

Formelsammlung Grundlagen der Elektrotechnik

Marc Völkers

November 2019

Contents

1	Grundlagen	3
1.1	Formelkreis	3
1.2	Halbleiter	3
2	EUE04	3
2.1	Widerstand	3
2.2	Kondensator	3
2.3	Spule	4
2.4	Diode	5
2.5	Transistor	5
2.6	Feld Effekt Transistor (FET)	6
2.7	Operationsverstärker	6
3	EUE05	7
3.1	Grundlagen digitale Schaltungstechnik	7
3.2	Analog-Digital- / Digital-Analog Umsetzer	7
4	LEL01	8
5	LEL02	10
5.0.1	Hochsatzsteller	10
5.1	Frequenzumrichter in der Antriebstechnik	11
5.2	Erläuterung Drehmomentbildung Synchronmaschine	12
5.3	Asynchronmaschine	12
5.4	Schaltnetzteile	12

1 Grundlagen

1.1 Formelkreis

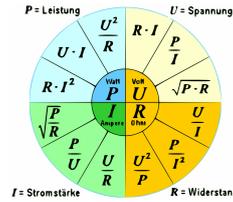


Figure 1: <http://www.sengpielaudio.com/Formelrad-Elektrotechnik.htm>

1.2 Halbleiter

Ladungsträger	N-Halbleiter	P-Halbleiter
Majorität	Donatorelektronen und thermisch beeinflusste Elektronen	Defektelektronen des Akzeptors und thermische Defektelektronen
Minorität	Defektelektronen thermischen Ursprungs	Elektronen thermischen Ursprungs

2 EUE04

2.1 Widerstand

Beschreibung	Variablen	Formel
Temperaturabhängigkeit Widerstand (0 K = -273,15 °C)	α = Temp. Koeffizient ϑ_0 = Betugstemp. ϑ = Temperatur R_0 = Widerstand bei ϑ_0	$R(\vartheta) = R_0(1 + \alpha\Delta\vartheta)$ $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$
Elektrische Verlustleistung	R_{TH} = thermischer Widerstand ϑ_U = Umgebungstemp. ϑ = Oberflächentemp.	$P_V = \frac{\vartheta - \vartheta_U}{R_{TH}}$
Gleichstromwiderstand arbeitspunktabhängig		$R_{AP} = \frac{U_{AP}}{I_{AP}}$
differentieller Widerstand (Wechselgrößenwiderstand)		$r_{DAP} = \frac{\Delta U_{AP}}{\Delta I_{AP}}$

2.2 Kondensator

Beschreibung	Variablen	Formel
Kapazität	ε = Permittivität A = Fläche d = Flächenabstand	$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$
Kapazität	Q = Ladung U = Spannung	$C = \frac{Q}{U}$
Verlustfaktor	$\tan\delta$ = Verlustfaktor P = Wirkleistung Q = Blindleistung	$\tan\delta = \frac{P}{Q}$

2.3 Spule

Beschreibung	Variablen	Formel
Induktivität	$\Psi(I)$ = magnetischer Fluss? I = Stromstärke	$L(I) = \frac{\Psi(I)}{I}$
Induktivität	μ_0 = mag. Feldkonstante $= 4\pi * 10^{-7} Vs/Am$ μ_R = Permeabilitätszahl A = durchsetzte Fläche n = Anzahl Windungen l = mag. Weglänge	$L = \mu_0 \cdot \mu_R \cdot \frac{A \cdot n^2}{l}$
Verlustfaktor	$\tan\delta$ = Verlustfaktor G = Spulengüte P = Wirkleistung Q = Blindleistung R = Widerstand ω = Winkelgeschwindigkeit $= 2 * \pi * f$ f = Frequenz L = Induktivität	$\tan\delta = \frac{1}{G} = \frac{P}{Q} = \frac{R}{\omega \cdot L}$

2.4 Diode

Beschreibung	Variablen	Formel
Strom-Spannungs-Abhängigkeit	I_D = Diostenstrom U_D = Diodenspannung I_S = Sperrstrom U_T = Thermospannung	$I_D = I_S(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$
Thermospannung	k = Boltzmannkonstant $= 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{Ws/K}$ e_0 = Elementarladung $= 1,602189 \cdot 10^{-19} \text{As}$ T = absolute Temperatur in K	$U_T = \frac{k \cdot T}{e_0}$
Diodenspannung bei linearisiertem Verlauf	U_F = Flussspannung r_D = Widerstand I_D = Diodenstrom	$U_D = U_F + r_D I_D$
Verlustleistung	U_F = Flussspannung r_D = Widerstand I_D = Diodenstrom T = Periodendauer	$P_V = \frac{1}{T} \int_0^T u_D(t) i_D(t) dt$ $= U_F \frac{1}{T} \int_0^T i_D(t) dt + r_D \frac{1}{T} \int_0^T i_D^2(t) dt$ $= U_F \bar{I}_D + r_D I_{DEFF}^2$

2.5 Transistor

Beschreibung	Variablen	Formel
Emitterstrom	I_C = Kollektorstrom I_B = Basisstrom	$I_E = I_C + I_B$
Kollektor-Emitter-Spannung	U_{CB} = Kollektor-Basis-Spannung U_{BE} = Basis-Emitter-Spannung	$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$
Kollektor Widerstand	U_B = Betriebsspannung U_{CEA} = Kollektor-Emitter Spannung Arbeitspunkt I_{CA} = Kollektorstrom Arbeitspunkt	$R_C = \frac{U_B - U_{CEA}}{I_{CA}}$
4 Quadranten Kennlinienfeld Arbeitspunkt in der Mitte	U_{CEA} = Kollektor-Emitter-Spannung Arbeitspunkt U_B = Betriebsspannung I_{CA} = Kollektorstrom Arbeitspunkt R_C = Kollektorwiderstand	$U_{CEA} = \frac{U_B}{2}$ $I_{CA} = \frac{U_B}{2R_C}$
Verstärkung	I_C = Kollektorstrom I_B = Basisstrom	$B = \frac{I_C}{I_B}$
Arbeitspunkteinstellung über Spannungsteiler	I_Q = Querstrom I_B = Basisstrom $R_{1/2}$ = Spannungsteiler Widerstände U_{BEA} = Basis-Emitter-Spannung Arbeitspunkt	$I_Q = 10 \cdot I_B$ $R_1 = \frac{U_B - U_{BEA}}{I_Q + I_B}$ $= \frac{U_B - U_{BEA}}{11 \cdot I_B}$ $R_2 = \frac{U_{BEA}}{I_Q} = \frac{U_{BEA}}{10 \cdot I_B}$

2.6 Feld Effekt Transistor (FET)

Beschreibung	Variablen	Formel
Drain-Source Abschnürgrenze Strom	I_{DSS} = Maximaler Drain Strom U_{DSP} = Drain Source Abschnürspannung U_{DSS} = Maximale Drain-Source Spannung	$I_{DSP} = I_{DSS} \left(\frac{U_{DSP}}{U_{DSS}} \right)^2$
Drain-Source Abschnürgrenze Spannung	U_P = Pinch-off-Spannung U_{GS} = Gate-Source Spannung	$U_{DSP} = U_{GS} - U_P$
Abschnürgrenze Strom anhand von Pinch-off-Spannung	I_{DSP} = Drain-Source Abschnürstrom U_P = Pinch-off-Spannung U_{GS} = Gate-Source Spannung I_{DSS} = Maximaler Drain-Source Strom	$I_{DSP} = I_{DSS} \left(\frac{U_{GS}}{U_P} - 1 \right)^2$
Steilheit (A/V)	U_P = Pinch-off-Spannung U_{GS} = Gate-Source Spannung I_{DSS} = Maximaler Drain-Source Strom	$S = \frac{dI_{DSP}}{dU_{GS}} = \frac{2I_{DSS}}{U_P} \left(\frac{U_{GS}}{U_P} - 1 \right)$

2.7 Operationsverstärker

Eigenschaften:

- Eingangswiderstand = ∞
- Ausgangswiderstand = 0
- $U_d = 0$ (Virtueller Kurzschluss zwischen den Eingängen)

Beschreibung	Variablen	Formel
Gegengekoppelt Ausgangsspannung	ν_D = Differenzverstärkung U_D = Differenzspannung U_P = Spannung Eingang U_N = Spannung invert. Eingang U_E = Eingangsspannung	$ \begin{aligned} U_A &= \nu_D * U_D = \nu_D(U_P - U_N) \\ &= \nu_D(U_E - k_R U_A) \\ &= \frac{\nu_D}{(1 + \nu_D \cdot k_R)} \cdot U_E \\ &\sim \frac{1}{k_r} * U_E \end{aligned} $

3 EUE05

3.1 Grundlagen digitale Schaltungstechnik

Beschreibung	Variablen	Formel
Spannungspegel	U_{AHMIN} = Ausgang Spannung High Min U_{EHMIN} = Eingang Spannung High Min U_{AHMAX} = Ausgang Spannung Low Max U_{EHMAX} = Eingang Spannung Low Max	$U_{AHMIN} > U_{EHMIN}$ $U_{ALMAX} < U_{EIMAX}$
Störabstände / Störschwellen	ΔU_{LS} = Störabstand Low ΔU_{HS} = Störabstand High ... (siehe Spannungspegel)	$\Delta U_{LS} = U_{ELMAX} - U_{ALMAX} > 0$ $\Delta U_{HS} = U_{AHMIN} - U_{EHMIN} > 0$
Eingangslastfaktor (FAN-IN)	I_E = Eingangsstrom Bauteil I_{ES} = Eingangsstrom Standardeingang gleiche Schaltkeisfamilie	$\eta_E = \frac{I_E}{I_{ES}}$
Ausgangslastfaktor (FAN-OUT)	I_A = Ausgangsstrom I_{ES} = Eingangsstrom Standardeingang gleiche Schaltkeisfamilie	$\eta_A = \frac{I_A}{I_{ES}}$
Delay Eingangs-/Ausgangsspannung	t_{DLH} = Zeitdifferenz Low High t_{DHL} = Zeitdifferenz High Low	$t_D = \frac{1}{2}(t_{DLH} + t_{DHL})$
Speed-Power-Produkt	P_v = Mittlere Verlustleistung Umschaltvorgang t_{DHL} = Zeitdifferenz High Low	$W = P_v \cdot t_D$

3.2 Analog-Digital- / Digital-Analog Umsetzer

Beschreibung	Variablen	Formel
Eingangsgröße (Meist Spannung)	z = binär kodierte Zahl am Ausgang Q = Quatisierungseinheit	$U_E = z \cdot Q$
Maximale Anzahl der Quantisierungsstufen	N = Bitzahl	$Z_{MAX} = 2^N$
Tastverhältnis DA Zählverfahren	z = Eingangszahlenwert n = Auflösung	$TAST = \frac{z}{2^n} = \frac{z}{z_{MAX} + 1}$
Mittelwert der Impulsfolge DA Zählverfahren	$TAST$ = Tastverhältnis U_{REF} = Eingangsspannung z = digitaler Zahlenwert Q = Quantisierungseinheit	$\bar{U}_A = TAST \cdot U_{REF} = zQ$

4 LEL01

Beschreibung	Variablen	Formel
Arithmetischer Mittelwert		$\bar{u} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) dt$
Effektivwert		$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt}$ $I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt}$
Mischgröße aus Gleich und Wechselanteil	$\bar{x} =$ Gleichgrößenanteil $x_{\sim}(t) =$ Wechselgrößenanteil	$u(t) = \bar{u} + u_{\sim}(t)$ $i(t) = \bar{i} + i_{\sim}(t)$
Mischgröße Wechselanteil	$x_{\sim}(t) =$ Wechselgrößenanteil $\hat{x} =$ Scheitelwert	$u_{\sim}(t) = \sum_{v=1}^{\infty} \hat{u}_v \cdot \sin(v\omega t + \varphi_v)$ $i_{\sim}(t) = \sum_{v=1}^{\infty} \hat{i}_v \cdot \sin(v\omega t + \varphi_v)$
Gesamteffektivwert Mischgröße	$X_d =$ Gleichgrößen-effektivwert $X_{eff\sim} =$ Wechselgrößen-effektivwert	$U_{eff} = \sqrt{U_d^2 + U_{eff\sim}^2}$ $I_{eff} = \sqrt{I_d^2 + I_{eff\sim}^2}$
Welligkeit ($w=0 \rightarrow$ reine Gleichgröße; $w \rightarrow \infty$ reine Wechselgröße)	$X_{eff} =$ Gesamteffektivwert $X_d =$ Gleichgrößen-effektivwert $X_{eff\sim} =$ Wechselgrößen-effektivwert	$w_u = \frac{U_{eff\sim}}{U_d} = \sqrt{\left(\frac{U_{eff}}{U_d}\right)^2 - 1}$ $w_i = \frac{I_{eff\sim}}{I_d} = \sqrt{\left(\frac{I_{eff}}{I_d}\right)^2 - 1}$
Klirrfaktor (Qualität der erzeugten Wechselspannung $k=0 \rightarrow$ rein Sinusförmig)	$X_{eff} =$ Gesamteffektivwert	$k_u = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_{eff,v}^2}}{U_{eff}}$ $k_i = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} I_{eff,v}^2}}{I_{eff}}$
Berechnung einfacher Kurvenverläufe (diskrete Werte)	$D = \frac{t_1}{T}$ Tastverhältnis $U_D =$ diskrete Spannung	$\bar{u} = U_d \cdot D$ $U_{eff} = U_d \cdot \sqrt{D}$
Kondensator Strom-Spannungs-Beziehung	$i_C =$ Kondensatorstrom $u_C =$ Kondensatorspannung	$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt}$ $u_C = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_C(\tau) d\tau + u_C(t=0)$
Spule Strom-Spannungs-Beziehung	$i_L =$ Spulenstrom $u_L =$ Spulenspannung	$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$ $i_L = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t u_L(\tau) d\tau + i_L(t=0)$
Scheinleistung	$P =$ Wirkleistung $Q =$ Blindleistung	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
Verschiebungsfaktor	$P =$ Wirkleistung $S_1 =$ Spulenspannung	$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos\varphi_1$
Wärmeströmungsfeld Temperaturdifferenz	$R_{th} =$ Wärmewiderstand ($\frac{K}{W}$) $P_v =$ Verlustleistung	$\Delta\vartheta = R_{th} \cdot P_v$ $\vartheta_j - \vartheta_a = (R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa}) \cdot P_v$
transienter Wärmewiderstand	$P\Delta\vartheta(t) =$ Temperaturdifferenz $P_v =$ Verlustleistung	$Z_{th} = \frac{\Delta\vartheta(t)}{P_v}$

Beschreibung	Variablen	Formel
Stromrichter M1U Diodenspannung	$u_S =$ Eingangsspannung $u_d =$ Ausgangsspannung	$u_D = u_S - u_d = u_S - i_d \cdot R$
Gleichrichter M1U Mittelwert Ausgangsspannung	$U_{eff} =$ Effektivwert Eingangsspannung	$U_d = \frac{\sqrt{2}U_{eff}}{\pi}$
Gleichrichter M2U Mittelwert Ausgangsspannung	$U_{eff1} =$ Effektivwert Eingangsspannung	$U_d = \frac{2\sqrt{2}U_{eff1}}{\pi}$
Gleichrichter M3U Mittelwert Ausgangsspannung	$U_{eff1} =$ Effektivwert Eingangsspannung	$U_d = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}U_{eff1}}{2\pi}$
Gleichrichter B2U Mittelwert Ausgangsspannung	$U_{eff1} =$ Effektivwert Eingangsspannung	$U_d = \frac{4\sqrt{2}U_{eff1}}{\pi}$
Gleichrichter B6U Mittelwert Ausgangsspannung	$U_{eff1} =$ Effektivwert Eingangsspannung	$U_d = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}U_{eff1}}{\pi}$
Tiefsetzsteller Einschaltzeit	$U_{Steuer} =$ Steuerspannung $\hat{U}_{SZ} =$ Sägezahnspannung	$t_{ein} = \frac{U_{Steuer}}{\hat{U}_{SZ}} \cdot T_S$
Tiefsetzsteller Mittelwert Ausgangsspannung	$U_d =$ Eingangsspannung $t_{ein} =$ Einschaltzeit $T_S =$ Schaltperiode $D =$ Tastgrad	$U_0 = \frac{t_{ein}}{T_S} \cdot U_d = D \cdot U_d$
LC Tiefpassfilter Spannungsteiler	$U_0 =$ Mittelwert Ausgangsspannung $u_{0F} =$ Filtereingangsspannung	$\frac{U_0}{u_{0F}(t)} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC}$
LC Tiefpassfilter Eckfrequenz	$f_E =$ Eckfrequenz	$\omega_E = 2\pi \cdot f_E = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
LC Tiefpassfilter Oberschwingungen unterdrücken	$f_E =$ Eckfrequenz $f_S =$ Schaltfrequenz	$f_E = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$ mit $\frac{f_E}{f_S} = 0,01$ $L = \frac{1}{C(2\pi \cdot 0,01 \cdot f_S)^2}$
Hochsetzsteller Zusammenhang Eingangsspannung und Ausgangsspannung	$U_0 =$ Ausgangsspannung $U_d =$ Eingangsspannung $D =$ Tastverhältnis	$\frac{U_0}{U_d} = \frac{T_S}{T_S - t_{ein}} = \frac{1}{1 - D}$

5 LEL02

Beschreibung	Variablen	Formel
Wechselrichter mit Halbbrücke Scheitelwert Ausgangsspannung	$U_d =$ Eingangsspannung	$\hat{U}_{0,1} = \frac{2}{\pi} \cdot U_d$
Wechselrichter mit Vollbrücke Scheitelwert Ausgangsspannung	$U_d =$ Eingangsspannung	$\hat{U}_{0,1} = \frac{4}{\pi} \cdot U_d$
Sinusförmige Pulsweitenmodulation Ausgangsspannung	$U_d =$ Eingangsspannung $u_{Steuer} =$ Steuerspannung $\hat{U}_\Delta =$ Amplitude Dreiecksspannung	$U_0 = U_d \cdot \frac{u_{Steuer}}{\hat{U}_\Delta}$
Sinusförmige Pulsweitenmodulation Aussteuergrad	$\hat{U}_{Steuer} =$ Amplitude Steuerspannung $\hat{U}_\Delta =$ Amplitude Dreiecksspannung	$m_a = \frac{\hat{U}_{Steuer}}{\hat{U}_\Delta}$
Sinusförmige Pulsweitenmodulation Verhältnis von Schaltfrequenz zu Grundschnwingfrequenz (muss größer als 10 sein)	$f_S =$ Schaltfrequenz $f_1 =$ Grundschnwingfrequenz	$m_f = \frac{f_S}{f_1}$
Dreiphasiger Wechselrichter Ausgangsspannung erster Schalter geschlossen	$U_d =$ Eingangsspannung	$u_{a0}(t) = \frac{U_d}{2}$
Dreiphasiger Wechselrichter Ausgangsspannung erster unterer Schalter geöffnet	$U_d =$ Eingangsspannung	$u_{a0}(t) = -\frac{U_d}{2}$
Dreiphasiger Wechselrichter Ausgangsspannung erster unterer Schalter geöffnet	$U_d =$ Eingangsspannung	$u_{a0}(t) = -\frac{U_d}{2}$

5.0.1 Hochsatzsteller

Beschreibung	Variablen	Formel
Induktivität berechnen	$L =$ Induktivität $\Delta I_L =$ Stromwälligkeit $I_e =$ Eingangsstrom $U_a =$ Ausgangsspannung $U_e =$ Eingangsspannung $f =$ Schaltfrequenz	$L = \frac{1}{\Delta I_L} (U_a - U_e) \cdot \frac{U_e}{U_a} \cdot \frac{1}{f}$ $\Delta I_L \approx 0,2 \cdot I_e$

5.1 Frequenzumrichter in der Antriebstechnik

Beschreibung	Variablen	Formel
Kraft	$m = \text{Masse}$ $a = \text{Beschleunigung}$	$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} \Rightarrow \frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}$
Geschwindigkeit / Weg	$\omega = \text{Winkelgeschwindigkeit}$ $r = \text{Radius}$ $\varphi = \text{Winkel}$	$v = \omega \cdot r \Rightarrow dv = r \cdot d\omega$ $s = r \cdot \varphi \Rightarrow ds = r \cdot d\varphi$
Kraft mit Drehmoment	$r = \text{Radius}$ $m = \text{Masse}$ $v = \text{Geschwindigkeit}$ $t = \text{Zeit}$ $F = \text{Kraft}$ $M = \text{Drehmoment}$ $J = \text{Trägheitsmoment}$	$F \cdot r = M \Rightarrow F = \frac{M}{r}$ $\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} = \frac{M}{r \cdot m} \Rightarrow \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{r \cdot m} = \frac{M}{r^2 + m}$ $J = r^2 \cdot m$
Bewegungsgleichung für rotierende Körper	$\omega = \text{Winkelgeschwindigkeit}$ $r = \text{Radius}$ $m = \text{Masse}$ $t = \text{Zeit}$ $M = \text{Drehmoment}$ $J = \text{Trägheitsmoment}$	$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{r^2 \cdot m} = \frac{M}{J}$
Trägheitsmoment eines Volumens	$r = \text{Radius}$ $m = \text{Masse}$	$J = \int_V r^2 dm$

5.2 Erläuterung Drehmomentbildung Synchronmaschine

Beschreibung	Variablen	Formel
Lorenzkraft	B = Magnetisches Feld I = Stromstärke l = Leiterlänge Wicklung	$F_L = B \cdot I \cdot l$
Elektrisches Drehmoment	B = Magnetisches Feld I = Stromstärke l = Leiterlänge Wicklung r = Rotorradius i_a = Wicklungsstrom F_L = Lorenzkraft	$M_{el} = F_L \cdot r = B \cdot I \cdot l \cdot r = B \cdot i_a \cdot l \cdot r$

5.3 Asynchronmaschine

Beschreibung	Variablen	Formel
Statorfeld synchrone Drehzahl	f_1 = Frequenz n_p = Kurzschlussläufer Polzahl	$n_s = \frac{f_1}{n_p}$
Schlupf	n_s = Synchrodrehzahl n_p = Mechanische Drehzahl	$s = \frac{n_s - n_m}{n_s}$

5.4 Schaltnetzteile

Beschreibung	Variablen	Formel
Transformator Zusammenhänge	u_1 = Eingangsspannung u_2 = Ausgangsspannung N_1 = Windungsanzahl Eingang N_2 = Windungsanzahl Ausgang i_2 = Stromstärke Ausgang i_1 = Stromstärke Eingang	$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1}$