

Elektronische Schaltungen SS 2021

3. Tutorium

Bipolartransistoren

Aufgabe 1 (Emitter-Schaltung)

a) Da der Kollektorstrom $I_C = 2,3 \text{ mA}$ beträgt, muss für den Basisstrom gelten:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 23 \mu\text{A}$$

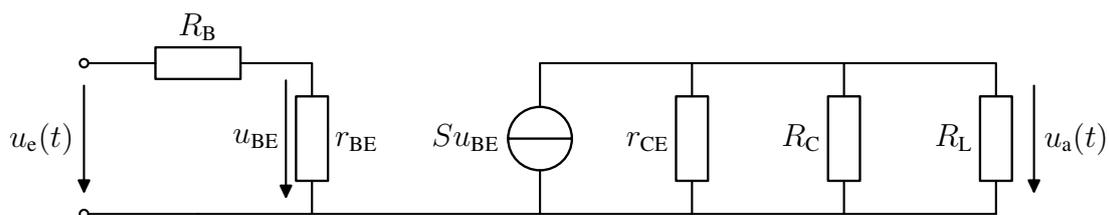
Für den Basiswiderstand R_B muss gelten:

$$R_B = \frac{3 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{23 \mu\text{A}} = 100 \text{ k}\Omega$$

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

$$U_{CE} = U_b - I_C R_C = 5,4 \text{ V}$$

c)



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

$$r_{CE} = \frac{\delta U_{CE}}{\delta I_C} = \frac{|U_A| + U_{CE}}{I_C} = 89,3 \text{ k}\Omega$$

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:

$$r_e = R_B + r_{BE} = 101,1 \text{ k}\Omega,$$

mit $r_{BE} = \frac{U_T}{I_B}$

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

$$r_a = (r_{CE} || R_C || R_L) = 661,6 \Omega$$

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

$$u_{BE} = u_e \frac{r_{BE}}{r_{BE} + R_B} = 0,011 u_e$$

Für die Gesamtverstärkung der Schaltung gilt:

$$u_a = -0,011 \cdot u_e S r_a$$

und

$$A_v = -0,011 \cdot S r_a = -0,644,$$

mit $S = \frac{I_C}{U_T} = 88,5 \text{ mS}$.

f) Diese Beschaltung eignet sich nicht für einen Verstärker. Da nur ein Teil der Eingangsspannung u_e am Transistor abfällt, verringert sich die gesamte Spannungsverstärkung. Im berechneten Fall wird das Signal sogar gedämpft.

Aufgabe 2 (SPICE-Aufgabe)

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

```
.model IdealA3 NPN(Is=1e-15 Bf=200 VAF=200)
```

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

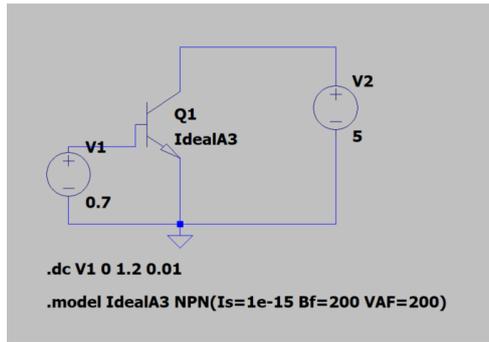


Abbildung 1

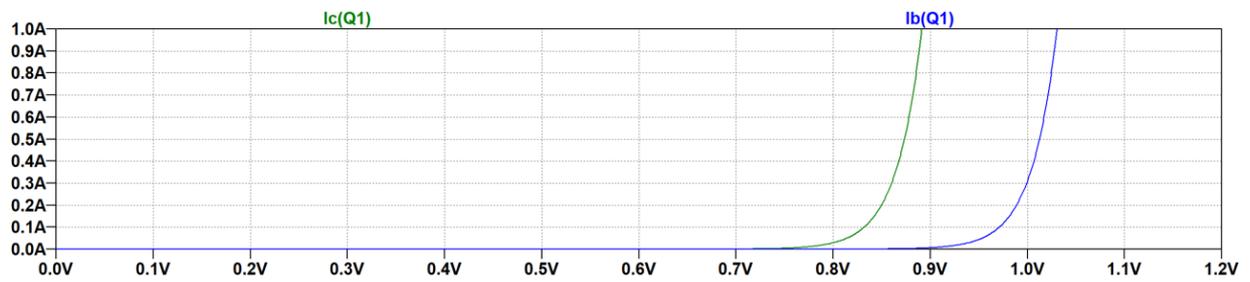


Abbildung 2

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

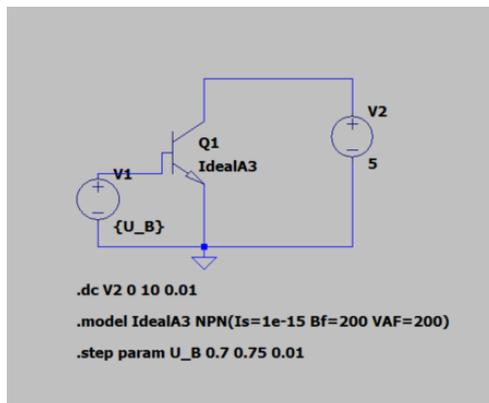


Abbildung 3

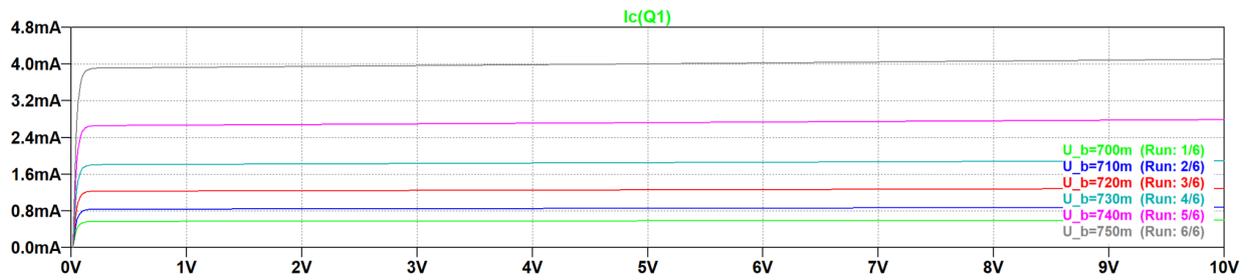


Abbildung 4

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

```
.model IdealA3 NPN(Is=1e-15 Bf=200 VAF=10)
```

Die resultierenden Ausgangskennlinien werden in Abb. 5 gezeigt:

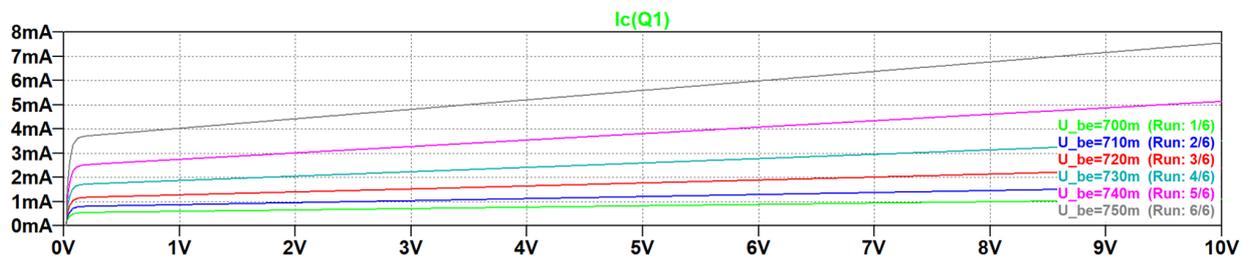


Abbildung 5

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

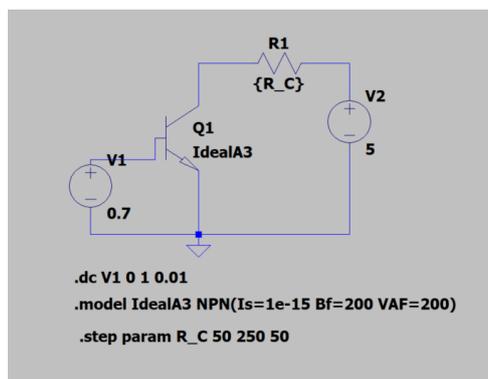


Abbildung 6

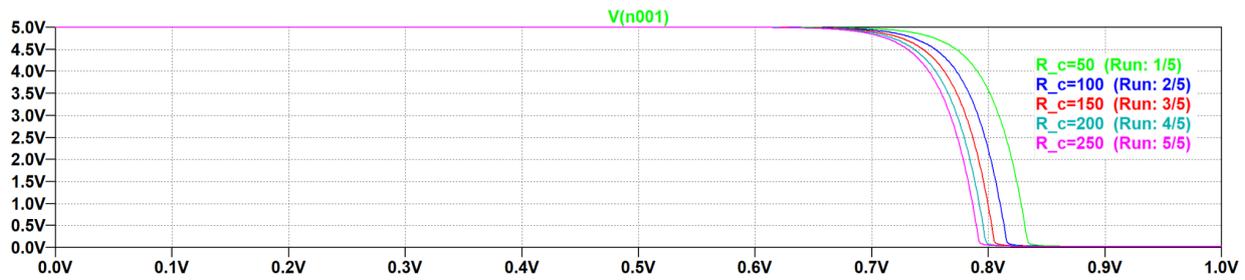


Abbildung 7

Auf Abb. 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 ist die Steigung der Kurve anders. 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:

$$I_E = (\beta + 1)I_B = 17,29 \text{ mA}$$

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

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

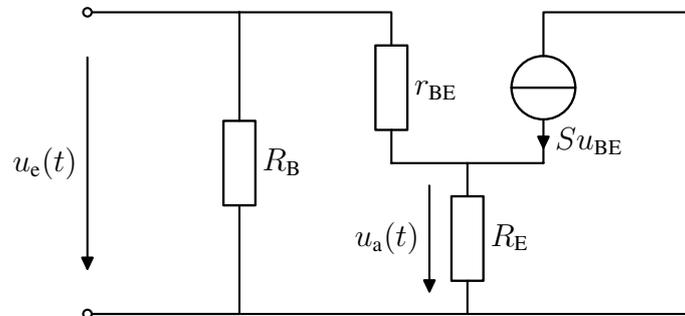
Eine Masche durch R_B , die Basis-Emitter-Diode vom Transistor (mit der Spannung $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$) und den Emitter-Widerstand R_E liefert:

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

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 Eingangswiderstand setzt sich aus der Parallelschaltung von R_B und dem Eingangswiderstand des Transistors zusammen.

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

,

$$\text{mit } r_{BE} = \frac{U_T}{I_B} = 303,3 \Omega$$

$$r_e = 19,84 \text{ k}\Omega || (30,5 \text{ k}\Omega) = 12 \text{ k}\Omega$$

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

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

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

d) Für die Spannungsverstärkung gilt:

$$A_V = \frac{SR_E}{1 + SR_E} = 0,990 \approx 1$$

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:

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

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

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

$$R_{B1} = 9 \text{ k}\Omega$$

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

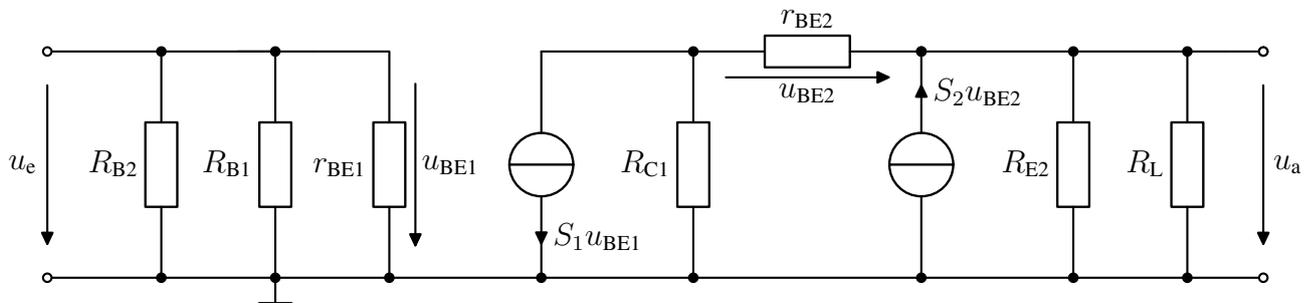
$$U_b = I_{C1} R_{C1} + U_{CE,T1}$$

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

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

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

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

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

$$r_e = r_{BE} + \beta R_E$$

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 die angenommen werden:

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

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

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 Ausgangsim-

pedanz der ersten Stufe $R_{a1} = R_{C1}$. Für die Verstärkung A_1 folgt:

$$A_1 = -S_1 r_{a,T1} = -159,9$$
$$\text{mit } S = \frac{I_C}{U_T} = 153,8 \text{ mS}$$

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:

$$A_{\text{ges}} = A_1 A_2 = -139.9$$

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.