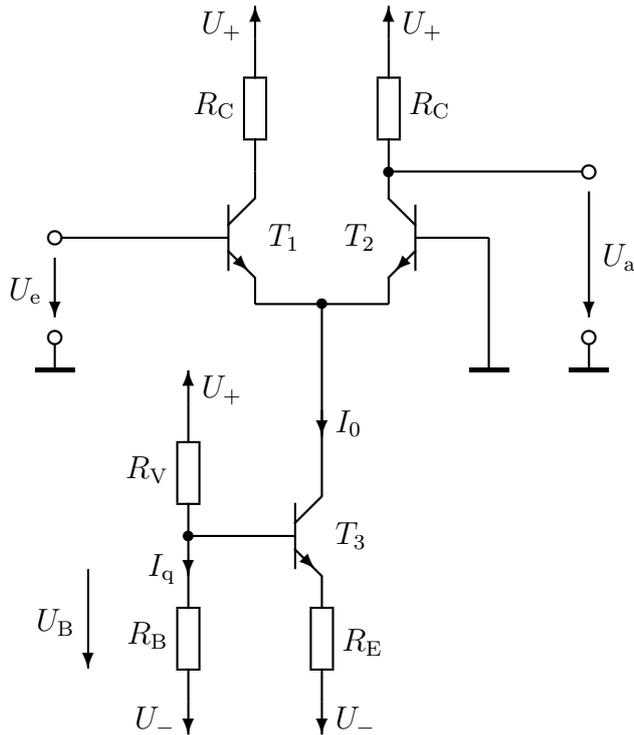


BEISPIEL 3.1: Differenzverstärker - Grundfunktion

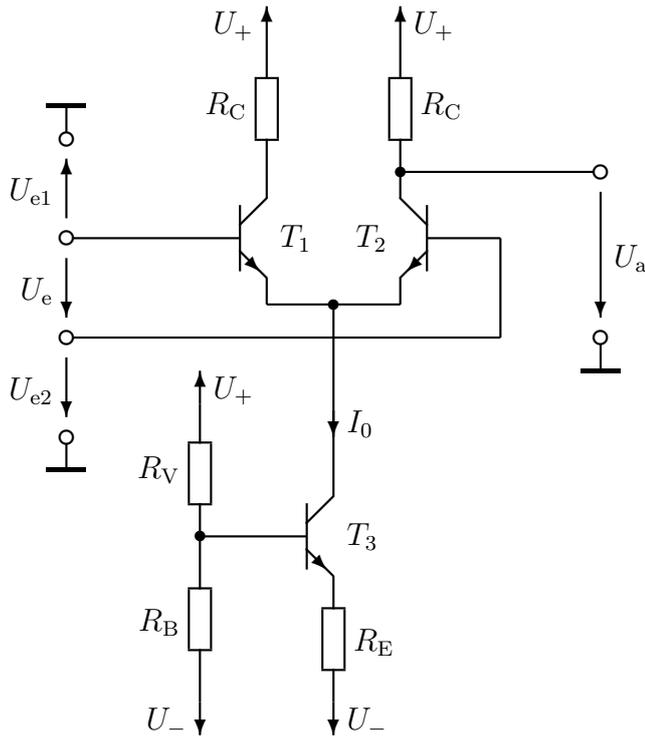


Versorgungsspannung:	$U_+ = 5 \text{ V}$
	$U_- = -5 \text{ V}$
Flussspannung:	$U_f = 0,6 \text{ V}$
Temperaturspannung:	$U_T = 25 \text{ mV}$
Stromverstärkung:	$B = 100$
Eingangs-Ruhe-spannung:	$U_{e0} = 0 \text{ V}$
Ausgangs-Ruhe-spannung:	$U_{a0} = 3 \text{ V}$
Stromquellenstrom:	$I_0 = 6 \text{ mA}$
Spannung an R_B :	$U_{B0} = 2 \text{ V}$
Querstrom:	$I_{q0} = I_0$

Der Differenzverstärker ist die wichtigste Schaltung der Analogtechnik. Er hat ähnliche Eigenschaften wie die Emitterschaltung ohne Gegenkopplung, hat aber einen stabilen Arbeitspunkt.

- Dimensionieren Sie die Widerstände der Schaltung so, dass sich die angegebenen Ruhe-spannungen und -ströme einstellen.
- Berechnen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung $v_u = u_a/u_e$.
- Berechnen Sie den Eingangswiderstand r_e .
- Berechnen Sie den Ausgangswiderstand r_a .

BEISPIEL 3.2: Differenzverstärker - Nichtideale Eigenschaften

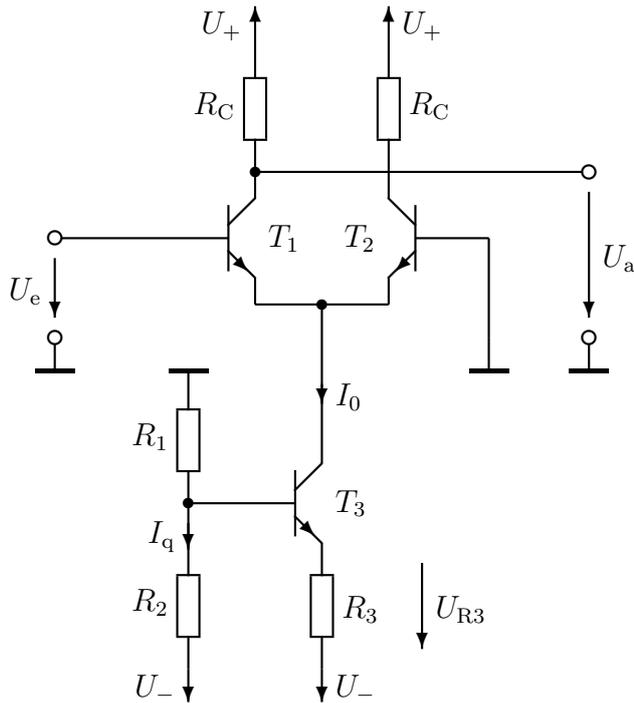


Versorgungsspannung:	$U_+ = 5 \text{ V}$ $U_- = -5 \text{ V}$
Flussspannung:	$U_f = 0,6 \text{ V}$
Temperaturspannung:	$U_T = 25 \text{ mV}$ ($T = 290 \text{ K}$)
Stromverstärkung:	$B = 100$
Early-Spannung:	$U_Y = 100 \text{ V}$
Temperaturkoeffizient	$\frac{dU_f}{dT} = -1,8 \text{ mV/K}$
Eingangs-Ruhschpannung:	$U_{e0} = 0 \text{ V}$ $U_{e2,0} = 0 \text{ V}$
Ausgangs-Ruhschpannung:	$U_{a0} = 3 \text{ V}$
Stromquellenstrom:	$I_0 = 6 \text{ mA}$
Spannung an R_B :	$U_{B0} = 2 \text{ V}$
Querstrom:	$I_{q0} = I_0$
Widerstände und Versorgungsspannung können temperaturunabhängig angenommen werden.	

Ein weiterer Vorteil des Differenzverstärkers ist, dass die Eingangsspannung nicht auf Masse bezogen sein muss, oder anders gesagt, dass die Eingangsspannung die Differenz zweier auf Masse bezogenen Spannungen U_{e1} und U_{e2} sein. Im Idealfall wird nur die Spannungsdifferenz $U_e = U_{e1} - U_{e2}$ verstärkt, nicht jedoch die Gleichtakt-Eingangsspannung $U_{gl} = \frac{1}{2}(U_{e1} + U_{e2})$ bei konstanter Differenzspannung $U_e = U_{e1} - U_{e2}$.

- Berechnen Sie die Gleichtaktverstärkung $v_{gl} = u_a/u_{gl}$ sowie mit Hilfe des Ergebnisses aus Beispiel 3.1 die Gleichtaktunterdrückung $CMRR = |v_u/v_{gl}|$ (common mode rejection ratio).
Hinweis: Für die Berechnung der Gleichtaktverstärkung genügt es, den Fall $u_e = 0$ zu betrachten. Man kann dann $u_{gl} = u_{e1} = u_{e2}$ setzen.
- Berechnen Sie den Ausgangswiderstand r_a unter Berücksichtigung des Early-Leitwerts von Transistor T_2 .
- Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit der Ausgangsspannung dU_{a0}/dT .
- Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit der Kleinsignal-Spannungsverstärkung dv_u/dT .

BEISPIEL 3.3: Vernachlässigung des Basisstroms der Stromquelle

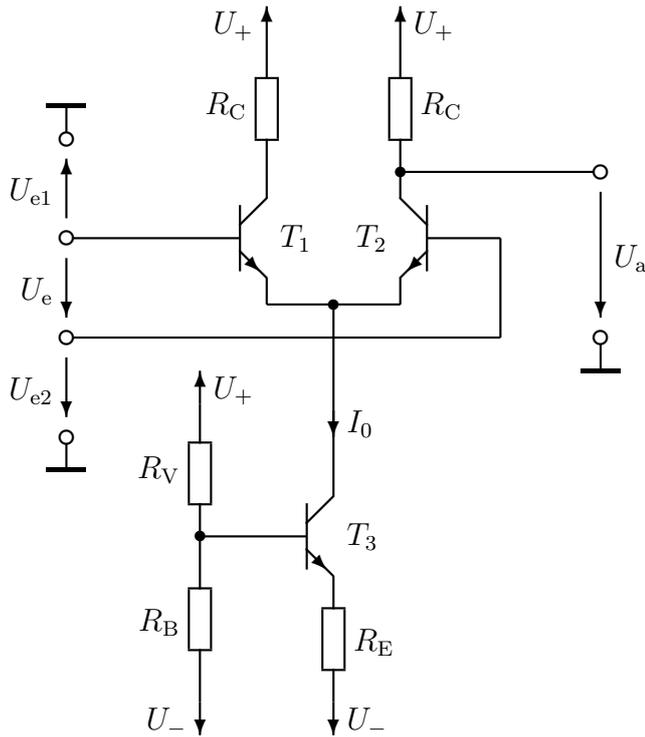


Versorgungsspannung:	$U_+ = 5 \text{ V}$
	$U_- = -5 \text{ V}$
Flussspannung:	$U_f = 0,6 \text{ V}$
Temperaturspannung:	$U_T = 25 \text{ mV}$
Stromverstärkung:	$B = 100$
Eingangs-Ruhe-spannung:	$U_{e0} = 0 \text{ V}$
Ausgangs-Ruhe-spannung:	$U_{a0} = 3 \text{ V}$
Stromquellenstrom:	$I_0 = 6 \text{ mA}$
Spannung an R_3 :	$U_{R3,0} = 0,5 \text{ V}$
Querstrom:	$I_{q0} = 0,3 \text{ mA}$

Hier wird in (a) ein Fehler bei der Dimensionierung des Differenzverstärkers gemacht, der in (b) untersucht wird.

- Dimensionieren Sie die Widerstände der Schaltung so, dass sich die angegebenen Ruhe-spannungen und -ströme einstellen. Vernachlässigen Sie dabei den Basisstrom von Transistor T_3 gegenüber dem Querstrom I_q .
- Durch die Vernachlässigung des Basisstroms in der Dimensionierung nach (a) entsteht ein Fehler. Berechnen Sie mit den in (a) bestimmten Widerständen unter Berücksichtigung der Basisströme die Ausgangs-Ruhe-spannung U_{a0} .

BEISPIEL 3.4: Aussteuergrenzen des Differenzverstärkers



Versorgungsspannung:	$U_+ = 5 \text{ V}$ $U_- = -5 \text{ V}$
Flussspannung:	$U_f = 0,6 \text{ V}$
Temperaturspannung:	$U_T = 25 \text{ mV}$
Stromverstärkung:	$B = 100$
Restspannung:	$U_{CEsat} = 0,1 \text{ V}$
Eingangs-Ruhschpannung:	$U_{e0} = 0 \text{ V}$ $U_{e2,0} = 0 \text{ V}$
Ausgangs-Ruhschpannung:	$U_{a0} = 3 \text{ V}$
Stromquellenstrom:	$I_0 = 6 \text{ mA}$
Spannung an R_B :	$U_{B0} = 2 \text{ V}$
Querstrom:	$I_{q0} = 20 \cdot I_{B3,0}$

(wie Beispiel 3.1)

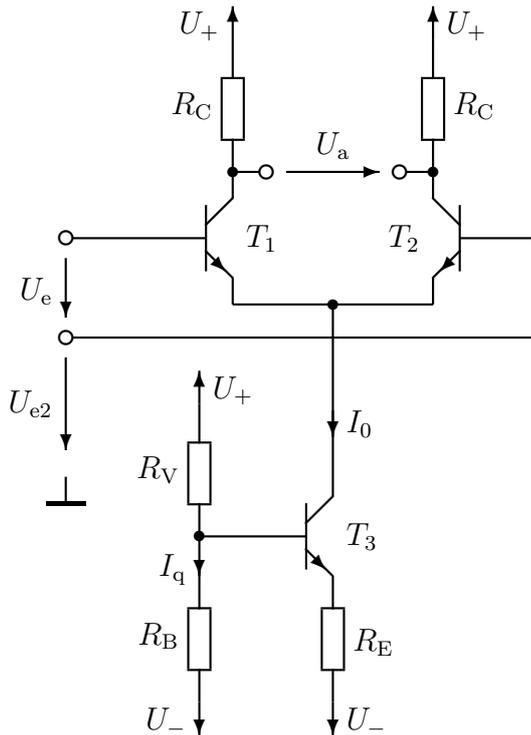
Der Differenzverstärker wird mit einem Sinussignal $u_e(t) = \hat{u}_e \sin \omega t$ angesteuert. Am Ausgang soll ein verstärktes, möglichst unverzerrtes Signal $u_a(t) = \hat{u}_a \sin \omega t$ erscheinen.

- (a) Berechnen Sie die maximalen Amplituden $(\hat{u}_e)_{\max}$ und $(\hat{u}_a)_{\max}$, sodass es zu keinen groben Verzerrungen des Ausgangssignals kommt, wenn die Gleichtakt-Eingangsspannung $U_{gl} \approx U_{e2} = 0$ ist.

Hinweis: Die Verschiebung des Emitterpotenzials von T_1, T_2 durch die Eingangsspannung u_e kann vernachlässigt werden.

- (b) Berechnen Sie die Grenzen der Gleichtakt-Eingangsspannung $(U_{e2})_{\min}$ und $(U_{e2})_{\max}$, sodass im Arbeitspunkt ($U_{e0} = 0$) alle Transistoren im aktiven Bereich arbeiten.

BEISPIEL 3.5: Differenzverstärker mit symmetrischem Ausgang



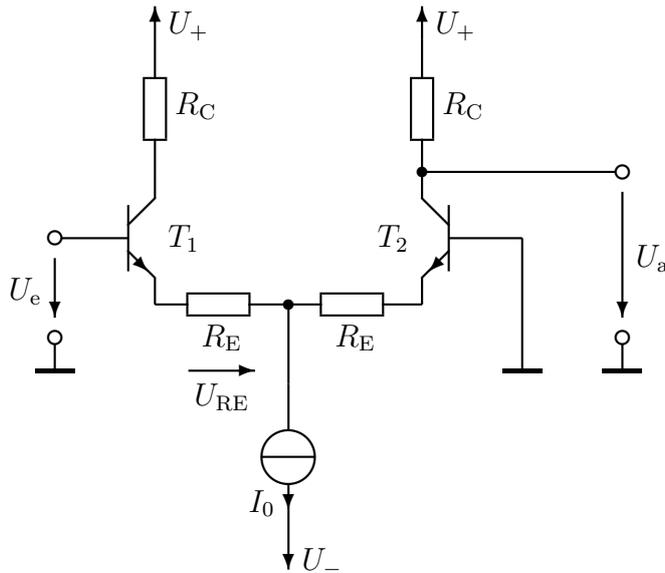
- Versorgungsspannung: $U_+ = 10 \text{ V}$
 $U_- = -10 \text{ V}$
- Flussspannung: $U_f = 0,6 \text{ V}$
- Temperaturspannung: $U_T = 25 \text{ mV}$
- Stromverstärkung: $B = 100$
- Temperaturkoeffizient $\frac{dU_f}{dT} = -1,8 \text{ mV/K}$
- Eingangsruhe­spannung: $U_{e0} = 0 \text{ V}$
 $U_{e2,0} = 0 \text{ V}$
- Widerstände: $R_V = 1 \text{ k}\Omega$
 $R_B = 150 \text{ }\Omega$
 $R_E = 100 \text{ }\Omega$
 $R_C = 820 \text{ }\Omega$
- Widerstände und Versorgungsspannung können temperaturunabhängig angenommen werden.

Ein symmetrischer Ausgang hat einige Vorteile, wie Sie sehen werden, wenn Sie die Ergebnisse dieser Aufgaben mit jenen aus den Beispielen 3.1 und 3.2 vergleichen.

Hinweis: Zur Lösung der meisten Fragen ist es hilfreich, die Kollektorpotenziale von T_1 und T_2 mit U_{a1} und U_{a2} zu bezeichnen und die Ausgangsspannung aus $U_a = U_{a1} - U_{a2}$ zu berechnen.

- Berechnen Sie den Stromquellenstrom I_0 und die Ausgangs-Ruhe­spannung U_{a0} der Schaltung.
- Berechnen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung $v_u = u_a/u_e$.
- Berechnen Sie den Eingangswiderstand r_e .
- Berechnen Sie den Ausgangswiderstand r_a unter Vernachlässigung des Early-Leitwerts.
- Bestimmen Sie die Temperaturabhängigkeit der Kleinsignal-Spannungsverstärkung dv_u/dT bei $T = 290 \text{ K}$.
- Berechnen Sie die Gleichtaktverstärkung $v_{gl} = u_a/u_{e2}$ für $u_e = 0$.

BEISPIEL 3.6: Differenzverstärker mit Stromgegenkopplung

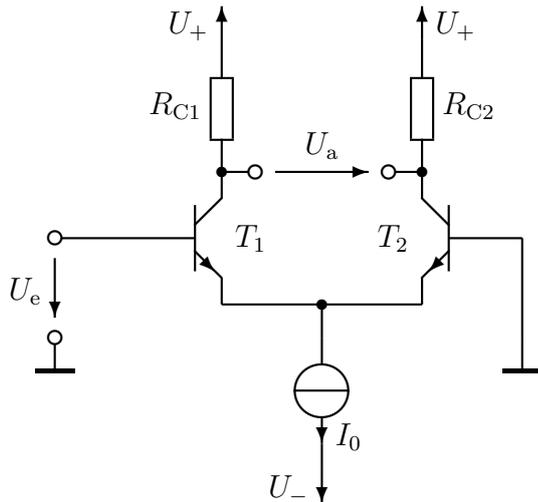


Versorgungsspannung:	$U_+ = 10 \text{ V}$ $U_- = -10 \text{ V}$
Flussspannung:	$U_f = 0,6 \text{ V}$
Temperaturspannung:	$U_T = 25 \text{ mV}$
Stromverstärkung:	$B = 80$
Early-Spannung:	$U_Y = 90 \text{ V}$
Eingangs-Ruhe-spannung:	$U_{e0} = 0 \text{ V}$
Ausgangs-Ruhe-spannung:	$U_{a0} = 7 \text{ V}$
Spannungsabfall an R_E :	$U_{RE} = 3 \cdot U_T$
Widerstand:	$R_C = 400 \ \Omega$

Die Emitterwiderstände verringern zwar die Verstärkung, verbessern aber Ein- und Ausgangswiderstand.

- Dimensionieren Sie die Stromquelle I_0 so, dass sich die Ausgangs-Ruhe-spannung U_{a0} einstellt.
- Berechnen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung $v_u = u_a/u_e$.
- Berechnen Sie den Eingangswiderstand r_e .
- Berechnen Sie den Ausgangswiderstand r_a unter Vernachlässigung des Early-Leitwerts der Transistoren.
- Berechnen Sie den Ausgangswiderstand r_a unter Berücksichtigung des Early-Leitwerts von Transistor T_2 .

BEISPIEL 3.7: Offsetspannung des Differenzverstärkers

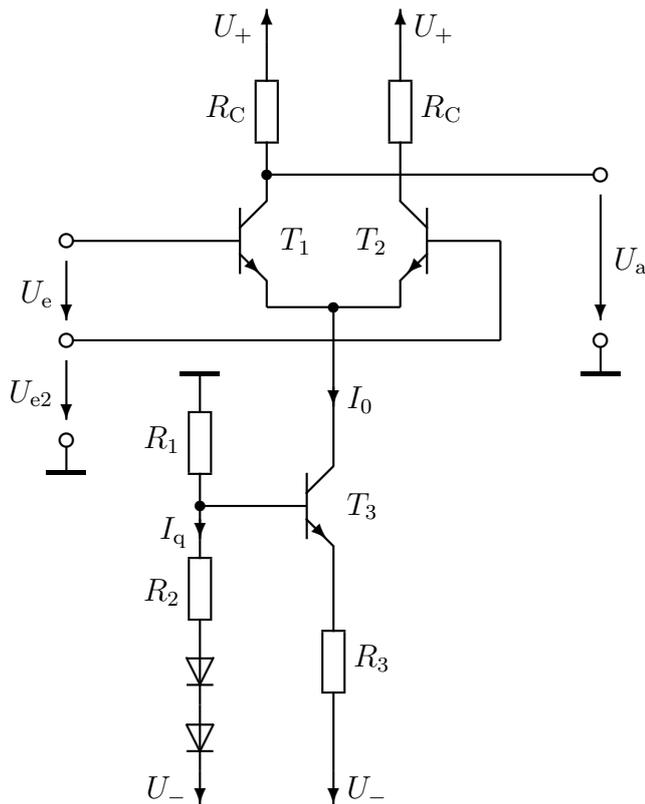


Versorgungsspannung:	$U_+ = 15 \text{ V}$ $U_- = -15 \text{ V}$
Flussspannung:	$U_f = 0,6 \text{ V}$
Temperaturspannung:	$U_T = 25 \text{ mV}$
Stromverstärkung:	$B = 100$
Temperaturkoeffizient	$\frac{dU_f}{dT} = -1,8 \text{ mV/K}$
Offsetspannung:	$U_{\text{offset}} = 5 \text{ mV}$
Stromquellenstrom:	$I_0 = 12 \text{ mA}$
Widerstandswerte:	$R_{C1} = R_{C2} = 1,2 \text{ k}\Omega$

Infolge der Exemplarstreuungen der Transistoren sind die Steuerkennlinien und somit die Flussspannungen bei gleichem Strom nicht ganz gleich. Unter Offsetspannung versteht man jene Eingangsspannung, die man anlegen muss, um mit den ungleichen Transistoren dieselbe Ausgangsspannung zu erhalten wie mit gleichen Transistoren bei $U_e = 0$.

- Berechnen Sie die Ausgangs-Ruhe­spannung U_{a0} der Schaltung für $U_{e0} = U_{\text{offset}}$.
- Berechnen Sie die Ausgangsspannung U_a sowie die Kollektorströme I_{C1} und I_{C2} der Schaltung für $U_e = 0$.
- Modifizieren Sie die Werte R_{C1} und R_{C2} so, dass sich die Ausgangsspannung aus (a) jetzt für $U_e = 0 \text{ V}$ einstellt. Die Summe aus R_{C1} und R_{C2} soll gleich bleiben.
Bemerkung: Diese Maßnahme nennt man *Offsetspannungskompensation*.
- Wir definieren jetzt $U_{e0} = 0 \text{ V}$ als neue Eingangs-Ruhe­spannung. Durch die Schaltungsmodifikation aus (c) haben wir wieder dieselbe Ausgangs-Ruhe­spannung wie in (a), jedoch haben wir nunmehr unterschiedliche Lastwiderstände R_{C1} und R_{C2} und unterschiedliche Kollektor-Ruhe­ströme $I_{C1,0}$ und $I_{C2,0}$ in den beiden Zweigen. Berechnen Sie für diese Schaltung die Kleinsignal-Spannungsverstärkung $v_u = u_a/u_e$ im Arbeitspunkt $U_{e0} = 0$.
- Berechnen Sie für die so modifizierte Schaltung den Eingangswiderstand r_e .
- Berechnen Sie für die so modifizierte Schaltung den Ausgangswiderstand r_a unter Vernachlässigung des Early-Leitwerts der Transistoren.

BEISPIEL 3.8: Differenzverstärker mit temperaturkompensierter Stromquelle



Versorgungsspannung:	$U_+ = 10 \text{ V}$ $U_- = -10 \text{ V}$
Flussspannung:	$U_f = 0,6 \text{ V}$
Temperaturkoeffizient	$\frac{dU_f}{dT} = -1,8 \text{ mV/K}$
Temperaturspannung:	$U_T = 25 \text{ mV}$
Stromverstärkung:	$B = 100$
Restspannung:	$U_{CEsat} = 0,2 \text{ V}$
Eingangs-Ruhschpannung:	$U_{e0} = 0 \text{ V}$
Ausgangs-Ruhschpannung:	$U_{a0} = 5 \text{ V}$
Stromquellenstrom:	$I_0 = 10 \text{ mA}$
Querstrom:	$I_{q0} = 20 \cdot I_{B3,0}$

Die Diodenkennlinien sind identisch mit den Steuerkennlinien der Transistoren.

Die Schaltung wird zunächst für $R_2 = 0$ untersucht. Dann wird R_2 so bestimmt, dass der Temperaturkoeffizient der Ausgangs-Ruhschpannung verschwindet. Abschließend wird ein wichtiger Nachteil der neuen Schaltung behandelt.

- Dimensionieren Sie für $R_2 = 0$ die restlichen Widerstände der Schaltung so, dass sich die angegebenen Ruhschpannungen und -ströme einstellen.
- Berechnen Sie für $R_2 = 0$ die Ableitung der Ausgangs-Ruhschpannung nach der Temperatur dU_{a0}/dT .
- Schreiben Sie die Ausgangs-Ruhschpannung U_{a0} allgemein als Funktion der Widerstandswerte an und leiten Sie eine Bedingung für R_2 her, sodass die Temperaturabhängigkeit von U_{a0} verschwindet.
- Dimensionieren Sie mit dieser Bedingung die Widerstände neu, sodass die Temperaturabhängigkeit von U_{a0} verschwindet.
- Bestimmen Sie für jede der beiden Dimensionierungen die Aussteuer Grenzen der Gleichtakt-Eingangsspannung $U_{gl} = U_{e2}$ für $U_e = 0$.

Hinweis: Die Aussteuer Grenzen sind dadurch gegeben, dass der Arbeitspunkt aller Transistoren im aktiven Bereich bleiben muss.