

Analogelektronik

Michael Korn

January 3, 2025

Ohmsches Gesetz

$$\begin{aligned}U &= R \cdot I \\ R &= \frac{U}{I} \\ I &= \frac{U}{R} \\ R &= \frac{1}{G}\end{aligned}$$

Leistung

$$\begin{aligned}P &= U \cdot I \\ P &= R \cdot I^2 \\ P &= \frac{U^2}{R}\end{aligned}$$

Regeln

$$\begin{aligned}\sum I_{in} &= \sum I_{out} \\ \sum U &= 0\end{aligned}$$

RC-Tiefpass

$$\begin{aligned}H &= \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{f}{f_c})^2}} \\ f_c &= \frac{1}{2\pi RC} \\ H[db] &= 20 \cdot \log(H) \\ -3db &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot H\end{aligned}$$

Halbleiter

Materialspezifisch

$$\begin{aligned}R &= \rho \cdot \frac{l}{A} \\ G &= \sigma \cdot \frac{A}{l}\end{aligned}$$

Elektronen & Löcher

$$\begin{aligned}n_0 &= p_0 = n_i \\ n_i &= n_{i0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{W_g}{2kT_0}} e^{\frac{W_g}{2kT}} \\ n + N_A &= p + N_D\end{aligned}$$

Donatoren & Akzeptoren

$$\begin{aligned}n \cdot p &= n_i^2 \\ n_p \cdot p_n &= n_i^2 \\ n_n \cdot p_n &= n_i^2\end{aligned}$$

Diffusion

$$\begin{aligned}j_{Feld} &= e \cdot n \cdot \mu \cdot E = \sigma \cdot E \\ j_{Diff} &= e \cdot D \cdot \frac{dn}{dx}\end{aligned}$$

$$I = A \cdot e \cdot E \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$$

$$D = \mu \cdot \frac{k_B T}{e}$$

$$j_{Ges} = j_{Feld} + j_{Diff} = e \cdot D \cdot \frac{dn}{dx} + e \cdot n \cdot \mu \cdot E$$

bezeichnen:

- μ : Ladungsträgerbeweglichkeit
- ν : Driftgeschwindigkeit
- D : Diffusionskonstante für Löcher oder Elektronen
- σ : spezifische Leitfähigkeit
- n, p : Ladungsträgerdichte

Dabei

Dioden

$$I_D = I_S \cdot (e^{\frac{U}{n \cdot U_T}} - 1)$$

$$I_S = I_S(T_0) \cdot e^{(\frac{T}{T_0} - 1) \cdot \frac{U_g}{n \cdot U_T}} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{x}{n}}$$

$$U_G = \frac{W_G}{e} = 1.12V$$

$$g_d = \frac{I}{n \cdot U_T} = \frac{1}{r_D}$$

wobei:

- $x \approx 3$
- I_S : Sättigungsstrom
- $\approx I_S \cdot (e^{\frac{U}{n \cdot U_T}})$ für $U > 4 \cdot U_T$
- U_G : Bandlückenspannung
- n : Emissionskoeffizient
- $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$: Temperaturspannung
- g_d : Kleinsignalleitwert
- I_D : Diodenstrom

Temperaturspannung

$$U_T = \frac{k_B \cdot T}{e} \approx 26 \text{ mV bei } T = 300 \text{ K}$$

wobei:

- k : Boltzmann TR:25 in J
- T : Absolute Temperatur in Kelvin
- k_B : $8.617 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$
- $1J = 6.2415 \cdot 10^{18} eV$

weitere Dioden

- Zener
- Schoty
- Fotodiode
- LED

Bipolare Transistoren (BJT)

Stromverhältnisse

$$\begin{aligned}I_C &= \beta \cdot I_B \\I_E &= I_C + I_B \\I_E &= (\beta + 1) \cdot I_B\end{aligned}$$

Kleinsignal

$$\begin{aligned}g_m &= \frac{I_C}{U_T} \\r_\pi &= \frac{\beta}{g_m} \\r_o &= \frac{U_A}{I_C}\end{aligned}$$

wobei:

- g_m : Steilheit
- r_π : Basis-Emitter-Widerstand
- r_o : Ausgangswiderstand
- U_A : Early-Spannung

Verstärkung in verschiedenen Schaltungen

- **Emitterschaltung:** $V_u \approx -g_m \cdot R_C$ (bei großem r_o und $R_E = 0$)
- **Kollektorschaltung (Emitterfolger):** $V_u \approx 1$
- **Basisschaltung:** $V_u \approx g_m \cdot R_C$

wobei R_C der Kollektorwiderstand ist.

Early-Effekt

Steilheit im aktiven Bereich

$$\frac{I_c}{U_{EA}}$$

MOSFETs

Grundlagen

MOSFETs gibt es in zwei Haupttypen:

- **n-Kanal MOSFET:** Leitet bei positiver Gate-Source-Spannung.
- **p-Kanal MOSFET:** Leitet bei negativer Gate-Source-Spannung.

Strom-Spannungs-Beziehungen

- **Abschnitt (Cut-off):** $I_D = 0$ für $V_{GS} < V_{TH}$
- **Linearer Bereich (Triodenbereich):** $I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2]$ für $V_{GS} > V_{TH}$ und $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$
- **Sättigungsbereich (Aktivbereich):** $I_D = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2$ für $V_{GS} > V_{TH}$ und $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$

wobei:

- μ_n : Beweglichkeit der Elektronen
- C_{ox} : Kapazität des Gate-Oxids pro Fläche
- W : Breite des Kanals
- L : Länge des Kanals
- V_{TH} : Schwellenspannung

Kleinsignalparameter

- **Steilheit:** $g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})$ (im Sättigungsbereich)

Operationsverstärker (OPV)

Idealer OPV

- Unendlich hohe Eingangs-Impedanz
- Null Ausgangs-Impedanz
- Unendlich hohe Verstärkung

Realer OPV

- **Eingangsruhestrom (Bias Current):** I_B
- **Eingangs-Offsetspannung:** V_{OS}
- **Verstärkung mit offenem Regelkreis (Open-Loop Gain):** A_{OL} (endlich)
- **Gleichtaktunterdrückung (CMRR)**
- **Common-Mode Rejection Ratio** :Verhältnis der Diffverstärkung zur Gleichtaktverstärkung.
- **Bandbreite:** Frequenzbereich, in dem die Verstärkung des OPVs nicht wesentlich abfällt.
- **Slew Rate:** Maximale Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung.

Invertierender Verstärker

$$V = -\frac{R_2}{R_1}$$

Nicht-invertierender Verstärker

$$V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Weitere wichtige OPV-Schaltungen

- **Differenzverstärker:** $V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1)$ (wenn $R_1 = R_3$ und $R_2 = R_4$)
- **Integrierer:** $V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt$
- **Differenzierer:** $V_{out}(t) = -RC \frac{dV_{in}(t)}{dt}$

Wechselstromanalyse (AC)

Impedanz

$$\begin{aligned} Z_R &= R \\ Z_C &= \frac{1}{j\omega C} \\ Z_L &= j\omega L \end{aligned}$$

wobei:

- $\omega = 2\pi f$: Kreisfrequenz
- j : Imaginäre Einheit