

# Formelsammlung

## Elektronische Bauelemente

© Volker Müller 2006/2007

<http://VolkerMueller.Info>

[Volker@VolkerMueller.Info](mailto:Volker@VolkerMueller.Info)

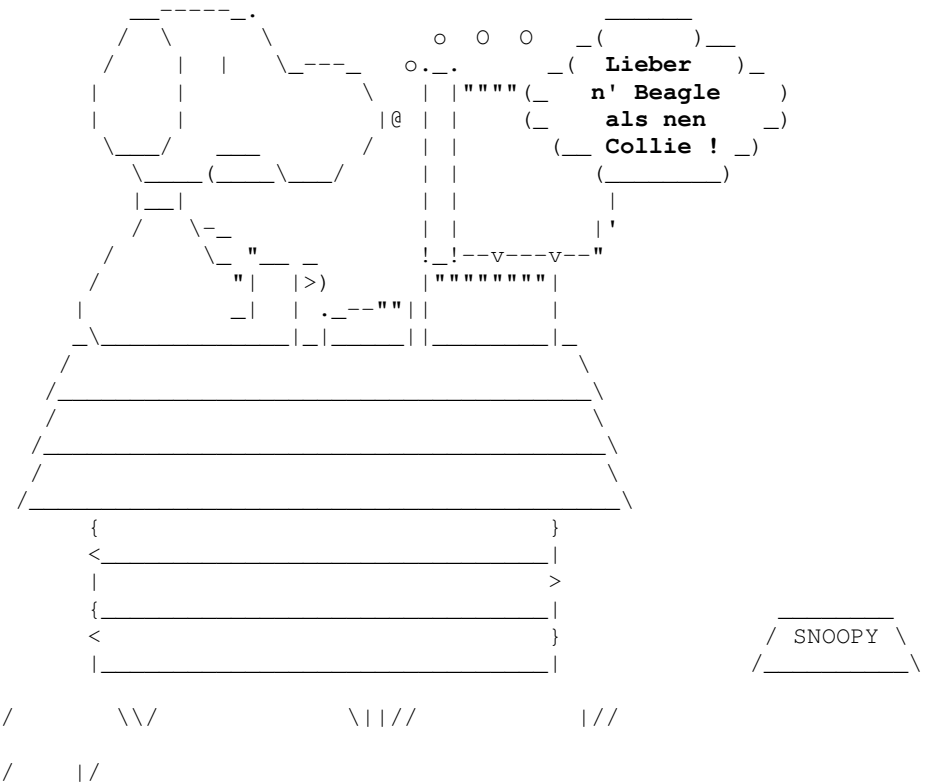
Griechische Buchstaben finden sich unter ihrem Anfangsbuchstaben (z. B. Gamma),

Kleinbuchstaben stets vor Großbuchstaben, griechische zum Schluss!

Konstanten-Nummern K# für Casio FX-Rechner.

**Ohne Gewähr !!!**

Stand: 2007-10-16



Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
A	Fläche		m <sup>2</sup>
		<b>Bipolartransistor:</b> siehe G <sub>u</sub>	
		<b>Feldeffekttransistor:</b>	
		$A = \frac{-S + j\omega \cdot C_{GD}}{\frac{1}{R_D} + \frac{1}{r_{DS}} + j\omega \cdot (C_{DS} + C_{GD})}$ in <b>Source-Schaltung</b>	
		$\omega \rightarrow 0: A = -S \cdot (R_D    r_{DS})$	
A	Spannungsverstärkung	$A = \frac{S + \frac{1}{r_{DS}} + j\omega C_{DS}}{\frac{1}{R_D} + \frac{1}{r_{DS}} + j\omega (C_{DS} + C_{GD})}$ in <b>Gate-Schaltung</b>	1
		$A = \frac{1}{1 + \frac{1}{S \cdot R_S    r_{DS}}} \approx \frac{S \cdot R_S}{1 + S \cdot R_S} \leq 1$ in <b>Drain-Schaltung (Sourcefolger)</b>	
A <sub>E</sub>	Querschnittsfläche des Emitters		m <sup>2</sup>
A <sub>r</sub>	Spannungsrückwirkung	siehe h <sub>12e</sub>	1
α <sub>i</sub>	Stromverstärkungsfaktor in Basisschaltung, Inversbetrieb	α <sub>i</sub> ≪ α <sub>n</sub>	1
α <sub>n</sub>	Stromverstärkungsfaktor in Basisschaltung, Normalbetrieb	α <sub>n</sub> < 1 $\alpha_n = \gamma_N \cdot \frac{I_n(x_B)}{I_n(x_E)}$	1
α <sub>TZ</sub>	Temperaturkoeffizient der Z-Diode	$\alpha_{TZ} = \frac{dU_{Z0}}{dT} \cdot \frac{1}{U_{Z0}} > 0$ mit U <sub>Z0</sub> bei 300 K	K <sup>-1</sup>
B <sub>i</sub>	Großsignal-Stromverstärkung in Emitterschaltung, Inversbetrieb	$B_i = \frac{\alpha_i}{1 - \alpha_i}$	1

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$B_N$	Großsignal-Stromverstärkung in Emitterschaltung, Normalbetrieb	$B_n = \frac{\alpha_n}{1 - \alpha_n}$ $B_n \approx \frac{1}{\frac{D_{pE} \cdot n_{iE}^2 \cdot z_{AB}}{D_{nB} \cdot n_{iB}^2 \cdot z_{DE}} + \frac{\tau_{BL}}{\tau_{nB}}}$	1
$\beta$	Kleinsignal-Stromverstärkung	siehe $h_{21e}$	1
$c$	Lichtgeschwindigkeit	im Vakuum: $c_0 = 299,792458 \cdot 10^6 \frac{m}{s} \approx 300 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$ <b>K# 28</b>	$ms^{-1}$
$C$	Kapazität	$C = \frac{Q}{U}; [C] = 1 \frac{As}{V} = 1 F$	F
$C_d, C_{diff}$	Diffusionskapazität	$C_d = \frac{d \cdot (Q_n + Q_p)}{d \cdot U}$ $C_d = \frac{e^2 \cdot A \cdot n_i^2}{2kT} \cdot \left( \frac{L_p}{N_D} + \frac{L_n}{N_A} \right) \cdot \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \quad \text{mit} \quad \frac{eU}{kT} = \frac{U}{U_T}$ $C_d = \frac{g_0}{2} \cdot \frac{p_{n0} \cdot L_p + n_{p0} \cdot L_n}{p_{n0} \cdot (L_p / \tau_p) + n_{p0} \cdot (L_n / \tau_n)}$ <p>für n<sup>+</sup>p-Übergang: <math>C_d = \frac{g_0}{2} \cdot \tau_n</math> für p<sup>+</sup>n-Übergang: <math>C_d = \frac{g_0}{2} \cdot \tau_p</math></p> <p><b>Achtung:</b> Beim Schottky-Kontakt keine Diffusionskapazität, da keine Minoritätsträger-Injektion vorhanden!</p>	F
$C_{DB}$	Drain-Bulk-Kapazität	$C_{DB} = C_{DB0} \cdot \left( 1 + \frac{U_{DB}}{U_D} \right)^{-1/2}$	F
$C_G$	Gate-Kapazität (gesamt)	$C_G = C_{GS} + C_{GD}$	F

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$C_{GD}$	Gate-Drain-Kapazität	$C_{GD} = \frac{2}{3} \cdot C_{Ox} \cdot \left[ 1 - \frac{(U_{GS} - U_t)^2}{[2 \cdot (U_{GS} - U_t) - U_{DS}]^2} \right]$	F
$C_{GS}$	Gate-Source-Kapazität	$C_{GS} = \frac{2}{3} \cdot C_{Ox} \cdot \frac{(U_{GS} - U_t) \cdot [3 \cdot (U_{GS} - U_t) - 2 \cdot U_{DS}]}{[2 \cdot (U_{GS} - U_t) - U_{DS}]^2}$	F
$C_M$	Kapazität des MOS-Kondensators	$C_M = \frac{C_{Ox} \cdot (C_R + C_Z)}{C_{Ox} + C_R + C_Z}; \quad \text{mit } C_Z \rightarrow 0: C_M \approx \frac{C_{Ox} \cdot C_R}{C_{Ox} + C_R}$ <b>relative MOS-Kapazität:</b> $\frac{C_M}{C_{Ox}} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{Ox}}{d_{Ox}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_S}{e \cdot \epsilon_H \cdot N_A}}}$	F
$C_{Ox}$	Oxidkapazität des MOS-Kondensators	$C_{Ox} = A \cdot \frac{\epsilon_{Ox}}{d_{Ox}}$	F
$C_R$	Kapazität der Raumladungszone im MOS-Kondensator	für den Depletion-Fall: $C_{Rdepl} = A \cdot \sqrt{\frac{e \cdot \epsilon_H \cdot N_A}{2 \cdot V_S}}$	F
$C_{SB}$	Source-Bulk-Kapazität	$C_{SB} = C_{SBO} \cdot \left( 1 + \frac{U_{DB}}{U_D} \right)^{-1/2}$	F
$C_{Sperr}$	Sperrschichtkapazität	$C_S = \frac{\epsilon_H \cdot A}{d_S}$ $C_S = A \cdot \sqrt{\frac{e \cdot \epsilon_H \cdot N_A \cdot N_D}{2 \cdot (N_A + N_D) \cdot (U_D - U)}} = A \cdot \sqrt{\frac{e \cdot \epsilon_H \cdot N}{2 \cdot (U_D - U)}} \quad \text{für } U \leq 0$ $C_S = C_{S0} \cdot \left( 1 - \frac{U}{U_D} \right)^{-\frac{1}{2}}$ <b>mit:</b> $C_{S0} = C_S(U=0)$ : Sperrschichtkapazität im thermodyn. Gleichgewicht	F

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$\bar{C}_{Sperr}$	mittlere Sperrschichtkapazität	$\bar{C}_{Sperr} = \frac{1}{-U_2 + U_{F0}} \cdot \int_{U_{F0}}^{-U_2} C_S(u) \cdot du$ mit $U_2$ : Spannung in Sperrpolung $< 0$	F
$C_{SMH}$	Sperrschichtkapazität des Schottky-Kontakts	$C_{SMH} = \frac{A \cdot \epsilon_H}{x_s} = A \cdot \sqrt{\frac{e \cdot \epsilon_H \cdot N}{2 \cdot (U_{DMH} - U)}}$	F
$C_Z$	Zwischenschichtladungskapazität im MOS-Kondensator		F
$d_i$	Dicke des eigenleitenden Mittelgebietes in Leistungsdioden		m
$d_n$	Dicke des schwach n-dotierten Mittelgebietes in Leistungsdioden		m
$d_s$	Sperrschichtdicke	$d_s = x_n + x_p$ $d_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_H}{e} \cdot (U_D - U) \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$ <p>für einseitig abrupten p+n-Übergang: <math>d_s = \sqrt{\frac{2 \epsilon_H \cdot (U_D - U)}{e \cdot N_D}}</math></p>	m
$d_s$	Breite der Raumladungszone im FET	$d_s(y) = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_H}{e \cdot N_{D,A}} \cdot [U_{SG} + V(y) + U_D]}$ für <b>JFET</b> <b>mit</b> $N_{D,A}$ : Dotierungskonzentration der Epitaxie-Schicht ( $N_D$ für n-Epi) $U_D$ : Diffusionsspannung des Gate-Kanal-pn-Übergangs $V(y) = konst.$ für $I_{Kanal} \rightarrow 0$ $d_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_H \cdot N_A}{e \cdot N \cdot (N + N_A)} \cdot (U_{SB} + U_D)}$ für <b>MOSFET</b> <b>mit</b> $U_D = U_T \cdot \ln \frac{N \cdot N_A}{n_i^2}$ N: Dotierungskonzentration im Kanal, $N_A$ : Substratdotierung	m

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$D_n$	Diffusionskonstante für Elektronen	$D_n = \frac{kT}{e} \cdot \mu_n$ <p><b>Achtung:</b> Gilt nur für nicht entartete Halbleiter!  <math>D_n(\text{Si})=35 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}</math>; <math>D_n(\text{Ge})=101 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}</math>; <math>D_n(\text{GaAs})=221 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}</math>;</p>	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$D_{nB}$	Diffusionskonstante der Elektronen in der Basiszone		$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$D_p$	Diffusionskonstante für Löcher	$D_p = \frac{kT}{e} \cdot \mu_p$ <p><b>Achtung:</b> Gilt nur für nicht entartete Halbleiter!  <math>D_p(\text{Si})=12,5 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}</math>; <math>D_p(\text{Ge})=49 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}</math>; <math>D_p(\text{GaAs})=12 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}</math>;</p>	$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$D_{pE}$	Diffusionskonstante der Löcher in der Emitterzone		$\text{m}^2\text{s}^{-1}$
$D_{TBE}$	Temperaturdrift Basis-Emitter-Spannung	$D_T = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T} \right _{I_c = \text{konst.}} = - \frac{W_g - e \cdot U_{BE}}{e \cdot T_0} \quad \text{typ. } -1 \dots -3 \text{ mV/K}$	$\text{mVK}^{-1}$
$e$	Elementarladung	$e = 1,602176462 \cdot 10^{-19} \text{ C} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	C
$E$	elektrische Feldstärke	$[E] = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$	$\text{Vm}^{-1}$
$E_{\text{krit}}$	kritische Durchbruchfeldstärke		$\text{Vm}^{-1}$
$E_{\text{max}}$	maximale Feldstärke im pn-Übergang	$E_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2e \cdot (U_D - U)}{\epsilon_H \cdot (1/N_A + 1/N_D)}}$ <p>für einseitig abrupten p+n-Übergang: <math>E_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2e}{\epsilon_H} \cdot N_D \cdot (U_D - U)}</math></p>	$\text{Vm}^{-1}$
$\epsilon_H$	Dielektrizitätszahl des Halbleitermaterials	$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ <p><b>mit</b> <math>\epsilon_0</math>: elektrische Feldkonstante <math>= 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}</math> <b>K# 32</b>  <math>\epsilon_r</math>: relative Dielektrizitätszahl  <math>\epsilon_r(\text{Si})=12</math>; <math>\epsilon_r(\text{Ge})=16</math>; <math>\epsilon_r(\text{GaAs})=11</math></p>	$\frac{\text{As}}{\text{Vm}} = \frac{\text{F}}{\text{m}}$

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$g_0$	Kleinsignal-Leitwert	$g_0 = \frac{e}{kT} \cdot (I + I_s) = \frac{1}{r_0}$	$\Omega$
$G$	Glättungsfaktor	$G = \frac{\Delta U_{\text{Eingang}}}{\Delta U_{Z\text{-Diode}}} = 1 + \frac{R}{r_Z} \quad G \approx 10 \dots 100$	1
$G_{\text{Avalanche}}$	Stoßionisations-Generationsrate	$G_{\text{Avalanche}} = n \cdot v_n \cdot \alpha_n + p \cdot v_p \cdot \alpha_p$ <b>mit</b> $\alpha_{p,n}$ : Ionisationskoeffizient für Stromdichten: $G = \frac{1}{e} \cdot (J_n \cdot \alpha_n + J_p \cdot \alpha_p)$	$\frac{1}{m^3 \cdot s}$
$G_i$	Stromübertragungsfaktor	$G_i = \frac{h_{21}}{1 + h_{22} \cdot Z_L}$ $G_i \approx \beta$ für Emitterschaltung $G_i = \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$ für Basisschaltung $G_i = \beta + 1 \approx \beta$ für Kollektorschaltung	1
$G_p$	Leistungsverstärkung	$G_p = G_u \cdot G_i$	1
$G_{\text{Photo}}$	Photo-Generationsrate	<b>Voraussetzung:</b> $W_{\text{photon}} \geq W_g$ $G_{\text{photo}} = \phi \cdot \beta(\lambda) \cdot \exp(-\beta(\lambda) \cdot x)$ <b>mit</b> $\phi_0$ : Photonenflussdichte ( $\sim$ Beleuchtungsstärke) $[\phi_0] = \frac{1}{m^2 \cdot s}$ $\beta(\lambda)$ : Absorptionskoeffizient, abhängig von der Wellenlänge <b>Folgerung:</b> Grenzwellenlänge $\lambda_g = \frac{h \cdot c}{W_g}$	$\frac{1}{m^3 \cdot s}$

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$G_u$	Spannungsübertragungsfaktor	$G_u = A = -\frac{h_{21} \cdot Z_L}{\Delta h \cdot Z_L + h_{11}}$ <p>mit <math>\Delta h = h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}</math></p> $G_u = -S \cdot (R_L    r_{CE}) \approx -S \cdot R_L$ für Emitterschaltung $G_u = S \cdot (R_L    r_{CE})$ für Basisschaltung $G_u \approx \frac{S \cdot R_E}{1 + S \cdot R_E} \leq 1$ für Kollektorschaltung	1
$\gamma_N$	Emitterwirkungsgrad im Normalbetrieb	$\gamma_N = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{1}{1 + \frac{n_{iE}^2 \cdot D_{pE} \cdot z_{AB}}{n_{iB}^2 \cdot D_{nB} \cdot z_{DE}}}$ <p><math>\gamma_N \rightarrow 1</math>  d.h. <math>D_{nB} \cdot z_{DE} \gg D_{pE} \cdot z_{AB}</math>  und <math>D_{nB} \approx 3 \cdot D_{pE}</math>  <math>\Rightarrow z_{DE} \gg z_{AB}</math></p>	1
$h$	Plancksches Wirkungsquantum	$h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ <b>K# 06</b> $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054571596 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ <b>K# 09</b>	Js
$h_{11e}$	differentieller Eingangswiderstand	$h_{11e} = r_{BE}$ $h_{11e} = \frac{u_{BE}}{i_B} \Big _{u_{CE}=0} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} \Big _{U_{CE}=\text{konst.}} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \Big _{U_{CE}=\text{konst.}}$ $h_{11e} = r_e + r_{BB'}$ mit $r_e$ : Eingangswiderstand eines idealen pn-Übergangs	$\Omega$



Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$h_{12e}$	Spannungsrückwirkung	$h_{12e} = A_r$ <p>Hervorgerufen durch Miller-Effekt</p> $A_r \ll 1 \quad ; \quad \text{typisch } 10^{-2} \text{ bei } A_v = 200$ $h_{12e} = \left. \frac{u_{BE}}{u_{CE}} \right _{i_b=0} = \left. \frac{dU_{BE}}{dU_{CE}} \right _{I_B = \text{konst.}} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \right _{I_B = \text{konst.}}$	1
$h_{21e}$	Kleinsignal-Stromverstärkung	$h_{21e} = \beta$ $h_{21e} = \left. \frac{i_C}{i_B} \right _{u_{CE}=0} = \left. \frac{dI_C}{dI_B} \right _{U_{CE} = \text{konst.}} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right _{U_{CE} = \text{konst.}}$ <p><b>Für Hochfrequenz:</b> <math>\beta</math> wird komplex</p> $h_{21e} = \frac{\beta_n}{1 + j \cdot (\omega / \omega_\beta)}$ $\omega_\beta = \frac{1}{r_e \cdot C_e}$ <p><b>mit</b> <math>\beta_n = h_{21e}(\omega \rightarrow 0)</math></p> <p><math>r_e</math> : dif. Widerstand der Basis-Emitter-Diode ohne <math>r_{BB}</math>,</p> $ h_{21e}(\omega_n)  = \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} \quad \text{-3dB - Grenzfrequenz}$	1
$h_{22e}$	differentieller Ausgangsleitwert	$h_{22e} = \frac{1}{r_{CE}}$ <p>Bestimmt durch Early-Effekt</p> $h_{22e} = \left. \frac{i_C}{u_{CE}} \right _{i_b=0} = \left. \frac{dI_C}{dU_{CE}} \right _{I_B = \text{konst.}} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right _{I_B = \text{konst.}}$	S
<b>I</b>	Strom		A

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$i_c$	differentieller Kollektorstrom	$i_c = h_{21e} \cdot i_B + h_{22e} \cdot u_{CE}$	A
$I_B$	Basisstrom	$I_B = I_E - I_C$	A
		$I_B = I_{ES} \cdot (1 - \alpha_n) \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T} - 1\right) - 1 \right] - I_{CS} \cdot (1 - \alpha_n) \approx \frac{I_{ES}}{B_n} \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T} - 1\right) - 1 \right]$	
$I_C$	Kollektorstrom	$I_C = I_E - I_B$	A
		$I_C = \frac{1}{1 + I_p/I_n} \cdot \left(1 - \frac{I_{nr}}{I_n}\right) \cdot I_E = \alpha_N \cdot I_E$	
		$I_C = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N} \cdot I_B = B_N \cdot I_B$	
		$I_C = \alpha_n \cdot I_{ES} \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T} - 1\right) - 1 \right] - I_{CS} \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T} - 1\right) - 1 \right]$ in <b>Basisschaltung</b>	
		$I_C = \alpha_N \cdot I_E - I_{CS} \cdot (1 - \alpha_n \cdot \alpha_i) \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T} - 1\right) - 1 \right]$ in <b>Basisschaltung</b>	
		$I_C = \frac{B_n \cdot I_B \cdot \left[1 - \frac{1}{\alpha_i} \cdot \exp\left(-\frac{U_{CE}}{U_T}\right)\right] + I_{CEO} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{U_{CE}}{U_T}\right)\right]}{1 + \frac{B_n}{B_i} \cdot \exp\left(-\frac{U_{CE}}{U_T}\right)}$ in <b>Emitterschaltung</b>	
		$I_C = B_n \cdot I_B + I_{CEO}$ in <b>Emitterschaltung</b> , Vereinfachung für aktiven Bereich, $U_{CE} > U_T$	
		$I_C = (B_n \cdot I_B + I_{CE}) \cdot \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_y}\right)$ in <b>Emitterschaltung</b> , wie oben, <b>mit Korrektur des Earlyeffekts</b>	
		$I_C \approx I_{CS}' \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$ in <b>Emitterschaltung</b> , für $U_{BE} \gg U_T$ , $I_{CS}'$ : korrigierter $I_{CS}$ -Wert	

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$I_C(T)$	Kollektorstrom mit Temperaturdrift	$I_C(T) = \alpha_n(T) \cdot I_E(T) + I_{CB0}(T)$	A
		$I_{CB0}(T) = I_{CB0}(T_0) \cdot \exp\left[\frac{W_g \cdot (T - T_0)}{m \cdot k \cdot T_0^2}\right]$	
		mit $I_E(T) = I_E(T_0) \cdot \exp\left[\frac{(W_g - e \cdot U_{BE}) \cdot (T - T_0)}{k \cdot T_0^2}\right]$ bei $T_0 = 300 \text{ K}$	
		$B_n(T) = B_n(T_0) \cdot \exp\left[\frac{6 \cdot (T - T_0)}{10^3 \text{ K}}\right]$	
$I_{CB0}$	Kollektor-Basis-Reststrom bei offenem Emitter		A
$I_{CD}$	Kollektorstrom in Durchlassrichtung	$I_{CD} = I_{CS} \cdot \left[ \exp\left(\frac{e \cdot U_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$ in <b>Basisschaltung</b> , inverser Betriebsfall	A
$I_{CE0}$	Kollektor-Emitter-Reststrom bei offener Basis	$I_{CE0} = \frac{I_{CB0}}{1 - \alpha_n}$	A
$I_{CS}$	Kollektorn-Sperrsättigungsstrom	$I_{CS} = \alpha_N \cdot I_{ES}$	A
$I_{CT}$	Kollektor-Transferstrom	$I_{CT} = \alpha_N \cdot I_{ED}$ in <b>Basisschaltung</b> , aktiv-normaler Betriebsfall	A

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$I_D$	Drainstrom	$I_D = K \cdot \left[ 2 \cdot U_{DS} \cdot (U_{GS} - U_m) - U_{DS}^2 \right]$ für <b>n-Kanal-Enhancement-MOSFET</b> im <b>Anlaufbereich</b>	A
		$I_D = K \cdot (U_{GS} - U_m)^2$ für <b>n-Kanal-Enhancement-MOSFET</b> im <b>Abschnürbereich</b> $[U_{DS} < U_K]$	
		<b>n-Kanal-Depletion-MOSFET:</b> obige Formeln mit $U_m = U_{ID} < 0$	
		$I_D = K \cdot \left[ 2 \cdot U_{SD} \cdot (U_{SG} - U_p) - U_{SD}^2 \right]$ für <b>p-Kanal-MOSFET</b> im <b>Anlaufbereich</b>	
		$I_D = K \cdot (U_{SG} - U_p)^2$ für <b>p-Kanal-MOSFET</b> im <b>Abschnürbereich</b>	
		<b>jeweils mit</b> $K = \frac{\mu_n \cdot \epsilon_{ox} \cdot b}{2 \cdot d_{ox} \cdot l}$	
		$I_D = I_{DS} \cdot \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_t} \right)^2$ <b>Abschnürbereich</b> , vereinfachte Form, auch für <b>JFET</b> mit $U_t = U_p$	
		mit $I_{DS} = I_D(U_{GS} = 2 \cdot U_m)$ für <b>Enhancement-MOSFET</b> $I_{DS} = I_D(U_{GS} = 0)$ für <b>Depletion-MOSFET</b>	
		$I_D = \frac{I_{DS}}{U_p^2} \cdot \left[ 2 \cdot (U_{GS} - U_p) \cdot U_{DS} - U_{DS}^2 \right]$ für <b>JFET</b> im <b>Anlaufbereich</b>	
$I_E$	Emitterstrom	$I_E = I_C + I_B$ $I_E = I_{ES} \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) - 1 \right] - \alpha_i \cdot I_{CS} \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) - 1 \right]$ in <b>Basisschaltung</b>	A
$I_{ED}$	Emitterstrom in Durchlassrichtung	$I_{ED} = I_{En} + I_{Ep} = I_{ES} \cdot \left[ \exp\left(\frac{e \cdot U_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$ in <b>Basisschaltung</b> , aktiv-normaler Betriebsfall	A

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$I_{En}$	Emitter-Elektronen-Strom	$I_{En} = I_n(x_E) = e \cdot A_E \cdot D_{nB} \cdot \frac{n_{iB}^2}{z_{AB}} \cdot \left[ \exp\left(\frac{e \cdot U_{BE}}{kT} - 1\right) \right]$ <p>unter Vernachlässigung der Ausdehnung der Basis-Emitter-Raumladungszone</p>	A
$I_{Ep}$	Emitter-Löcher-Strom	$I_{Ep} = I_p(x_E) = e \cdot A_E \cdot D_{pE} \cdot \frac{n_{iE}^2}{z_{DE}} \cdot \left[ \exp\left(\frac{e \cdot U_{BE}}{kT} - 1\right) \right]$ <p>unter Vernachlässigung der Ausdehnung der Basis-Emitter-Raumladungszone</p>	A
$I_{ES}$	Emitter-Sperrsättigungsstrom	$I_{ES} = e \cdot A_E \cdot \left( \frac{n_{iB}^2}{z_{AB}} \cdot D_{nB} + \frac{n_{iE}^2}{z_{DE}} \cdot D_{pE} \right)$	A
$I_{ET}$	Emitter-Transferstrom	$I_{ET} = \alpha_i \cdot I_{CD}$ in <b>Basisschaltung</b> , inverser Betriebsfall	A
$I_F$	Flussstrom	<b>für pn-Übergang:</b> siehe $I_{pn}$	A
$I_{F0}$	„Knickstrom“ des pn-Übergangs	$I_{F0} = 1 \dots 10 \mu A$	A
$I_{MH}$	Strom durch den Schottky-Kontakt	$I_{MH} = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$ <p><b>mit</b> Sperrsättigungsstrom <math>I_S = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-e \cdot V_{Bn}}{kT}\right)</math></p> <p><b>und</b> Geometriedaten <math>I_0 = e \cdot A \cdot \frac{4 \pi \cdot m_n^*}{h^3} \cdot (kT)^2</math></p> <p><b>Erkenntnis:</b> Schottky-Kontakt und pn-Übergang zeigen gleiches exponentielles Verhalten</p>	A
$I_n$	Elektronenstrom	für abrupten pn-Übergang mit beliebig langen Bahngebieten	
		$I_n = e \cdot A \cdot D_n \cdot \frac{n_i^2}{L_n \cdot N_A} \cdot \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$	A
$I_{nr}$	Elektronen-Rekombinationsstrom	in der Basis $I_{nr} = \frac{Q_{Ba}}{\tau_{nB}}$	A

<b>Größe</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Formel</b>	<b>Einheit</b>
$I_p$	Löcherstrom	für abrupten pn-Übergang mit beliebig langen Bahngebieten $I_p = e \cdot A \cdot D_p \cdot \frac{n_i^2}{L_p \cdot N_D} \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$	A
$I_{pn}$	Strom durch den pn-Übergang <b>Diodengleichung</b>	$I_{pn} = I_n + I_p$ $I_{pn} = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{eU}{m \cdot kT}\right) - 1 \right]$	A
$I_R$	Rückwärtsstrom Sperrstrom	für pn-Übergänge mit hoher Eigenleitungsichte (z.B. Ge): U negativ in Diodengleichung einsetzen für kleines $n_i$ : $I_R = -I_{RG}$  <b>Temperaturverhalten:</b> $I_R(T) = I_R(T_0) \cdot \exp\left(\frac{W_g \cdot (T - T_0)}{m^2 \cdot k \cdot T_0^2}\right)$ <b>mit</b> m': Korrekturfaktor (1..2), 1 für Ge, 2 für Si und GaAs; $ T - T_0  \ll T_0$	A
$I_{RG}$	Rekombinations-Generations-Strom	$I_{rg} = -e \cdot A \cdot \frac{n_i}{\tau_S} \cdot d_S \quad \text{für } U > U_{Br}$ $\tau_S = \frac{\tau_n \cdot p_1 + \tau_p \cdot n_1}{n_i}$ <b>mit</b> $p_1 = N_V \cdot \exp\left(\frac{W_V - W_A}{kT}\right)$ $n_1 = N_C \cdot \exp\left(\frac{W_D - W_C}{kT}\right)$	A

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$I_S$	Sperrsättigungsstrom	$I_S = e \cdot A \cdot n_i^2 \cdot \left( \frac{D_p}{N_D \cdot L_p} + \frac{D_n}{N_A \cdot L_n} \right)$ $I_S = e \cdot A \left( p_{n0} \cdot \frac{L_p}{\tau_p} + n_{p0} \cdot \frac{L_n}{\tau_n} \right)$ <p>für einseitig abrupten p+n-Übergang: <math>I_S = e \cdot A \cdot p_{n0} \cdot \frac{L_p}{\tau_p}</math></p> <p><b>Achtung:</b> Für Leistungsdioden <math>I_S = I_{SR}</math> !</p>	A
$I_{SR}$	Sperrsättigungsstrom bei Leistungsdioden	$I_{SR} = e \cdot A \cdot \frac{n_i}{\tau_i} \cdot d_n$	A
$J$	Driftstromdichte	$\vec{J} = e \cdot (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) \cdot \vec{E} = \kappa \cdot \vec{E}$ <p><b>Achtung:</b> Gilt für undotierte und dotierte Halbleiter</p>	Am <sup>-2</sup>
$J_e$	thermische Emissionsstromdichte über eine Potentialbarriere $V_B$	$J_e = e \cdot \frac{n \cdot v_{th}}{4} \cdot \exp\left(\frac{-e \cdot V_B}{kT}\right) = R^* \cdot T^2 \cdot \exp\left(\frac{-e \cdot V_B}{kT}\right)$ <p>Beim Vakuum-Halbleiter-Übergang gilt: <math>e \cdot V_B = W_{EA}</math></p>	Am <sup>-2</sup>
$J_n$	Elektronenstromdichte	$\vec{J}_n = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + e \cdot D_n \cdot \text{grad}(n)$	Am <sup>-2</sup>
$J_p$	Löcherstromdichte	$\vec{J}_p = e \cdot n \cdot \mu_p \cdot \vec{E} + e \cdot D_p \cdot \text{grad}(p)$	Am <sup>-2</sup>
$J_T$	Tunnelstromdichte	<p>Für dreiecksförmige Energiebarriere (Näherung) der Höhe <math>V_B</math> und der Breite <math>d</math></p> $J_T = e \cdot \frac{n \cdot v_{th}}{4} \cdot \exp\left(-\frac{8\pi \cdot d}{3h} \cdot \sqrt{2e \cdot m_n^* \cdot V_B}\right)$	Am <sup>-2</sup>
$k$	Boltzmann-Konstante	$k = 1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ <b>K# 25</b>	JK <sup>-1</sup>
$k_{\ddot{u}}$	Übersteuerungsfaktor	$k = \frac{B_N \cdot I_{Baus}}{I_{Cein}}$ <p><b>mit</b> <math>I_{Baus} &lt; 0</math></p>	1

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$\kappa$	spezifische Halbleiter-Leitfähigkeit	$\kappa = \frac{1}{\rho}$ $\kappa = e \cdot (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) = e \cdot \left( \frac{\mu_n \cdot n_i^2}{N_A} + \mu_p \cdot N_A \right)$	$\frac{1}{\Omega \cdot m}$
$L_n$	Diffusionslänge der Elektronen im p-Material	$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$	m
$L_p$	Diffusionslänge der Löcher im n-Material	$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$	m
$\bar{\lambda}$	mittlere freie Weglänge		m
$m$	Dioden-Korrekturfaktor	1...2, 1 für Standard-Dioden (schwache Injektion), 2 für Leistungsdioden (starke Injektion)	1
$m$	Übersteuerungsfaktor	$m = \frac{B_N \cdot I_{B\text{ein}}}{I_{C\text{ein}}} > 1$ mit $I_{B\text{ein}} > 0$	1
$m_0$	Ruhemasse des Elektrons	$m_0 = 9,10938188 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ <b>K# 03</b>	kg
$m_n^*$	effektive Masse des Elektrons		kg
$m_p^*$	effektive Masse des Defektelektrons		kg
$\mu$	Ladungsträgerbeweglichkeit		$\frac{m^2}{Vs}$
$\mu_n$	Elektronenbeweglichkeit	$\mu_n \approx 3 \cdot \mu_p$ $\mu_n(\text{Si}) = 1350 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ; $\mu_n(\text{Ge}) = 3900 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ; $\mu_n(\text{GaAs}) = 8500 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ;	$\frac{m^2}{Vs}$
$\mu_p$	Löcherbeweglichkeit	$\mu_p \approx \frac{\mu_n}{3}$ $\mu_p(\text{Si}) = 480 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ; $\mu_p(\text{Ge}) = 1900 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ; $\mu_p(\text{GaAs}) = 450 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ;	$\frac{m^2}{Vs}$



Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
<b>n</b>	Elektronendichte	für $n < N_C$ und $p < N_V$ : $n = N_C \cdot \exp\left(-\frac{W_C - W_F}{kT}\right)$ $p = n_i \cdot \exp\left(\frac{-e \cdot V_F}{kT}\right)$	$\text{m}^{-3}$
<b>n<sub>0</sub></b>	Elektronendichte im thermodynamischen Gleichgewicht	für n-Halbleiter ( $N_D \gg N_A$ ): $n_0 = N_D - N_A \approx N_D$ für p-Halbleiter ( $N_A \gg N_D$ ): $n_0 = \frac{n_i^2}{N_A - N_D} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$	$\text{m}^{-3}$
<b>n<sub>i</sub></b>	Eigenleitungsdichte Intrinsicdichte	$n_i = \sqrt{n \cdot p}$ für schwache Injektion $n \cdot p > n_i^2$ für starke Injektion <b>Gilt auch für den dotierten Halbleiter.</b> <b>Folge:</b> Bei Erhöhung der Dichte des einen Ladungsträgers muss sich zwangsläufig die Dichte des anderen Ladungsträgers verringern ( <b>thermodynamisches Gleichgewicht</b> )! Gilt nicht im Mittelgebiet von Leistungsdioden (dort starke Injektion)!	$\text{m}^{-3}$
		$n_i = \sqrt{N_C \cdot N_V \cdot \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right)}$ $n_i \sim T^3$ $n_i(\text{Si}) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}; n_i(\text{Ge}) = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}; n_i(\text{Si}) = 1,8 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$	
<b>n<sub>iB</sub></b>	Intrinsicdichte in der Basiszone		$\text{m}^{-3}$
<b>n<sub>iE</sub></b>	Intrinsicdichte in der Emitterzone		$\text{m}^{-3}$
<b>N</b>	Dotierungskonzentration des HL	$N = \frac{N_A \cdot N_D}{N_A + N_D}$	$\text{m}^{-3}$
<b>N<sub>A</sub></b>	Akzeptorendichte		$\text{m}^{-3}$
<b>N<sub>A</sub><sup>-</sup></b>	Dichte der ionisierten Akzeptoren		$\text{m}^{-3}$

<b>Größe</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Formel</b>	<b>Einheit</b>
<b>N<sub>c</sub></b>	effektive oder äquivalente Zustandsdichte im Leitungsband	$N_C = 2 \cdot \left( \frac{2\pi \cdot m_n^* \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$	m <sup>-3</sup>
<b>N<sub>D</sub></b>	Donatorendichte		m <sup>-3</sup>
<b>N<sub>D</sub><sup>+</sup></b>	Dichte der ionisierten Donatoren		m <sup>-3</sup>
<b>N<sub>n</sub>(W)</b>	Energiezustandsdichte im Leitungsband	$N_n(W) = \frac{N_C}{\sqrt{\pi \cdot kT}} \cdot \sqrt{\frac{W - W_C}{kT}}$	$\frac{1}{eV \cdot m^2}$
<b>N<sub>p</sub>(W)</b>	Energiezustandsdichte im Valenzband	$N_p(W) = \frac{N_V}{\sqrt{\pi \cdot kT}} \cdot \sqrt{\frac{W_V - W}{kT}}$	$\frac{1}{eV \cdot m^2}$
<b>N<sub>ss</sub></b>	Dichte der Zwischenschicht-Energiezustände		$\frac{1}{eV \cdot m^2}$
<b>N<sub>v</sub></b>	effektive oder äquivalente Zustandsdichte im Valenzband	$N_V = 2 \cdot \left( \frac{2\pi \cdot m_p^* \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$	m <sup>-3</sup>
<b>p</b>	Löcherdichte	für $n < N_C$ und $p < N_V$ : $p = N_V \cdot \exp\left(-\frac{W_F - W_V}{kT}\right)$ $p = n_i \cdot \exp\left(\frac{e \cdot V_F}{kT}\right)$	m <sup>-3</sup>
<b>p<sub>0</sub></b>	Löcherdichte im thermodynamischen Gleichgewicht	für p-Halbleiter ( $N_A \gg N_D$ ): $p_0 = N_A - N_D \approx N_A$ für n-Halbleiter ( $N_D \gg N_A$ ): $n_0 = \frac{n_i^2}{N_D - N_A} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$	m <sup>-3</sup>
<b>P<sub>tot</sub></b>	maximale thermische Verlustleistung		W

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$P_V$	Verlustleistung	$P_V = I_C \cdot U_{CE}$ für Bipolartransistor $P_V = I_D \cdot U_{DS}$ für Feldeffekttransistor $P_V \overset{!}{\leq} P_{tot}$	W
$Q$	Ladung	$Q = \int I \cdot dt; [Q] = 1 \text{ As} = 1 \text{ C}$	C
$Q_B$	Bulkladung		C
$Q_{Ba}$	Basisladung	$Q_{Ba} = \tau_{BL} \cdot I_n(x_B)$	C
$Q_G$	Gateladung		C
$Q_n$	Elektronenladung	$Q_n \approx \frac{e \cdot A \cdot L_n \cdot n_i^2}{2 \cdot N_A} \cdot \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$	C
$Q_p$	Löcherladung	$Q_p \approx \frac{e \cdot A \cdot L_p \cdot n_i^2}{2 \cdot N_D} \cdot \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$	C
		$Q_{ges} \approx \frac{e \cdot A \cdot n_i^2}{2} \cdot \left(\frac{L_p}{N_D} + \frac{L_n}{N_A}\right) \cdot \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$	
$Q_s$	Speicherladung		C
$Q_z$	Zwischenschichtladung im MOS-Kondensator		C
$R$	Widerstand	<b>für lineare Bauelemente:</b> $R = \frac{U}{I}$  $R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{A}$	$\Omega$
$R_{DS\ on}$	Drain-Source-Widerstand des eingeschalteten Power-MOSFET	$R_{DS\ on} = \left[ \frac{1}{2} \cdot (R_{KE} + R_{KD}) + R_n \right] / z + R_{n+}$ <b>mit z:</b> Anzahl der parallelgeschalteten Einzel-MOSFETs Widerstände siehe Foliensatz S. 33	$\Omega$

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$r_o$	differentieller Kleinsignal-Widerstand	$r = \frac{dU}{dI}$ $r_o = \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{I}$ <p><b>Achtung:</b> Bei allen Bauelementen mit nicht-linearer Kennlinie existiert kein absoluter Widerstand, sondern ein differentieller Widerstand, der Arbeitspunkt-abhängig ist!</p>	$\Omega$
$r_a$	Ausgangswiderstand des Sourcefolgers	$r_a = \frac{1}{S} \parallel R_S$	$\Omega$
$r_{BB'}$	Basis-Bahnwiderstand		$\Omega$
$r_{BE}$	differentieller Basis-Emitter-Widerstand (Eingangswiderstand des Transistors)	<b>Näherung:</b> $r_{BE} = \frac{\beta \cdot U_T}{I_C}$ <b>Achtung:</b> 20-30% Fehler	$\Omega$
$r_{CE}$	differentieller Kollektor-Emitter-Widerstand (Ausgangswiderstand des Transistors)	siehe $h_{22e}$ <b>Näherung:</b> $r_{CE} = \frac{U_Y}{I_C}$ <b>Achtung:</b> 20-30% Fehler	$\Omega$
$\frac{1}{r_{DS}}$	differentieller Drainleitwert	$\frac{1}{r_{DS}} = K \cdot K_4 \cdot (U_{GS} - U_t)$ für den <b>Abschnürbereich</b> $\frac{1}{r_{DS}} = K \cdot [(2 + K_4) \cdot (U_{GS} - U_t) - 2 \cdot U_{DS}]$ für den <b>Anlaufbereich</b> <b>mit jeweils <math>K_4</math>: Modellkonstante (20...30%)</b>	$\Omega$
$r_e$	Eingangswiderstand der FET-Schaltung	$r_e = \frac{1}{j\omega [C_{GS} + C_{GD} \cdot (1 +  A )]}$ in <b>Source-Schaltung</b> $\omega \rightarrow 0 \Rightarrow r_e = r_{GS} \rightarrow \infty$ $r_e \approx \frac{1}{S}$ in <b>Gate-Schaltung</b> $r_e = \frac{1}{j\omega C_{GD}}$ in <b>Drain-Schaltung (Sourcefolger)</b> $\omega \rightarrow 0 \Rightarrow r_e = r_{GS} \rightarrow \infty$	$\Omega$

<b>Größe</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Formel</b>	<b>Einheit</b>
<b>R*</b>	modifizierte Richardson-Konstante	$R^* = 4 \pi \cdot m_n^* \cdot e \cdot k^2 \cdot h^{-3}$	$\frac{A}{cm^2 \cdot K^2}$
<b>R<sub>D</sub></b>	direkte Rekombinationsrate	$R_D = K_D \cdot (n \cdot p - n_i^2)$	$\frac{1}{m^3 \cdot s}$
<b>R<sub>i</sub></b>	indirekte Rekombinationsrate	$R_i = K_i \cdot (n \cdot p - n_i^2)$	$\frac{1}{m^3 \cdot s}$
<b>R<sub>H</sub></b>	Hallkonstante	Bei gleichzeitiger Beteiligung von Elektronen und Löchern in vergleichbarer Konzentration $R_H \approx \frac{1}{e} \cdot \frac{p \cdot \mu_p^2 - n \cdot \mu_n^2}{(p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)^2}$	m <sup>3</sup> C <sup>-1</sup>
<b>R<sub>th</sub></b>	Wärmewiderstand	$R_{th} = \frac{\Delta \vartheta}{P_V}$	KW <sup>-1</sup>
<b>ρ</b>	spezifischer Halbleiter-Widerstand	$\rho = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{e \cdot (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p)}$	Ω m
<b>S</b>	Steilheit des Bipolartransistors	siehe y <sub>21e</sub> <b>Näherung:</b> $S = \frac{I_C}{U_T}$ <b>Achtung:</b> 20-30% Fehler	1
<b>S</b>	Steilheit des Feldeffekttransistors	$S = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right _{U_{GS} = konst.}$ $S = 2 K \cdot (U_{GS} - U_t)$ für <b>MOSFET im Abschnürbereich</b> $S = 2 K \cdot U_{DS}$ für <b>MOSFET im Anlaufbereich</b> <b>mit K siehe I<sub>D</sub></b> $S = \frac{2}{ U_p } \cdot \sqrt{I_{DS} \cdot I_D}$ für <b>JFET im Abschnürbereich</b> <b>mit I<sub>DS</sub> siehe I<sub>D</sub></b>	1

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$S_r$	Rückwärtssteilheit des Bipolartransistors	siehe $y_{12e}$	1
$t_f$	Abfallzeit Fall Time	für Dioden: $t_f = \bar{C}_{Sperr} \cdot R \cdot \ln 10$  für Schalter mit Bipolartransistor: $t_f = \tau_a \cdot \ln \left( \frac{k_{\bar{U}} + 0,9}{k_{\bar{U}} + 0,1} \right)$	s
$t_r$	Anstiegszeit Rise Time	für Schalter mit Bipolartransistor: $t_r = \tau_a \cdot \ln \left( \frac{m-0,1}{m-0,9} \right)$	s
$t_s$	Speicherzeit Storage Time	für Dioden: $t_s = \tau_V \cdot \ln \left( 1 + \frac{I_F}{I_R} \right)$ mit $I_R$ : maximaler Rückwärtsstrom, bestimmt durch die Sperrspannung am äußeren Widerstand $\frac{1}{\tau_V} = \frac{1}{\tau_M} + \frac{1}{\tau_L}$ $\tau_M$ : Minoritätsträgerlebensdauer, $\tau_L$ : Laufzeit der Ladungsträger  für Schalter mit Bipolartransistor: $t_s = \tau_{BS} \cdot \ln \left( \frac{m + k_{\bar{U}}}{1 + k_{\bar{U}}} \right) + \tau_a \cdot \ln \left( \frac{k_{\bar{U}} + 1}{k_{\bar{U}} + 0,9} \right)$ mit $\tau_a$ : siehe Rise-/Falltime	s
$T$	absolute Temperatur	$T = \left( 273 + \frac{\vartheta}{C} \right) K$	K
$\bar{\tau}$	mittlere freie Flugzeit	$\bar{\tau} = \frac{\bar{\lambda}}{v_{th}}$	s
$\tau_{BL}$	Ladungsträger-Laufzeit durch die Basis	$\tau_{BL} = \frac{(x_B - x_E)^2}{2 \cdot D_{nB}}$ für die homogen dotierte Basis	s

$$\tau_a = \tau_{nB} + B_N \cdot \bar{C}_{SC} \cdot R_L$$

mit 
$$\bar{C}_{SC} = \frac{1}{U_b - U_{CEsat}}$$

$$\int_{U_{CEsat} - U_{F0}}^{U_b - U_{F0}} C_{SC0} \cdot \left( 1 + \frac{U}{U_D} \right)^{-1/2} \cdot dU$$

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$\tau_{BS}$	Ladungsspeicherkonstante in der Basis	$\tau_{BS} = \frac{Q_{SS}}{I_{BS}}$ mit $I_{BS} = I_B - \frac{I_{C\text{ein}}}{\beta_N}$ ; $Q_{SS}$ : Stationäre Basis-Speicherladung	s
$\tau_i$	Ladungsträger-Lebensdauer im undotierten Mittelgebiet einer Leistungsdiode		s
$\tau_n$	Lebensdauer der Elektronen im p-Gebiet		s
$\tau_p$	Lebensdauer der Löcher im n-Gebiet		s
$\vartheta_A$	Gehäusetemperatur		°C
$\vartheta_j$	Sperrschichttemperatur	$\vartheta_{j\text{max}}(\text{Si}) = 150 \dots 200 \text{ °C}$ $\vartheta_{j\text{max}}(\text{Ge}) = 90 \dots 100 \text{ °C}$ $\vartheta_{j\text{max}}(\text{GaAs}) \sim 450 \text{ °C}$	°C
$U$	Spannung	$[U] = 1 \frac{J}{C} = 1 V$	V
$u_{BE}$	differentielle Basis-Emitter-Spannung	$u_{BE} = h_{11e} \cdot i_B + h_{12e} \cdot u_{CE}$	V
$U_{Br}$	Durchbruchspannung	für <b>Kleinsignaldioden</b> : $U_{Br} = \frac{\epsilon_H}{2 \cdot e} \cdot \left( \frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right) \cdot E_{krit}^2$ <b>für <math>U_{Br} \gg U</math></b> für <b>Leistungsdioden</b> : $U_{Br} = E_{krit} \cdot d_n - \frac{e \cdot N \cdot d_n^2}{2 \cdot \epsilon_H}$ <b>mit N</b> : Dotierungskonzentration des Mittelgebietes für <b>Power-MOSFETs</b> : $U_{Br} = \frac{E_{krit}^2 \cdot \epsilon_H}{2 \cdot e \cdot N_D}$ <b>mit <math>N_D</math></b> : Donatordichte des n-Gebiets	V
$U_{BE}$	Basis-Emitter-Spannung		V
$U_{CB}$	Kollektor-Basis-Spannung		V
$U_{CE}$	Kollektor-Emitter-Spannung		V

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$U_{CE\ sat}$	Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung	$U_{CE\ sat} = r_{CC}' \cdot I_{C\ ein} + U_T \cdot \ln \frac{B_N / B_I + m / \alpha_I}{m - 1}$ <p>mit <math>r_{CC}'</math>: Kollektor-Bahnwiderstand</p>	V
$U_D$	Diffusionsspannung	$U_D = \frac{kT}{e} \cdot \ln \left( \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) = \frac{kT}{e} \cdot \ln \left( \frac{N_A \cdot N_D}{N_C \cdot N_V \cdot \exp(-W_g / kT)} \right)$ $U_D = U_T \cdot \ln \left( \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right)$ $U_D = \frac{E_{max}}{2} \cdot (x_n + x_p)$	V
$U_{DMH}$	Diffusionsspannung Metall-Halbleiter-Kontakt	$U_{DMH} = V_{Bn} - \frac{1}{e} \cdot (W_C - W_F) = V_{Bn} - \frac{kT}{e} \cdot \ln \left( \frac{N_C}{N} \right)$	V
$U_F$	Flussspannung Spannungsabfall am pn-Übergang	$U = \frac{mkT}{e} \cdot \ln \left( \frac{I}{I_S} + 1 \right)$ <p>mit <math>m</math>: Korrekturfaktor (1...2), 1 für Standard-Dioden (schwache Injektion), 2 für Leistungsdioden (starke Injektion)</p>	V
$U_{F0}$	„Knickspannung“ des pn-Übergangs	$U_{F0} = U_F (1 \dots 10 \mu A)$	V
$U_{FB}$	Flachbandspannung	$U_{FB} = - \left( U_K + \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} \cdot Q_{Z0}'' \right)$ <p>mit <math>Q_Z</math>: Ladung der Zwischenschichtzustände</p>	V
$U_{GS}$	Gate-Source-Spannung		V



Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$U_H$	Hallspannung	<p>für Elektronen: <math>U_{Hn} = E \cdot b = \frac{1}{-e \cdot n} \cdot \frac{I_0 \cdot B}{d} = R_{Hn} \cdot \frac{I_0 \cdot B}{d}</math></p> <p>für Löcher: <math>U_{Hp} = E \cdot b = \frac{1}{-e \cdot p} \cdot \frac{I_0 \cdot B}{d} = R_{Hp} \cdot \frac{I_0 \cdot B}{d}</math></p> <p>bei Eigenleitung: <math>U_H = \frac{I_0 \cdot B}{e \cdot n_i \cdot d}</math></p> <p><math>b</math>: Breite des Halbleiterplättchens  <math>d</math>: Dicke des Halbleiterplättchens</p> <p>mit <math>R_{H p, n}</math>: Hallkonstante für Elektronen / Löcher</p> $R_{Hn} = \frac{1}{-e \cdot n} \quad R_{Hp} = \frac{1}{+e \cdot p}$	V
$U_K$	Kniespannung	$U_K \approx U_{GS} - U_m$	V
$U_{Me}$	Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Metall		eV
$U_p$	Pinch-Off-Spannung des JFET	$U_p = \frac{e \cdot d_K^2 \cdot N_D}{2 \cdot \epsilon_H} - U_D$ <p>mit <math>U_D</math>: Diffusionsspannung des Gate-Kanal-pn-Übergangs</p>	V
$U_T$	Temperaturspannung	$U_T = \frac{kT}{e} \approx 25,85 \text{ mV} \big _{300K}$	V
$U_t$	Thresholdspannung, Einsatzspannung, Schwellenspannung (allgemein)		V
$U_{ID}$	Thresholdspannung des Depletion-MOSFET	$U_{ID} = - \left( \frac{e \cdot N \cdot x_S^2}{2 \cdot \epsilon_H} - U_{FB} + \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} \cdot e \cdot N \cdot x_S \right) < 0$ <p>mit <math>x_S</math>: Geometriedatum [s. A. Foliensatz S. 31 Mitte]</p>	V

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$U_{tn}$	Thresholdspannung des n-Kanal-Enhancement-MOSFET	$U_{tn} = 2 \cdot V_F + U_{FB} + \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} \sqrt{2 \cdot e \cdot N_A \cdot \epsilon_H \cdot (2V_F + U_{SB})}$	V
$U_{tp}$	Thresholdspannung, des p-Kanal-Enhancement-MOSFET	$U_{tp} = 2 \cdot V_F + U_{FB} + \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} \sqrt{2 \cdot e \cdot N_D \cdot \epsilon_H \cdot (2V_F + U_{BS})}$	V
$U_y$	Earlyspannung	pnp: 80...100 V nnp: 100...150 V	V
$v$	Ladungsträgergeschwindigkeit	$v = \frac{e}{m^*} \cdot E \cdot \bar{\tau} = \mu \cdot E$	ms <sup>-1</sup>
$v_n$	Elektronengeschwindigkeit		ms <sup>-1</sup>
$v_p$	Löchergeschwindigkeit		ms <sup>-1</sup>
$v_{th}$	thermische Geschwindigkeit	$v_{th} = \sqrt{\frac{8 \cdot kT}{m^* \cdot \pi}}$	ms <sup>-1</sup>
$V_0$	Ersatzpotential für die Oberflächenzustände des Oxids		V
$V_{Bn}$	Barrierenpotential	$V_{Bn} = \gamma \cdot (U_M - U_{EA}) + (1 - \gamma) \cdot \left( \frac{W_g}{e} - V_0 \right) \quad \text{mit} \quad \gamma = \frac{1}{1 + \frac{e^2 \cdot N_{SS} \cdot d_i}{\epsilon_i}}$ <p><b>2 Grenzfälle:</b>  <math>N_{SS} = 0 \Rightarrow \gamma = 1 \Rightarrow V_{Bn} = U_M - U_{EA}</math> (klassische Schottky-Theorie)  <math>N_{SS} \gg 0 \Rightarrow \gamma \rightarrow 0 \Rightarrow V_{Bn} = \frac{W_g}{e} - V_0</math> Realität: <math>0 &lt; \gamma &lt; 1</math></p>	V
$V_F$	Dotierungspotential, Dotierungsinhalt	$V_F = \frac{W_F - W_i}{e} = \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \cdot U_T$ <p><math>V_F = 0</math>: reine Eigenleitung  <math>V_F \neq 0</math>: dotierter Halbleiter</p>	V
$V_s$	Oberflächenpotential		V

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$W$	Arbeit	$W = \int P \cdot dt ; \quad [W] = 1 J = 1 Ws = 1 Nm \quad 1 eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$	eV
$W_C$	Leitungsbandunterkante		eV
$W_D$	energetische Lage der Donatorniveaus		eV
$W_{EA}$	Elektronenaffinität (Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Halbleiter)	$W_{EA} = e \cdot U_{EA}$	eV
$W_F$	Fermienergie	<p>Energie, bei der die Besetzungswahrscheinlichkeit der Energiezustände im Leitungs- / Valenzband gleich 0,5 ist.</p> <p>bei Eigenleitung: <math>W_i = W_F</math> mit <math>W_i = \frac{W_C - W_V}{2} = \frac{W_g}{2}</math></p> <p>für nicht entarteten Halbleiter:</p> $W_C - W_F = -kT \cdot \ln\left(\frac{n}{N_C}\right)$ $W_F - W_V = -kT \cdot \ln\left(\frac{p}{N_V}\right)$ <p>für entarteten Halbleiter:</p> $W_F - W_C = kT \cdot \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \pi^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{n}{N_C}\right)^{\frac{2}{3}}$ $W_V - W_F = kT \cdot \left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \pi^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{p}{N_V}\right)^{\frac{2}{3}}$ <p><b>Folge:</b> Fermienergie liegt im Leitungs- oder Valenzband</p> $W_F = W_i + e \cdot  V_F $	eV
$W_G$	Gapenergie Breite der verbotenen Zone	$W_G(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}; W_G(\text{Ge}) = 0,67 \text{ eV}; W_G(\text{GaAs}) = 1,43 \text{ eV}$	eV
$W_V$	Valenzbandoberkante		eV
$x_n$	Sperrschichtausdehnung ins n-Gebiet	$x_p = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_H \cdot N_D \cdot (U_D - U)}{e \cdot N_A \cdot (N_A + N_D)}}$ für Sperrpolung: $U \leq 0$	m

<b>Größe</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Formel</b>	<b>Einheit</b>
$x_p$	Sperrschichtausdehnung ins p-Gebiet	$x_p = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_H \cdot N_D \cdot (U_D - U)}{e \cdot N_D \cdot (N_A + N_D)}}$ für Sperrpolung: $U \leq 0$	m
$x_{SMH}$	Weite der Raumladungszone des Schottky-Kontakts	$x_{SMH} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_H}{e \cdot N} \cdot (U_{DMH} - U)}$ mit $U < 0$ !	m
<b>X</b>	Blindwiderstand		$\Omega$
$y_{11e}$	Eingangsleitwert	$y_{11e} = \frac{1}{h_{11e}} = \frac{1}{r_{BE}}$	S
$y_{12e}$	Rückwärtssteilheit	$y_{12e} = \frac{i_B}{u_{CE}} \Big _{u_{BE}=0} = S_r$ $y_{12e} = S_r = -\frac{A_r}{r_{BE}}$	1
$y_{21e}$	Steilheit	$y_{21e} = \frac{i_C}{u_{BE}} \Big _{u_{CE}=0} = S$	1
$y_{22e}$	differentieller Ausgangsleitwert	$y_{22e} = h_{22e} = \frac{1}{r_{CE}}$	S
$z_{AB}$	Dotierungsinhalt der Akzeptoren in der Basiszone	$z_{AB} = \int_{x_E}^{x_B} N_A(x) \cdot dx$	$m^2$
$z_{DE}$	Dotierungsinhalt der Donatoren in der Emitterzone	$z_{DE} = \int_0^{x_E} N_D(x) \cdot dx$	$m^2$
<b>Z</b>	Scheinwiderstand	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\Omega$

Größe	Bedeutung	Formel	Einheit
$Z_A$	Ausgangswiderstand des Transistors in der Schaltung	$Z_A = \frac{-1}{\frac{h_{12} \cdot h_{21}}{h_{11} \cdot Z_G} - h_{22}}$ <p>mit <math>Z_G</math>: Generatorwiderstand</p> <p><b>für <math>Z_G \rightarrow 0</math>:</b></p> $Z_A = R_L \parallel r_{CE} \quad \text{für Emitterschaltung}$ $Z_A \approx R_L \quad \text{für Basisschaltung}$ $Z_A = R_E \parallel \left( \frac{1}{S} + \frac{Z_G}{\beta} \right) \quad \text{für Kollektorschaltung}$	$\Omega$
$Z_E$	Eingangswiderstand des Transistors in der Schaltung	$Z_E = h_{11} + \frac{h_{12} \cdot h_{21} \cdot Z_L}{1 - Z_L \cdot h_{22}}$ $Z_E = r_{BE} \quad \text{für Emitterschaltung}$ $Z_A \approx \frac{1}{S} \quad \text{für Basisschaltung}$ $Z_E = \beta \cdot R_E \quad \text{für Kollektorschaltung}$	$\Omega$
$Z_L$	Lastwiderstand		$\Omega$