

## Elektronische Schaltungen SS 2022

### 3. Tutorium

### Bipolartransistoren

#### Aufgabe 1 (Emitter-Schaltung)

a) Da der Kollektorstrom  $I_C = 3 \text{ mA}$  betragen soll, muss für den Basisstrom gelten:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 30 \mu\text{A}$$

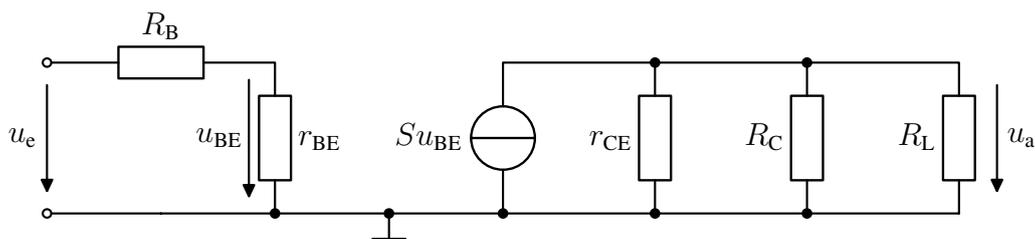
Für den Basiswiderstand  $R_B$  muss dann gelten:

$$R_B = \frac{1 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{30 \mu\text{A}} = 10 \text{ k}\Omega$$

b) Aus der Masche über  $U_b$ ,  $R_C$  und dem Transistor folgt:

$$U_{CE} = U_b - I_C R_C = 5 \text{ V} - 3 \text{ mA} \cdot 500 \Omega = 3,5 \text{ V}$$

c)



(1 Pt. für die Reihenschaltung aus  $R_B$  und  $R_{BE}$ , 1 Pt. für die parallelgeschaltete Widerstände am Ausgang, 1 Pt für korrekt geschaltete Stromquelle)

Der Widerstand  $r_{CE}$  modelliert den Early-Effekt. Er kann nach folgender Formel bestimmt werden:

$$r_{CE} = \frac{\delta U_{CE}}{\delta I_C} = \frac{|U_A| + U_{CE}}{I_C} = 51,2 \text{ k}\Omega$$

Der Early-Effekt hat in diesem Fall nur einen geringen Einfluss auf das Kleinsignalverhalten der Schaltung. Für grobe Schätzungen könnte  $r_{CE}$  als Leerlauf genähert werden.

d) Der Eingangswiderstand  $r_e$  setzt sich aus der Reihenschaltung von  $R_B$  und  $r_{BE}$  zusammen:

$$r_{BE} = \frac{\beta U_T}{I_C} = 866,7 \Omega$$

$$r_e = R_B + r_{BE} = 10,87 \text{ k}\Omega,$$

Der Ausgangswiderstand setzt sich aus der Parallelschaltung von  $r_{CE}$ ,  $R_C$  und  $R_L$  zusammen:

$$r_a = (r_{CE} || R_C || R_L) = \left( \frac{1}{51,2 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{500 \Omega} + \frac{1}{750 \Omega} \right)^{-1} = 298,3 \Omega$$

*Hinweis:* da  $r_{CE}$  viel größer als  $R_C$  und  $R_L$  ist, kann es vernachlässigt werden. Dann ist  $r_a \approx 300 \Omega$ .

e) **Wichtig:** Die Eingangsspannung fällt nicht vollständig zwischen Basis und Emitter vom Bipolartransistor ab. Anstatt dessen bilden  $R_B$  und  $r_{BE}$  einen Spannungsteiler.

$$u_{BE} = \frac{r_{BE}}{r_{BE} + R_B} \cdot u_e = 0,08 \cdot u_e$$

Für die Kleinsignalspannungsverstärkung  $\frac{u_a}{u_{BE}}$  der Schaltung gilt:

$$A_0 = \frac{u_a}{u_{BE}} = -S r_a = -34,3,$$

mit

$$S = \frac{I_C}{U_T} = 115,4 \text{ mS}$$

Insgesamt ist die Betriebsspannungsverstärkung:

$$A_B = \frac{u_a}{u_{BE}} = -0,08 \cdot A_0 = -2,74$$

f) Diese Beschaltung eignet sich nicht für einen Verstärker. Da nur ein Teil der Eingangsspannung  $u_e$  zwischen Basis und Emitter des Transistors abfällt, verringert sich die gesamte Spannungsverstärkung auf den Faktor 0,08.

## Aufgabe 2 (SPICE-Aufgabe)

a) Das Modell des Transistor kann mit folgender Zeile definiert werden:

```
.model IdealA2 NPN(Is=4e-15 Bf=150 VAF=180)
```

b) Abb. 1 und Abb. 2 zeigen jeweils die Simulationseinstellungen und ermittelten Kurven für den Basisstrom und den Kollektorstrom.

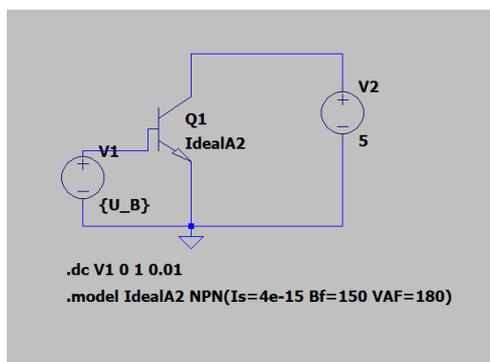


Abbildung 1

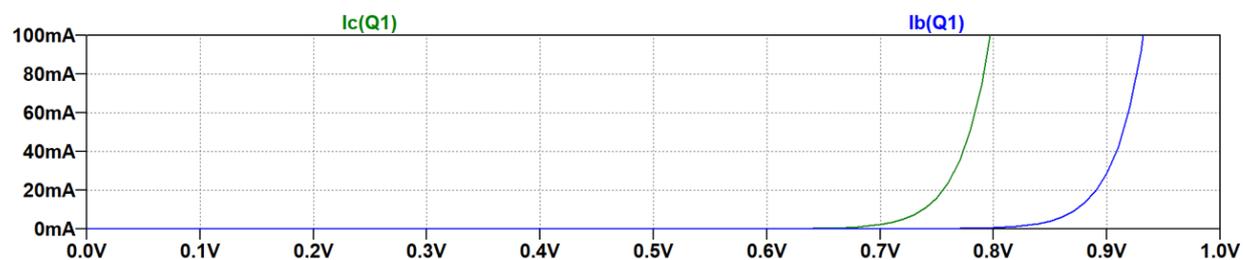


Abbildung 2

c) Das Schematic und die Simulationseinstellungen werden in Abb. 3 gezeigt. Das Ausgangskennlinienfeld wird in Abbildung 4 gezeigt.

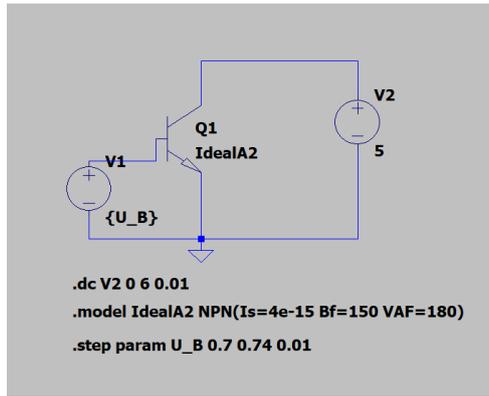


Abbildung 3

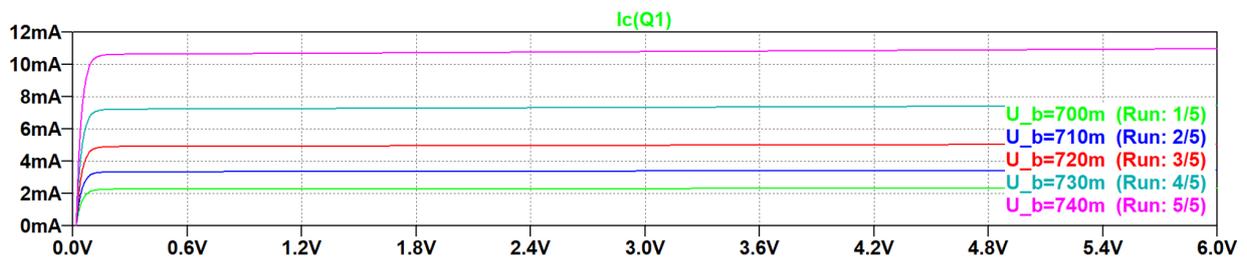


Abbildung 4

d) Die Early-Spannung muss im Modell geändert werden:

```
.model IdealA2 NPN(Is=4e-15 Bf=150 VAF=15)
```

Die resultierenden Ausgangskennlinien werden in Abb. 5 gezeigt:

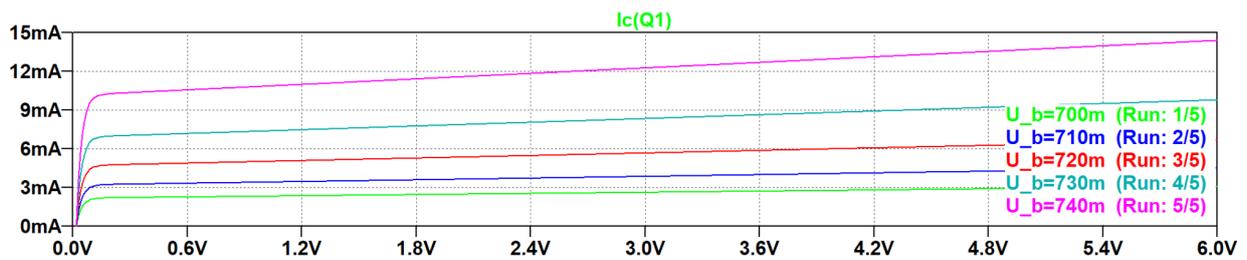


Abbildung 5

(1 Pt.)

e) Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen jeweils die Simulationseinstellungen und die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  gegenüber der Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE}$ .

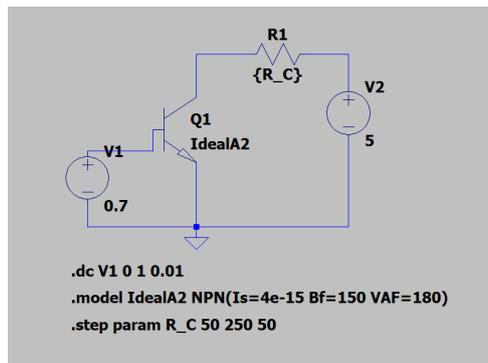


Abbildung 6

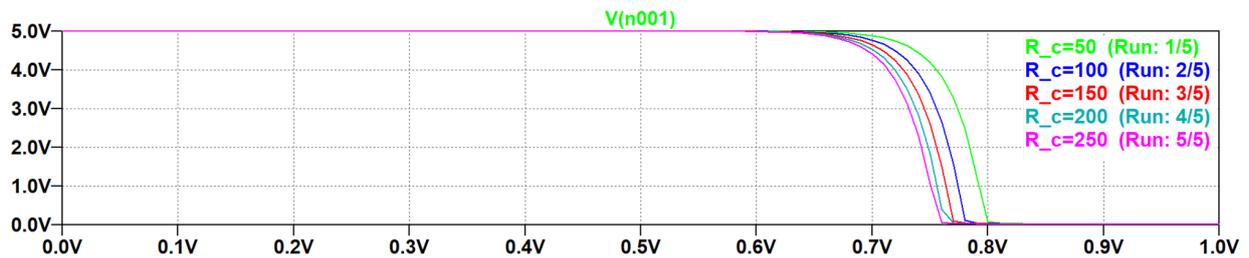


Abbildung 7

Auf Abbildung 7 können die Arbeitsbereiche vom Transistor festgestellt werden.

- Bis ca. 0,7 V ist die Eingangsdiode in Sperrbetrieb.
- Ab ca. 0,7 V steigt der Kollektorstrom und der Transistor wird in Normalbetrieb betrieben. Je nach Kollektor-Widerstand variiert die Steigung der Kurve. Diese entspricht bei Kleinsignalen der Spannungsverstärkung.
- Ab spätestens ca. 0,81 V ist der Kollektorstrom so groß, dass (fast) die gesamte Versorgungsspannung am Kollektor-Widerstand abfällt. Der Transistor ist dann in Sättigung.

### Aufgabe 3 (Kollektor-Schaltung)

a) Der Basisstrom beträgt:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 86 \mu\text{A}$$

Für den Emitterstrom gilt dann:

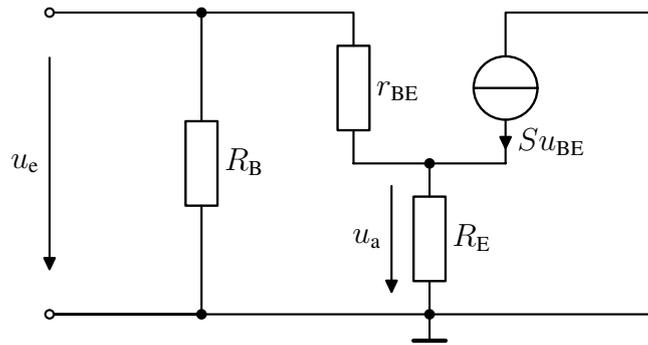


Abbildung 8: Kleinsignal-Ersatzschaltbild

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 17,3 \text{ mA}$$

*Hinweis:* Da  $\beta$  in der Regel deutlich größer als 1 ist, kann  $\beta + 1 \approx \beta$  angenommen werden. Dann gilt auch  $I_C \approx I_E$ .

Für die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  gilt:

$$U_{CE} = U_b - I_E R_E = 2,41 \text{ V}$$

Eine Masche durch  $R_B$ , die Basis-Emitter-Diode vom Transistor (mit der Spannung  $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ ) und den Emitter-Widerstand  $R_E$  liefert:

$$U_b = I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E$$

Dann gilt für den Basis-Widerstand  $R_B$ :

$$R_B = \frac{U_b - U_{BE} - I_E R_E}{I_B} = 19,84 \text{ k}\Omega$$

b)

c) Der Kleinsignal-Eingangswiderstand setzt sich aus der Parallelschaltung von  $R_B$  und dem Eingangswiderstand des Transistors zusammen.

$$r_e = R_B || (r_{BE} + (1 + \beta) R_E)$$

mit  $r_{BE} = \frac{U_T}{I_B} = 302,3 \Omega$

$$r_e = 19,84 \text{ k}\Omega || (302,3 \Omega + 30,15 \text{ k}\Omega) = 12,0 \text{ k}\Omega$$

Da der Early-Effekt vernachlässigbar ist, geht  $r_{CE} \rightarrow \infty$ . Außerdem ist  $R_E$  groß im Vergleich zu  $1/S$ . Es kann dann angenommen werden:

$$r_a = \frac{1}{S} = 1,51 \Omega$$

mit  $S = \frac{I_C}{U_T} = 661,5 \text{ mS}$ .

**d)** Für die Spannungsverstärkung gilt:

$$A = \frac{SR_E}{1 + SR_E} = 0.990 \approx 1$$

Wenn  $SR_E \gg 1$ , kann  $A = 1$  direkt angenommen werden.

## Aufgabe 4 (Zweistufiger Verstärker)

a) Um die richtige Basis-Emitter-Spannung einzustellen, muss der Spannungsabfall am zweiten Widerstand  $U_{RB2} = 0,8 \text{ V}$  sein. Da (näherungsweise) kein Strom in die Basis der ersten Stufe fließt, sind  $R_{B1}$  und  $R_{B2}$  als einfacher Spannungsteiler geschaltet:

$$U_{B2} = U_b \cdot \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

Damit sich der erwünschte Strom  $I_{RB}$  einstellt, muss zusätzlich gelten:

$$R_{B1} + R_{B2} = \frac{U_b}{I_{RB}} = 10 \text{ k}\Omega$$

Es folgt für die Widerstände

$$R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega \cdot \frac{U_{B2}}{U_b} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_{B1} = 10 \text{ k}\Omega - R_{B2} = 9 \text{ k}\Omega$$

b) Die Masche von  $U_b$  über  $R_{C1}$  und den Transistor  $T_1$  ergibt:

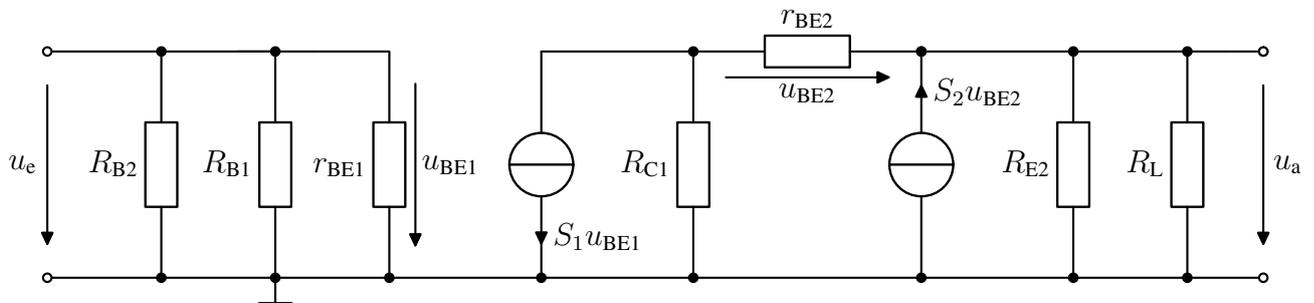
$$U_b = I_{C1} R_{C1} + U_{CE,T1}$$

$$R_{C1} = \frac{U_b - U_{CE,T1}}{I_C} = 1,3 \text{ k}\Omega$$

Da zwischen Basis und Emitter vom Transistor  $T_2$  eine Spannung von  $U_{BE,T2} = 0,8 \text{ V}$  abfällt, muss am Widerstand  $R_{E2}$  eine Spannung von  $U_{R2} = 2 \text{ V}$  abfallen. Bei dem gegebenen Kollektorstrom, liefert das ohmsche Gesetz:

$$R_{E2} = \frac{2 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 500 \Omega$$

c) Kleinsignal-Ersatzschaltbild:



d) Die Eingangsimpedanz der ersten Stufe setzt sich aus der Parallelschaltung von  $R_{B2}$ ,  $R_{B1}$  und  $r_{BE}$ .

$$r_e = R_{B2} || R_{B1} || r_{BE},$$

mit

$$S = \frac{I_C}{U_T} = 153,8 \text{ mS} \quad \text{und} \quad r_{BE} = \frac{\beta}{S} = \frac{100}{153,8 \text{ mS}} = 650,2 \Omega$$

$$r_{e,R1} = \left( \frac{1}{R_{B1}} + \frac{1}{R_{B2}} + \frac{1}{r_{BE1}} \right)^{-1} = 377,5 \Omega$$

Der Eingangswiderstand der Kollektor-Schaltung ( $T_2$ ) ist durch folgende Gleichung gegeben (Siehe Herleitung in den Vorlesungsfolien):

$$r_e = r_{BE} + (\beta + 1)R_E$$

Wie man auf dem ESB sieht, ist der Gesamtwiderstand am Emitter von  $T_2$  die Parallelschaltung von  $R_{E2}$  und  $R_L$ . Dann ist der Eingangswiderstand der zweiten Stufe gegeben durch:

$$r_{e,T2} = r_{BE} + (\beta + 1)(R_{E2} || R_L) = 5,245 \text{ k}\Omega$$

mit  $(R_{E2} || R_L) = 45,5 \Omega$  und  $r_{BE} = 650,2 \Omega$ .

Der Ausgangswiderstand der ersten Stufe ergibt sich auch der Parallelschaltung aus  $R_{C1}$  und dem Eingang der zweiten Stufe.

$$r_{a,T1} = R_{C1} || r_{e,T2} = 1,04 \text{ k}\Omega$$

Für hohe  $r_{CE}$  kann angenommen werden:

$$r_{a,T2} = \left( \frac{1}{S} || R_{E2} || R_L \right) = 5,69 \Omega$$

mit  $1/S = 6,5 \Omega$ .

Der Kleinsignal-Eingangswiderstand der Gesamtschaltung entspricht dem Kleinsignal-Eingangswiderstand der ersten Stufe und der Kleinsignal-Ausgangswiderstand der Gesamtschaltung entspricht dem Kleinsignal-Ausgangswiderstand der zweiten Stufe.

$$r_e = r_{e,T1}$$

$$r_a = r_{a,T2}$$

e) Die Gesamtverstärkung ergibt sich aus dem Produkt der Verstärkungen der einzelnen Stufen.

$$A_{\text{ges}} = A_1 A_2$$

Da der Basisstrom in den zweiten Transistor vernachlässigt werden kann, ist die Ausgangsimpedanz der ersten Stufe  $r_{a1} = R_{C1}$ . Für die Verstärkung  $A_1$  folgt:

$$A_1 = -S_1 r_{a,T1} = -159,9$$

mit  $S = \frac{I_C}{U_T} = 153,8 \text{ mS}$

Die Verstärkung einer Kollektor-Schaltung (zweite Stufe) ist gegeben durch:

$$A_2 = \frac{S(R_E || R_L)}{1 + S(R_E || R_L)} = 0,875$$

So ist die Gesamtverstärkung:

$$A_{\text{ges}} = A_1 \cdot A_2 = -139,9$$

Bei einer reinen Emitter-Schaltung (wie in Aufgabe 1) hängt die Ausgangsimpedanz und somit die Kleinsignal-Spannungsverstärkung von der Lastimpedanz ab. Obwohl die Kollektor-Stufe keine Verstärkung beiträgt, sorgt sie dafür, dass die erste Stufe unbelastet bleibt. So kann die gesamte zweistufige Schaltung eine stabile Signalverstärkung unabhängig vom Lastwiderstand  $R_L$  erzeugen. Außerdem ist die Ausgangsimpedanz der zweiten Stufe sehr gering.