

Analoger Schaltungsentwurf

Sommersemester 2012

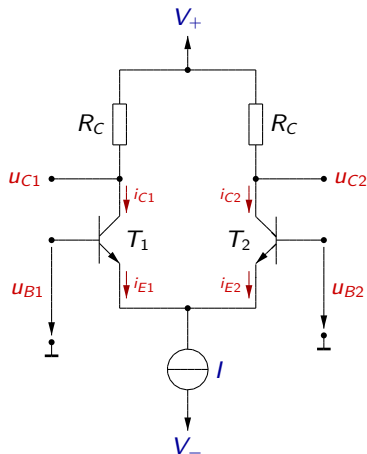
Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Wess



Teil VI

Verstärker

Differenzverstärker



Stromquelle: $I = i_{E1} + i_{E2}$

$$T_1: i_{E1} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(u_{B1} - u_E)/V_T}$$

$$T_2: i_{E2} = \frac{I_S}{\alpha} e^{(u_{B2} - u_E)/V_T}$$

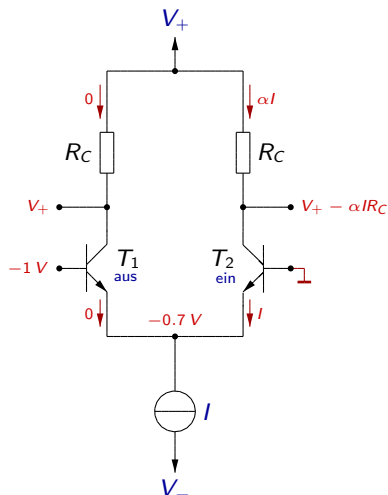
Für die Emitterströme gilt

$$i_{E1} = \frac{I}{1 + e^{(u_{B2} - u_{B1})/V_T}}$$

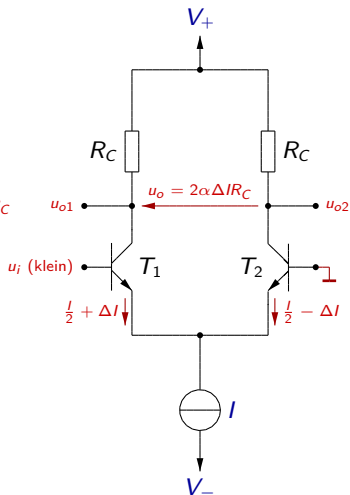
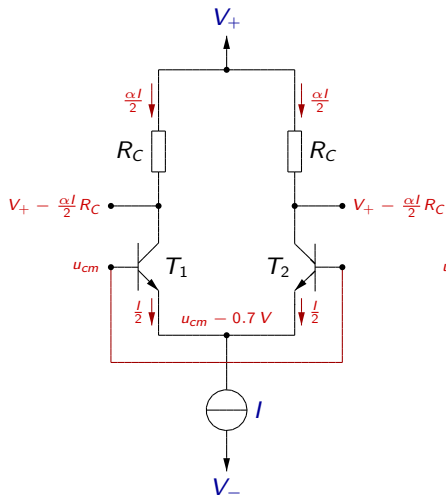
bzw.

$$i_{E2} = \frac{I}{1 + e^{(u_{B1} - u_{B2})/V_T}}$$

- T_1 und T_2 haben identische Eigenschaften



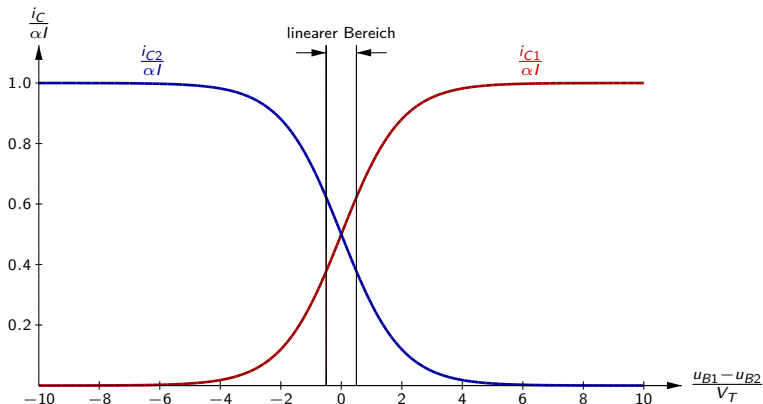
Kleinsignalverhalten



$$u_{o1} = V_+ - \alpha R_C \left(\frac{I}{2} + \Delta I \right)$$

$$u_{o2} = V_+ - \alpha R_C \left(\frac{I}{2} - \Delta I \right)$$

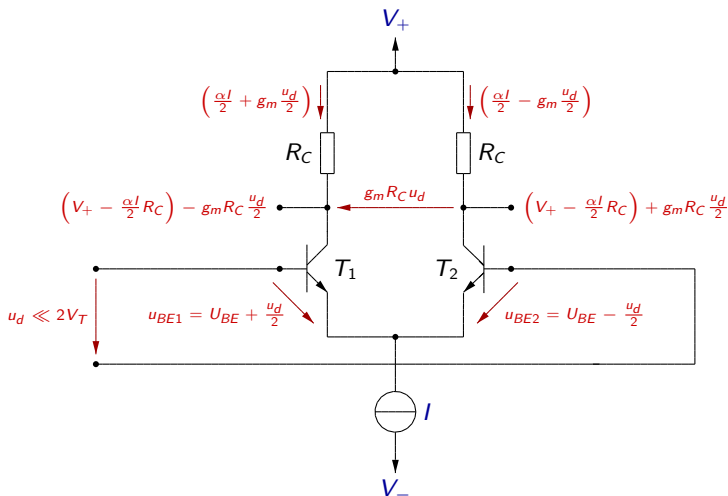
Übertragungskennlinien



- Für $u_d = u_{B1} - u_{B2} \ll V_T$ gilt näherungsweise

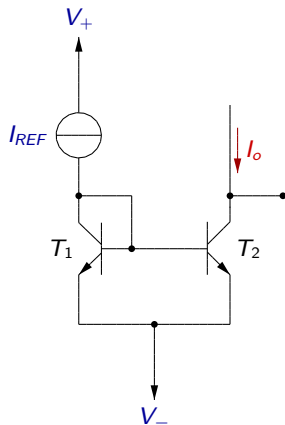
$$\boxed{\frac{i_{C1}}{\alpha I} = \frac{1}{2} + \frac{u_d}{4V_T}} \quad \text{und} \quad \boxed{\frac{i_{C2}}{\alpha I} = \frac{1}{2} - \frac{u_d}{4V_T}}$$

Differenzverstärkung



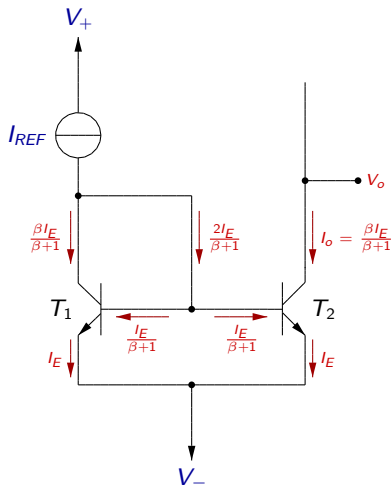
- $g_m = \frac{\alpha I}{2V_T}$... Übertragungsleitwert für T_1 bzw. T_2

Stromspiegel



- Identische Transistoren T_1 und T_2

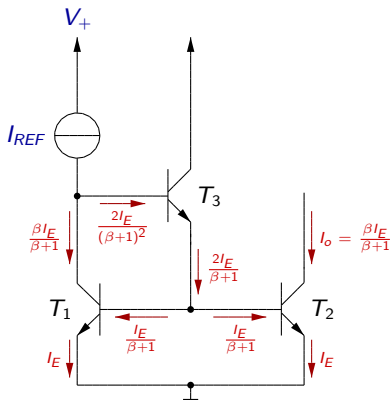
Stromspiegel



$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{\beta}{\beta + 2} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

- Identische Transistoren T_1 und T_2

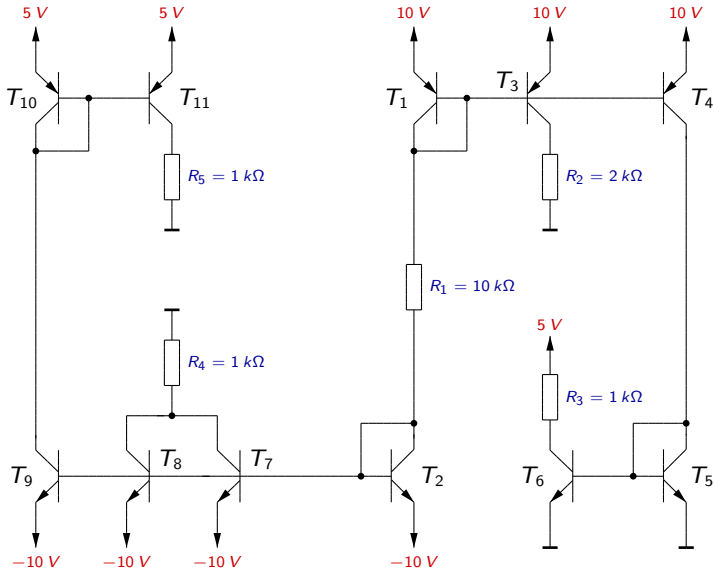
Verbesserter Stromspiegel



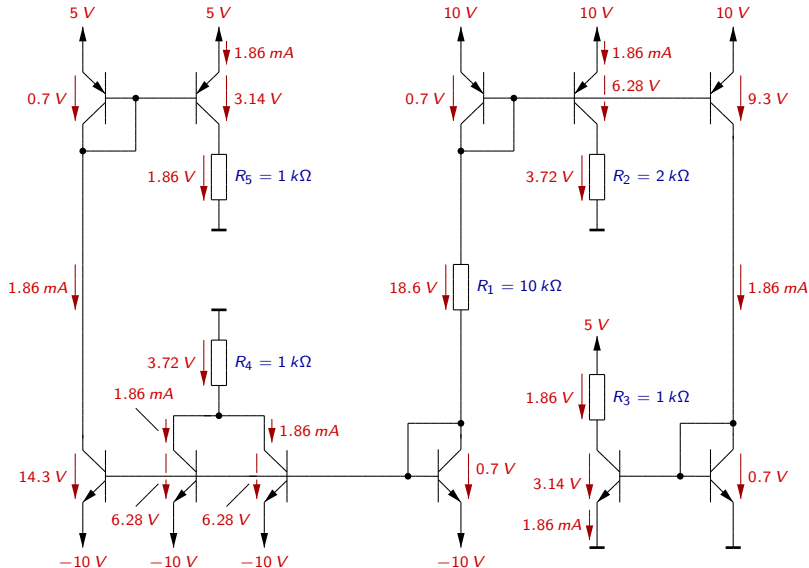
$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta^2 + \beta}} \approx \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta^2}}$$

- Identische Transistoren T_1 und T_2

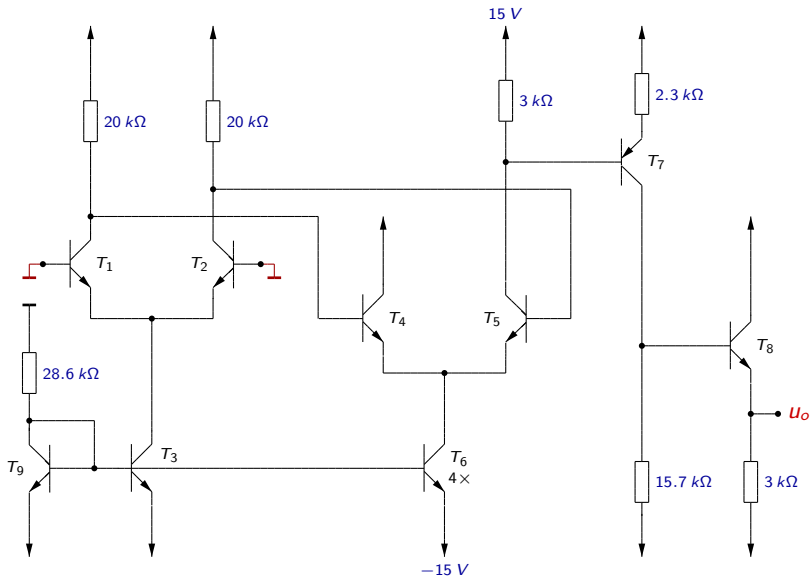
Aufgabe 6.1: Analyse einer Stromspiegelschaltung



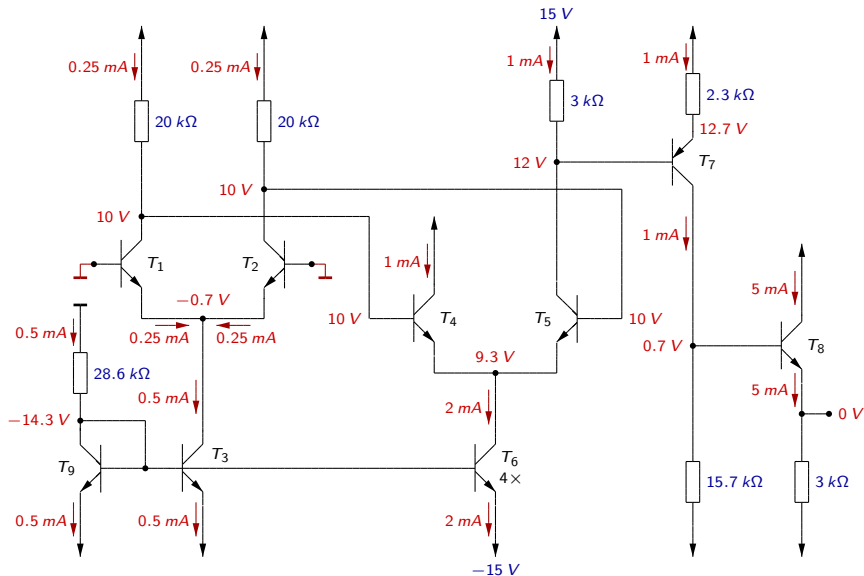
Aufgabe 6.1: Analyse einer Stromspiegelschaltung



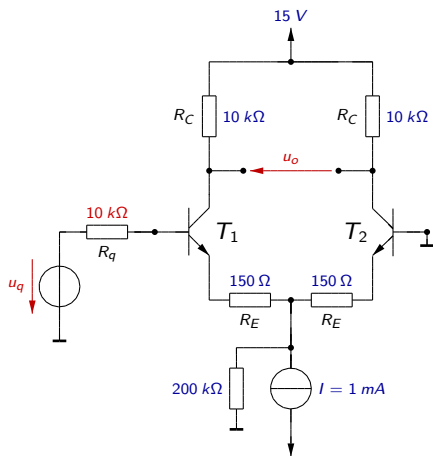
Aufgabe 6.2: Einfache Operationsverstärkerschaltung



Aufgabe 6.2: Einfache Operationsverstärkerschaltung



Aufgabe 6.3: Differenzverstärker



Aufgabenstellung

Bestimme

- Differenzeingangswiderstand r_{id} .
- Spannungsverstärkung $v_d = \frac{u_o}{u_q}$.
- Gleichtaktverstärkung v_{cm} für $R_C \pm 1\%$ (worst case).
- CMRR in dB.

Aufgabe 6.3: Differenzverstärker

Lösung

- Differenzeingangswiderstand:

$$r_{id}$$

- Spannungsverstärkung:

$$v_d = \frac{u_o}{u_q}$$

- Gleichtaktverstärkung v_{cm} für $R_C \pm 1\%$ (Worst-Case-Analyse):

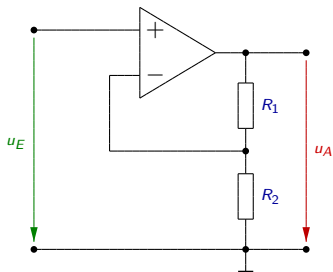
$$v_{cm} = \frac{\Delta R_C}{2R}$$

- CMRR in dB:

$$\text{CMRR} = 20 \log \frac{v_d}{v_{cm}}$$

Nichtinvertierender Verstärker

Schaltbild



Verstärkung

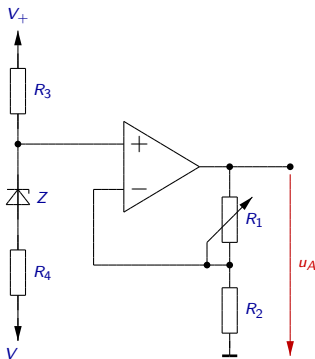
$$u_E = u_A \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$v = \frac{u_A}{u_E} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Aufgabe 6.4: Nichtinvertierender Verstärker

Aufgabenstellung

Innerhalb welcher Grenzen lässt sich die Ausgangsspannung u_A mit dem Potentiometer R_1 verändern?



$$V_+ = 15 \text{ V}$$

$$V_- = -15 \text{ V}$$

$$U_Z = 5 \text{ V}$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

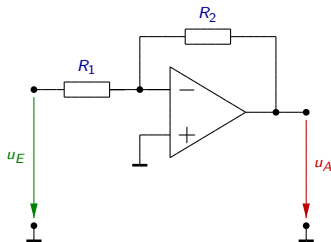
$$R_2 = 33 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 3.3 \text{ k}\Omega$$

Invertierender Verstärker

Schaltbild



Verstärkung

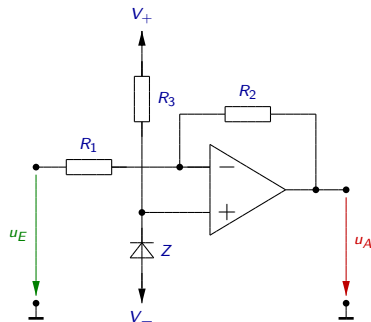
$$\frac{u_E}{R_1} = -\frac{u_A}{R_2}$$

$$v = \frac{u_A}{u_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Aufgabe 6.5: Invertierender Verstärker

Aufgabenstellung

Wie groß ist die Ausgangsspannung u_A bei einer Eingangsspannung $u_E = 1\text{ V}$?



$$V_+ = 15\text{ V}$$

$$V_- = -15\text{ V}$$

$$U_Z = 12\text{ V}$$

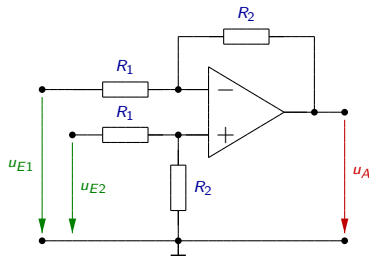
$$R_1 = 10\text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 22\text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 1\text{ k}\Omega$$

Differenzverstärker

Schaltbild



Verstärkung

$$\frac{u_{E1} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{E2}}{R_1} = - \frac{u_A - \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{E2}}{R_2}$$

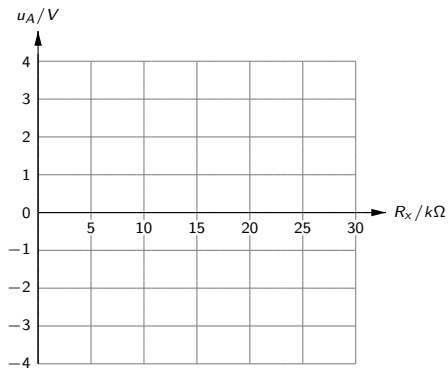
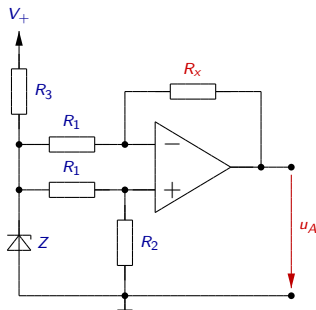
$$u_{E1} - u_{E2} = - \frac{R_1}{R_2} u_A$$

$$v = \frac{u_A}{u_{E1} - u_{E2}} = - \frac{R_2}{R_1}$$

Aufgabe 6.6: Differenzverstärker

Aufgabenstellung

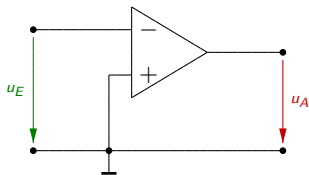
Stelle die Ausgangsspannung u_A als Funktion des Widerstandes R_x grafisch dar.



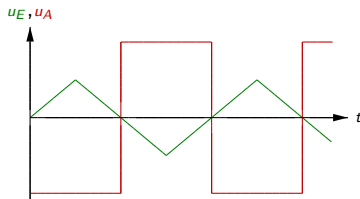
$$V_+ = 15 \text{ V}, U_Z = 5 \text{ V}, R_1 = 10 \text{ k}\Omega, R_2 = 10 \text{ k}\Omega, R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

Komparator ohne Hysterese

Invertierender Komparator

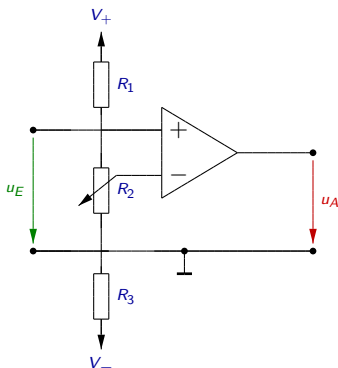


Feste Schaltschwelle

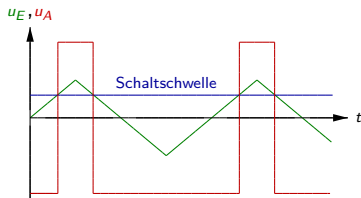


Komparator ohne Hysterese

Nichtinvertierender Komparator



Einstellbare Schaltschwelle

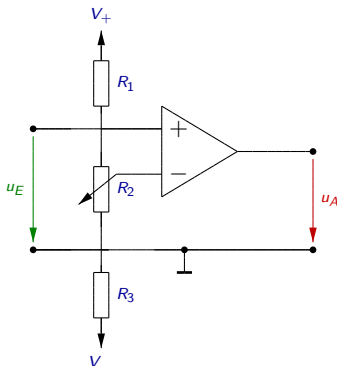


Aufgabe 6.7: Komparator ohne Hysterese

Aufgabenstellung

Innerhalb von welchem Bereich kann die Schaltschwelle verändert werden?

Schaltbild



$$V_+ = 15 \text{ V}$$

$$V_- = -15 \text{ V}$$

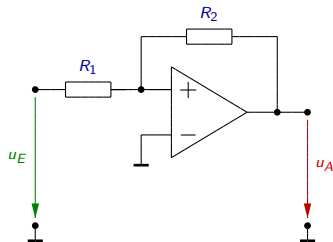
$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

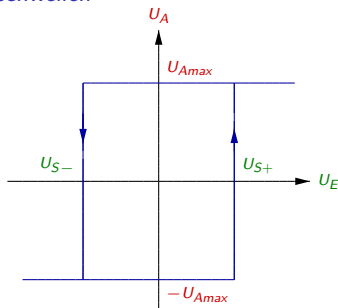
$$R_3 = 10 \text{ k}\Omega$$

Nichtinvertierender Komparator mit Hysterese

Schaltbild



Schaltsschwellen

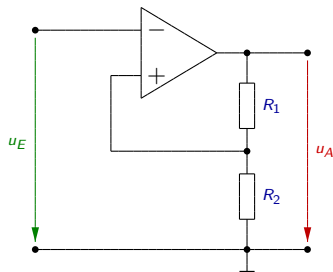


$$U_{S+} = \frac{R_1}{R_2} U_{Amax}$$

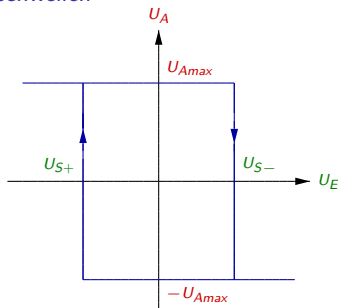
$$U_{S-} = -\frac{R_1}{R_2} U_{Amax}$$

Invertierender Komparator mit Hysterese

Schaltbild



Schaltswellen

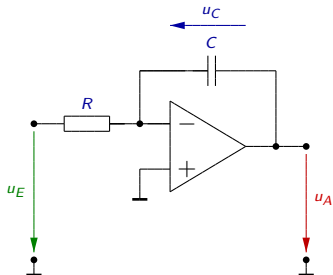


$$U_{S+} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{Amax}$$

$$U_{S-} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{Amax}$$

Invertierender Integrator

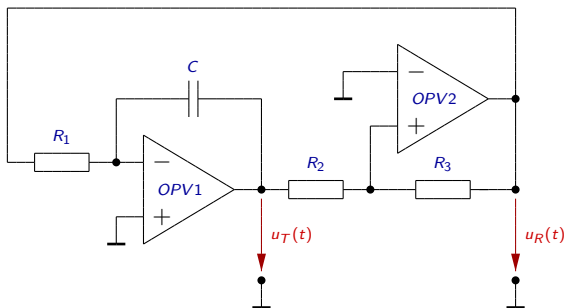
Schaltbild



Übertragungsverhalten

$$u_A(t) = -\frac{1}{RC} \int u_E dt + u_C(0)$$

Aufgabe 6.8: Dreiecksgenerator



- 1 Bestimme die Schaltschwellen des Schmitt-Triggers ($OPV2$, R_2 , R_3).
- 2 Zeige, dass die Frequenz f des Dreiecksgenerators durch

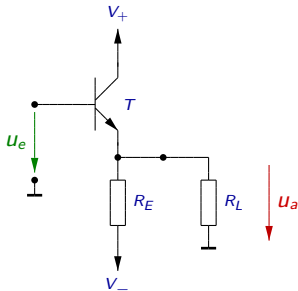
$$f = \frac{R_3}{4R_1R_2C}$$

festgelegt wird.

- 3 Skizziere Zeitdiagramme für die Spannungen $u_R(t)$ und $u_T(t)$.

Aufgabe 6.8: Dreiecksgenerator

Der Emitterfolger als Leistungsverstärker



- Maximale Ausgangsleistung:

$$P_{Lmax} = \frac{V_+^2}{8R_E}$$

- Gesamtleistung:

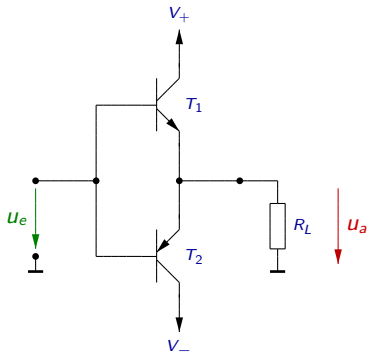
$$P_{ges} = P_L + P_T + P_E = 2 \frac{V_+^2}{R_E}$$

- Maximaler Wirkungsgrad:

$$\eta_{max} = \frac{P_{Lmax}}{P_{ges}} = \frac{1}{16} = 6.25\%$$

- Der Strom durch den Transistor wird nie null.
- Die von der Schaltung aufgenommene Gesamtleistung ist unabhängig von der Aussteuerung konstant.

Komplementäre Transistorendstufe in B-Betrieb



- Ausgangsleistung:

$$P_L = \frac{\hat{u}_a^2}{2R_L}$$

- Gesamtleistung:

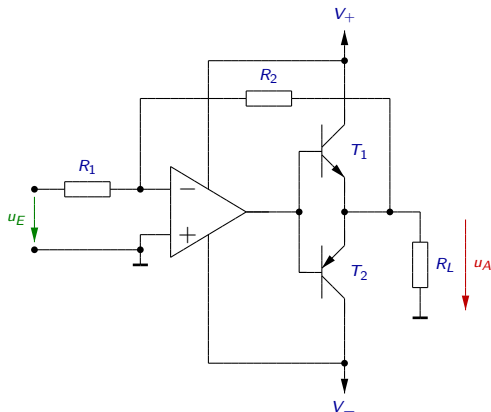
$$P_{ges} = 2P_{T1} + P_L = \frac{2V_+}{\pi R_L} \hat{u}_a$$

- Maximaler Wirkungsgrad:

$$\eta_{max} = \frac{\pi}{4}$$

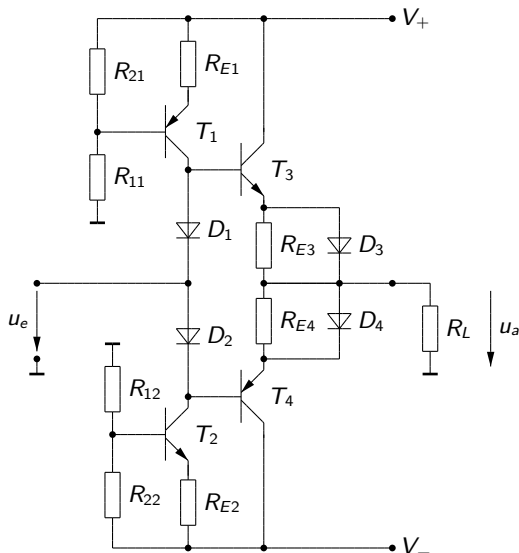
- Die aufgenommene Leistung ist proportional zur Amplitude des Ausgangssignals.

Leistungsverstärker



- Der Operationsverstärker eliminiert die Übernahmeverzerrungen.

Komplementäre Transistorendstufe in AB-Betrieb



Komplementäre Transistorendstufe in AB-Betrieb

- Maßnahmen zur Stabilisierung des Ruhestromes
 - Stromgegenkopplung durch R_{E3} bzw. R_{E4}
 - Negativer Temperaturkoeffizient von D_1 bzw. D_2
- Mit T_1 bzw. T_2 werden Stromquellen realisiert → Erhöhung des Eingangswiderstandes bzw. Verringerung der Steuerleistung.