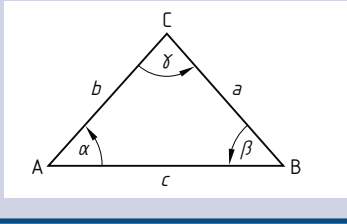


**Kosinussatz**



$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot bc \cdot \cos \alpha \quad \Rightarrow \cos \alpha = \frac{c^2 + b^2 - a^2}{2bc}$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2 \cdot ac \cdot \cos \beta \quad \Rightarrow \cos \beta = \frac{c^2 + a^2 - b^2}{2ac}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot ab \cdot \cos \gamma \quad \Rightarrow \cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

**Wichtige Winkelfunktionswerte:**

Funktion	Winkel $\alpha$									
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°	270°	360°
Sinus $\alpha$	0	0,259	0,500	0,707	0,866	0,966	1	0	-1	0
Cosinus $\alpha$	1	0,966	0,866	0,707	0,500	0,259	0	-1	0	1
Tangens $\alpha$	0	0,268	0,577	1	1,732	3,732	$\infty$	0	$\infty$	0

Beispiel:  $\sin 15^\circ = 0,259$

**1.6 Zahlensysteme, BCD-Code, Rechenregeln**

**Vergleich von Zahlensystemen:**

Dezimalzahl	Dualzahl	Sedezimalzahl***
0	0	0
$1 = 2^0$	1	1
$2 = 2^1$	10	2
3	11	3
$4 = 2^2$	100	4
5	101	5
6	110	6
7	111	7
$8 = 2^3$	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F
$16 = 2^4$	10000	10
17	10001	11
18	10010	12
19	10011	13
...		...
$32 = 2^5$	100000	20
...		...
$64 = 2^6$	1000000	40

**BCD-(8-4-2-1)-Code:**

Dezimalzahl	Stellenwert	8421
0	0000	0000
1	0000	0001
2	0000	0010
3	0000	0011
4	0000	0100
5	0000	0101
6	0000	0110
7	0000	0111
8	0000	1000
9	0000	1001
*	0000	1010
**		+0110
10	0001	0000
11	0001	0001
12	0001	0010
13	0001	0011
14	0001	0100
15	0001	0101
16	0001	0110
17	0001	0111
18	0001	1000
19	0001	1001
*	0001	1010
**		+0110
20	0010	0000

**Rechnen mit Dualzahlen:**

$\begin{array}{r} 00 \\ + 0 \\ \hline 00 \end{array}$	$\begin{array}{r} 00 \\ - 0 \\ \hline 00 \end{array}$
$\begin{array}{r} 01 \\ + 0 \\ \hline 01 \end{array}$	$\begin{array}{r} 01 \\ - 0 \\ \hline 01 \end{array}$
$\begin{array}{r} 00 \\ + 1 \\ \hline 01 \end{array}$	$\begin{array}{r} 00 \\ - 1 \\ \hline 01 \end{array}$
$\begin{array}{r} 01 \\ + 1 \\ \hline 10 \end{array}$	$\begin{array}{r} 01 \\ - 1 \\ \hline 00 \end{array}$
$\begin{array}{r} 011 \\ + 10 \\ \hline 101 \end{array}$	$\begin{array}{r} 011 \\ - 10 \\ \hline 001 \end{array}$
$\begin{array}{r} 011 \\ + 11 \\ \hline 110 \end{array}$	$\begin{array}{r} 011 \\ - 100 \\ \hline 001 \end{array}$

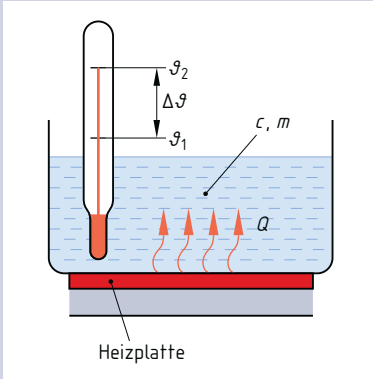
$1 \cdot 1 = 1$
$0 \cdot 0 = 0$
$1 \cdot 0 = 0$
$0 \cdot 1 = 0$
$0 : 1 = 0$
$1 : 1 = 1$

\* Pseudotetrade, bewirkt Rückstellung und Übertrag auf die nächste Dekade.  
 \*\* Korrektursummand beim Übertrag.  
 \*\*\* auch Hexadezimalzahl genannt.



### 5.3 Wärmemenge

#### Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe bei Temperaturänderung



- $Q$  Wärme, Wärmemenge
- $m$  Masse
- $\Delta\vartheta$  Temperaturdifferenz
- $\vartheta_1$  Anfangstemperatur
- $\vartheta_2$  Endtemperatur
- $c$  spezifische Wärmekapazität
- $C_{th}$  Wärmekapazität



- Weitere Werte für  $c$ : Seite 117
- Elektrowärme: Seite 27

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 \Rightarrow \vartheta_2 = \vartheta_1 + \Delta\vartheta; \vartheta_1 = \vartheta_2 - \Delta\vartheta$$

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$$

$$\Rightarrow c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\vartheta}; m = \frac{Q}{c \cdot \Delta\vartheta}; \Delta\vartheta = \frac{Q}{c \cdot m}$$

$$C_{th} = c \cdot m$$

$$\Rightarrow c = \frac{C_{th}}{m}; m = \frac{C_{th}}{c}$$

$$Q = C_{th} \cdot \Delta\vartheta$$

$$\Rightarrow C_{th} = \frac{Q}{\Delta\vartheta}; \Delta\vartheta = \frac{Q}{C_{th}}$$

$$[c] = \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

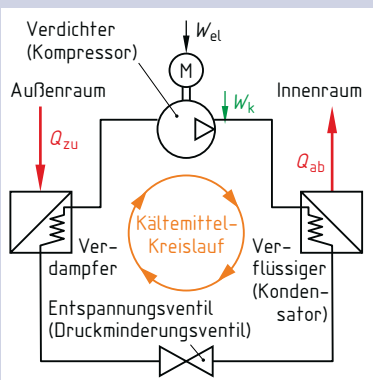
$$[C_{th}] = \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

#### Spezifische Wärmekapazität $c$ in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Stoff	Wert	Stoff	Wert
Wasser	4,187	Aluminium	0,921
Kupfer	0,389	Eisen	0,461
Silber	0,234	Messing	0,377
Wasserstoff	14,277	Luft	1,005

### 5.4 Wärme-Kreisprozess

#### Wärmepumpe (Funktionsschema)



- $W_k$  Kompressionsarbeit
- $\beta$  Jahresarbeitszahl

$$Q_{ab} = Q_{zu} + W_k$$

$$\Rightarrow Q_{zu} = Q_{ab} - W_k; W_k = Q_{ab} - Q_{zu}$$

$$\beta = \frac{Q_{Jahr}}{W_{Jahr}}$$

$$\Rightarrow Q_{Jahr} = \beta \cdot W_{Jahr}; W_{Jahr} = \frac{Q_{Jahr}}{\beta}$$

$$P_H = A_H \cdot HF$$

#### Heizleistungsfaktor $HF$ (Beispiele)

- Altbau 120  $\text{W}/\text{m}^2$
- Wohnhaus (gedämmt) 60  $\text{W}/\text{m}^2$
- Niedrigenergiehaus 30  $\text{W}/\text{m}^2$



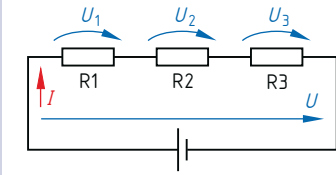
- Eine Wärmepumpe bringt die vom Außenraum, z. B. Erdreich, Außenluft oder Grundwasser, zugeführte Wärme  $Q_{zu}$  von einer niedrigen Temperatur auf eine höhere Temperatur und gibt sie im Innenraum als Heizwärme  $Q_{ab}$  ab.
- Die Jahresarbeitszahl  $\beta$  ist ein Maß für die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe. Je höher die Jahresarbeitszahl ist, desto wirtschaftlicher arbeitet die Wärmepumpe. Typische Werte der Jahresarbeitszahl:  $\beta = 3,5 \dots 5$

- $Q_{zu}$  zugeführte Wärme (Umweltwärme)
- $Q_{ab}$  abgegebene Wärme (Heizwärme)
- $Q_{Jahr}$  pro Jahr abgegebene Heizwärme
- $A_H$  zu beheizende Fläche

- $W_{el}$  zugeführte elektrische Energie
- $W_{Jahr}$  pro Jahr zugeführte elektr. Energie
- $P_H$  Gebäudewärmebedarf
- $HF$  Heizleistungsfaktor (spezif. Wärmebedarf)

### 6.3 Schaltungen von Widerständen

#### Reihenschaltung von Widerständen



Durch in Reihe geschaltete Verbraucher fließt derselbe Strom  $I$ .

$R$	Ersatzwiderstand (Gesamtwiderstand)
$R_1, R_2, R_3$	Einzelwiderstände
$U$	Gesamtspannung
$U_1, U_2, U_3$	Teilspannungen, Verbraucherspannungen
$I$	Stromstärke
$n$	Anzahl gleicher Widerstände

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \dots$$

$$\Rightarrow U_1 = U - U_2 - U_3; \\ U_2 = U - U_1 - U_3$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \dots$$

$$\Rightarrow R_1 = R - R_2 - R_3; \\ R_2 = R - R_1 - R_3$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$\Rightarrow U_1 = \frac{R_1}{R_2} \cdot U_2; \\ U_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_1$$

$$\frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R}$$

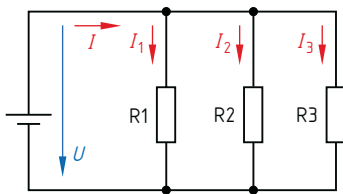
$$\Rightarrow U_1 = \frac{R_1}{R} \cdot U; U = \frac{R}{R_1} \cdot U_1$$

Für  $n$ -gleiche Widerstände gilt:

$$R = n \cdot R_1$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{R}{n}$$

#### Parallelschaltung von Widerständen



An parallelgeschalteten Verbrauchern liegt dieselbe Spannung  $U$ .

$R$	Ersatzwiderstand
$R_1, R_2, R_3$	Einzelwiderstände
$I$	Gesamtstrom
$I_1, I_2, I_3$	Teilströme
$G$	Ersatzleitwert
$G_1, G_2, G_3$	Einzelleitwerte
$n$	Anzahl gleicher Widerstände

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

$$\Rightarrow I_1 = I - I_2 - I_3; \\ I_2 = I - I_1 - I_3$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

$$\Rightarrow G_1 = G - G_2 - G_3; \\ G_2 = G - G_1 - G_3$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

$$\Rightarrow R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$\Rightarrow I_1 = \frac{R_2}{R_1} \cdot I_2; I_2 = \frac{R_1}{R_2} \cdot I_1$$

$$\frac{I_1}{I_3} = \frac{R_3}{R_1}$$

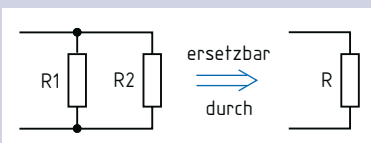
$$\Rightarrow I_1 = \frac{R_3}{R_1} \cdot I_3; I_3 = \frac{R_1}{R_3} \cdot I_1$$

Für  $n$ -gleiche Widerstände gilt:

$$R = \frac{R_1}{n}$$

$$\Rightarrow R_1 = n \cdot R$$

#### Parallelschaltung von zwei Widerständen



$R$	Ersatzwiderstand
$R_1, R_2$	Einzelwiderstände parallel

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{R \cdot R_2}{R_2 - R};$$

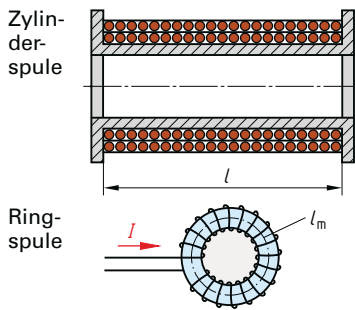
$$R_2 = \frac{R \cdot R_1}{R_1 - R}$$



Bemessungsleistungen von Widerständen:  
Tabelle 22, Seite 121



## Induktivität (Eigeninduktivität)



- $u_i$  Selbstinduktionsspannung  
 $u_L$  Ladespannung  
 $i_L$  Lade-/Entladestromstärke  
 $I_0$  Anfangsstromstärke  
 $L$  Induktivität  
 $\Delta i$  Stromänderung  
 $\Delta t$  Zeitdauer der Änderung  
 $N$  Windungszahl  
 $\mu_0$  magnet. Feldkonstante  
 $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$   
 $\mu_r$  Permeabilitätszahl  
 $A$  Spulenquerschnitt  
 $l$  Feldlinienlänge  
 $l_m$  mittlere Feldlinienlänge  
 $R$  Wirkwiderstand  
 $\tau$  Zeitkonstante  
 $\tau_L$  Lade-/Entladezeit  
 $t$  Zeit für Stromanstieg beim Einschalten  
 $A_L$  Spulenkonstante, z. B. in mH

$$u_i = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \Rightarrow L = -u_i \cdot \frac{\Delta t}{\Delta i}$$

$$\tau = \frac{L}{R} \Rightarrow L = \tau \cdot R; \quad R = \frac{L}{\tau}$$

$$\tau_L \approx 5 \cdot \tau$$

Einschaltvorgang:

$$u_L = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow u_0 = \frac{u_L}{e^{-\frac{t}{\tau}}}; \quad t = -\tau \cdot \ln\left(\frac{u_L}{u_0}\right)$$

$$i_L = i_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \Rightarrow i_0 = \frac{i_L}{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}};$$

Ausschaltvorgang:

$$u_L = -u_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow u_0 = -\frac{u_L}{e^{-\frac{t}{\tau}}}; \quad t = -\tau \cdot \ln\left(\frac{-u_L}{u_0}\right)$$

$$i_L = i_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow i_0 = \frac{i_L}{e^{-\frac{t}{\tau}}}; \quad t = -\tau \cdot \ln\left(\frac{i_L}{i_0}\right)$$

Zylinderspule/Ringspule:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l} \Rightarrow N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}};$$

$$A = \frac{L \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2}$$

$$L = N^2 \cdot A_L \Rightarrow N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}; \quad A_L = \frac{L}{N^2}$$

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

$l = l_m$  bei der Ringspule

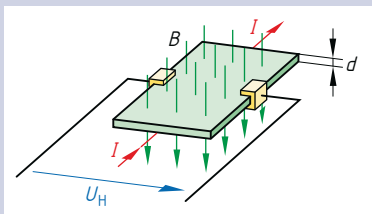
## Energieinhalt des magnetischen Feldes einer Spule

- $W$  Energie  
 $L$  Induktivität  
 $I$  Stromstärke

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \Rightarrow L = \frac{2 \cdot W}{I^2}; \quad I = \sqrt{\frac{2 \cdot W}{L}}$$

$$[W] = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \text{A}^2 = \text{Ws} = \text{J}$$

## Halleffekt



$$U_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{d} \Rightarrow I = \frac{U_H \cdot d}{R_H \cdot B}; \quad d = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{U_H};$$

$$[R_H] = \frac{\text{m}^3}{\text{As}}$$

$$R_H = \frac{U_H \cdot d}{I \cdot B}$$

$$[U_H] = \frac{\text{m}^3}{\text{As}} \cdot \text{A} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot \frac{1}{\text{m}} = \text{V}$$

- $U_H$  Hallspannung  
 $I$  Stromstärke

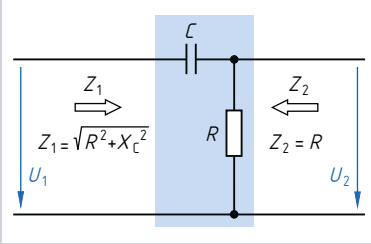
- $R_H$  Hallkonstante  
 $B$  magnetische Flussdichte

$d$  Dicke des Hallplättchens



## 9.7 Hoch- und Tiefpässe

## RC-Hochpass

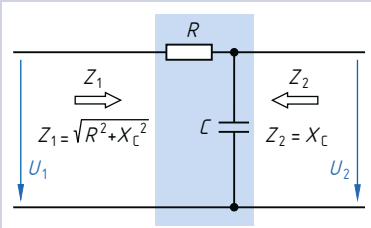


$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow U_2 = U_1 \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}$$

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \Rightarrow R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C};$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot R}$$

## RC-Tiefpass

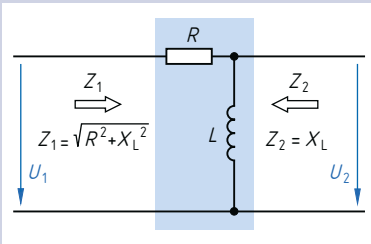


$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \cdot R \cdot C)^2}}$$

$$f_c = \frac{1}{2 \pi \cdot R \cdot C} \Rightarrow R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C};$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot R}$$

## RL-Hochpass

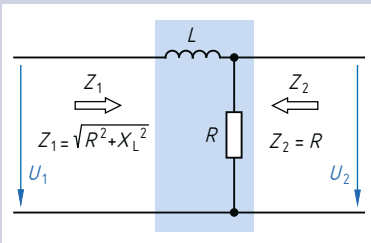


$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R}{\omega \cdot L}\right)^2 + 1}}$$

$$f_c = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L} \Rightarrow R = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot L;$$

$$L = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot f_c}$$

## RL-Tiefpass



$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right)^2}}$$

$$f_c = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L} \Rightarrow R = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot L;$$

$$L = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot f_c}$$

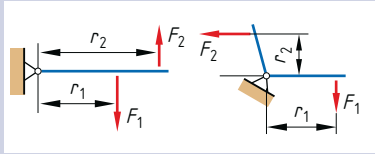
$U_1$  Eingangsspannung  
 $U_2$  Ausgangsspannung  
 $Z_1$  Eingangsimpedanz

$Z_2$  Ausgangsimpedanz  
 $R$  Widerstand  
 $X_L$  induktiver Blindwiderstand

$C$  Kapazität  
 $f_c$  Grenzfrequenz  
 $\omega$  Kreisfrequenz



### Hebelgesetz im Gleichgewicht



$$F_2 \cdot r_2 + \dots = F_1 \cdot r_1 + \dots$$

$$\Sigma M_{\text{links}} = \Sigma M_{\text{rechts}}$$

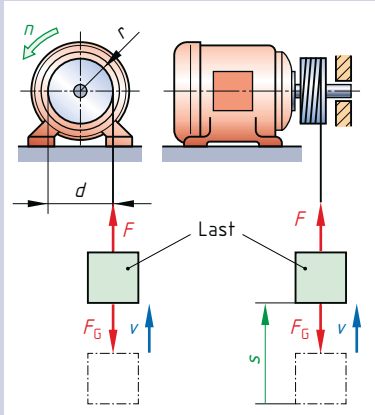
$F, F_1, F_2 \dots$  Kraft

$r, r_1, r_2, \dots$  wirksame Hebellänge

$\Sigma M_{\text{links}}$  Summe der linksdrehenden Momente  
 $\Sigma M_{\text{rechts}}$  Summe der rechtsdrehenden Momente

### 10.2.5 Mechanische Leistung

#### Leistung bei geradliniger Bewegung und bei Drehbewegung



$P$  Leistung

$W$  Arbeit

$t$  Zeitdauer, in der Arbeit verrichtet wird

$F$  Kraft

$s$  Kraftweg

$v$  Umfangsgeschwindigkeit

$n$  Umdrehungsfrequenz, Drehzahl

$r$  Radius

$M$  Drehmoment

$\omega$  Winkelgeschwindigkeit, Drehgeschwindigkeit



- Wechselstrommotoren: Seite 61
- Drehstrommotoren: Seite 62
- Datenblatt Drehstromasynchronmotoren: Seite 123

$$P = \frac{W}{t}$$

$$\Rightarrow W = P \cdot t; \quad t = \frac{W}{P}$$

$$P = \frac{F \cdot s}{t}$$

$$\Rightarrow F = \frac{P \cdot t}{s}; \quad s = \frac{P \cdot t}{F}; \quad t = \frac{F \cdot s}{P}$$

$$P = F \cdot v$$

$$\Rightarrow F = \frac{P}{v}; \quad v = \frac{P}{F}$$

$$v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r$$

$$\Rightarrow r = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot n}; \quad n = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$P = F \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r$$

$$\Rightarrow F = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r}; \quad n = \frac{P}{F \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$r = \frac{P}{F \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}$$

$$P = M \cdot \omega$$

$$\Rightarrow M = \frac{P}{\omega}; \quad \omega = \frac{P}{M}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$\Rightarrow M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}; \quad n = \frac{P}{M \cdot 2 \cdot \pi}$$

$$[P] = \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$$

$$[\omega] = \frac{\text{rad}}{\text{s}} = \frac{1}{\text{s}}; \quad [n] = \frac{1}{\text{s}}$$

Von Praktikern verwendet:

$$P = \frac{M \cdot n}{9549}$$

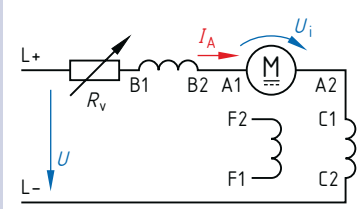
$$\Rightarrow M = \frac{P \cdot 9549}{n}; \quad n = \frac{P \cdot 9549}{M}$$

$P$  in kW,  $M$  in Nm,  $n$  in  $\frac{1}{\text{min}}$

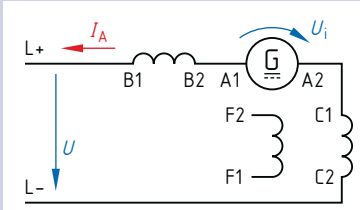


## Fremderregte Gleichstrommaschine

## Motor



## Generator



- $U$  Netzspannung
- $U_i$  induzierte Gegenspannung
- $U_B$  Bürstenspannung
- $I_A$  Ankerstrom
- $I_2$  Einschaltstrom
- $R_v$  Anlasswiderstand
- $R_k$  Widerst. Kompensationswicklung
- $R_{wp}$  Widerst. Wendepolwicklung
- $R_A$  Ankerwiderstand

## Motor

$$U = U_i + U_B + I_A \cdot (R_A + R_{wp} + R_k)$$

$$\Rightarrow U_i = U - U_B - I_A \cdot (R_A + R_{wp} + R_k);$$

$$I_A = \frac{U - U_i - U_B}{R_A + R_{wp} + R_k}; \quad R_A = \frac{U - U_i - U_B}{I_A} - R_{wp} - R_k$$

$$R_v = \frac{U - U_B}{I_2} - R_A - R_{wp} - R_k$$

$$\Rightarrow I_2 = \frac{U - U_B}{R_v + R_A + R_{wp} + R_k}$$

## Generator

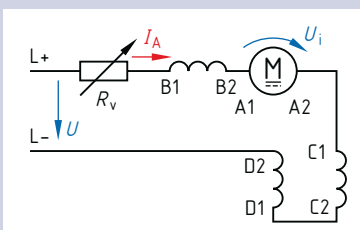
$$U = U_i - U_B - I_A \cdot (R_A + R_{wp} + R_k)$$

$$\Rightarrow U_i = U + U_B + I_A \cdot (R_A + R_{wp} + R_k);$$

$$I_A = \frac{U_i - U_B - U}{R_A + R_{wp} + R_k}; \quad R_A = \frac{U_i - U_B - U}{I_A} - R_{wp} - R_k$$

Bei Maschinen ohne Wendepol- bzw. Kompensationswicklung gilt:  $R_{wp} = 0 \Omega$  bzw.  $R_k = 0 \Omega$

## Gleichstrom-Reihenschlussmotor



- $U$  Netzspannung
- $U_B$  Bürstenspannung
- $U_i$  induzierte Gegenspannung
- $I_A$  Ankerstrom
- $I_2$  Einschaltstrom
- $R_A$  Ankerwiderstand
- $R_e$  Erregerwiderstand
- $R_{wp}$  Widerstand der Wendepolwicklung
- $R_k$  Widerstand der Kompensationswicklung
- $R_v$  Anlasswiderstand

$$U = U_i + U_B + I_A \cdot (R_A + R_e + R_{wp} + R_k)$$

$$\Rightarrow U_i = U - U_B - I_A (R_A + R_e + R_{wp} + R_k);$$

$$I_A = \frac{U - U_B - U_i}{R_A + R_{wp} + R_e + R_k};$$

$$R_A = \frac{U - U_B - U_i}{I_A} - R_{wp} - R_e - R_k;$$

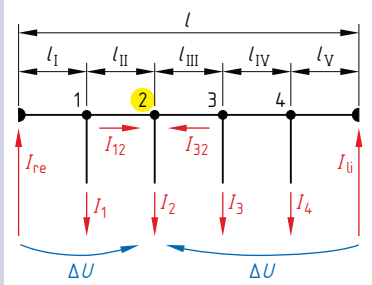
$$R_e = \frac{U - U_B - U_i}{I_A} - R_A - R_{wp} - R_k$$

$$R_v = \frac{U - U_B}{I_2} - R_A - R_e - R_{wp} - R_k$$

$$\Rightarrow I_2 = \frac{U - U_B}{R_v + R_A + R_e + R_{wp} + R_k}$$

Bei Maschinen ohne Wendepol- bzw. Kompensationswicklung gilt:  $R_{wp} = 0 \Omega$  bzw.  $R_k = 0 \Omega$

**Spannungsfall bei einer Ringleitung**



Ringleitung, am Einspeisepunkt aufgeschnitten  
 2 Tiefpunkt

- $\Sigma (I \cdot l)_{TPre}$  Summe der Strommomente nach rechts bis zum Tiefpunkt
- $\Sigma (I \cdot l)_{TPli}$  Summe der Strommomente nach links bis zum Tiefpunkt
- A Leiterquerschnitt
- I Leiterstrom
- l Länge der Leitung
- $\cos \varphi_m$  mittlerer Wirkfaktor
- $\gamma$  elektrische Leitfähigkeit
- $\Delta U$  Spannungsfall in V

Der Leiterquerschnitt wird vom größten Komponentenstrom und den Verlegebedingungen bestimmt.

**Ermittlung des Spannungsfalls bei Drehstrom**

Summe der Strommomente nach rechts zum Tiefpunkt (TP)  $\Sigma (I \cdot l)_{TPre}$  bzw. nach links zum Tiefpunkt  $\Sigma (I \cdot l)_{TPli}$  berechnen.  
 Beispiel: Punkt 2 (Bild) ist Tiefpunkt.

$$\Sigma (I \cdot l)_{TPre} = I_1 \cdot l_I + I_{12} (l_I + l_{II})$$

$$\Sigma (I \cdot l)_{TPli} = I_4 \cdot l_V + I_3 (l_{IV} + l_V) + I_{32} (l_{III} + l_{IV} + l_V)$$

Berechnung von  $\Delta U$  nach rechts:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_m \cdot \Sigma (I \cdot l)_{TPre}}{\gamma \cdot A}$$

$$\Rightarrow \cos \varphi_m = \frac{\Delta U \cdot \gamma \cdot A}{\sqrt{3} \cdot \Sigma (I \cdot l)_{TPre}}; A = \frac{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_m \cdot \Sigma (I \cdot l)_{TPre}}{\Delta U \cdot \gamma}$$

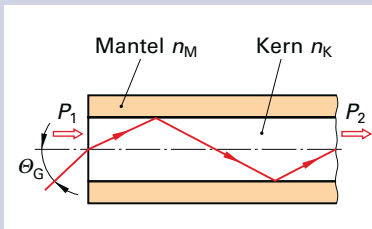
Berechnung von  $\Delta U$  nach links:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_m \cdot \Sigma (I \cdot l)_{TPli}}{\gamma \cdot A}$$

$$\Rightarrow \cos \varphi_m = \frac{\Delta U \cdot \gamma \cdot A}{\sqrt{3} \cdot \Sigma (I \cdot l)_{TPli}}; A = \frac{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_m \cdot \Sigma (I \cdot l)_{TPli}}{\Delta U \cdot \gamma}$$

**i** Den Spannungsfall  $\Delta U$  kann von rechts oder von links berechnet werden. Beide Rechnungen führen zum gleichen Ergebnis.

**11.2.4 Lichtwellenleitung (LWL)**



- $D_p$  Dämpfungsfaktor
- $a_p$  Dämpfungsmaß in dB
- $P_1$  Eingangsleistung in W
- $P_2$  Ausgangsleistung in W
- P Leistung in W
- $L_p$  absoluter Leistungspegel in dBm
- $n_M$  Brechzahl Mantel
- $n_K$  Brechzahl Kern
- $N_A$  numerische Apertur
- $\theta_G$  Grenzwinkel in Grad (Akzeptanzwinkel)
- $c_K$  Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kern in km/s
- $c_0$  300 000 km/s (Lichtgeschwindigkeit)

$$D_p = \frac{P_1}{P_2} \Rightarrow P_1 = D_p \cdot P_2; P_2 = \frac{P_1}{D_p}$$

$$a_p = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} \Rightarrow P_1 = P_2 \cdot 10^{\frac{a_p}{10}}; P_2 = \frac{P_1}{10^{\frac{a_p}{10}}}$$

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ mW}} \Rightarrow P = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{L_p}{10}}$$

$$c_K = c_0 \cdot \frac{n_M}{n_K} \Rightarrow n_K = n_M \cdot \frac{c_0}{c_K}; n_M = n_K \cdot \frac{c_K}{c_0}$$

$$N_A = \sin \theta_G = \sqrt{n_K^2 - n_M^2}$$

Bei LWL-Strecken:

$$D_{Pges} = D_{P1} \cdot D_{P2} \cdot D_{P3} \cdot \dots \Rightarrow D_{P1} = \frac{D_{Pges}}{D_{P2} \cdot D_{P3}}$$

$$a_{Pges} = a_{P1} + a_{P2} + a_{P3} + \dots \Rightarrow a_{P1} = a_{Pges} - a_{P2} - a_{P3}$$

Brechzahlen: Quarz 1,54, Acrylglas 1,49, Luft  $\approx 1$





Tabelle 7: Werkstoffwerte von Metallen (und Kohle)

Werkstoff	Kurzzeichen	Spezifischer Widerstand	Elektrische Leitfähigkeit	Dichte	Temperaturkoeffizient	Längenausdehnungskoeffizient	Spezif. Wärmekapazität	Schmelztemperatur °C
		$\rho_{20}$ $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$\gamma_{20}$ $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$	$\rho$ $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$	$\alpha$ $\frac{1}{\text{K}}$	$\alpha_l$ in $10^{-6}/\text{K}$ (zwischen 0 und 100 °C)	$c$ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	
Aluminium	Al	0,0278	36	2,7	0,004	23,8	0,921	658
Blei	Pb	0,208	4,8	11,34	0,00422	29,4	0,130	327
Chrom	Cr	0,130	6,7	7,19	–	6,2	0,452	1890
Eisen (rein)	Fe	0,1	10	7,87	0,00657	11,5	0,461	1539
Gusseisen	GG	–	–	7,25	0,005	10,5	0,80	≈ 1200
Gold	Au	0,022	45,7	19,3	0,00398	14,2	0,130	1063
Kadmium	Cd	0,077	13	8,64	0,0042	29,4	0,234	321
Kobalt	Co	0,062	16,1	8,9	0,0066	12,6	0,419	1490
Kohle	–	100	0,01	2,0	– 0,0005	6,0	0,5	≈ 3540
Kupfer (99,9%)	Cu	0,0178	56	8,9	0,0039	17,0	0,389	1085
Lithium	Li	0,086	–	0,534	–	56	0,294	179
Magnesium	Mg	0,044	22,7	1,74	0,0041	26	1,047	650
Mg-Legierungen	–	0,08 ... 0,05	12 ... 20	≈ 1,8	≈ 0,0022	≈ 24,0	1,0	650
Mangan	Mn	1,85	0,54	7,43	0,0053	23,0	0,502	1245
Molybdän	Mo	0,047	21	10,2	0,0047	5,1	0,272	2620
Nickel	Ni	0,095	10,5	8,85	0,0055	13,0	0,461	1452
Platin	Pt	0,098	10,2	21,5	0,0038	9,0	0,134	1770
Quecksilber	Hg	0,9406	1,063	13,5	0,0009	$\gamma = 182$	0,138	– 38,9
Silber	Ag	0,0167	60	10,5	0,0041	19,3	0,234	960
Stahl								
• unleg. u. niedrig legiert	–	–	–	≈ 7,85	–	11,5	0,49	≈ 1440
• nichtrostend	–	–	–	7,8	–	16	0,50	1450
• nicht magnetisierbar	–	–	–	8,0	–	–	–	1450
Tantal	Ta	0,15	6,67	16,7	0,0034	6,5	0,14	3030
Titan	Ti	0,8	1,25	4,54	0,00564	8,4	0,528	1670
Wismut	Bi	1,07	0,94	9,8	0,0045	13,4	0,126	270
Wolfram	W	0,055	18,2	19,3	0,0046	4,5	0,142	3370
Zink	Zn	0,0625	16	7,14	0,0042	29,8	0,394	419
Zinn	Sn	0,115	8,7	7,28	0,00463	27	0,226	232

Tabelle 8: Werkstoffwerte von Legierungen

Konstantan (CuNi44)	0,49	2,04	8,9	0,00004	15,2	0,410	1280
Nickelin (CuNi30Mn)	0,4	2,5	8,8	0,00015	16	0,398	1180
Manganin (CuMn12Ni)	0,43	2,33	8,4	0,00001	19,5	0,406	980
Aldrey (AlMgSi)	0,0328	30,5	2,7	0,0036	23	–	–

Tabelle 9: Elektrochemische Äquivalente und Wertigkeit

Werkstoff	Werkstoff	Wertigkeit	Elektrochemisches Äquivalent c		Werkstoff	Wertigkeit	Elektrochemisches Äquivalent c		
			in g/Ah	in mg/As			in g/Ah	in mg/As	
Aluminium	Al	3	0,335	0,093	Magnesium	Mg	2	0,454	0,126
Blei	Pb	2	3,865	1,074	Nickel	Ni	2	1,095	0,304
Blei	Pb	4	1,932	0,5368	Platin	Pt	4	1,820	0,5055
Chrom	Cr	3	0,647	0,179	Quecksilber	Hg	2	3,742	1,039
Eisen	Fe	2	1,042	0,289	Quecksilber	Hg	1	7,484	2,079
Eisen	Fe	3	0,694	0,192	Silber	Ag	1	4,025	1,118
Gold	Au	1	7,349	2,0414	Zink	Zn	2	1,220	0,339
Gold	Au	3	2,452	0,681	Zinn	Sn	2	2,214	0,615
Kadmium	Cd	2	2,097	0,582	Zinn	Sn	4	1,107	0,3075
Kupfer	Cu	1	2,372	0,659	Sauerstoff	O	2	0,299	0,083
Kupfer	Cu	2	1,186	0,329	Wasserstoff	H	1	0,038	0,0105