

---

Klausur in  
**„Mess- und Schaltungstechnik“**  
im Sommersemester 2015  
am 20.07.2015

---

**Beachten Sie folgende Hinweise:**

- Füllen Sie als Erstes das Deckblatt aus.
- Prüfen Sie die Vollständigkeit der Klausur. (6 Aufgabenblätter)
- Es sind keine Hilfsmittel (z.B. Formelsammlung oder Taschenrechner) erlaubt.
- Benutzen Sie keinen Bleistift oder Rotstift.
- Benutzen Sie für eine neue Aufgabe ein neues Blatt.
- Aufgaben mit einem Sternchen \* sind Zusatzaufgaben.

**Viel Erfolg!**

Name, Vorname: Musterlösung

Matrikelnummer: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Aufgabe	Punkte
1	15
2	16 + 4
3	15
4	18 + 4
5	18 + 2
6	18 + 4
Zusatzpkt.	10
Summe	124

Note	
------	--

## Aufgabe 1: $\Sigma$ 15

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 1 mit dem Transistor  $T_1$ , für den gelte:  $B = \beta \rightarrow \infty$ . Die Versorgungsspannung  $U_B$  beträgt 12 V und hat eine Brummspannung von  $u_{B,Br,eff} = 1$  V. Die Z-Diode  $D_1$  besitzt folgende Daten:  $U_Z = 5,6$  V,  $r_Z = 40 \Omega$  bei  $I_Z = 40$  mA.

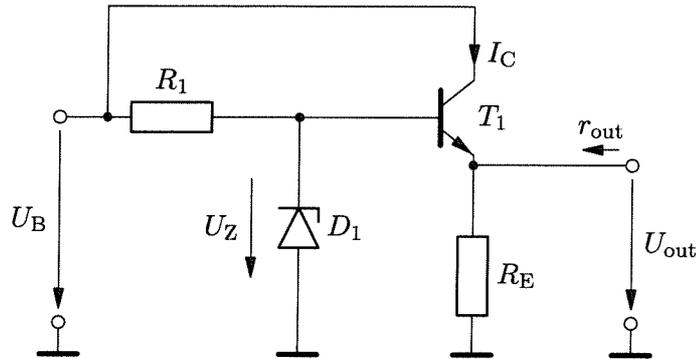


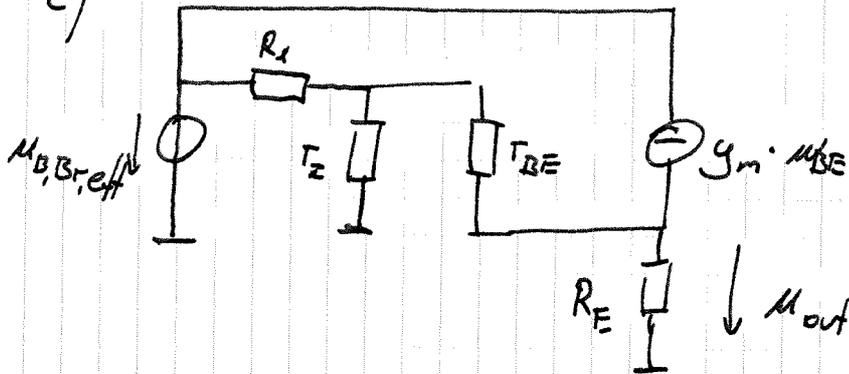
Abbildung 1: Z-Dioden-Schaltung

- 3 a) Bestimmen Sie den Widerstand  $R_1$  so, dass durch die Z-Diode ein Arbeitspunktstrom von  $I_Z = 40$  mA fließt.
- 3 b) Bestimmen Sie, welche Gleichspannung über  $R_E$  abfällt und bestimmen Sie den Widerstand  $R_E$  so, dass ein Strom von  $I_C = 10$  mA fließt.
- 3 c) Zeichnen Sie das Kleinsignal-Ersatzschaltbild.
- 3 d) Bestimmen Sie die Brummspannung  $u_{out,Br,eff}$ .
- 3 e) Bestimmen Sie den Ausgangswiderstand  $r_{out}$ .

$$1 \ a) \quad R_1 = \frac{U_B - U_Z}{I_Z} = \frac{12V - 5,6V}{40mA} = 160 \Omega$$

$$b) \quad R_E = \frac{U_Z - U_{BE}}{I_C} = \frac{5,6V - 0,6V}{10mA} = 500 \Omega$$

c)



$$d) \quad u_{out, Br, eff} \approx u_{B, Br, eff} \frac{r_c}{r_c + R_1} = 1V \frac{40\Omega}{300\Omega} = 200mV$$

$$e) \quad r_{out} = R_E \parallel \left( \frac{1}{g_m} + \frac{1}{\beta} \cdot (R_1 \parallel r_c) \right) \Big|_{\rho \rightarrow \infty}$$

$$= R_E \parallel \frac{1}{g_m} = 500\Omega \parallel \frac{25mV}{10mA}$$

$$\approx 2,5 \Omega$$

## Aufgabe 2: $\Sigma 20$

Gegeben sei die Transistorschaltung aus Abbildung 2. Der Transistor  $T_1$  habe eine Stromverstärkung  $B = \beta \rightarrow \infty$ . Die Versorgungsspannung  $U_B$  beträgt 15 V. Weiterhin gilt  $R_1 = 10,3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 4,7 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 2,5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 500 \Omega$ ,  $R_5 = 1,5 \text{ k}\Omega$  und  $U_T = 25 \text{ mV}$ .

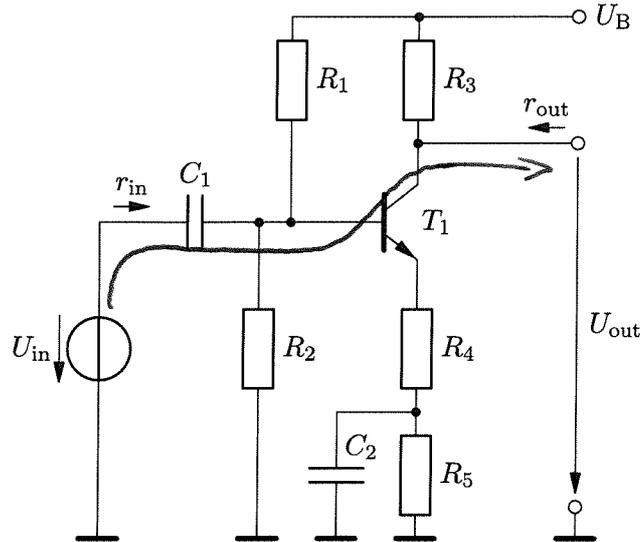


Abbildung 2: Verstärkerschaltung

- 2 a) Bestimmen Sie den Kollektorstrom im Arbeitspunkt des Transistors  $I_C$  und die Ausgangsspannung  $U_{out}$  im Arbeitspunkt.
- 2 b) Zeichnen Sie den Weg, den das Signal durch die Schaltung nimmt, ein.
- 2 c) In welcher Schaltungsart befindet sich der Transistor?
- 2 d) Zeichnen Sie das Kleinsignal-Ersatzschaltbild der Schaltung.
- 2 e) Bestimmen Sie den Eingangswiderstand  $r_{in}$  und den Ausgangswiderstand  $r_{out}$ .
- 3 f) Bestimmen Sie die Spannungsverstärkung  $v = \frac{u_{out}}{u_{in}}$ .
- 3 g) Bestimmen Sie den Eingangswiderstand  $r_{in}$  für  $B = \beta = 100$ .
- 2 h) \* Bestimmen Sie den Ausgangswiderstand  $r_{out}$  bei einer Early-Spannung  $U_A = 100 \text{ V}$  und  $B = \beta = 100$ .
- 2 i) \* Verändern oder erweitern Sie die Schaltung so, dass bei bleibender Verstärkung und Arbeitspunkt der Ausgangswiderstand deutlich verkleinert wird.

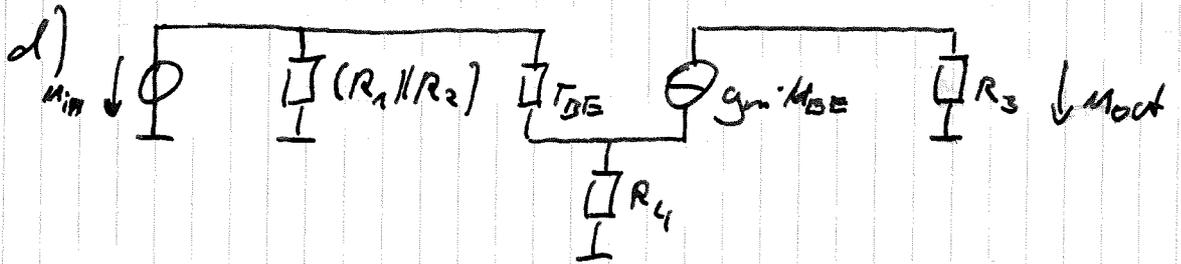
$$2 a) \quad U_{R2} = U_B \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4,7V$$

$$U_C = U_{R2} - U_{BE} = 4V$$

$$I_C = \frac{U_C}{R_4 + R_5} = 2mA$$

$$U_{out} = U_B - I_C \cdot R_3 = 10V$$

d) In Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

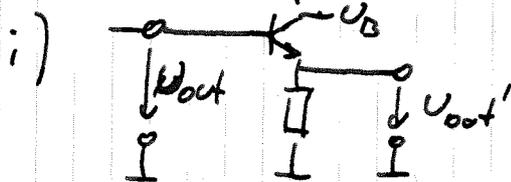


e)  $\beta \rightarrow \infty$ :  $r_{in} = R_1 \parallel R_2 \approx 3k\Omega$   
 $r_{out} = R_3 = 2,5k\Omega$

f)  $g_m' = \frac{1}{\frac{1}{g_m} + R_4} \approx \frac{1}{R_4}$ ,  $v = -g_m' \cdot R_3 = \frac{-R_3}{R_4} = -5$

g)  $\beta = 100$ :  $r_{in} = (R_1 \parallel R_2) \parallel (r_{BE} + \beta \cdot R_4)$   
 $= 3k\Omega \parallel 51,25k\Omega$   
 $\approx 3k\Omega$

h)  $r_{out} = R_3 \parallel r_{CE} \left( 1 + \frac{\beta \cdot R_4}{R_4 + r_{BE}} \right)$   
 $= 2,5k\Omega \parallel \frac{100V}{2mA} \left( 1 + \frac{50000}{1750} \right)$   
 $\approx 2,5k\Omega \parallel (50k\Omega \cdot 30)$   
 $\approx 2,5k\Omega$



### Aufgabe 3: $\Sigma 15$

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 3 mit den Transistoren  $T_1$  und  $T_2$ , für die gelte:  $B_1 = B_2 = \beta_1 = \beta_2 \rightarrow \infty$ . Weiterhin gegeben sind:  $R_C = 2,5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $I_1 = 2 \text{ mA}$ ,  $U_{B1} = 15 \text{ V}$  und  $U_{B2} = -5 \text{ V}$ .

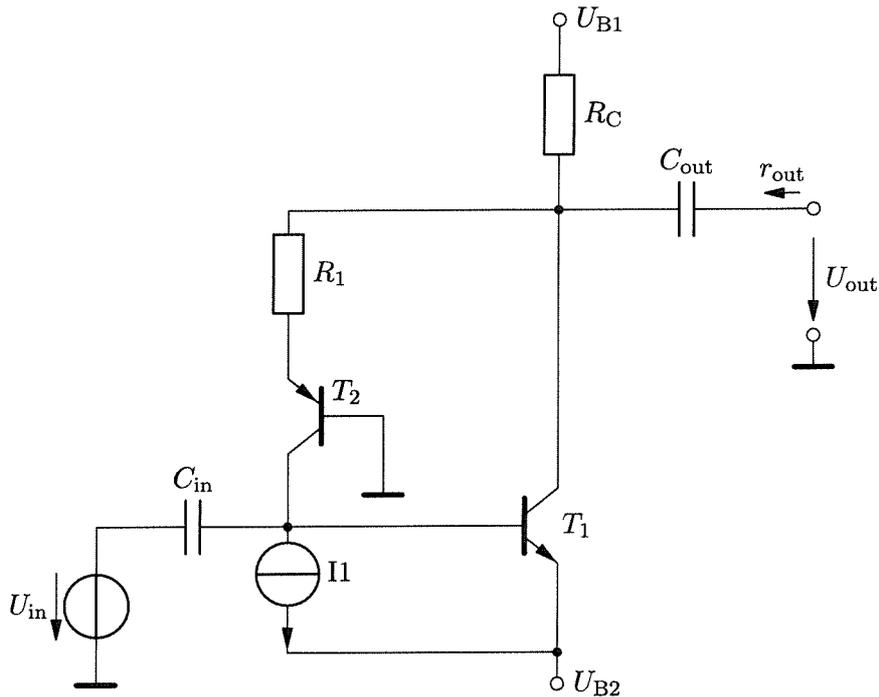


Abbildung 3: Transistorschaltung

- 3 a) Beschreiben Sie den Wirkmechanismus der Schaltung.
- 3 b) Berechnen Sie die Spannung im Arbeitspunkt über  $R_1$ .
- 3 c) Berechnen Sie die Spannung über Widerstand  $R_C$  und den Strom durch  $R_C$  im Arbeitspunkt.
- 3 d) Berechnen Sie den Ausgangswiderstand  $r_{out}$ .
- 3 e) Berechnen Sie die Spannungsverstärkung  $v = \frac{u_{out}}{u_{in}}$ .

3 a) Annahme: Wenn das Potential am Kollektor von  $T_1$  steigt, wird das Potential an der Basis von  $T_1$  über  $T_2$  nach oben gezogen. Dadurch sinkt das Potential am Kollektor von  $T_1$  wieder.

Der Arbeitspunkt wird aktiv eingestellt.

$$b) V_{R1} = I_{R1} \cdot R_1 = 4,4V$$

$$c) V_{RC} = V_{B1} - V_{R1} + V_{BE2} = 15V - 4,4V - 0,6V \\ = 10V \Rightarrow I_{RC} = 4mA$$

$$d) r_{out} = R_C \parallel \left( R_1 + \frac{1}{g_{m2}} \right) \approx 1,1k\Omega$$

$$e) g_{m1} = \frac{I_{RC} - I_{R1}}{U_T} = \frac{2mA}{25mV} = 80mS$$

$$v = -g_{m1} \cdot r_{out} = -88$$

## Aufgabe 4: $\Sigma 22$

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 4 mit einem idealen Operationsverstärker.

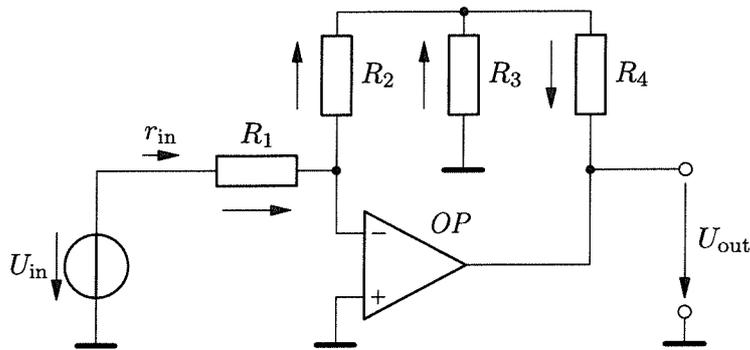


Abbildung 4: Operationsverstärkerschaltung mit Spannungspfeilen

- 3 a) Bestimmen Sie den Strom durch  $R_1$  als Funktion von  $U_{in}$ .
- 3 b) Bestimmen Sie den Strom durch  $R_2$  und die Spannung über  $R_2$ .
- 3 c) Bestimmen Sie die Spannung über  $R_3$  und den Strom durch  $R_3$ .
- 3 d) Bestimmen Sie den Strom durch  $R_4$  und die Spannung über  $R_4$ .
- 3 e) Bestimmen Sie die Ausgangsspannung  $U_{out}$  Funktion von  $U_{in}$ .

Im Folgenden gilt für die Widerstände:  $R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_4 = 100 \text{ k}\Omega$ .

- 3 f) Wie groß ist die Spannungsverstärkung dieser Schaltung?
- 2 g) \* Wie groß ist der Eingangswiderstand der Schaltung  $r_{in}$ ?
- 2 h) \* Zeichnen Sie eine einfachere Schaltung mit einem OP und gleichem Eingangswiderstand, die dieselbe Aufgabe erfüllt.

$$4 a) \quad I_1 = \frac{U_{in}}{R_1}$$

$$b) \quad I_2 = I_1, \quad U_2 = R_2 \cdot I_1 = U_{in} \frac{R_2}{R_1}$$

$$c) \quad U_3 = U_2, \quad I_3 = \frac{U_2}{R_3} = U_{in} \frac{R_2}{R_1 R_3}$$

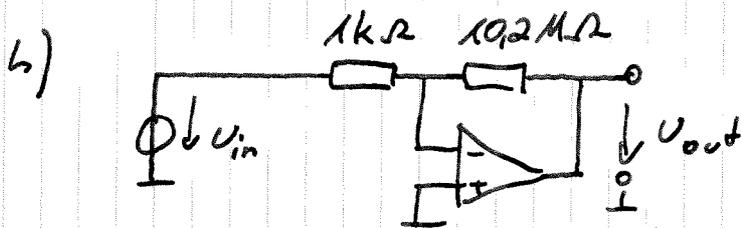
$$d) \quad I_4 = I_2 + I_3 = U_{in} \frac{1}{R_1} + U_{in} \frac{R_2}{R_1 R_3}$$

$$U_4 = I_4 \cdot R_4 = U_{in} \frac{R_4}{R_1} + U_{in} \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$$

$$e) \quad U_{out} = -U_2 - U_4 \\ = -U_{in} \left( \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_1} + \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \right)$$

$$f) \quad v = - \left( \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_1} + \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \right) \\ = - \left( 100 + 100 + 100^2 \right) = -10200$$

$$g) \quad r_{in} = R_1 = 1k\Omega$$



## Aufgabe 5: $\Sigma 20$

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 5 mit zwei idealen Operationsverstärkern.

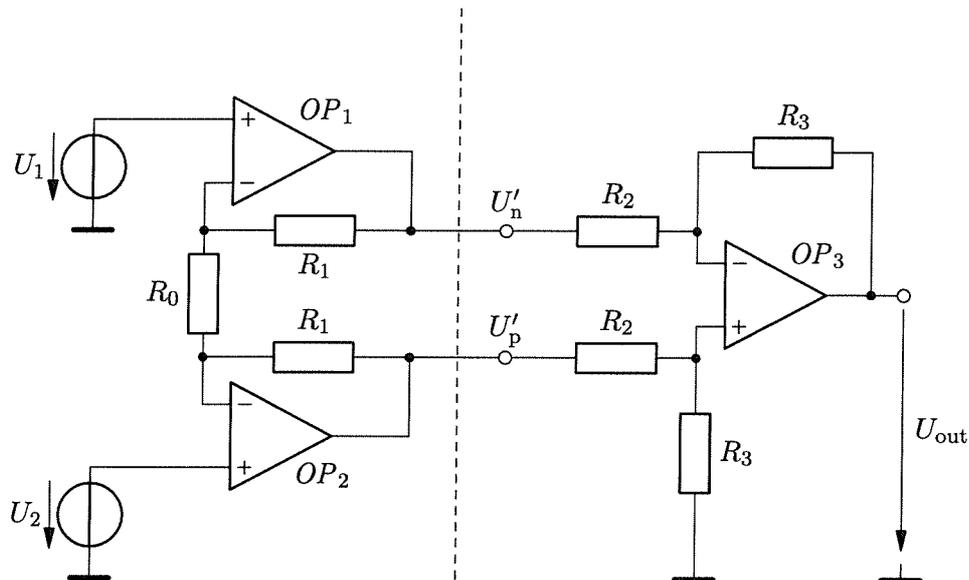


Abbildung 5: Operationsverstärker

Betrachten Sie zunächst den Schaltungsteil rechts von der gestrichelten Linie.

- 2 a) Bestimmen Sie  $U_{\text{out}} = f(U'_p, R_3, R_2)$  für  $U'_n = 0$ .
- 2 b) Bestimmen Sie  $U_{\text{out}} = f(U'_n, R_3, R_2)$  für  $U'_p = 0$ .
- 2 c) Benutzen Sie das Superpositionsprinzip, um allgemein  $U_{\text{out}} = f(U'_p, U'_n, R_3, R_2)$  anzugeben.

Betrachten Sie jetzt den linken Teil der Schaltung.

- 3 d) Zunächst gelte  $U_2 = 0$ . Bestimmen Sie für diesen Fall die Potentiale an den invertierenden Eingängen von  $OP_1$  und  $OP_2$ , sowie  $U'_p$  und  $U'_n$ .
- 3 e) Nun gelte  $U_1 = 0$ . Bestimmen Sie für diesen Fall die Potentiale an den invertierenden Eingängen von  $OP_1$  und  $OP_2$ , sowie  $U'_p$  und  $U'_n$ .
- 3 f) Benutzen Sie das Superpositionsprinzip, um allgemein  $U'_p = f(U_1, U_2, R_0, R_1)$  und  $U'_n = f(U_1, U_2, R_0, R_1)$  anzugeben.

Betrachten Sie nun die gesamte Schaltung.

- 3 g) Geben Sie allgemein  $U_{\text{out}} = f(U_1, U_2, R_0, R_1, R_2, R_3)$  an.
- 2 h) \* Welchen Vorteil hat die Gesamtschaltung gegenüber der OP-Teilschaltung rechts der gestrichelten Linie?

$$5) \quad a) \quad U_{out} = U_p' \left( \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right) \\ = U_p' \frac{R_3}{R_2}$$

$$b) \quad U_{out} = -U_n' \frac{R_3}{R_2}$$

$$c) \quad U_{out} = (U_p' - U_n') \frac{R_3}{R_2}$$

d) ~~U\_p' = U\_1~~

$$U_{n1} = U_1, \quad U_{n2} = 0V$$

$$U_n' = U_1 \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right), \quad U_p' = -U_1 \frac{R_1}{R_0}$$

$$e) \quad U_{n1} = 0V, \quad U_{n2} = U_2$$

$$U_n' = -U_2 \frac{R_1}{R_0}, \quad U_p' = U_2 \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right)$$

$$g) \quad U_{out} = \frac{R_3}{R_2} \left( -U_1 \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right) + U_2 \frac{R_1}{R_0} + U_1 \frac{R_1}{R_0} + U_2 \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right) \right) \\ = \frac{R_3}{R_2} \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_0} \right) (U_2 - U_1)$$

$$+ \quad U_p' = U_2 \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right) - U_1 \frac{R_1}{R_0}$$

$$U_n' = U_1 \left( 1 + \frac{R_1}{R_0} \right) - U_2 \frac{R_1}{R_0}$$

$$h) \quad \Gamma_{in} \rightarrow \infty \quad \text{bzw} \quad I_{in1} = I_{in2} \rightarrow 0$$

## Aufgabe 6: $\Sigma 22$

Gegeben sei die Schaltung aus Abbildung 6 mit einem idealen Operationsverstärker. Die beiden Transistoren  $T_1$  und  $T_2$  sind vom gleichen Typ mit  $B = \beta \rightarrow \infty$ . Die Betriebsspannung der Schaltung beträgt 5 V. Die Werte der Widerstände sind  $R_1 = 700 \Omega$  und  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ . Der Strom  $I_0$  ist stets positiv.

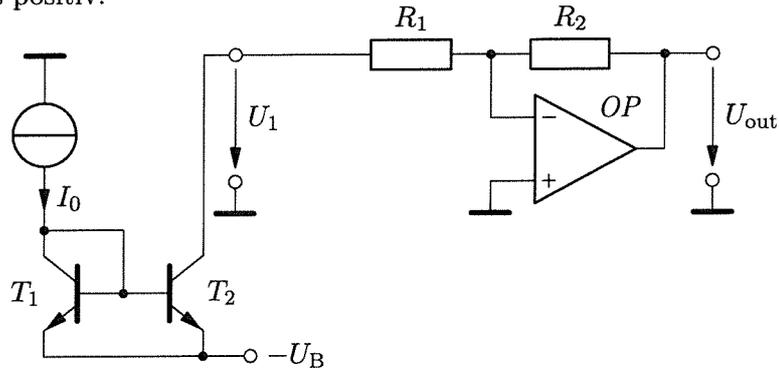


Abbildung 6: Schaltung

- 2 a) Bestimmen Sie den Strom  $I_{C2} = f(I_0)$ .
- 3 b) Bestimmen Sie die Spannung  $U_1 = f(I_0)$ .
- 4 c) Bestimmen Sie die Ausgangsspannung  $U_{\text{out}}$  in Abhängigkeit von  $I_0$ . Zeichnen Sie den Verlauf quantitativ in ein Diagramm für  $0 \leq I_0 \leq 2 \text{ mA}$ .

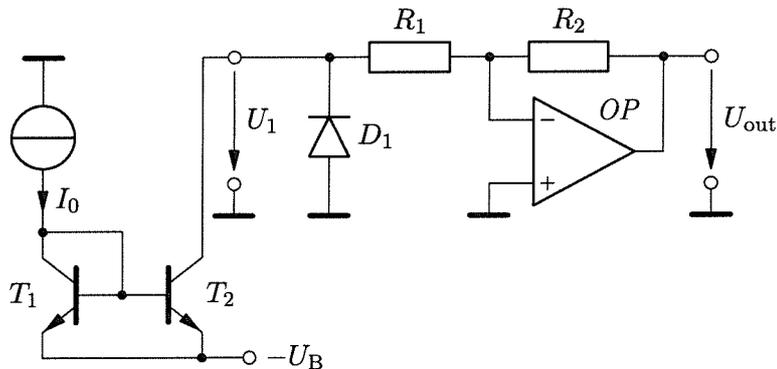


Abbildung 7: Schaltung

Die Schaltung wird jetzt um die Diode  $D_1$  erweitert, siehe Abbildung 7. Die Diode weist ein ideales Verhalten mit  $U_F = 0,7 \text{ V}$  auf.

- 5 d) Bestimmen Sie nun die Ausgangsspannung  $U_{\text{out}}$  in Abhängigkeit von  $I_0$ . Zeichnen Sie ebenfalls den Verlauf quantitativ in das Diagramm aus c) für  $0 \leq I_0 \leq 2 \text{ mA}$ .  
*Hinweis: Beachten Sie die Fallunterscheidung durch den Einfluss der Diode.*
- 4 e) Beschreiben Sie die Wirkung von  $D_1$  und  $R_1$ .

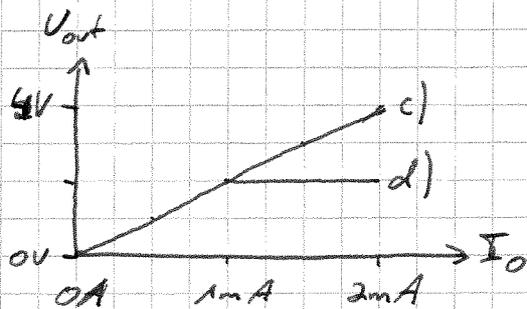
Als Stromquelle wird eine Fotodiode eingesetzt. Deren Strom ist proportional zur Beleuchtungsstärke (in Lux,  $[E_V] = \text{lx}$ ). Für die eingesetzte Fotodiode gilt:  $I_0 = 20 \mu\text{A lx}^{-1} \cdot E_V$

- 2 f) \* Wie ist der Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der Ausgangsspannung? Bestimmen Sie die maximal messbare Beleuchtungsstärke.
- 2 g) \* Nun weisen die Transistoren eine endliche Stromverstärkung von  $B = 20$  auf. Wie kann der Fehler des Stromspiegels ausgeglichen werden?

6 a)  $\beta \rightarrow \infty: I_{C2} = I_0$

b)  $U_1 = -I_0 \cdot R_1$

c)  $U_{out} = -U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1} = I_0 \cdot \cancel{R_1} \cdot \frac{R_2}{\cancel{R_1}} = I_0 \cdot R_2$   
 $= I_0 \cdot 2k\Omega$



d) Für  $U_1 \geq -0,7V$ ,  $I_0 \leq \frac{0,7V}{R_1} = 1mA$   
 $\cdot U_{out} = I_0 \cdot R_2$

Für  $I_0 > 1mA$

$\cdot U_{out} = 1mA \cdot 2k\Omega = 2V$

e)  $U_1$  kann nicht unter  $-0,7V$  fallen, da die Diode leitet. Ein größeres  $I_0$  fließt zum Teil über die Diode nach Masse ab.  $U_{out}$  wird auf  $2V$  begrenzt.

f)  $U_{out} = I_0 \cdot R_2 = 20\mu A / I_x \cdot E_V \cdot 2k\Omega$   
 $= 40mV / I_x \cdot E_V$

$E_{V,max} = \frac{1mA \cdot I_x}{20\mu A} = 500 I_x$

g)  $I_{C2} = I_0 \cdot \frac{\beta}{\beta+2} = I_{C2} \cdot \frac{20}{22} \Rightarrow I_0 = 1,1 \cdot I_{C2}$

~~1mA~~  $1mA \cdot \frac{20}{22} \cdot R_1' = 0,7V \Rightarrow R_1' = 770\Omega$

$1mA \cdot \frac{20}{22} \cdot R_2' = 2V \Rightarrow R_2' = 2,2k\Omega$

Oder einen Wilson-Stromspiegel einsetzen