

Formelsammlung - Elektrotechnik

Mario Konrad
Mario.Konrad@gmx.net

26. Oktober 2003

Inhaltsverzeichnis

1 Konstanten	2
1.1 Elementarladung	2
1.2 Dielektrizitätskonstante	2
1.3 Spezifischer Widerstand	2
1.4 Temperatur-Koeffizient	2
2 Grundlagen	2
2.1 Coulombsche Kraft	2
2.2 Elektrische Feldstärke	2
2.3 Kraftwirkung im elektrischen Feld	3
2.4 Strom I, i	3
2.5 Stromdichte J, j	3
2.6 Spannung U, u	3
2.7 Ohmsches Gesetz	3
2.8 Leistung P	4
2.9 Widerstand R	4
3 Halbleiter	4
3.1 Diode	4
3.2 Transistor	4
4 Netzwerke	5
4.1 Manipulation mit idealen Quellen	5
4.2 Maschenstromverfahren	5
4.3 Knotenspannungsverfahren	6
5 Messtechnik	7
5.1 Linearer Mittelwert (Average)	7
5.2 Betragsmittelwert	7
5.3 Quadratischer Mittelwert, Effektivwert	7
5.4 Fehler von digitalen VA Multimetern	7
5.5 Crest-Faktor (Scheitelfaktor)	8
5.6 Differenzbetrieb beim KO	8
6 Kapazität	8
6.1 Dirac-Stoss	8
6.2 Ersatzschaltbild	9
6.3 Parallelschaltung	9
6.4 Serieschaltung	9
6.5 U und I in RC -Netzwerken	9
6.6 Kondensator als Energiespeicher	9
6.7 U und I bei Wechselstrom	9

7	Induktivität	10
7.1	Zylinderspule	10
7.2	Ringkern	10
7.3	Ersatzschaltbild	11
7.4	Gekoppelte Spulen	11
7.5	Serieschaltung nichtgekoppelter Spulen	12
7.6	Parallelschaltung nichtgekoppelter Spulen	13
7.7	Parallelschaltung gekoppelter Spulen	13
7.8	Serieschaltung gekoppelter Spulen	13
7.9	Blindwiderstand	13
7.10	RL-Schaltung	13
8	Wechselstromtheorie	14
8.1	Kennwerte und Kenngrößen	14
8.2	Linearer Mittelwert	14
8.3	Betragsmittelwert	14
8.4	Effektivwert	14
8.5	Zeigerdarstellung	14
8.6	Bezeichnungen und Konventionen	14
8.7	Impedanz und Admittanz	15
8.8	Bodediagramm	15
8.9	Wechselstromleistung	15
8.10	Netzwerk im Wechselstrom	16
9	Transformator	16
9.1	Ersatzschaltbild	16
9.2	Frequenzabhängigkeit	16
10	Verstärkertechnik	17
10.1	Gleichstromgegenkopplung	17
10.2	Gleichspannungsgegenkopplung	17
10.3	Einseitiger Transistorverstärker	17

1 Konstanten

1.1 Elementarladung

$$e_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} \quad [As] \quad (1)$$

1.2 Dielektrizitätskonstante

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \quad \left[\frac{As}{Vm} \right] \quad (2)$$

ϵ_r	umgebendes Material
≈ 1	Luft
$= 1$	Vakuum
81	Wasser

1.3 Spezifischer Widerstand

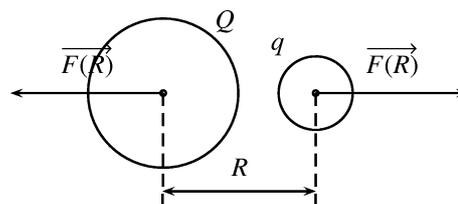
Material	ρ	$\left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right]$	ρ	$[\Omega m]$
Kupfer	$\approx 1.8 \cdot 10^{-2}$		$1.8 \cdot 10^{-8}$	
Eisen	≈ 0.2			
Chromnickel	≈ 1.15		$1.15 \cdot 10^{-6}$	
Widerstandsdraht	≈ 0.4			
Glas	$\approx 5 \cdot 10^{13}$		$5 \cdot 10^7$	
Porzellan	$\approx 10^{16}$			

1.4 Temperatur-Koeffizient

Material	α	$\left[\frac{1}{C} \right]$	β	$\left[\frac{1}{C^2} \right]$
Kupfer	$0.393 \cdot 10^{-2}$		$0.6 \cdot 10^{-6}$	
Konstantan	$2 \cdot 10^{-6}$		0	
Mangemin	$6 \cdot 10^{-6}$		0	
Kohlenstoff	$-5 \cdot 10^{-4}$			

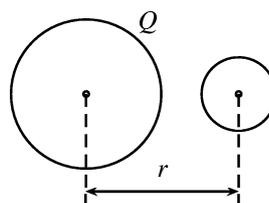
2 Grundlagen

2.1 Coulombsche Kraft



$$F(R) = \frac{Q \cdot q}{4\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{R^2} \quad [N] \quad (3)$$

2.2 Elektrische Feldstärke



$$E(r) = \frac{Q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (4)$$

$$\vec{E}(r) = E(r) \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (5)$$

$$Q = n \cdot e \quad (6)$$

2.3 Kraftwirkung im elektrischen Feld

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q \quad [N] \quad (7)$$

2.4 Strom I, i

$$i = \frac{\partial q}{\partial t} \quad [A] \quad (8)$$

$$i = \frac{n \cdot e^- \cdot v \cdot A \cdot \partial t}{\partial t} = n \cdot e^- \cdot v \cdot A \quad (9)$$

mit

A : Leiterquerschnitt

v : Geschwindigkeit

n : Dichte der Elektronen $[m^{-3}]$

b : Beweglichkeit $\left[\frac{m^2}{v \cdot s} \right]$

$$I = q \cdot n \cdot A \cdot b \cdot E \quad (10)$$

2.5 Stromdichte J, j

$$j = \frac{i}{A} \quad J = \frac{I}{A} \quad \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (11)$$

2.6 Spannung U, u

$$U = \underbrace{\frac{W}{q}}_{\text{Arbeitsvermögen pro Ladung}} = \underbrace{E \cdot l}_{\text{Feldstärke mal Länge}} \quad [V] \quad (12)$$

2.7 Ohmsches Gesetz

$$U = R \cdot I = \rho \frac{l}{A} \quad [V] \quad (13)$$

$$I = \delta \frac{A}{l} \cdot U \quad [I] \quad (14)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (15)$$

R : Widerstand $[\Omega]$

G : Gleitwert $[S]$

δ : spez. Leitfähigkeit $= n \cdot e_0 \cdot b$

ρ : spez. Widerstand $= \frac{1}{\delta}$

l : Länge des Drahtes

A : Querschnitt

2.8 Leistung P

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad [W] \quad (16)$$

mit

$$u(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t) \quad \text{und} \quad i(t) = \hat{i} \cdot \cos(\omega t) \quad (17)$$

$$P = U \cdot I \quad [W] \quad (18)$$

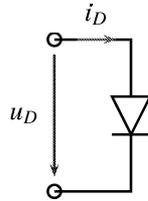
2.9 Widerstand R

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (19)$$

$$R_{(20C+\Delta\theta)} = R_{20} \left(1 + \alpha \cdot \Delta\theta + \beta \cdot (\Delta\theta)^2 + \dots \right) \quad [\Omega] \quad (20)$$

3 Halbleiter

3.1 Diode



$$i_D = I_s \left(e^{\frac{|e_0| u_D}{kT}} - 1 \right) = I_s \left(e^{\frac{u_D}{u_s}} - 1 \right) \quad (21)$$

I_s : Sperrstromkonstante [A]

e_0 $1.6 \cdot 10^{-19}$ [As]

k : Boltzman-Konstante = $1.38 \cdot 10^{-23}$ $\left[\frac{J}{K} \right]$

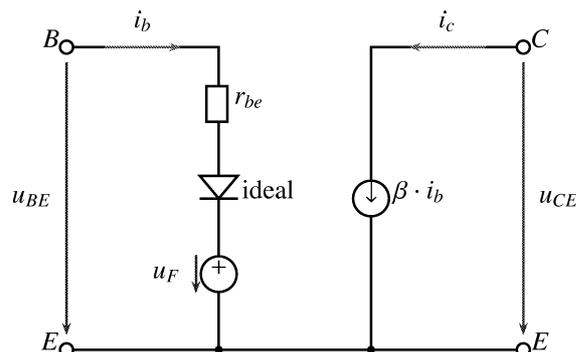
T : absolute Temperatur [K]

Flussspannung-Übersicht

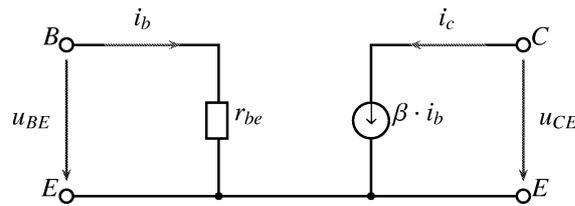
Silizium	$\approx 0.7 \dots 0.8$ [V]
Germanium	≈ 0.3 [V]
Schottky	≈ 0.4 [V]

3.2 Transistor

3.2.1 Grosses Ersatzschaltbild (NPN)



3.2.2 Kleines Ersatzschaltbild (NPN)



3.2.3 Hybridparameter

$$\begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_b \\ u_{ce} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{be} \\ i_c \end{bmatrix} \quad (22)$$

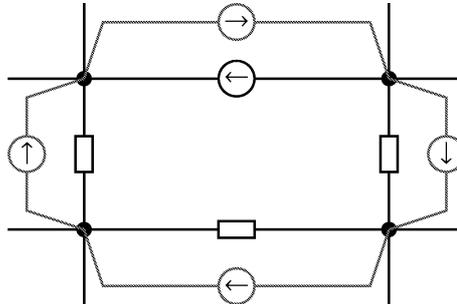
e : Emitterschaltung

siehe Datenblatt:

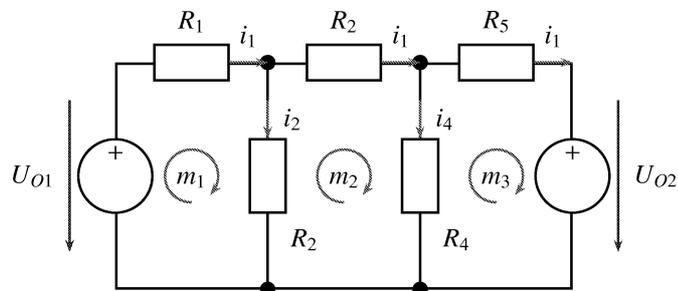
$$\begin{aligned} h_{ie} &= r_{be} \\ h_{re} &= \alpha \\ h_{fe} &= \beta \\ h_{oe} &= G_{oe} = \frac{1}{r_{oe}} \end{aligned}$$

4 Netzwerke

4.1 Manipulation mit idealen Quellen



4.2 Maschenstromverfahren



1. Vorbereitung des Netzwerkes: Stromquellen wegschaffen
2. Wahl der geeigneten Maschen

Widerstandsmatrix

$$W = \begin{pmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 & 0 \\ R_2 & R_2 + R_3 + R_4 & -R_4 \\ 0 & -R_4 & R_4 + R_5 \end{pmatrix} \quad (23)$$

Direktes Aufstellen von W :

1. Diagonalelemente ($i = k$): Summe der Widerstände, durch die der betreffende Maschenstrom fließt.
2. Übrige Elemente ($i \neq k$): Summe der Widerstände, durch die der Maschenstrom i und k fließt. Das Vorzeichen ist negativ falls die Maschenströme unterschiedliche Richtungen haben.

Quellvektor

$$\underline{u}_0 = \begin{pmatrix} +U_{01} \\ 0 \\ -U_{02} \end{pmatrix} \quad (24)$$

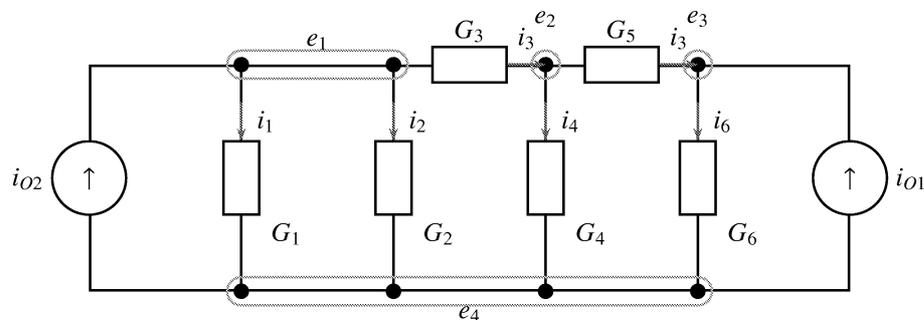
Direktes Aufstellen von u_0 : Summe der einzelnen Quellspannungen in jeder Masche. Das Vorzeichen ist positiv wenn sich ein positiver Maschenstrom ergeben würde.

Maschenstromvektor

$$\underline{m} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} \quad (25)$$

Lösung

$$W \cdot \underline{m} = \underline{u}_0 \quad (26)$$

4.3 Knotenspannungsverfahren

1. Vorbereitung des Netzwerkes:
 - Alles in Leitwert umrechnen
 - Spannungsquellen beseitigen
2. Einführung der Knotenspannungen:
 - Wahl eines geeigneten Bezugsknotens

Leitwertmatrix

$$L = \begin{pmatrix} G_1 + G_2 + G_3 & -G_3 & 0 \\ -G_3 & G_3 + G_4 + G_5 & -G_5 \\ 0 & -G_5 & G_5 + G_6 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Direktes Aufstellen von L :

1. Diagonalelemente ($i = k$): Summe aller Leitwerte des betreffenden Knotens
2. Übrige Elemente ($i \neq k$): Summe der Leitwerte, die die betroffenen Knoten miteinander verbindet. Das Vorzeichen ist immer negativ.

Quellvektor

$$\underline{i}_0 = \begin{pmatrix} i_{02} \\ 0 \\ i_{01} \end{pmatrix} \quad (28)$$

Direktes Aufstellen von i_0 : Summe aller Stromquellen, die Strom zu betrachteten Knoten liefern. Das Vorzeichen ist positiv wenn der Strom zum Knoten fließt.

Knotenspannungsvektoren

$$\underline{e} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} \quad (29)$$

Lösung

$$L \cdot \underline{e} = \underline{i}_0 \quad (30)$$

5 Messtechnik**5.1 Linearer Mittelwert (Average)**

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T u \, dt \quad (31)$$

5.2 Betragsmittelwert

$$|\bar{u}(t)| = \frac{1}{T} \int_0^T |u| \, dt \quad (32)$$

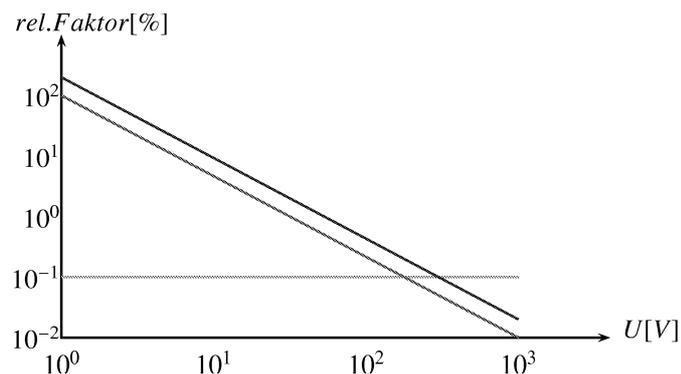
5.3 Quadratischer Mittelwert, Effektivwert

$$\bar{u}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 \, dt \quad (33)$$

$$u_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 \, dt} \quad (34)$$

5.4 Fehler von digitalen VA Multimetern

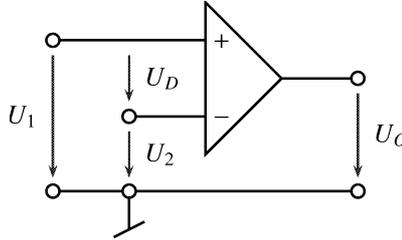
Fehler = $\pm(0.1\%$ der Ablesung $+0.2\%$ des Messbereichs $+1$ Digit $+ \text{spez. Fehler})$.



5.5 Crest-Faktor (Scheitelfaktor)

$$CF = \frac{\hat{U}}{U_{eff}} \quad \text{Sinus: } CF = \sqrt{2} \quad (35)$$

5.6 Differenzbetrieb beim KO



Ideal: $u_o = v_D \cdot (u_1 - u_2)$

Real: $u_o = v_D \cdot (u_1 - u_2) \pm v_c \cdot \left(\frac{u_1 + u_2}{2}\right)$

v_D : Differenzverstärkung

v_c : Commonmodeverstärkung

u_D : Commonmodespannung

CMMR : Commonmode Rejection Ratio

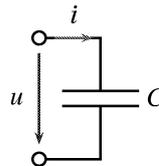
(Gleichtakt-Unterdrückungs-Verstärkung)

$$u_o = v_D \cdot u_D \cdot \left(1 \pm \frac{1}{\text{CMMR}} \cdot \frac{u_c}{u_D}\right) \quad \text{mit} \quad \frac{1}{\text{CMMR}} = \frac{v_c}{v_D}$$

Verstärkung in $dB = 20 \cdot \log(v)$. Es gilt auch:

$$10 < \text{CMMR} < 10^4 \\ 20dB < \text{CMMR} < 80dB$$

6 Kapazität



$$i = C \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (36)$$

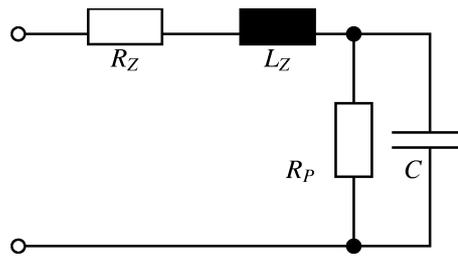
$$u = \frac{1}{C} \cdot \int_{t_0}^{t_1} i(\tau) d\tau + u_c(t=0) \quad (37)$$

6.1 Dirac-Stoss

$$i(t) = C \cdot u_o \cdot \delta(t) \quad \text{mit} \quad \delta(t) : \text{Dirac-Stoss} \quad (38)$$

Fläche: $C \cdot u_o$

6.2 Ersatzschaltbild



C : Kapazität
 R_p : Isolationswiderstand
 R_z : Zuleitungswiderstand
 L_z : Zuleitungsinduktivität

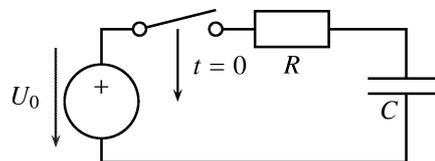
6.3 Parallelschaltung

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \quad (39)$$

6.4 Serieschaltung

$$\frac{1}{C_{total}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (40)$$

6.5 U und I in RC -Netzwerken



$$u_o = R \cdot C \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + u_c(t) \quad (41)$$

$$u_c(t) = u_o \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (42)$$

$$i_c(t) = u_o \cdot \frac{1}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (43)$$

$$p_c(t) = \frac{u_o^2}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (44)$$

6.6 Kondensator als Energiespeicher

$$W = \frac{U_o^2 \cdot C}{2} = \frac{Q \cdot U_o}{2} \quad (45)$$

6.7 U und I bei Wechselstrom

$$u_c(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t) \quad (46)$$

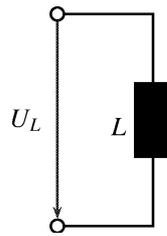
$$i_c(t) = -\omega \cdot C \omega \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \quad (47)$$

$$i_c(t) = \omega \cdot C \cdot \hat{u} \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (48)$$

Blindwiderstand:

$$\frac{\hat{u}}{\hat{i}} = \frac{\hat{u}_c}{\omega C \hat{u}_c} = \frac{1}{\omega C} = X_c \quad [\Omega] \quad (49)$$

7 Induktivität



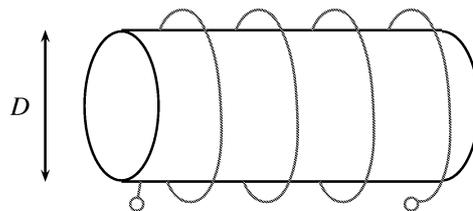
$$u_L(t) = L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (50)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_1} u_L(\tau) d\tau + i_L(0) \quad (51)$$

L : Induktivität [H]

Hat die Eigenschaft, dass der Strom niemals springt!

7.1 Zylinderspule



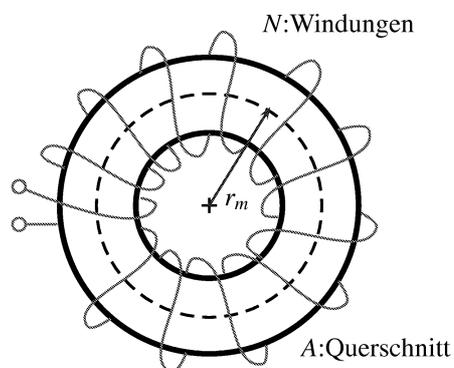
$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot N^2 \quad (52)$$

mit

$$\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$$

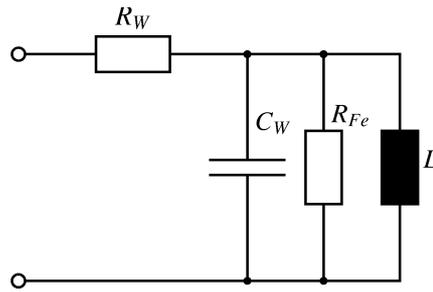
$$\mu_r : \text{Luft} = 1, \text{Eisen} = 10^3$$

7.2 Ringkern



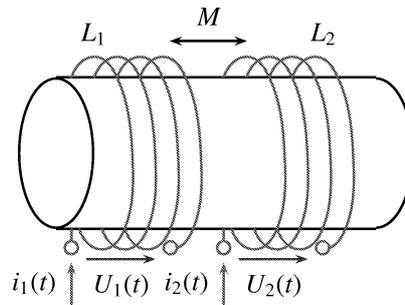
$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{2\pi \cdot r_m} \cdot N^2 \quad (53)$$

7.3 Ersatzschaltbild



- R_w : Wicklungswiderstand
- L : Induktivitätswert
- C_w : Wicklungskapazität
- R_{Fe} : Kernverluste

7.4 Gekoppelte Spulen



- L_1 : Induktivität der Spule 1
- L_2 : Induktivität der Spule 2
- M : Gegeninduktivität (Kopplung)

ohne Streufluss:

$$u_1(t) = L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t} \tag{54}$$

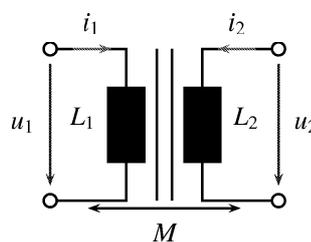
$$u_2(t) = L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t} \tag{55}$$

(56)

Kopplungsfaktor

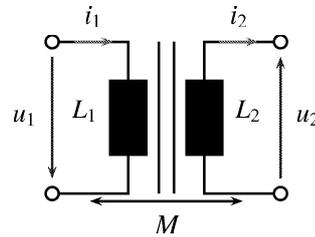
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad \text{mit } 0 < k \leq 1 \tag{57}$$

Keinen Streufluss: $k = 1$



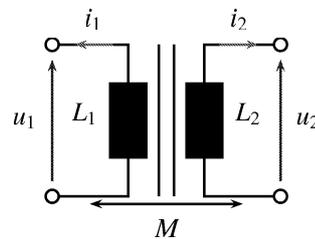
$$u_1 = L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

$$u_2 = L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t}$$



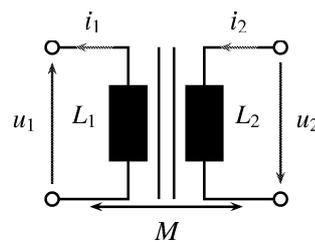
$$u_1 = L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} - M \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

$$u_2 = L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} - M \frac{\partial i_1}{\partial t}$$



$$u_1 = L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} + M \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

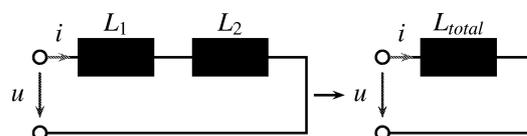
$$u_2 = L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} + M \frac{\partial i_1}{\partial t}$$



$$u_1 = L_1 \frac{\partial i_1}{\partial t} - M \frac{\partial i_2}{\partial t}$$

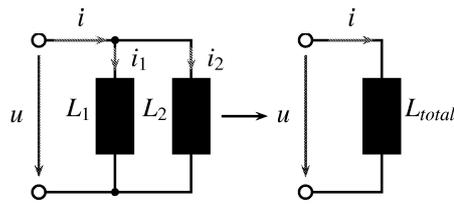
$$u_2 = L_2 \frac{\partial i_2}{\partial t} - M \frac{\partial i_1}{\partial t}$$

7.5 Serieschaltung nichtgekoppelter Spulen



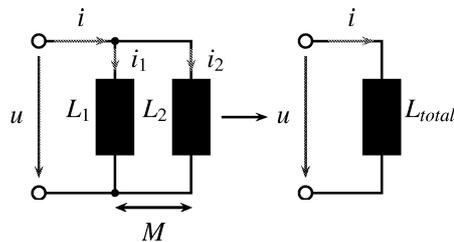
$$L_{total} = \sum_{i=1}^n L_i$$

7.6 Parallelschaltung nichtgekoppelter Spulen



$$\frac{1}{L_{total}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} \quad (59)$$

7.7 Parallelschaltung gekoppelter Spulen



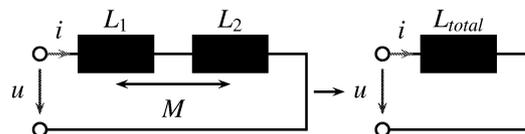
für die gezeigte Schaltung:

$$L_{total} = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} \quad (60)$$

Achtung: Orientierung beachten (siehe obige 4 Fälle)

⇒ Gleichung ändert bei anderem Fall

7.8 Serieschaltung gekoppelter Spulen

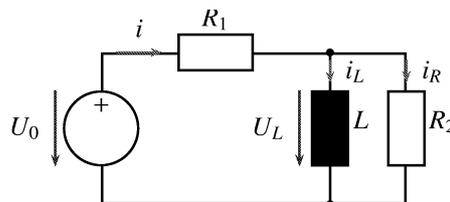


$$L_{total} = L_1 + L_2 + 2M \quad (61)$$

7.9 Blindwiderstand

$$L \cdot \omega = X_L \quad [\Omega] \quad (62)$$

7.10 RL-Schaltung



$$i_L(t) = \frac{U_0}{R_1} \cdot e^{-\frac{R_2}{L} \cdot t} \quad (63)$$

$$u_L(t) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_0 \cdot e^{-\frac{R_2}{L} \cdot t} \quad (64)$$

$$p_L(t) = -\left(\frac{U_0}{R_1}\right)^2 \cdot R_2 \cdot e^{-2\frac{R_2}{L} \cdot t} \quad (65)$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

8 Wechselstromtheorie

8.1 Kennwerte und Kenngrößen

- Amplitude, Spitzenwert, Scheitelwert: \hat{u}, \hat{i}
- Kreisfrequenz: $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$
- Frequenz: $f = \frac{1}{T}$ $[\text{Hz}]$
- Periodenzeit, Periodendauer: $T = \frac{1}{f}$ $[\text{s}]$
- Nullphasenwinkel: ϕ_i, ϕ_u
- Momentanwert: $i(t), u(t)$

8.2 Linearer Mittelwert

Arithmetischer Mittelwert:

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \cdot \cos(\omega t + \phi_u) dt \quad (66)$$

8.3 Betragsmittelwert

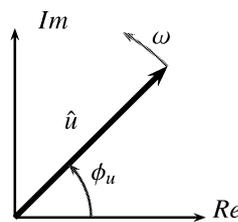
$$|\hat{u}| = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{u} \cdot |\cos(\omega t)| dt \quad (67)$$

8.4 Effektivwert

Geometrischer Mittelwert:

$$U = U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad (68)$$

8.5 Zeigerdarstellung



$$\begin{aligned} \underline{\hat{u}}(t) &= \hat{u} \cdot e^{j\phi_u} \cdot e^{j\omega t} & (69) \\ \hat{u} \cdot e^{j\phi_u} \cdot e^{j\omega t} &= \underline{\hat{u}} \cdot e^{j\omega t} \\ &= \hat{u} [\cos(\phi_u) + j \sin(\phi_u)] \cdot e^{j\omega t} \\ &= \underline{\hat{u}} [\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)] \end{aligned}$$

8.6 Bezeichnungen und Konventionen

- \hat{u} : Länge des Zeigers
- ω : Winkelgeschwindigkeit
- ϕ_u : Nullphasenlage

$$\underline{\hat{u}}(t) = \hat{u} \cdot e^{j(\omega t + \phi_u)}$$

Komplexer Momentanwert

$$\hat{u}(t) = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} \quad (70)$$

Komplexer Scheitelwert

$$\underline{\hat{u}} = \hat{u} \cdot e^{j\phi_u} \quad (71)$$

Reeller Momentanwert

$$u(t) = \operatorname{Re}[\hat{u}(t)] = \hat{u} \cdot \cos(\omega t + \phi_u) \quad (72)$$

Imaginärer Momentanwert

$$u(t) = \operatorname{Im}[\hat{u}(t)] = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \phi_u) \quad (73)$$

Komplexer Effektivwert

$$\underline{u} = u_{eff} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\phi_u} \quad (74)$$

8.7 Impedanz und Admittanz

$$\underline{Z} = \frac{\hat{u}(t)}{\hat{i}(t)} = \frac{\hat{u}}{\hat{i}} = R + jX \quad (75)$$

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{\hat{i}(t)}{\hat{u}(t)} = G + jB \quad (76)$$

Z : Scheinwiderstand, Impedanz

Y : Scheinleitwert, Admittanz

R : Wirkwiderstand, Resistanz

X : Blindwiderstand, Reaktanz

G : Wirkleitwert, Konduktanz

B : Blindleitwert, Suszeptanz

8.8 Bodediagramm

Zahlentafel:

$\frac{\omega}{\omega_y}$	v [dB]	$\phi_z = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}\{\underline{Y}\}}{\operatorname{Re}\{\underline{Y}\}}\right)$
0.01	0.000434	0.5729
0.10	0.0432	5.771
1.00	3.0103	45
10.00	20.043	84.289
100.00	40.004	89.43

8.9 Wechselstromleistung**8.9.1 Wirkleistung P [W]**

$$P = \overline{p}(t) = \frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} \cdot \cos(\phi_u - \phi_i) \quad (77)$$

$$= u_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos(\phi_u - \phi_i) \quad (78)$$

8.9.2 Blindleistung Q [VAR]

$$Q = \frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} \cdot \sin(\phi_u - \phi_i) \quad (79)$$

$$= u_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \sin(\phi_u - \phi_i) \quad (80)$$

8.9.3 Scheinleistung S [VA]

$$S = u_{eff} \cdot i_{eff} \quad (81)$$

8.9.4 Leistungsfaktor

$$\cos(\phi) = \cos(\phi_u - \phi_i) = \frac{P}{S} \quad (82)$$

8.10 Netzwerk im Wechselstrom

Funktioniert gleich wie bei Gleichstrom mit der Unterscheidung:

- **mit magnetischer Kopplung:** Knotenspannungsmethode *nicht* geeignet.
- **ohne magnetischer Kopplung:** Knotenspannungs- sowie Maschenstrommethode geeignet.

Mit magnetischer Kopplung:

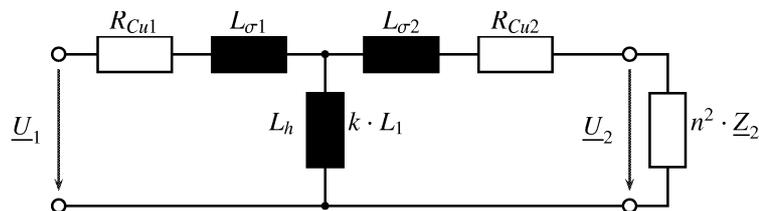
$$\left[\begin{pmatrix} \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdots \end{pmatrix} + K \right] \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} = \underline{u} \quad (83)$$

K : Kopplungsmatrix

Achtung: Orientierung der Spulen beachten! Machen möglichst nicht wo Kopplungen sind!

9 Transformator

9.1 Ersatzschaltbild



$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad \text{Kopplungsfaktor}$$

9.2 Frequenzabhängigkeit

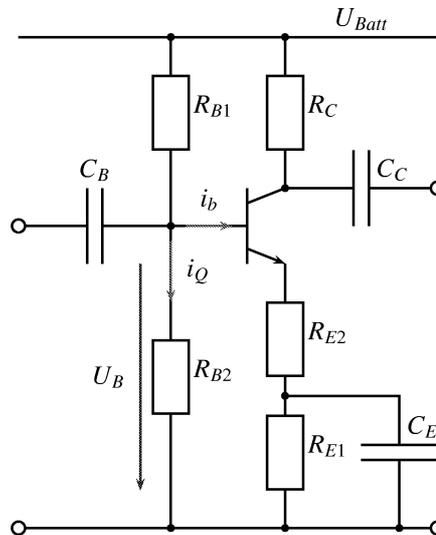
$$\underline{H}(\omega) = \frac{n \cdot \underline{u}_2(\omega)}{\underline{u}_1(\omega)} \quad (84)$$

$$\text{Hochpass: } \underline{H}(\omega) = \frac{j\omega T(\omega)}{1 + j\omega T(\omega)}$$

$$\text{Tiefpass: } \underline{H}(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T(0)}$$

10 Verstärkertechnik

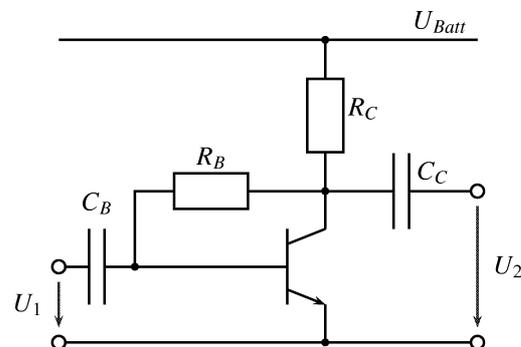
10.1 Gleichstromgegenkopplung



Regel: $i_Q \approx (5 \dots 10) \cdot i_b$

$$u_B \approx \frac{U_{Batt}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot R_{B2}$$

10.2 Gleichspannungsgegenkopplung



10.3 Einseitiger Transistorverstärker

