----------	-------	----------	-----------	-----

	$\hat{u} = R \hat{i}$	$\hat{i} = \hat{u} / R$	$\underline{Z}_R = R$	$\underline{Y}_R = \frac{1}{R} = G$	(8.28)
--	-----------------------	-------------------------	-----------------------	-------------------------------------	--------

	$\hat{u} = j\omega L \hat{i}$	$\hat{i} = \frac{\hat{u}}{j\omega L}$	$\underline{Z}_L = j\omega L \stackrel{(8.13)}{=} jX_L$	$\underline{Y}_L = \frac{1}{j\omega L} = jB_L$	(8.29)
				mit $B_L = -\frac{1}{\omega L}$	

	$\hat{u} = \frac{1}{j\omega C} \hat{i}$	$\hat{i} = j\omega C \hat{u}$	$\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = jX_C$	$\underline{Y}_C = j\omega C \stackrel{(8.15)}{=} jB_C$	(8.30)
			mit $X_C = -\frac{1}{\omega C}$		

Vorgehen zur  
Netzwerkanalyse

1. Ersatzschaltbild
2. Mehrere Strom-, Spannungsquellen via Superposition
3. Vom Zeit- in Frequenzraum transformieren, komplexe Impedanzen
4. Vereinfachen: Serien- und Parallelschaltung, Maschen- und Knotenregeln, Spannungs- und Stromteiler
5. Rücktransformation in Zeitbereich

### Zeitabhängige Spannung und zugehörige komplexe Amplitude

Zeitabhängige Spannung	Komplexe Amplitude
$\hat{u} \cos \omega t$	$\underline{\hat{u}} = \hat{u}$
$\hat{u} \cos(\omega t + \varphi_u)$	$\underline{\hat{u}} = \hat{u} e^{j\varphi_u}$
$\hat{u} \sin \omega t = \hat{u} \cos(\omega t - \pi/2)$	$\underline{\hat{u}} = \hat{u} e^{-j\pi/2}$
$\hat{u} \sin(\omega t + \varphi_u)$	$\underline{\hat{u}} = \hat{u} e^{j(\varphi_u - \pi/2)}$

Ohm'sches Gesetz

$$\underline{\hat{u}} = \underline{\hat{Z}} \underline{\hat{i}}$$

$\underline{\hat{Z}}$ , Komplexe Impedanz

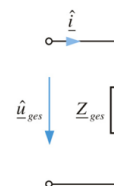
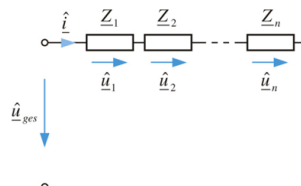
Maschenregel

$$\sum_{\text{Masche}} \underline{\hat{u}}_i = 0$$

Knotenregel

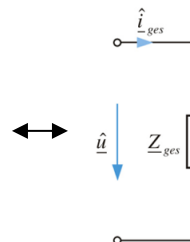
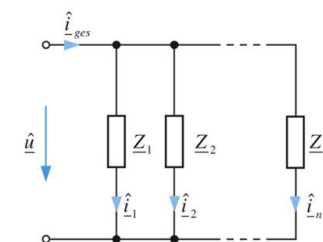
$$\sum_{\text{Knoten}} \underline{\hat{i}}_i = 0$$

Reihenschaltung:  
Impedanz-Addition



$$\underline{\hat{Z}}_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^n \underline{\hat{Z}}_k$$

Parallelschaltung:  
Admittanz-Addition



$$\underline{\hat{Y}}_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^n \underline{\hat{Y}}_k$$

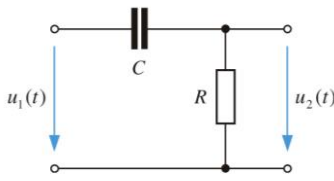
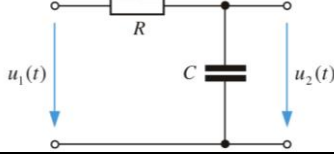
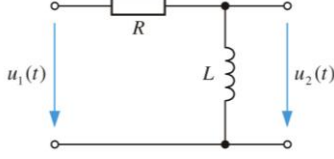
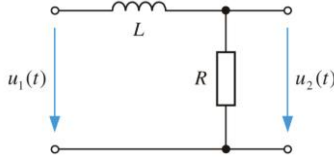
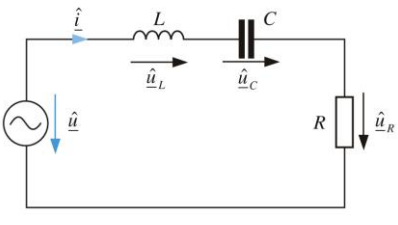
$$\frac{1}{\underline{\hat{Z}}_{\text{ges}}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\underline{\hat{Z}}_k}$$

Spannungsteiler

$$\frac{\underline{\hat{u}}_1}{\underline{\hat{u}}_2} = \frac{\underline{\hat{Z}}_1}{\underline{\hat{Z}}_2}$$

Stromteiler

$$\frac{\underline{\hat{i}}_1}{\underline{\hat{i}}_2} = \frac{\underline{\hat{Y}}_1}{\underline{\hat{Y}}_2} = \frac{\underline{\hat{Z}}_2}{\underline{\hat{Z}}_1}$$

Grenzfrequenz $\omega_g$		$\left  \frac{\hat{u}_2(\omega_g)}{\hat{u}_1(\omega_g)} \right ^2 = \frac{1}{2}$
RC Hochpass		$\frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \frac{Z_R}{Z_R + Z_C} = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1}$ $\Delta\varphi = \angle \frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega RC}\right)$ $\omega_g = \frac{1}{RC}$
RC Tiefpass		$\frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \frac{Z_C}{Z_R + Z_C} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$ $\Delta\varphi = \angle \frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \tan^{-1}(-\omega RC)$
RL Hochpass		$\frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \frac{Z_L}{Z_R + Z_L} = \frac{j\omega L}{R + j\omega L}$ $\Delta\varphi = \angle \frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \tan^{-1}\left(\frac{R}{\omega L}\right)$ $\omega_g = \frac{R}{L}$
RL Tiefpass		$\frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \frac{Z_R}{Z_R + Z_L} = \frac{R}{R + j\omega L}$ $\Delta\varphi = \angle \frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_1} = \tan^{-1}\left(\frac{-\omega L}{R}\right)$
RLC Oszillator		$\frac{\hat{u}_R}{\hat{u}} = \frac{Z_R}{Z_R + Z_L + Z_C} = \frac{Rj\omega C}{Rj\omega C - \omega^2 LC + 1}$ $\left  \frac{\hat{u}_R}{\hat{u}} \right  = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$
		$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $Q_s = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{d_s}$ $B = \frac{1}{2\pi} \frac{R}{L} = \frac{f_0}{Q_s}$
		$\omega_0$ , Resonanzfrequenz $Q_s$ , Güte $d_s$ , Dämpfung $B$ , Bandbreite



## 7 Halbleiter

Bandlücke $E_G$	$E_G = E_L - E_V$	$E_L$ , Leitungsband $E_V$ , Valenzband
Halbleiter	$0.1 \text{ eV} < E_G < 4 \text{ eV}$	$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Kinetische Energie	$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m}$	$m$ , Masse $v$ , Geschwindigkeit $p$ , Impuls
De Broglie	$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$	$h$ , Planck'sche Konstante $\hbar = h/2\pi$ , reduzierte Planck'sche K. $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
Energie eines Elektrons	$E_{\text{tot}} = \frac{\hbar^2 k^2}{2 m_{\text{eff}}}$	$m_{\text{eff}}$ , effektive Masse
Boltzmann-Konstante	$k_B$	$k_B = 1.380 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ $k_B = 8.617 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$
Fermi-Dirac-Verteilung	$f_{\text{FD}}(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}}$	$E_F$ , Fermi-Energie
Boltzmann-Verteilung	$f_B(E) = e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}}$	
Ladungsträgerdichte im Leitungsband, allg.	$n = \int_{E_L}^{\infty} f(E) \rho_n(E) dE$	$\rho$ , Zustandsdichte
Ladungsträgerdichte im Leitungsband, mit Boltzmann-Annäherung	$n = N_L \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{k_B T}\right)$	
Äquivalente Zustandsdichte im Leitungsband $N_L$	$N_L = 2 \left( \frac{2\pi \cdot m_{\text{eff},n} \cdot k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$	
Ladungsträgerdichte im Valenzband	$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$	
Äquivalente Zustandsdichte im Valenzband $N_V$	$N_V = 2 \left( \frac{2\pi \cdot m_{\text{eff},p} \cdot k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$	
Eigenhalbleiter	$n_{\text{th}} = p_{\text{th}} = n_i$	$n_i$ , Eigenleitungsträgerdichte th, thermische Ladungsträger
Massenwirkungsgesetz	$n_i^2(T) = n p$	
Donatorenniveau $E_D$	$\Delta E_D = E_L - E_D$	$E_D$ ist <i>unter</i> dem Leitungsband
Akzeptorenniveau $E_A$	$\Delta E_A = E_A - E_V$	$E_A$ ist <i>über</i> dem Valenzband
Ladungsneutralität	$n + n_A^- = p + n_D^+$	$n_A^-$ , ionisierte Akzeptorendichte $n_D^+$ , ionisierte Donatorendichte
Drift	$\vec{J}_{\text{Drift}} = [en\mu_n + ep\mu_p] \vec{E}$	$\vec{J}_{\text{Drift}}$ , Drift-Stromdichte
Leitfähigkeit	$\kappa = en\mu_n + ep\mu_p$	
Diffusion	$\vec{J}_{\text{Diff}} = \vec{J}_{n,\text{Diff}} + \vec{J}_{p,\text{Diff}}$	$\vec{J}_{\text{Diff}}$ , Diffusions-Stromdichte
	$\vec{J}_{n,D} = +eD_n \nabla n$	$\vec{J}_{n,\text{Diff}}$ , Elektr.-Diffusionsstromdichte $D$ , Diffusionskonstante
	$\vec{J}_{p,D} = -eD_p \nabla p$	$\vec{J}_{p,\text{Diff}}$ , Löcher-Diffusionsstromdichte

Einschuss v. Ladungsträgern	$pn > n_i^2$  $\Delta n = \Delta p = g \tau_{n/p}$	$n$ , Elektronendichte $p$ , Löcherdichte $g$ , Generationsrate $\tau_{n/p}$ , Lebensdauer von Elektronen $(n)$ und Löchern $(p)$
Kontinuitätsgleichung	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = e(g_n - r_n) - e(g_p - r_p)$  $\rho = e(p + n_D^+ - n - n_A^-)$	$\rho$ , Raumladungsdichte
Elektronenstromdichte	$\vec{J}_n = \vec{J}_{n,Drift} + \vec{J}_{n,Diff}$  $\vec{J}_n = en\mu_n \vec{E} + eD_n \nabla n$	$\vec{J}_n$ , totale Elektronen-Stromdichte
Löcherstromdichte	$\vec{J}_p = \vec{J}_{p,Drift} + \vec{J}_{p,Diff}$  $\vec{J}_p = ep\mu_p \vec{E} - eD_p \nabla p$	$\vec{J}_p$ , totale Löcher-Stromdichte
Kontinuitätsgleichung für Löcher	$\frac{\partial(ep)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_p = e(g_p - r_p) + eg_{ext}$	
Kontinuitätsgleichung für Elektronen	$\frac{\partial(-en)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_n = -e(g_n - r_n) - eg_{ext}$	
Poisson Gleichung	$\Delta \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} = -\frac{e}{\epsilon}(p + n_D^+ - n - n_A^-)$	$\phi$ , Potential $\rho$ , Raumladungsdichte $\epsilon$ , Permittivität

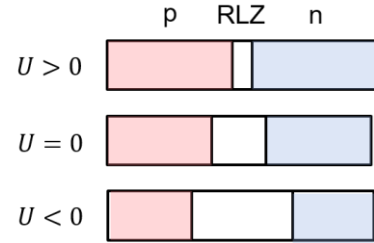
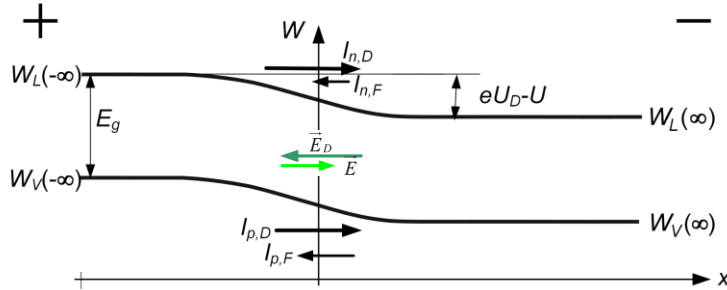
## 8 pn-Diode

Diffusionsspannung  $U_D = \frac{k_B T}{e} \ln \left( \frac{n_D n_A}{n_i^2} \right)$

Verhalten der RLZ bei angelegter Spannung  $U > 0$

$U_D$ , Diffusionsspannung

Verhalten der RLZ



Diodenkennlinie  $I = I_n + I_p = I_S \left( e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$

Photodiode  $I_{PD} = I_L - I_S \left( e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right)$

Kleinsignal:  
- Leitwert  $g(U) = \frac{dI}{dU} = \frac{e}{k_B T} (I(U) + I_S)$

- Sperrschichtkapazität  $C_S = \frac{dQ}{dV} = \frac{A}{l} \epsilon_r \epsilon_0$

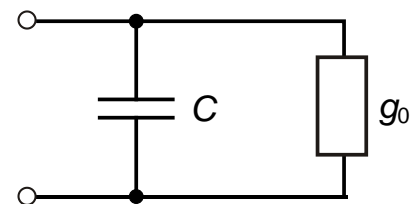
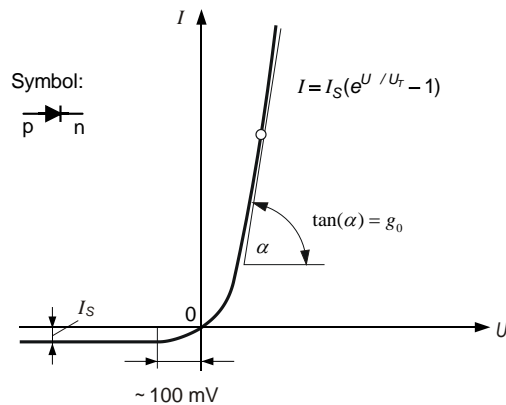
Diodenkennlinie

$I$ , Strom durch die Diode  
 $U$ , Spannung über der Diode  
 $I_{PD}$ , Strom erzeugt durch die Photodiode  
 $I_L, I_S$ , (photo) Drift-, Sperrstrom

$g$ , Kleinsignal Leitwert

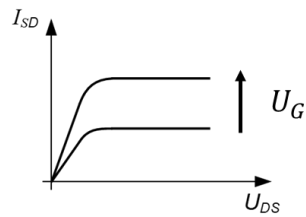
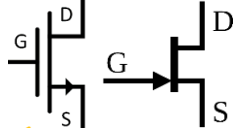
$C_S$ , Kleinsignal Kapazität

Kleinsignal Ersatzschaltbild



## 9 Aktive Bauelemente

n-typ MOSFET



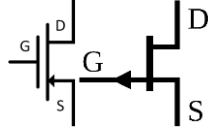
Linear:  $I_{DS} = \beta(V_{GS} - V_T)V_{DS}$

Sättigung:  $I_{DS} = \frac{\beta}{2}(V_{GS} - V_T)^2$

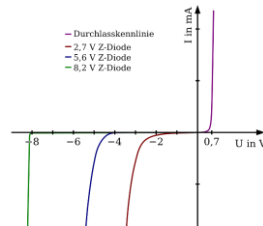
**Anwendung:** Digitales Schaltelement, Verstärker

**Typ. Char.:** Lineare und Sättigte Region, mit  $U_{GS}$  steigt der Strom  $I_{DS}$

p-typ MOSFET



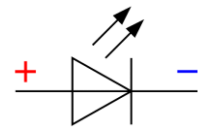
Zener Diode



**Anwendung:** Schaltungsschutz

**Typ. Char.:** Durchbruch nach einer gewissen Spannung, Widerstand sackt zu sehr kleinen Werten.

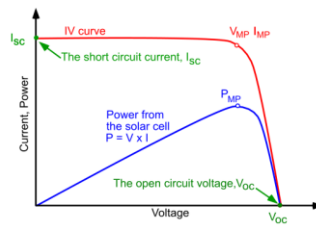
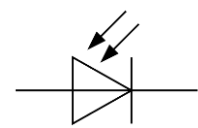
LED



**Anwendung:** Licht-Generation

**Typ. Char.:** Wie normale pn-diode.

Solarzelle/Photodetektor



$$I = I_L - I_S \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

**Anwendung:** Solarenergie, Quelle

**Typ. Char.:** Maximum Power Point

## 10 Konstanten

Elementarladung	$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$	$[\text{C}] = [\text{As}]$
Vakuumpermittivität	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$	$[\text{F/m}] = [\text{As/Vm}]$
Vakuumpermeabilität	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ $\approx 1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$	$\left[\frac{\text{H}}{\text{m}}\right] = \left[\frac{\text{N}}{\text{A}^2}\right] = \left[\frac{\text{kg m}}{\text{s}^2 \text{A}^2}\right]$
Boltzmann-Konstante	$k_B = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ $= 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$	
Thermische Energie bei Raumtemperatur	$k_B T = 25.9 \text{ meV}$ $= 4.14 \times 10^{-21} \text{ J}$	Raumtemperatur: 300 K

---