

## Elektronische Schaltungen SS 2020

### 2. Übungsblatt - Lösung

#### Bipolartransistoren

#### Aufgabe 1

- Bei der Schaltung handelt es sich um eine Emitterschaltung.
- Die Kondensatoren haben die Aufgabe, die Gleichspannungsanteile der Basis-Emitterspannung und der Kollektor-Emitterspannung vom Ein- bzw. Ausgangssignal zu entkoppeln.
- Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 1 zu sehen.

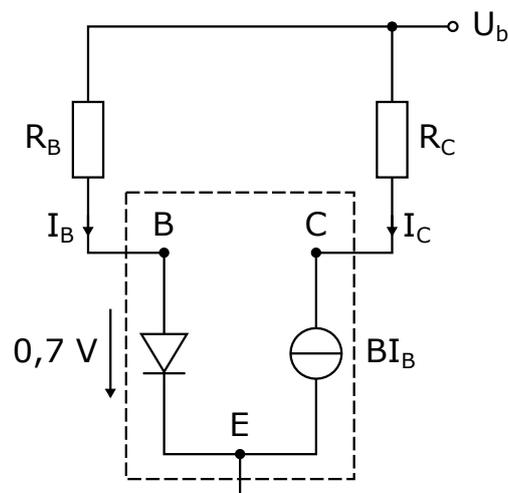


Abbildung 1

d) Die Größen im Arbeitspunkt berechnen sich zu:

$$I_B = \frac{U_b - U_{BE}}{R_B} = \frac{24 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 49,6 \mu\text{A}$$

$$I_{C,A} = B \cdot I_B = 150 \cdot 49,6 \mu\text{A} = 7,44 \text{ mA}$$

$$U_{CE,A} = U_b - I_{C,A} \cdot R_C = 24 \text{ V} - 7,44 \text{ mA} \cdot 1,6 \text{ k}\Omega = 12,1 \text{ V}$$

$$S = \frac{I_{C,A}}{U_T} = \frac{7,44 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 286,1 \text{ mS}$$

e) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 2 zu sehen.

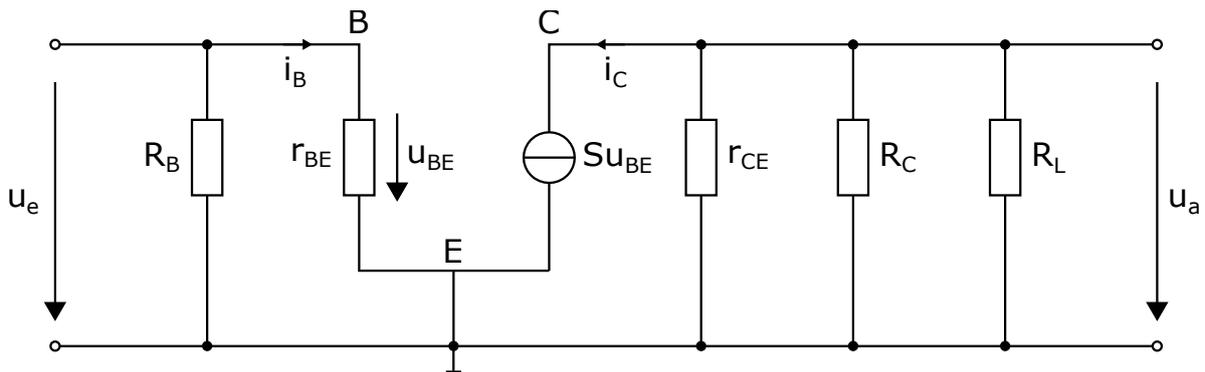


Abbildung 2

f) Die Kleinsignal Größen berechnen sich zu:

$$r_e = R_B \parallel r_{BE} = R_B \parallel \frac{\beta}{S} = 470 \text{ k}\Omega \parallel 524,3 \Omega \approx 524 \Omega \approx r_{BE}$$

$$r_a = r_{CE} \parallel R_C \parallel R_L \text{ mit der Annahme } r_{CE} \gg R_C$$

$$= R_C \parallel R_L = 1,6 \text{ k}\Omega \parallel 4,7 \text{ k}\Omega = 1,19 \text{ k}\Omega$$

$$A = -S \cdot r_a = -286,1 \text{ mS} \cdot 1,19 \text{ k}\Omega = -341,5$$

g)

1. Der Arbeitspunkt wird durch  $I_C$  und  $U_{CE}$  bestimmt, deshalb bleibt  $R_C$  erhalten. Damit muss  $R_B$  ausgetauscht werden.

2. Bestimmung von  $R_B$ :

$$I_C = B \cdot I_B = B_{\text{neu}} \cdot I_{B,\text{neu}}$$

$$\rightarrow I_{B,\text{neu}} = \frac{B}{B_{\text{neu}}} \cdot I_B$$

$$\text{oder: } I_{B,\text{neu}} = \frac{I_C}{B_{\text{neu}}} = \frac{7,44 \text{ mA}}{300} = 24,8 \mu\text{A}$$

$$R_{B,\text{neu}} = \frac{U_b - U_{BE}}{I_{B,\text{neu}}} = 939,5 \text{ k}\Omega$$

Auswahl von  $R_{B,\text{neu}}$  aus der E24-Reihe:  $R_{B,\text{neu}} = 910 \text{ k}\Omega$

3. Neuer Arbeitspunkt:

$$I_{B,A,\text{neu}} = \frac{U_b - U_{BE}}{R_{B,\text{neu}}} = 25,6 \mu\text{A}$$

$$I_{C,A,\text{neu}} = B_{\text{neu}} \cdot I_{B,A,\text{neu}} = 7,68 \text{ mA}$$

$$U_{CE,A,\text{neu}} = U_b - I_{C,A,\text{neu}} \cdot R_C = 11,71 \text{ V}$$

$$S_{\text{neu}} = \frac{I_{C,A,\text{neu}}}{U_T} = 295 \text{ mS}$$

$$A_{\text{neu}} = -S_{\text{neu}} \cdot R_C = -351$$

## Aufgabe 2

a) Großsignalbetrieb: Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

Kleinsignalbetrieb: Emitterschaltung (da  $C \parallel R_E$  und Angabe bei Aufgabe: Die Kondensatoren können für Wechselspannungen als Kurzschluss betrachtet werden).

b) Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 3 zu sehen.

c) Annahme:  $I_B \ll I_q \rightarrow$  vereinfachte Berechnung, da dadurch nur der unbelastete Spannungsteiler für die Berechnung herangezogen werden muss.

Weiter Annahme, die getroffen werden kann:  $I_E \approx I_C$ , da  $I_C \gg I_B$ .

Berechnung des Spannungsteilers ergibt

$$\frac{U_{R2}}{U_b} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

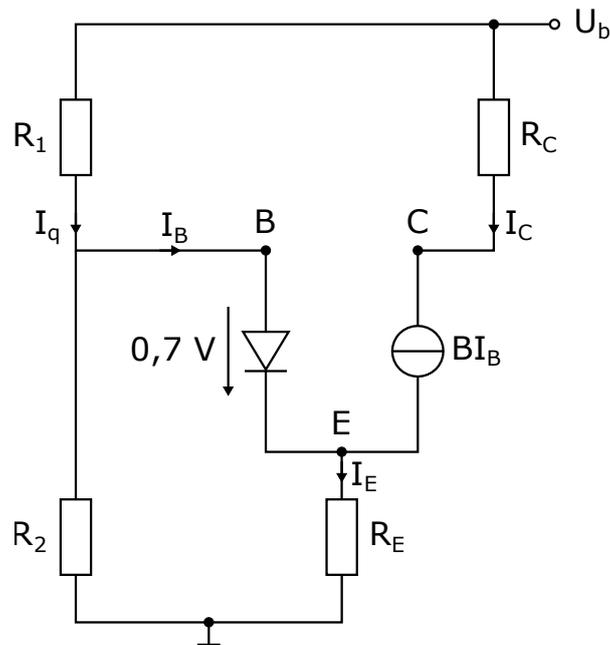


Abbildung 3

Berechnung der unbekanntnen Spannung  $U_{R2}$  über

$$U_{R2} = 0,7\text{ V} + U_{RE} = 0,7\text{ V} + R_E \cdot I_C = 2,9\text{ V}$$

ergibt für den Widerstand  $R_2$

$$R_2 = \frac{R_2 \cdot (U_b - U_{R2})}{U_{R2}} = 7,51\text{ k}\Omega.$$

damit wird

$$I_q = \frac{U_{R2}}{R_2} = 1,61\text{ mA}$$

**d)** Der Kollektor-Vorwiderstand berechnet sich zu:

$$U_b = I_C \cdot (R_C + R_E) + U_{CE}$$

$$\rightarrow R_C = \frac{U_b - U_{CE}}{I_C} - R_E = 3,9\text{ k}\Omega$$

**e)** Aus dem Datenblatt kann mit  $I_C = 2\text{ mA}$  und  $U_{CE} = 5\text{ V}$ ,  $B = 290$  aus der Spalte „Typ“ abgelesen werden. (Gleichstromverstärkung (DC Current Gain), Symbol:  $h_{FE}$ ).

$$I_B = \frac{I_C}{B} = 6,9\text{ }\mu\text{A} (\ll I_q)$$

Da kein  $U_T$  angegeben ist, wird  $U_T = 26 \text{ mV}$  angenommen.

$$S = \frac{I_C}{U_T} = 76,92 \text{ mS}$$

f) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 4 zu sehen.

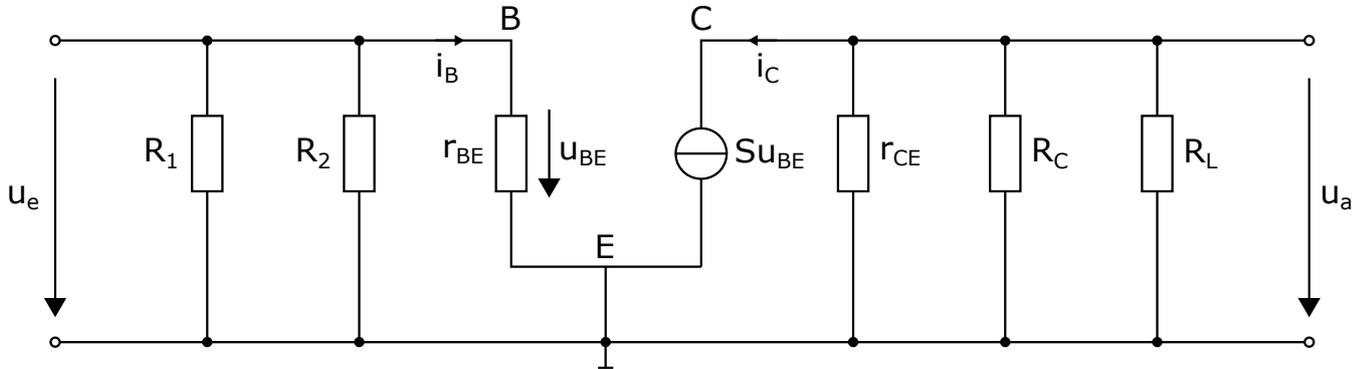


Abbildung 4

g) Der Kleinsignal-Eingangswiderstand berechnet sich zu

$$r_e = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{BE}, \text{ mit } r_{BE} = \frac{\beta}{S}.$$

Aus dem Datenblatt kann bei gegebenem Arbeitspunkt  $\beta = 330$  aus der Spalte „Typ“ abgelesen werden (Kleinsignal Stromverstärkung (Small-Signal Current Gain), Symbol:  $h_{fe}$ ).

$$r_{BE} = \frac{\beta}{S} = 330 \cdot 76,91 \text{ mS} = 4,3 \text{ k}\Omega$$

$$r_e = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot r_{BE}}{R_1 r_{BE} + R_2 r_{BE} + R_1 R_2} = 1,085 \text{ k}\Omega$$

f) Ausgangswiderstand  $r_a$ :

$$r_a = R_C \parallel R_L$$

für  $R_L = \infty \rightarrow r_a = R_C = 3,9 \text{ k}\Omega$   
 für  $R_L = 3,9 \text{ k}\Omega \rightarrow r_a = 1,95 \text{ k}\Omega$

Kleinsignal-Spannungsverstärkung  $A$ :

$$A = \frac{u_a}{u_e} = -S \cdot r_a$$

$$\text{für } R_L = \infty \rightarrow A = -300$$

$$\text{für } \rightarrow A = R_L = -150$$

e) Die Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung besitzt im Vergleich zu einer „normalen“ Emitterschaltung eine geringeren Temperaturabhängigkeit und die Verstärkung ist nur noch von Widerständen abhängig. Der Nachteil der Schaltung ist eine kleinere Verstärkung.

### Aufgabe 3

a) Bei der Schaltung handelt es sich um eine Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung.

b) Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 5 zu sehen.

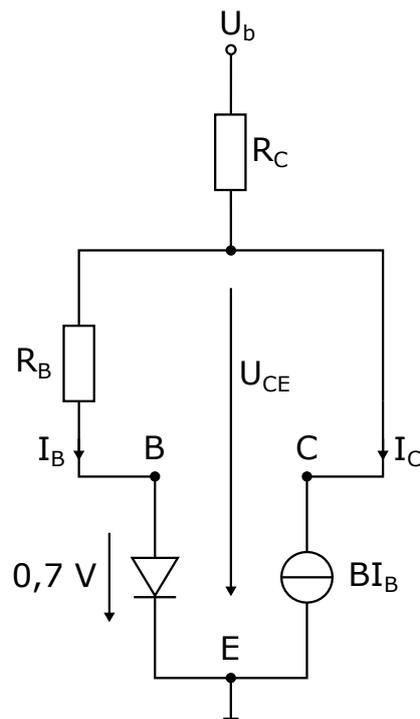


Abbildung 5

c) Arbeitspunktbestimmung:

1. Bestimmung von  $I_B$ :

$$0 = U_b - I \cdot R_C - I_B \cdot R_B - 0,7V = 0$$

$$I = I_B + I_C \text{ mit } I_C = B \cdot I_B$$

$$I = I_B(1 + B)$$

$$I_B = \frac{U_b - 0,7V}{(1 + B)R_C + R_B} = 7,9 \mu A$$

2. Bestimmung von  $I_C$

$$I_C = B \cdot I_B = 948 \mu A$$

3. Bestimmung von  $U_{CE}$

$$U_{CE} = U_b - I \cdot R_C = U_b - I_B(1 + B) \cdot R_C = 2,44 V$$

d) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 6 zu sehen.

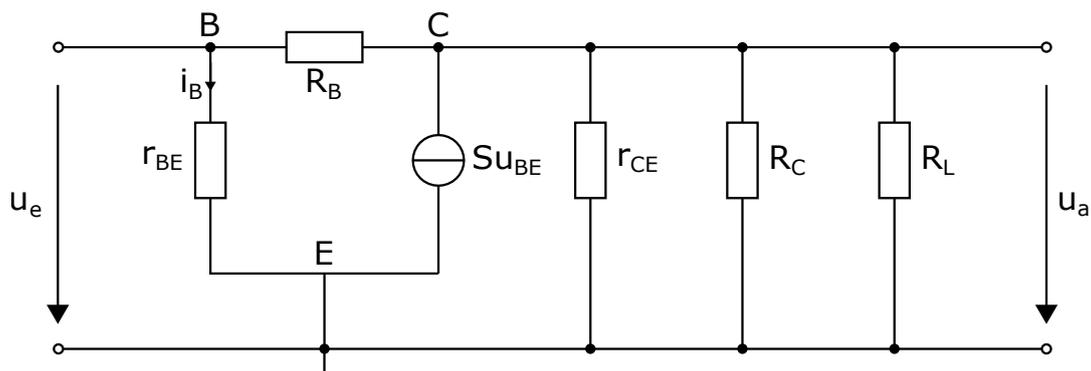


Abbildung 6

e) Kleinsignal-Spannungsverstärkung  $A = \frac{u_a}{u_e}$  berechnen.

1. Schritt: Ersatzschaltbild vereinfachen

Berechnung von  $r_{BE}$

$$\begin{aligned} r_{BE} &= \frac{\beta}{S}, \text{ mit } S = \frac{I_C}{U_T} = 36,46 \text{ mS} \\ &= 3,29 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Berechnung von  $R_X$  mit der Annahme von  $r_{CE} \rightarrow \infty$ :

$$R_X \approx R_C \parallel R_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} = 3,2 \text{ k}\Omega$$

Dadurch vereinfacht sich das Ersatzschaltbild wie in Abbildung 7 gezeigt.

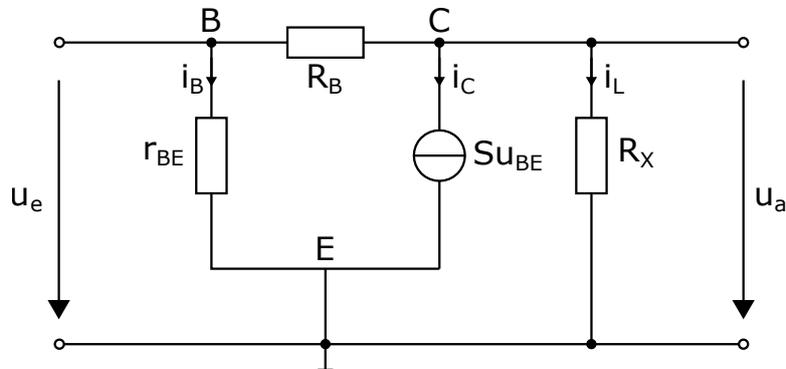


Abbildung 7

**2. Schritt:** Welche Werte sind gegeben?

geg:  $r_{BE}, S, R_B, R_X, \beta$

**3. Schritt:** Gleichungen aufstellen.

$$u_e = u_{BE} = i_B \cdot r_{BE} \quad (1)$$

$$u_e = i \cdot R_B + u_a \quad (2)$$

$$u_a = i_L \cdot R_X \quad (3)$$

$$u_{BE} = i \cdot R_B + u_{CE} \quad (4)$$

$$i = i_C + i_L \quad (5)$$

$$i_C = \beta \cdot i_B \quad (6)$$

**4. Schritt:** Zusammenhang zwischen  $u_a$  und  $u_e$  finden.

Gleichung 4 zeigt den Zusammenhang zwischen  $u_a$  und  $u_e$ . Für  $i$  kann Gleichung 5 eingesetzt werden.

$$u_e = i \cdot R_B + u_a = (i_C + i_L) \cdot R_B + u_a$$

Für  $i_C$  kann Gleichung 6 und für  $i_L$  Gleichung 3 eingesetzt werden.

$$u_e = \left( \beta i_B + \frac{u_a}{R_X} \right) \cdot R_B + u_a$$

Schließlich kann noch für  $i_B$  Gleichung 1 eingesetzt werden.

$$u_e = \left( \beta \frac{u_e}{r_{BE}} + \frac{u_a}{R_X} \right) \cdot R_B + u_a$$

Nun muss nur noch nach  $u_a/u_e$  umgeformt werden.

$$\begin{aligned} \left( 1 - \frac{\beta \cdot u_e}{r_{BE}} \right) u_e &= \left( \frac{R_B}{R_X} + 1 \right) u_a \\ \frac{u_a}{u_e} &= \frac{1 - \beta \frac{R_B}{r_{BE}}}{1 + \frac{R_B}{R_X}} = -115 \end{aligned}$$

f) Unter der Annahme, dass  $r_{BE}$  sehr groß ist, kann dieser vernachlässigt werden. Dadurch ergibt sich

$$r_e = \frac{u_e}{i_e} = \frac{u_e}{\frac{u_e - u_a}{R_B}} = \frac{R_B}{1 - A} = 1,9 \text{ k}\Omega$$

g) Der Vorteil der Emitterschaltung mit Spannungsgegenkopplung ist der sehr gut kontrollierbare Eingangswiderstand. Der Nachteil der Schaltung ist die verringerte Verstärkung im Vergleich zur „normalen“ Emitterschaltung.

## Aufgabe 4

a) In Abbildung 8 ist das Eingangs- und Ausgangskennlinienfeld zu sehen.

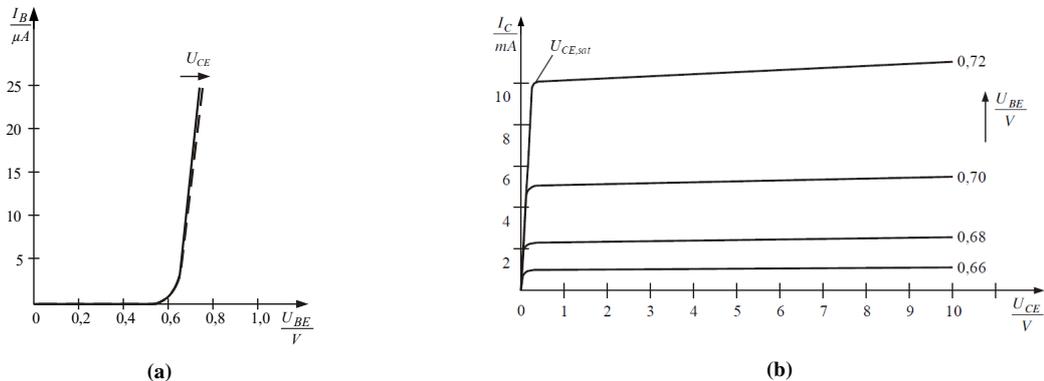


Abbildung 8: a) Eingangskennlinienfeld und b) Ausgangskennlinienfeld eines Bipolartransistors [aus ES Skript].

b) Hier gibt es mehrere richtige Lösungen. In der Vorlesung wurde vor allem auf die folgenden beiden Punkte hingewiesen:

- Der Ausgangswiderstand des Bipolartransistors ist sehr groß.
- Die Basis des Bipolartransistors ist sehr klein.

c) Unter dem Early-Effekt versteht man, dass auch im Normalbetrieb der Kollektorstrom von der Kollektor-Emitter Spannung Abhängig ist und somit der Ausgangswiderstand des Bipolartransistors nicht unendlich groß ist. Die extrapolierten Kennlinien des Ausgangskennlinienfeldes schneiden sich näherungsweise in einem Punkt, bei der Early-Spannung  $U_A$ .