

# 1 Berechnung von Operationsverstärker-Schaltungen

Die zu berechnende Schaltung wird so partitioniert und umgezeichnet, dass sie durch das Blockschaltbild in Abb. 1 beschrieben wird.

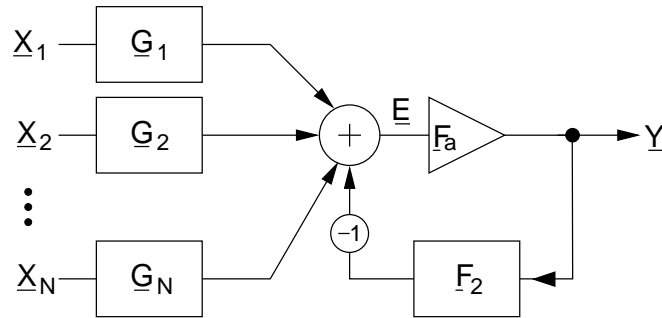


Abb. 1: Allgemein gültiges Blockschaltbild zur Beschreibung von Operationsverstärker-Schaltungen.  $X_n$  können Spannungen oder Ströme sein.  $\underline{Y}$  und  $\underline{E}$  sind in der Regel Spannungen (Spannungsgesteuertes Hauptzweitor mit Spannungsausgang).

Es gilt allgemein für die Schaltung in Abb. 1

$$\underline{Y} = \underline{E} \underline{F}_a = \underline{F}_a \sum_{n=1}^N \underline{X}_n \underline{G}_n - \underline{Y} \underline{F}_2 \underline{F}_a \quad (1)$$

$$\underline{Y} = \frac{\underline{F}_a \underline{F}_2}{1 + \underline{F}_a \underline{F}_2} \frac{1}{\underline{F}_2} \sum_{n=1}^N \underline{X}_n \underline{G}_n \quad (2)$$

$$\underline{Y} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\underline{F}_O}} \frac{1}{\underline{F}_2} \sum_{n=1}^N \underline{X}_n \underline{G}_n; \quad \underline{F}_O = \underline{F}_a \cdot \underline{F}_2, \text{ Ringverstärkung.} \quad (3)$$

Darin lassen sich die  $\underline{G}_n$  und  $\underline{F}_2$  wie folgt bestimmen:

$$\underline{G}_n = \left. \frac{\underline{E}}{\underline{X}_n} \right|_{X_i=0, i \neq n}^{Y=0} \quad \underline{F}_2 = \left. \frac{-\underline{E}}{\underline{Y}} \right|_{X_n=0} \quad (4)$$

Die Betriebsverstärkung für den Eingang  $n$  ist

$$\frac{\underline{Y}}{\underline{X}_n} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\underline{F}_O}} \frac{\underline{G}_n}{\underline{F}_2} \approx \frac{\underline{G}_n}{\underline{F}_2} \quad (\text{für } |\underline{F}_O| \rightarrow \infty). \quad (5)$$

Der Einfluss von nichtidealen Eigenschaften des OP's kann mit Hilfe eines geeigneten Ersatzschaltbildes ermittelt werden. Abb. 2 zeigt ein quasistatisches Ersatzschaltbild eines realen OP's ohne Rauschquellen. Es berücksichtigt einen endlichen „differentiellen“ Eingangswiderstand  $R_{\text{ein,d}}$ , Offset, ein  $I_B$ , eine endliche (reelle) Spannungsverstärkung  $V_U$  und einen endlichen Ausgangswiderstand  $R_{\text{aus}}$ .

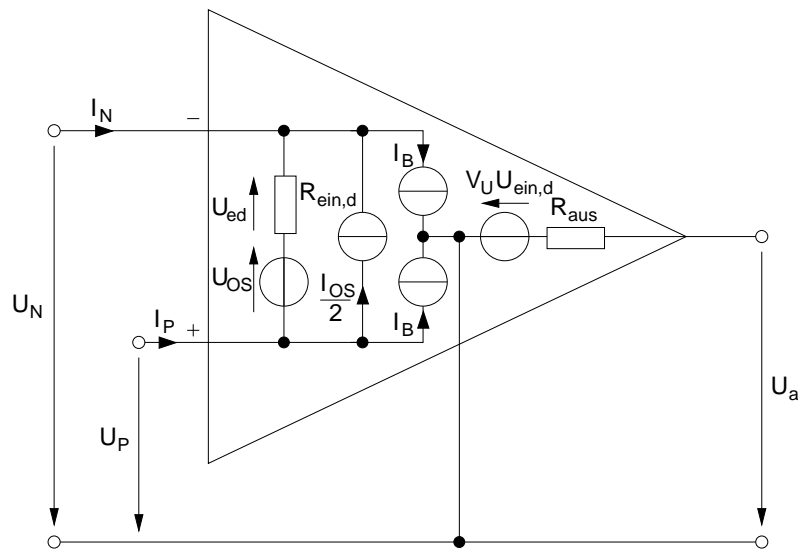


Abb. 2: Ersatzschaltbild eines realen Operationsverstärkers mit Ruhestromen und Offsetgrößen.

**Beispiel:** invertierender Verstärker

Es wird ein invertierender Verstärker nach Abb. 3 aufgebaut. Für den OP gilt das Ersatzschaltbild in Abb. 2, wobei  $V_U \rightarrow \infty$  angenommen werden kann.

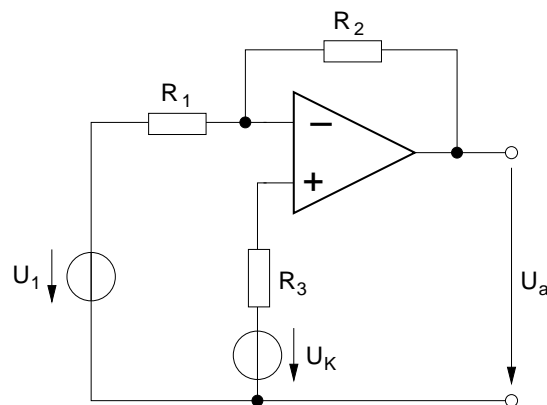


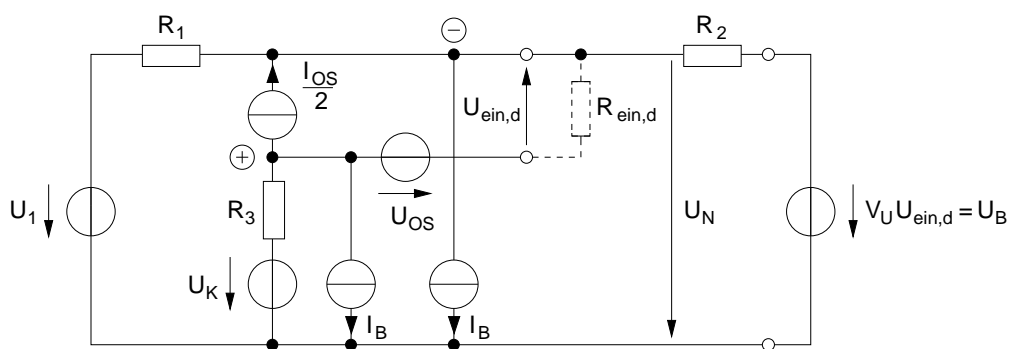
Abb. 3: Invertierender Verstärker mit Kompensationsnetzwerk  $R_3, U_K$ .

Für die Ausgangsspannung des invertierenden Verstärkers gilt:

$$U_a = U_a(U_1, U_K, U_{OS}, I_B, I_{OS}) \quad (6)$$

Aufgabe: Ermittlung von  $U_a$

- Bestimme die Gesamtschaltung aus Abb. 2 und 3 in Abb. 1



Darin wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Näherung  $R_{ein,d} \gg R_1, R_2, R_3 \gg R_{aus}$  erfüllt ist. Daher wird  $R_{ein,d}$  als Leerlauf und  $R_{aus}$  als Kurzschluss berücksichtigt.

2. Bestimme die Einkoppelfaktoren  $G_n$  ( $Q_{n \neq i}$  bedeutet: alle Quellen aus  $X_i$  gleich Null)

a)  $X_1 = U_1$

$$G_1 = \frac{E}{X_1} \Big|_{\substack{Y=0 \\ X_n=0, n \neq i}} = \frac{U_{ein,d}}{U_1} \Big|_{Q_{n \neq 1}=0} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

b)  $X_2 = U_K$

$$G_2 = \frac{U_{ein,d}}{U_1} \Big|_{Q_{n \neq 2}=0} = 1$$

c)  $X_3 = I_B$

$$G_3 = \frac{U_{ein,d}}{I_B} \Big|_{Q_{n \neq 3}=0} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} - R_3$$

d)  $X_4 = \frac{I_{OS}}{2}$

$$G_4 = \frac{U_{ein,d}}{\frac{I_{OS}}{2}} \Big|_{Q_{n \neq 4}=0} = -\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} - R_3$$

e)  $X_5 = U_{OS}$

$$G_5 = \frac{U_{ein,d}}{U_{OS}} \Big|_{Q_{n \neq 5}=0} = -1$$

f) Rückkoppelfaktor  $F_2 = k$

$$F_2 = \frac{-E}{Y} \Big|_{X_n=0} = \frac{U_{ein,d}}{U_a} \Big|_{Q=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

3. Zusammenfassen nach Gl. (3)

Mit der Ringverstärkung  $F_O = F_a F_2 = V_U = k = V_U \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  folgt

$$U_a = \underbrace{\frac{1}{1 + \frac{1}{F_O}}}_{\rightarrow 1 \text{ für } V_U \rightarrow \infty} \frac{1}{F_2} \sum_{n=1}^S X_n G_n \quad (8)$$

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} U_1 + \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_K + \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} - R_3 \right) \frac{R_1 + R_2}{R_1} I_B \quad (9)$$

$$- \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{I_{OS}}{2} - \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{OS} \quad (10)$$

Der OP habe folgende Daten:  $2 \mu\text{A} \leq I_B \leq 3 \mu\text{A}$ ,  $|I_{OS}| \leq 0,5 \mu\text{A}$ ,  $|U_{OS}| \leq 3 \text{mV}$ .

Aufgabe: Dimensionierungsbeispiel

Die Quelle  $U_1$  soll durch einen Eingangswiderstand der Verstärkerschaltung von  $10 \text{k}\Omega$  belastet werden. Es soll gelten

$$U_a = -8U_1 + U_{a,f}(U_K, U_{OS}, I_B, I_{OS}) \quad (11)$$

Welche Bauteile sind wie zu dimensionieren? Aufgabe: Kompensation der Fehlerspannung

$R_3$  soll so dimensioniert werden, daß die Fehlerspannung  $U_{a,f}(U_K = 0, U_{OS}, I_B, I_{OS})$  minimal wird. Wie groß ist  $U_{a,f}$  in diesem Fall?

Aufgabe: Temperaturkompensation

Bei  $25^\circ\text{C}$  soll durch die Spannungsquelle  $U_K$  ein Offsetspannungsabgleich durchgeführt werden. Welchen Einstellbereich muß  $U_K$  besitzen, damit ein Abgleich möglich ist?

Wie groß kann im Temperaturbereich  $-55^\circ\text{C} \dots 125^\circ\text{C}$  die Fehlerspannung  $U_{a,f}$  nach dem Abgleich maximal werden, wenn für die Temperaturabhängigkeit der Offsetgrößen gilt

$$\left| \frac{dI_{OS}}{dT} \right| \leq 2 \frac{\text{nA}}{\text{C}}, \quad \left| \frac{dU_{OS}}{dT} \right| \leq 25 \frac{\mu\text{V}}{\text{C}}.$$