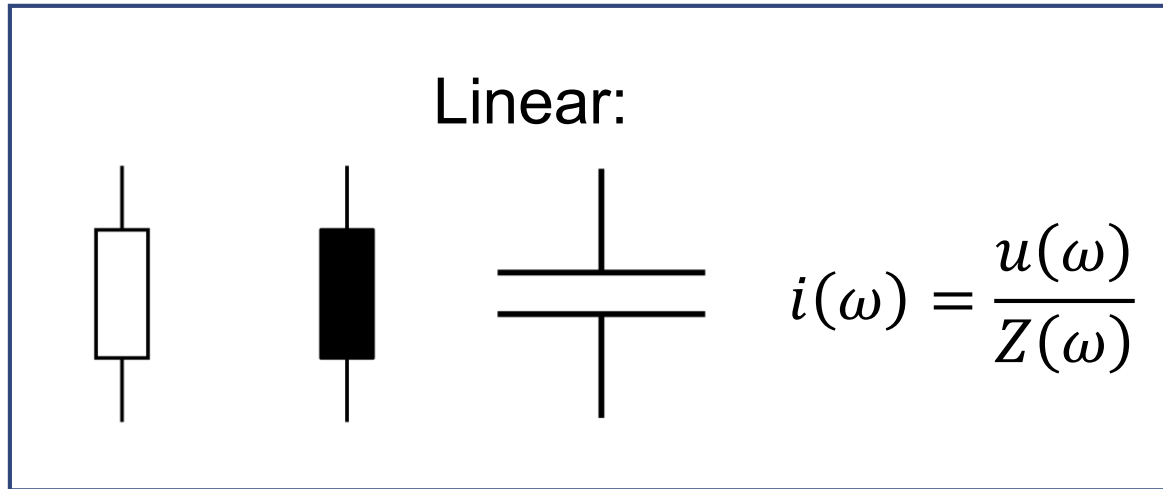


Übung 3, Bipolartransistoren

Daniel Gil Gaviria

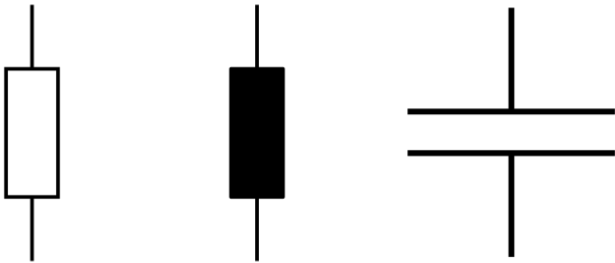


Was bisher geschah...



Was bisher geschah...

Linear:



$$i(\omega) = \frac{u(\omega)}{Z(\omega)}$$

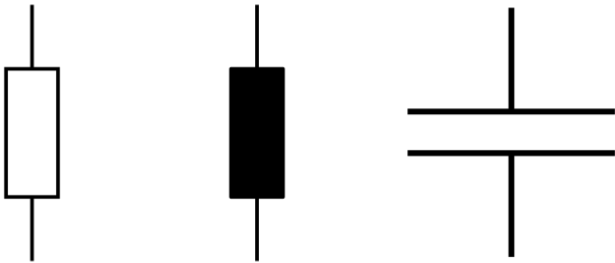
Nichtlinear



$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

Was bisher geschah...

Linear:

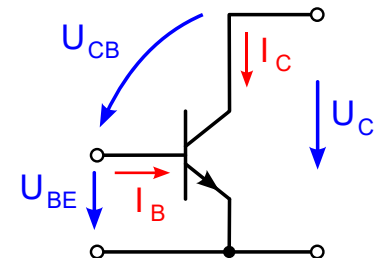


$$i(\omega) = \frac{u(\omega)}{Z(\omega)}$$

Nichtlinear

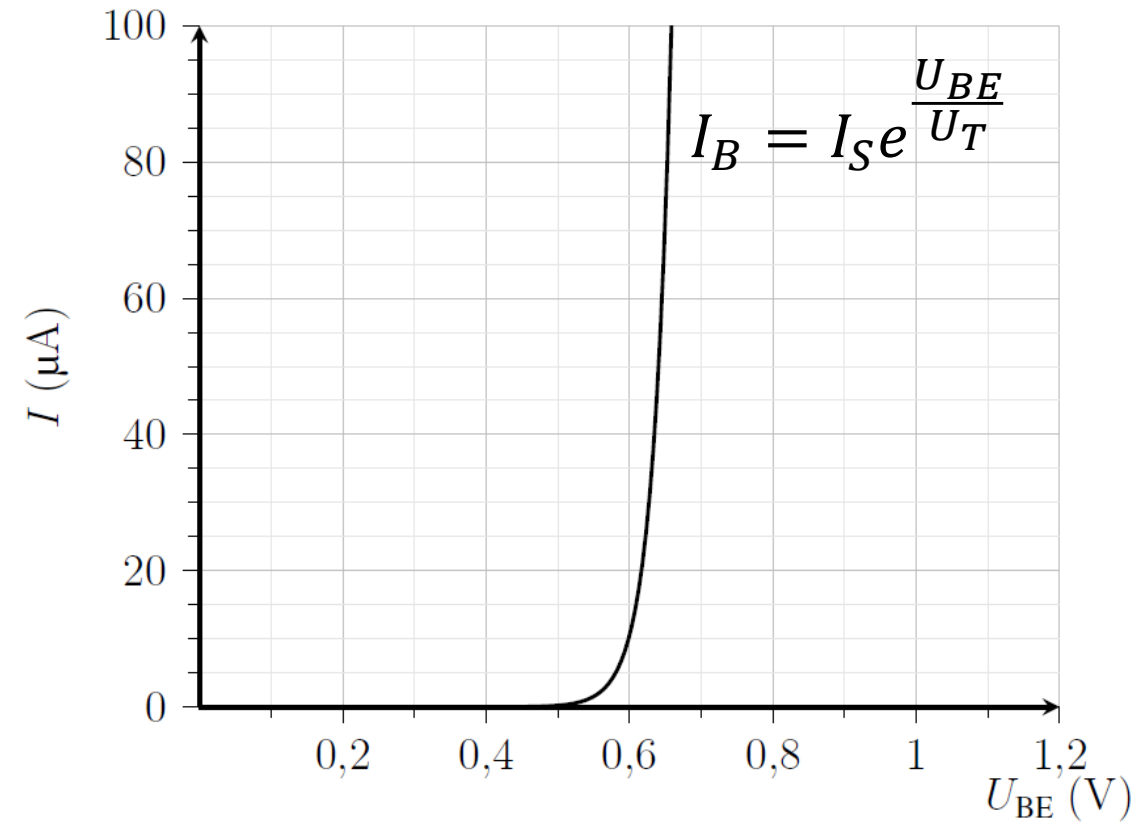
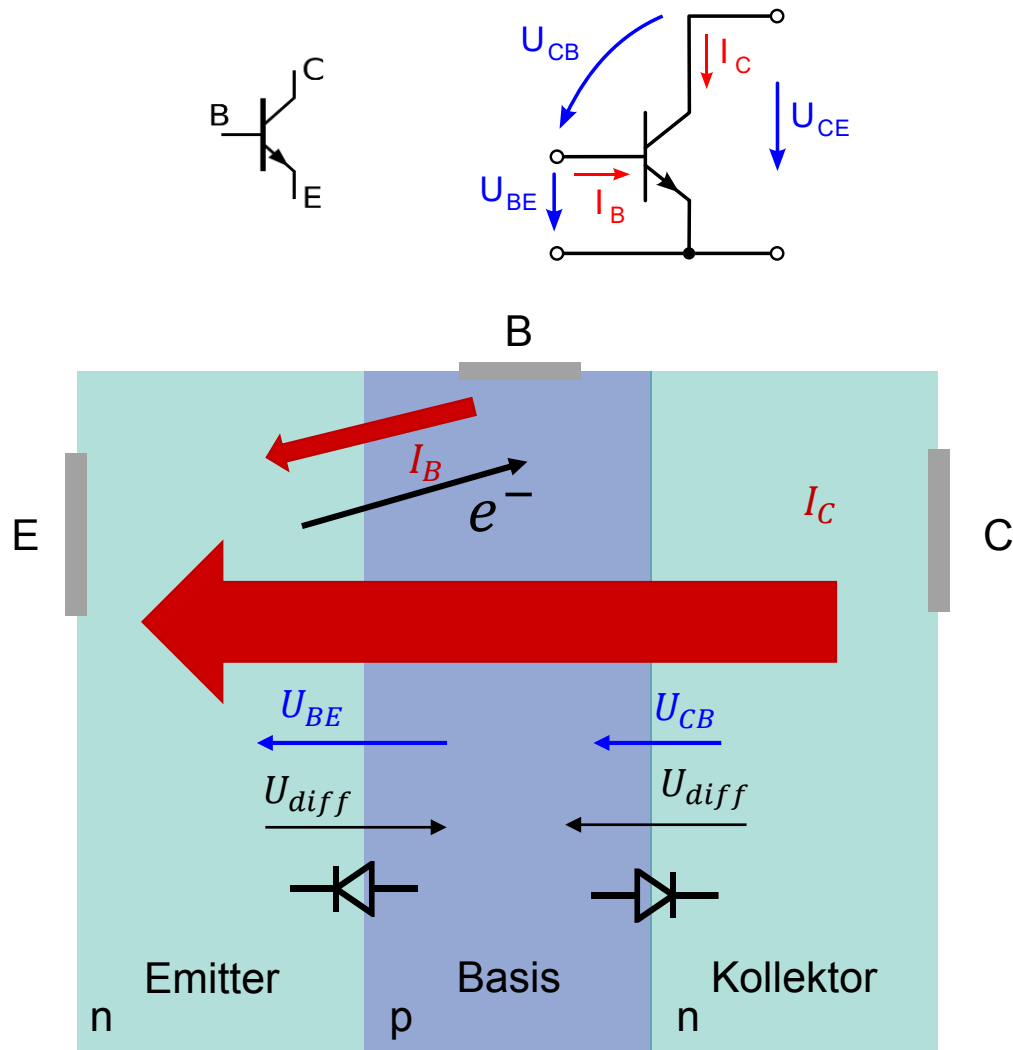


$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

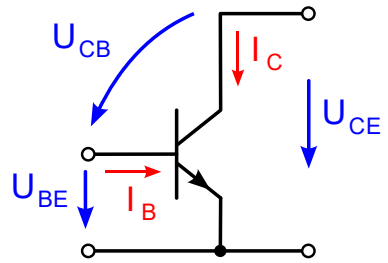


$$I_C = \beta I_{B,S} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_A} \right)$$

NPN Transistor

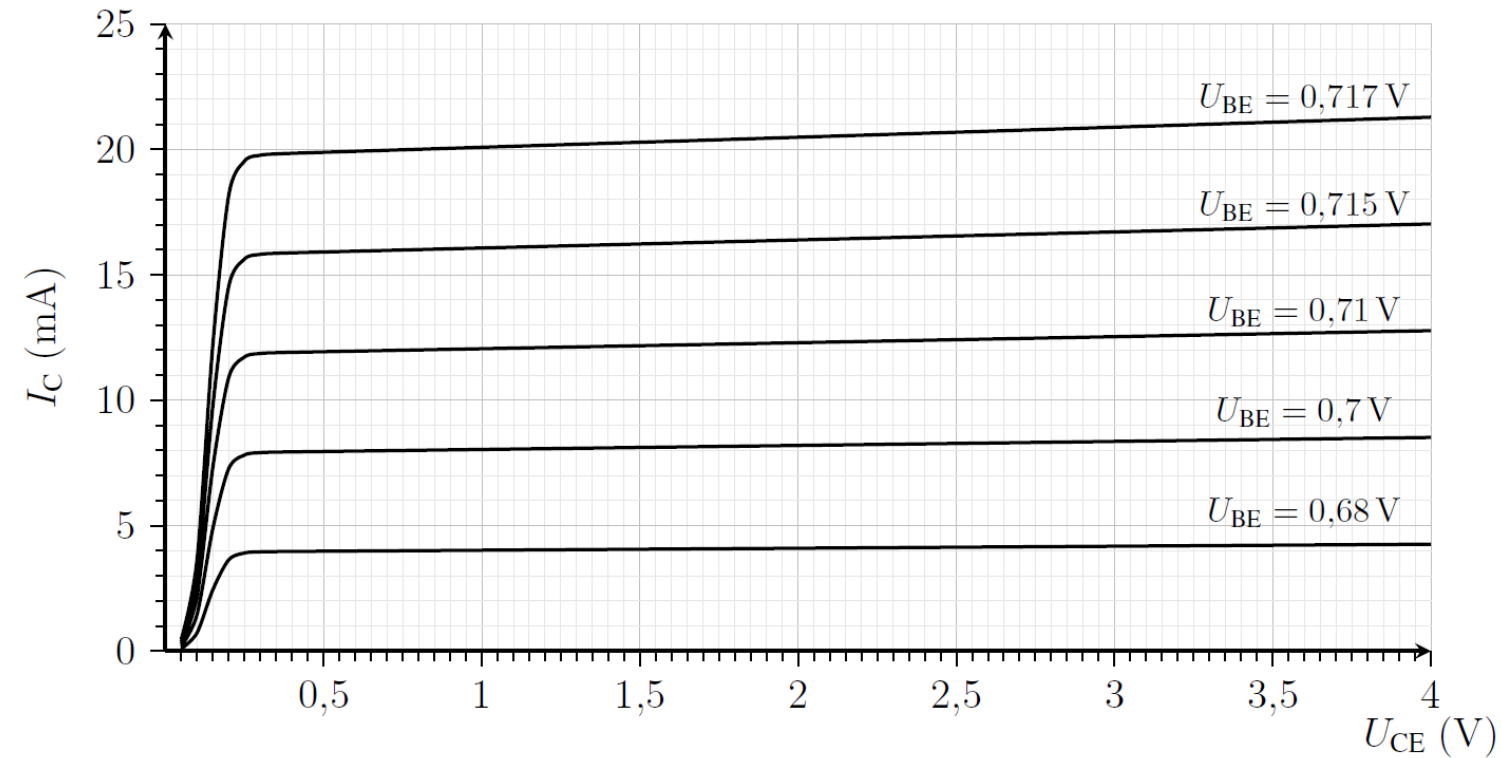
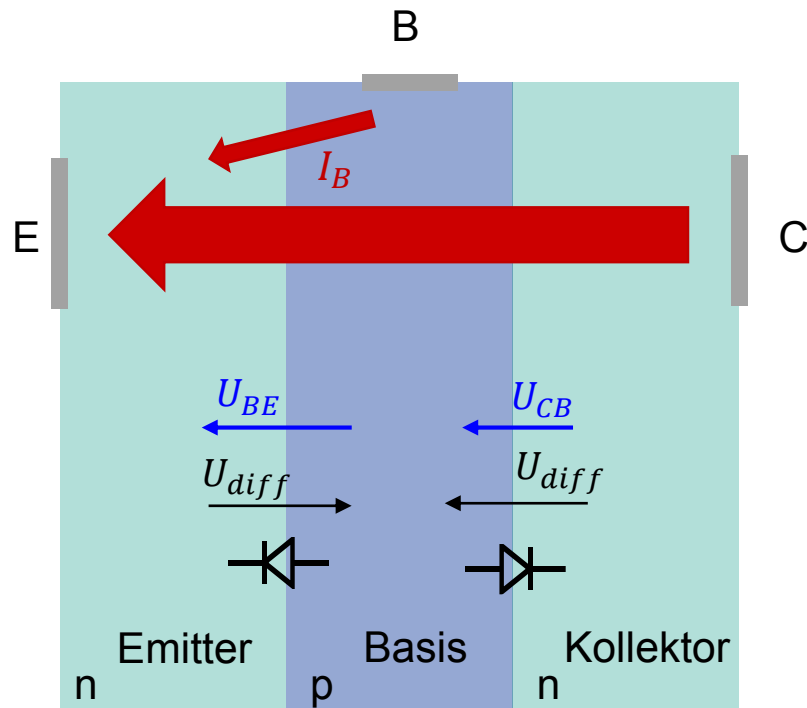


Abhängigkeit von U_{CE}

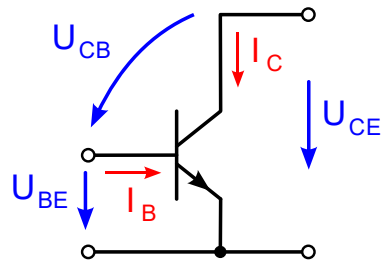


$$U_{CE} > U_{BE}$$

$$U_{CB} > 0$$

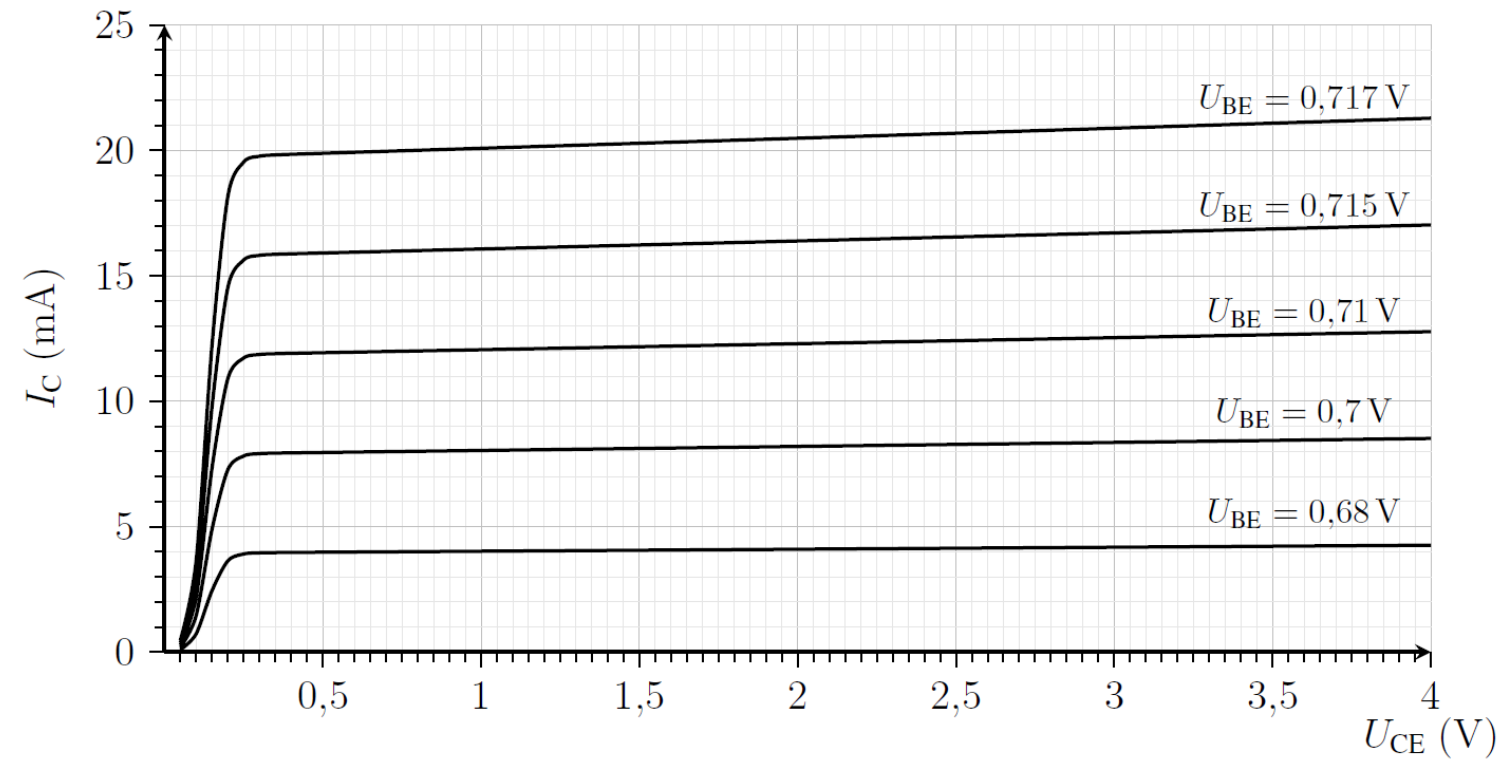
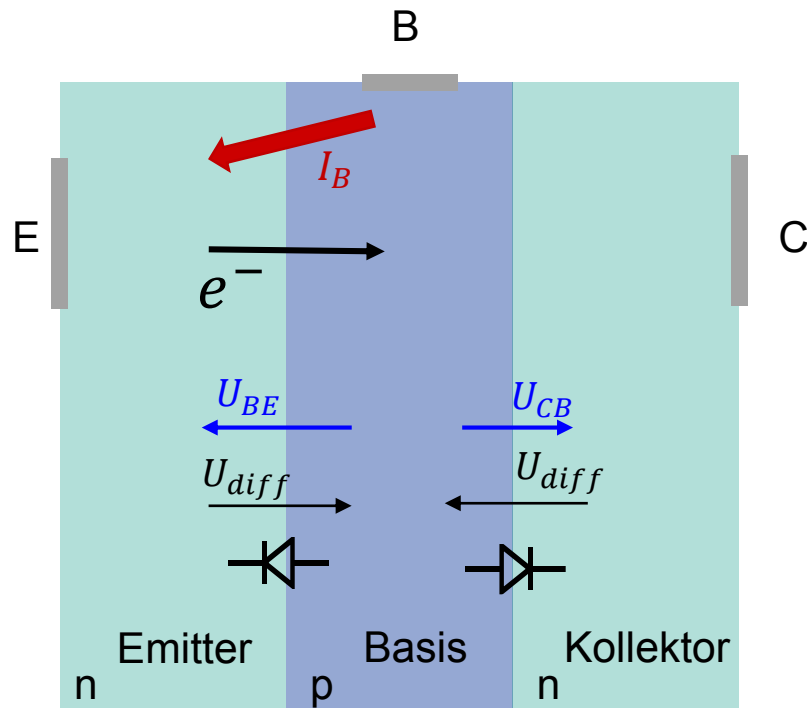


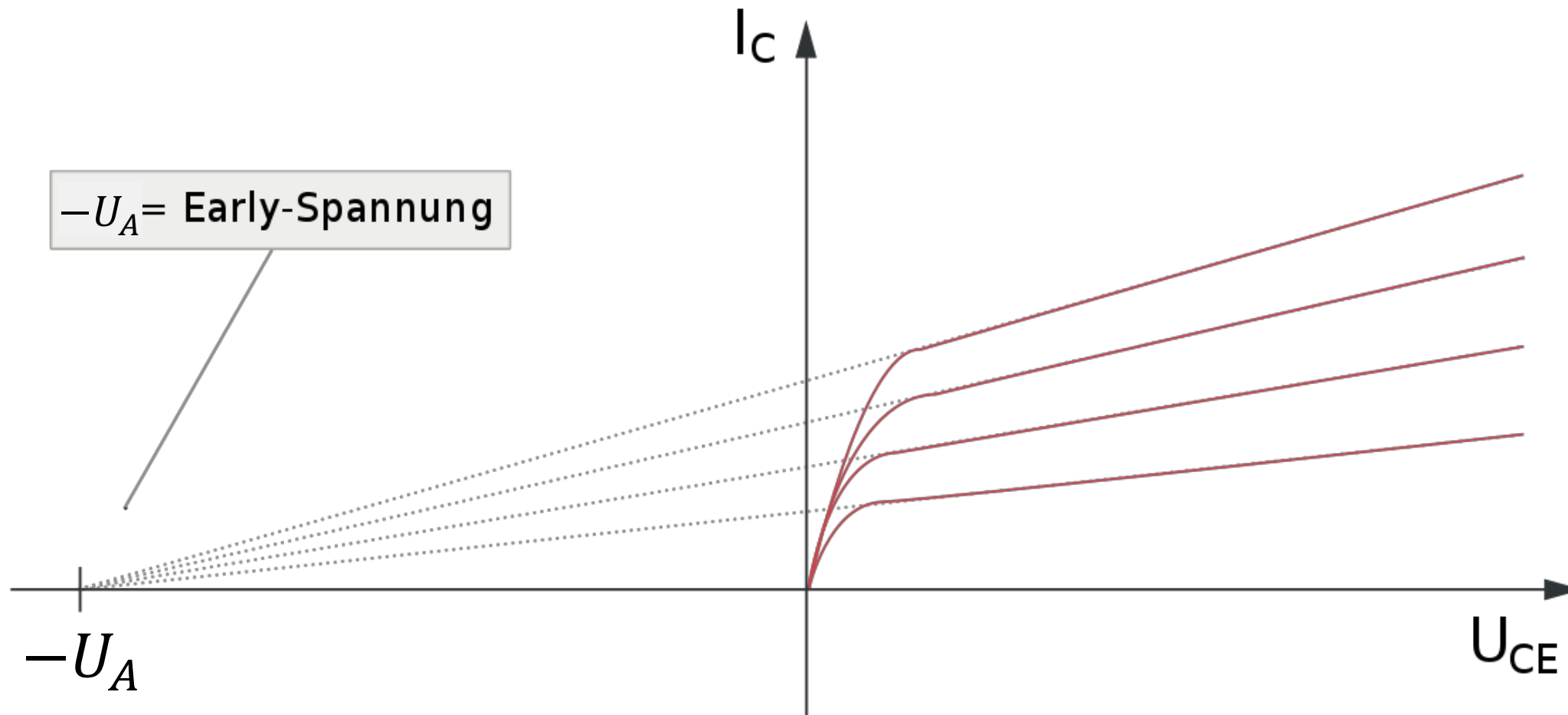
Abhängigkeit von U_{CE}



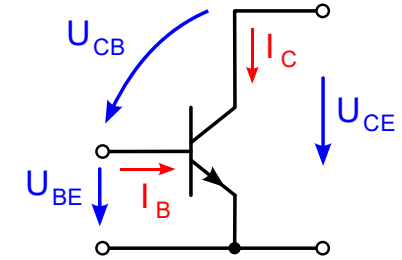
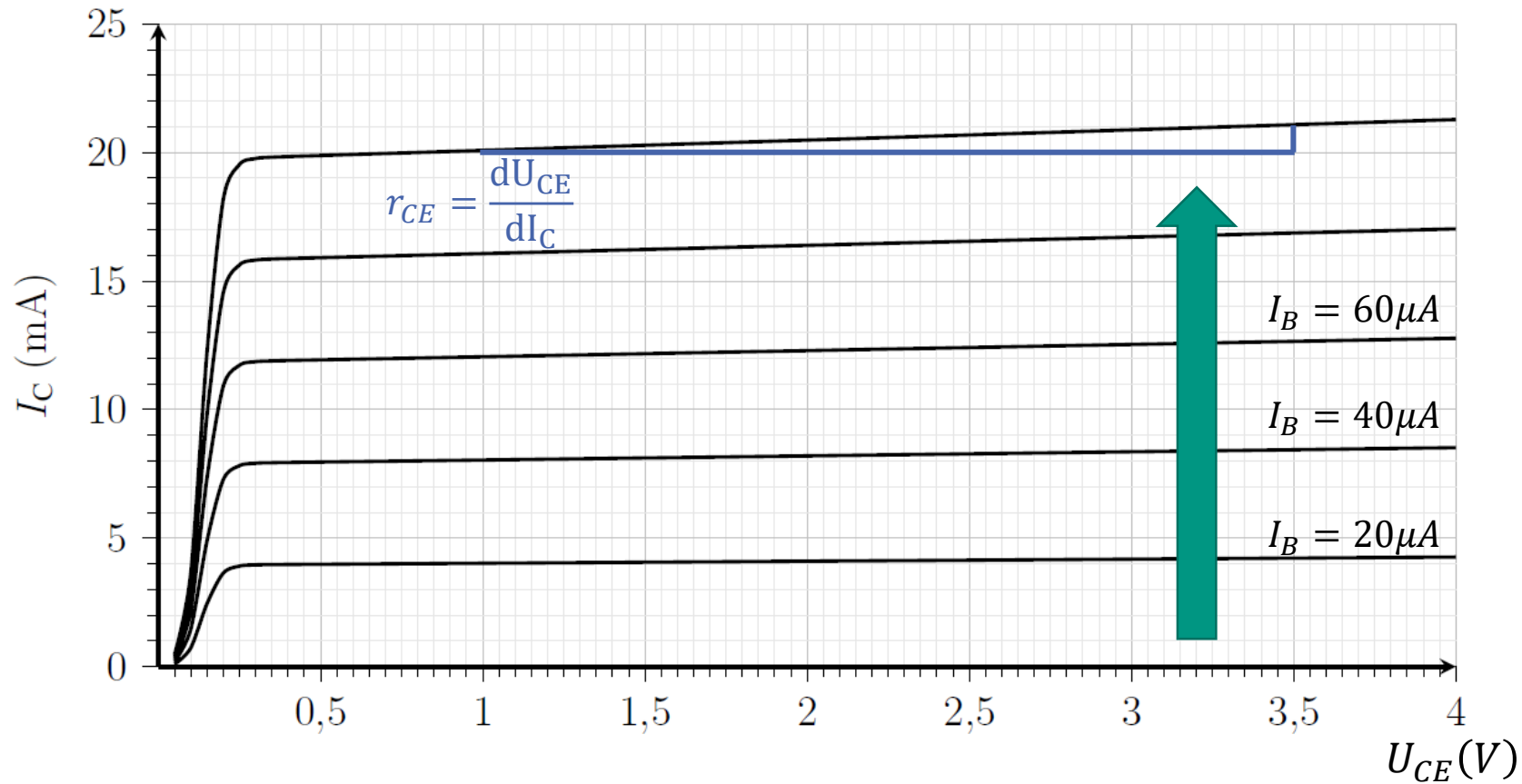
$$U_{CE} < U_{BE}$$

$$U_{CB} < 0$$



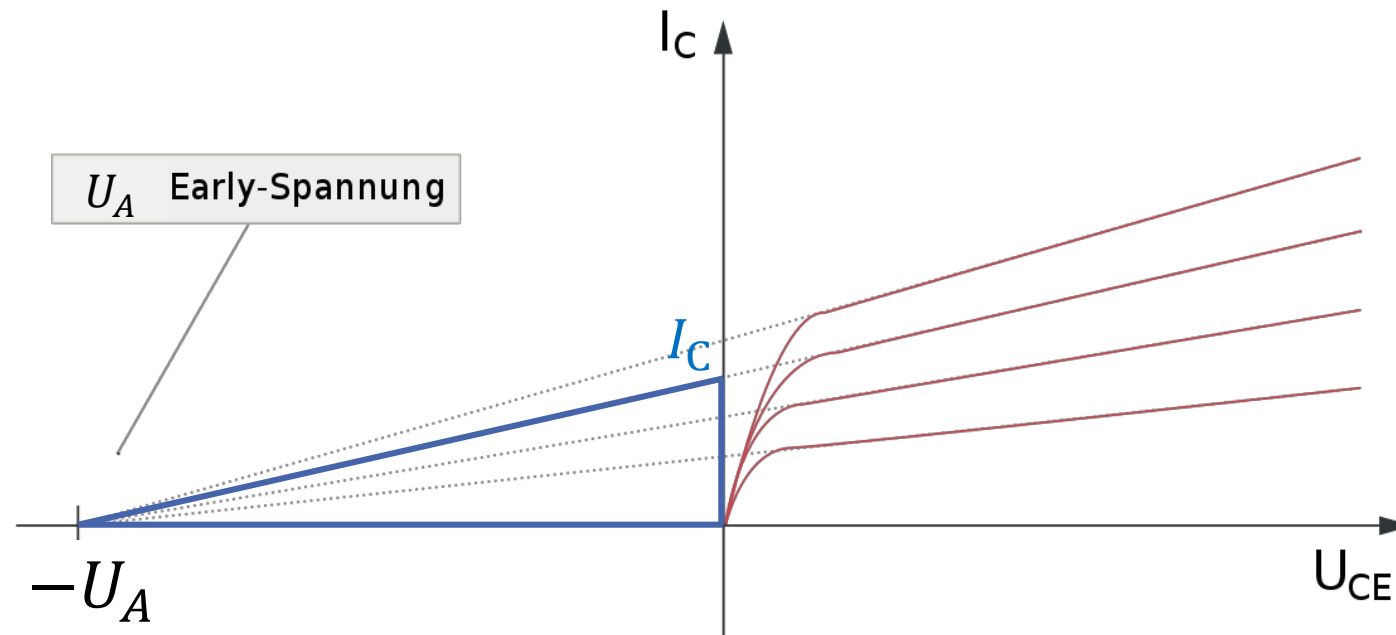


Ausgangskennlinienfeld und Early Effekt



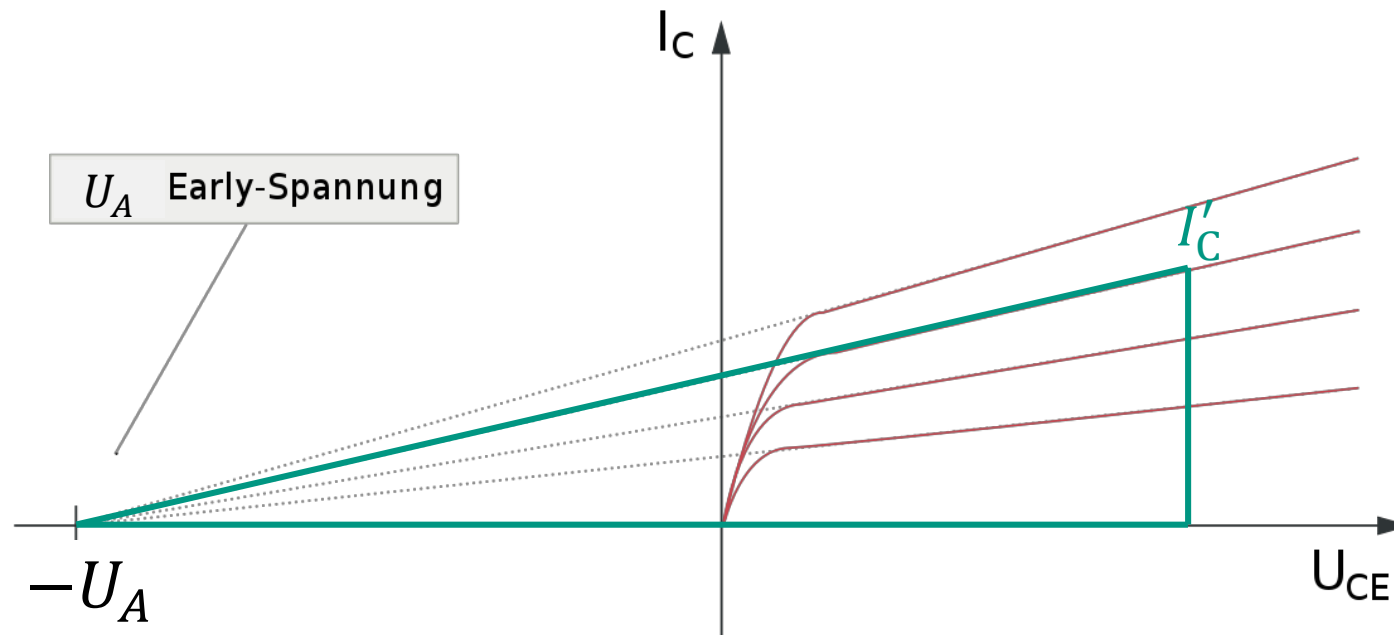
$$I_C = \beta I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_A} \right)$$

Bestimmung von r_{CE}



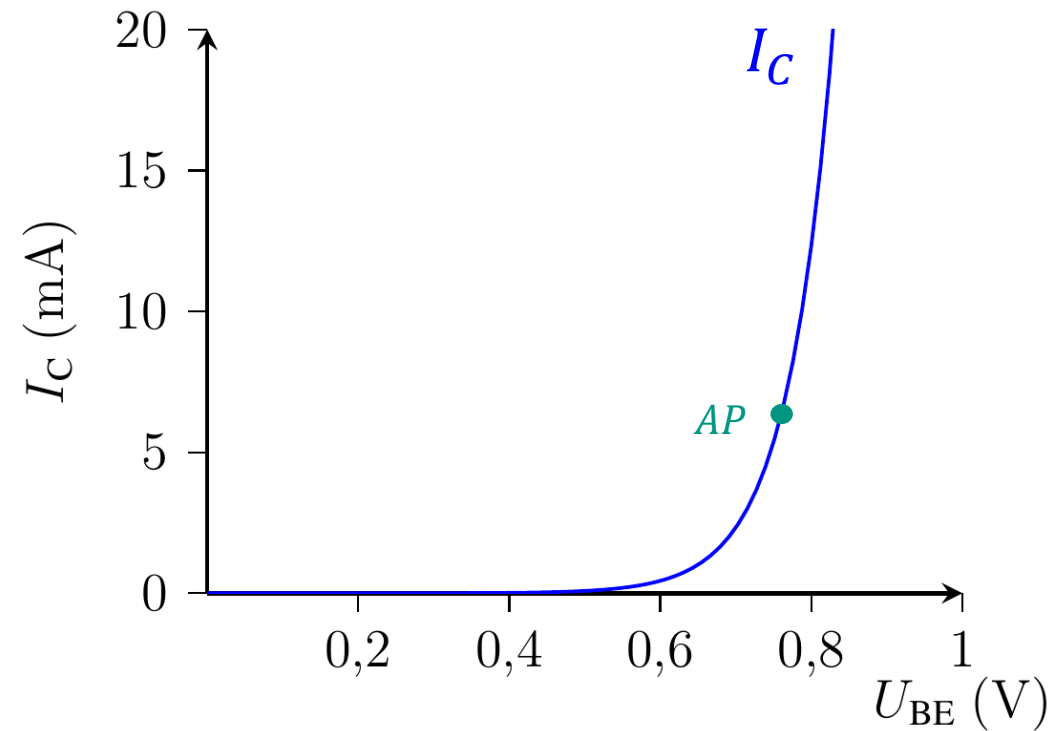
$$r_{CE} = \frac{U_A}{I_C}$$

Bestimmung von r_{CE}

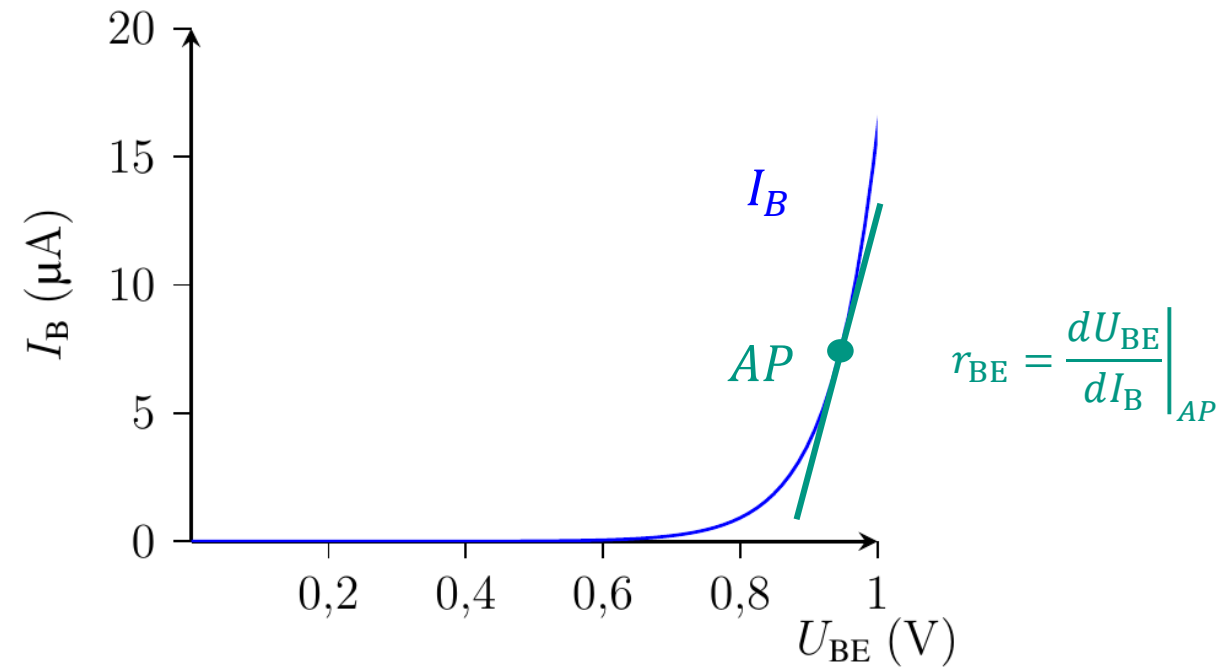


$$r_{CE} = \frac{U_A + U_{CE}}{I'_C}$$

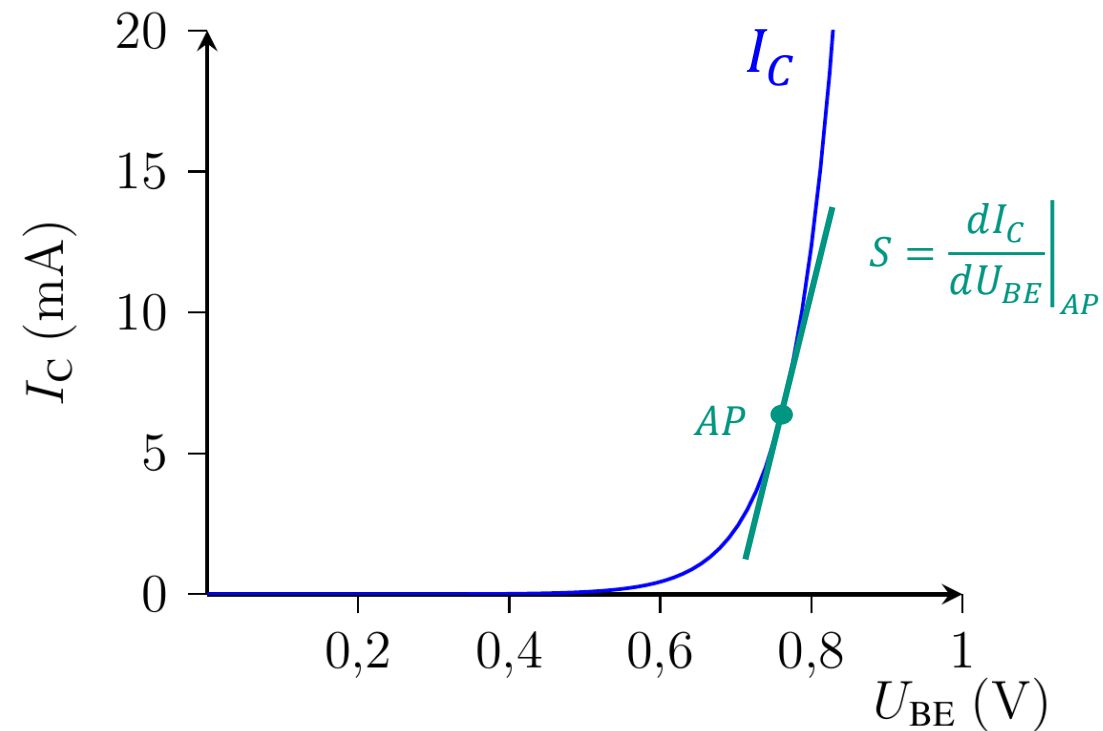
Linearisierung



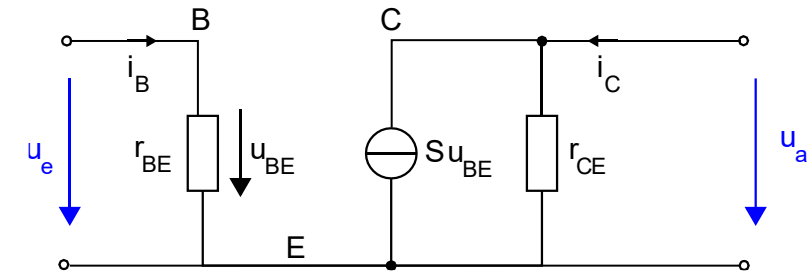
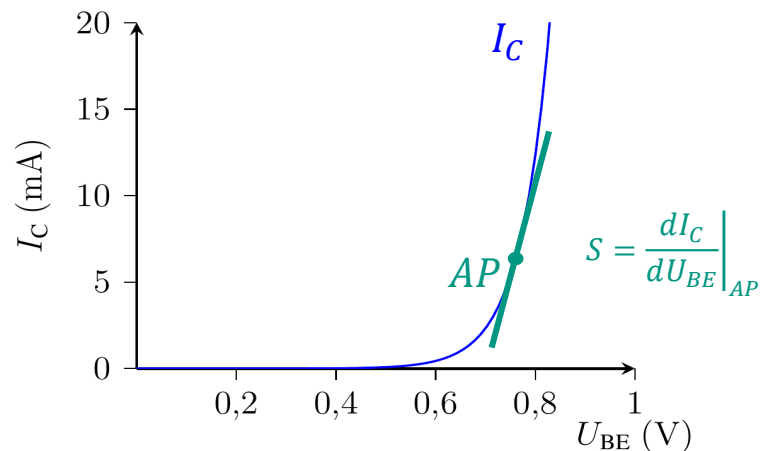
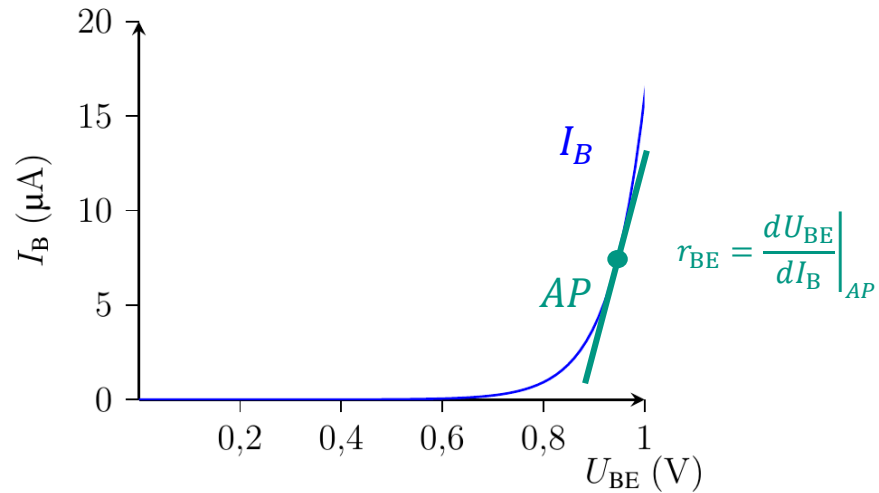
Eingangswiderstand:



Kollektorstrom im Kleinsignalbetrieb



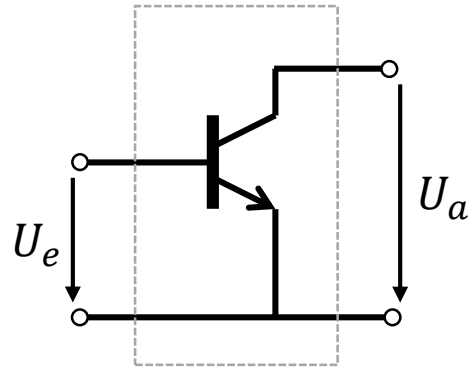
Kleinsignal



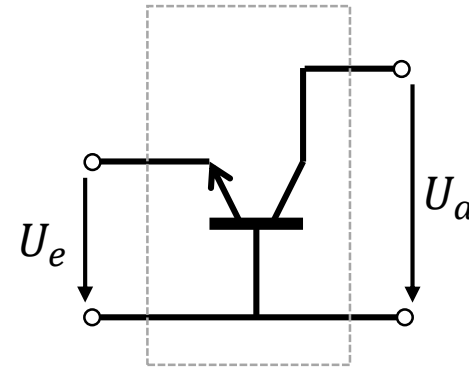
- r_{BE} ist der Ersatzwiderstand der Eingangsdiode (zwischen Basis und Emitter)
- Die Spannungsquelle zeigt den Kollektorstrom
- r_{CE} modelliert den Early-Effekt.

Grundschaltnngen - Zusammenfassung

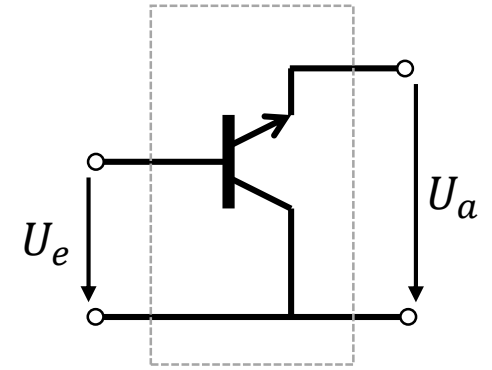
Eigenschaft



Emitterschaltung



Basisschaltung



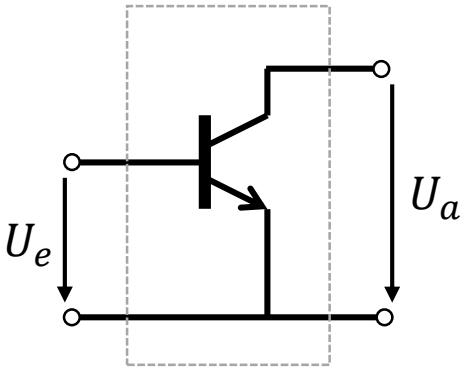
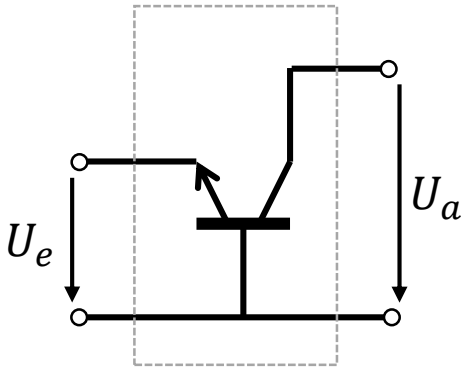
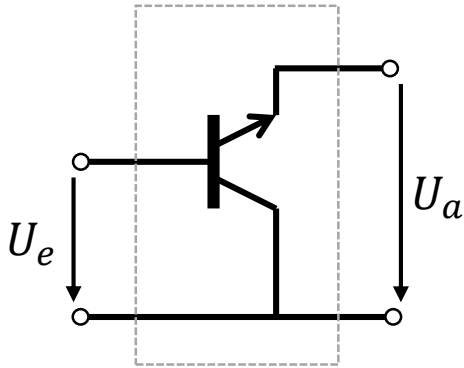
Kollektorschaltung

$$A_0 = \frac{u_a}{u_e}$$

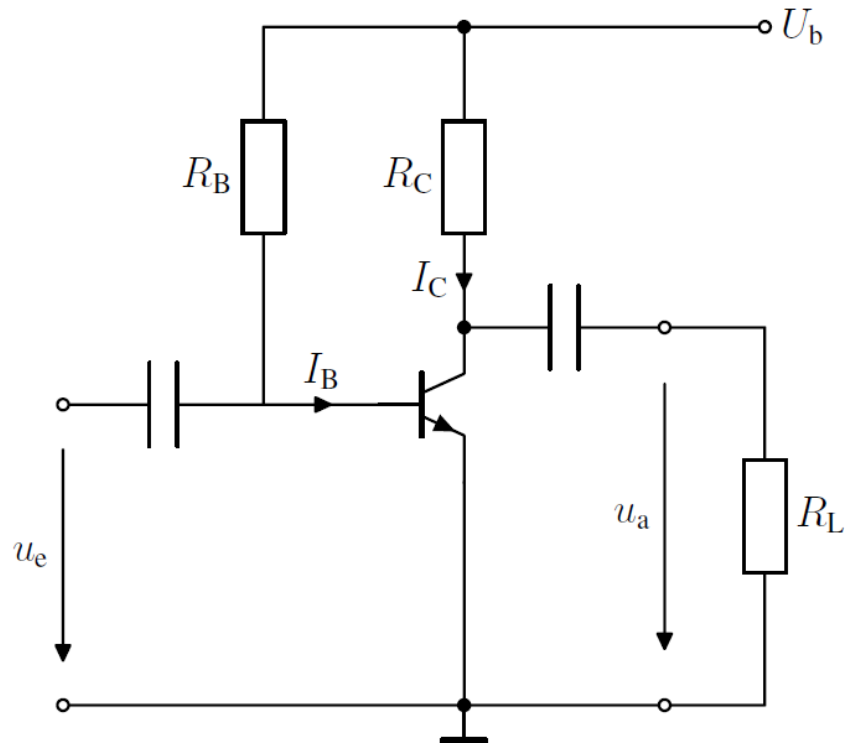
$$r_e = \frac{u_e}{i_e}$$

$$r_a = \left. \frac{u_a}{i_a} \right|_{u_e=0}$$

Grundschaltnngen - Zusammenfassung

Eigenschaft	 Emitterschaltung	 Basisschaltung	 Kollektorschaltung
$A_0 = \frac{u_a}{u_e}$	$A = -SR_C$	$A = \frac{\beta R_C}{r_{BE} + R_B} \approx SR_C$	$A = \frac{SR_E}{1 + SR_E} \approx 1$
$r_e = \frac{u_e}{i_e}$	$r_{BE} = \frac{\beta}{S}$	$r_e = \left(\frac{1}{S} + \frac{R_B}{\beta} \right) \approx \frac{1}{S}$	$r_e = r_{BE} + \beta R_E$
$r_a = \frac{u_a}{i_a} \Big _{u_e=0}$	$r_a = r_{CE} \parallel R_C$	$r_a = r_{CE} \parallel R_C$	$r_a = \frac{1}{S}$

Aufgabe1



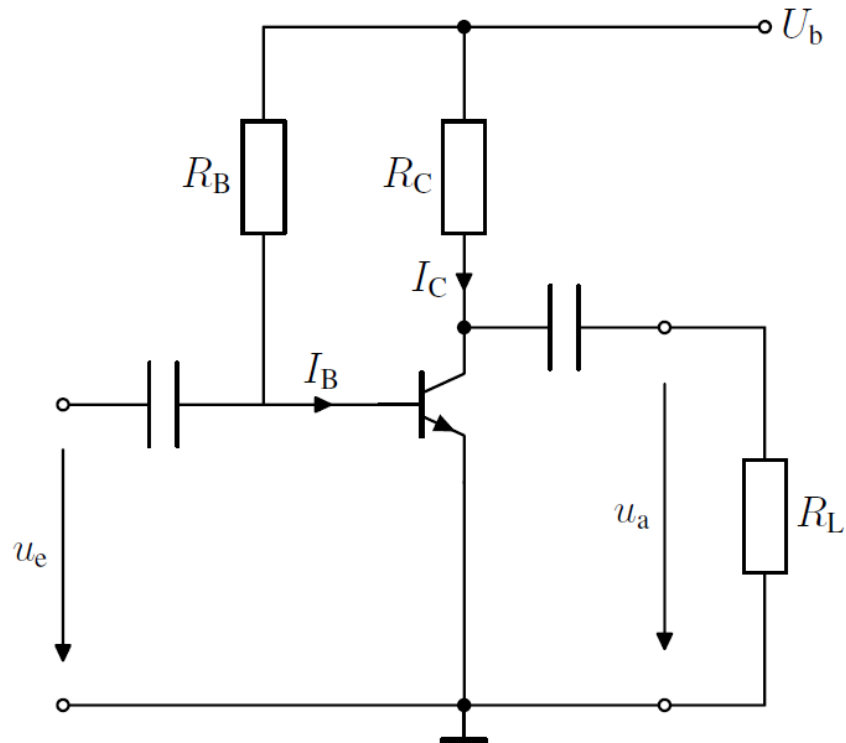
$$\beta = 200$$
$$|U_A| = 50 \text{ V}$$

$$U_b = 4 \text{ V}$$
$$R_L = 50 \Omega$$
$$R_C = 250 \Omega$$

Aufgabe 1

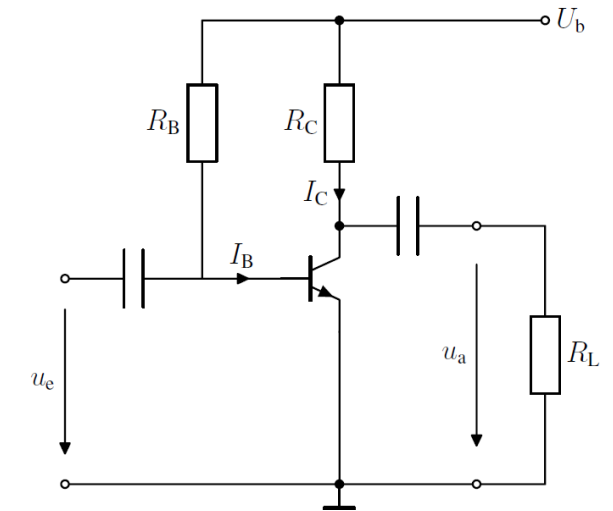
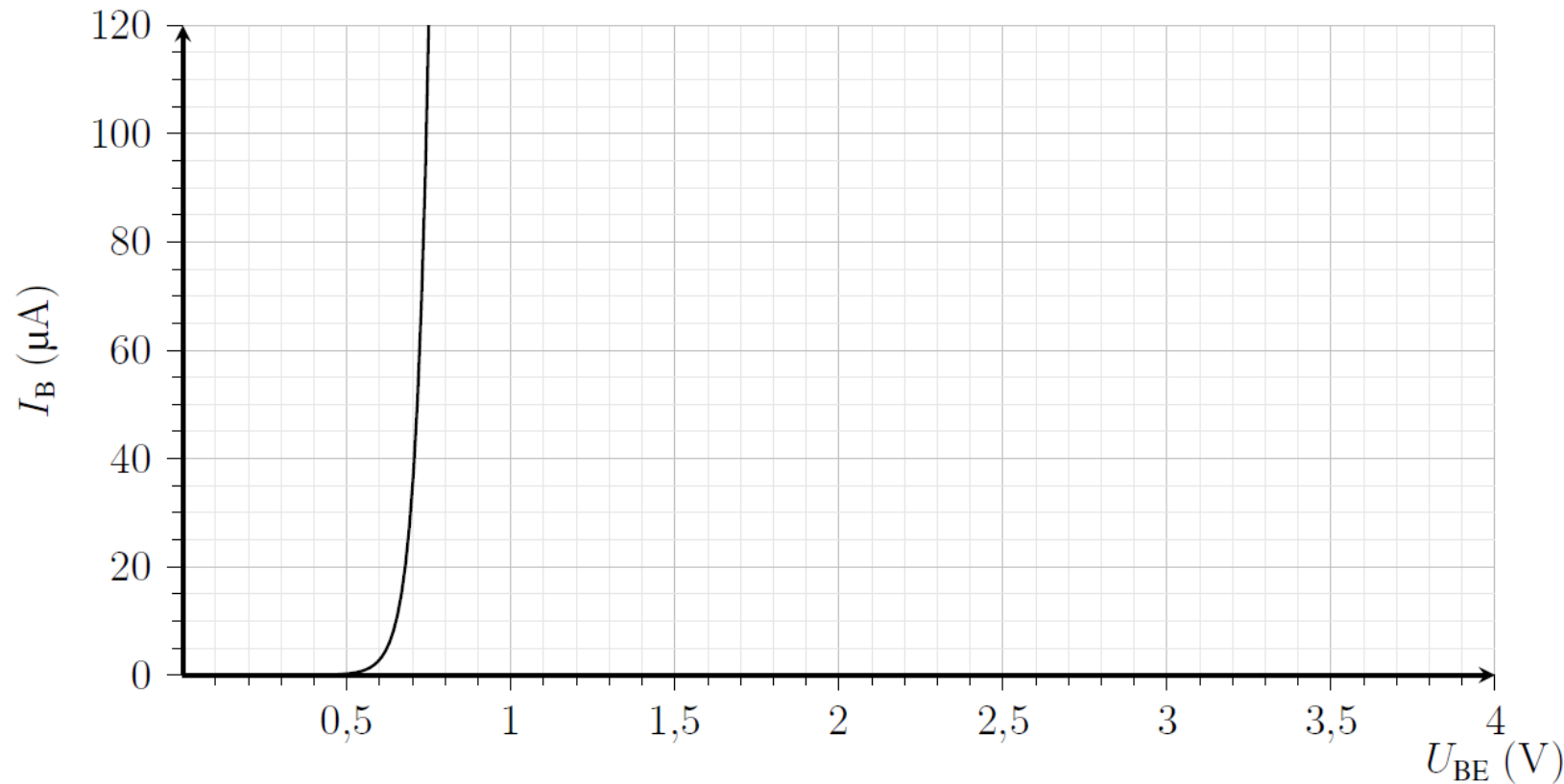
a) In welcher Grundschaltung wird der Transistor betrieben?

Emitterschaltung



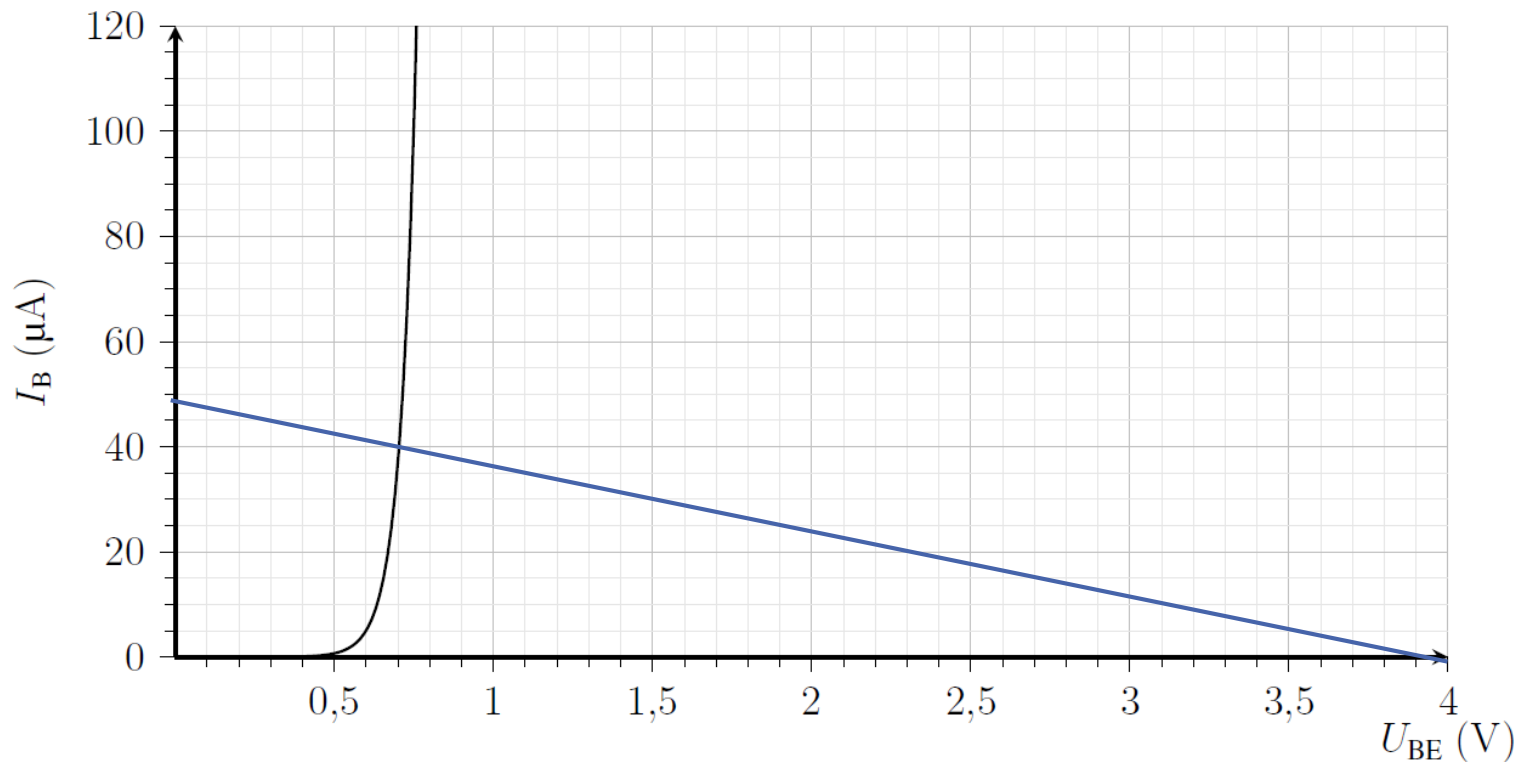
Aufgabe 1

b) Ermitteln Sie den Widerstand R_B , mit dem eine Basis-Emitter Spannung U_{BE} von 0.7 V eingestellt werden kann



Aufgabe 1

b) Ermitteln Sie den Widerstand R_B , mit dem eine Basis-Emitter Spannung U_{BE} von 0.7 V eingestellt werden kann



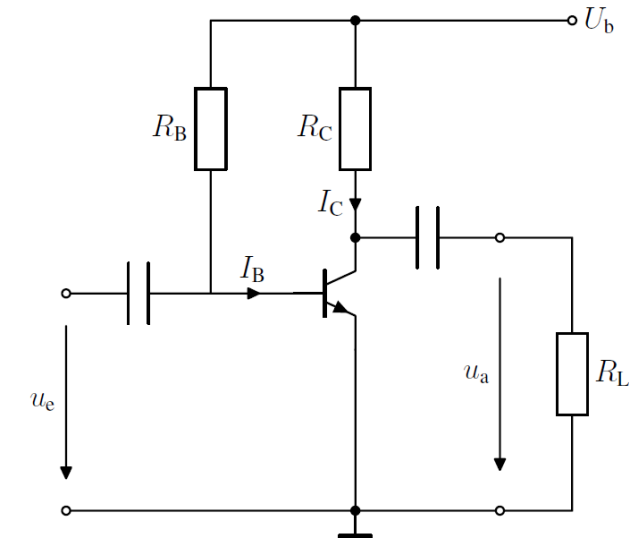
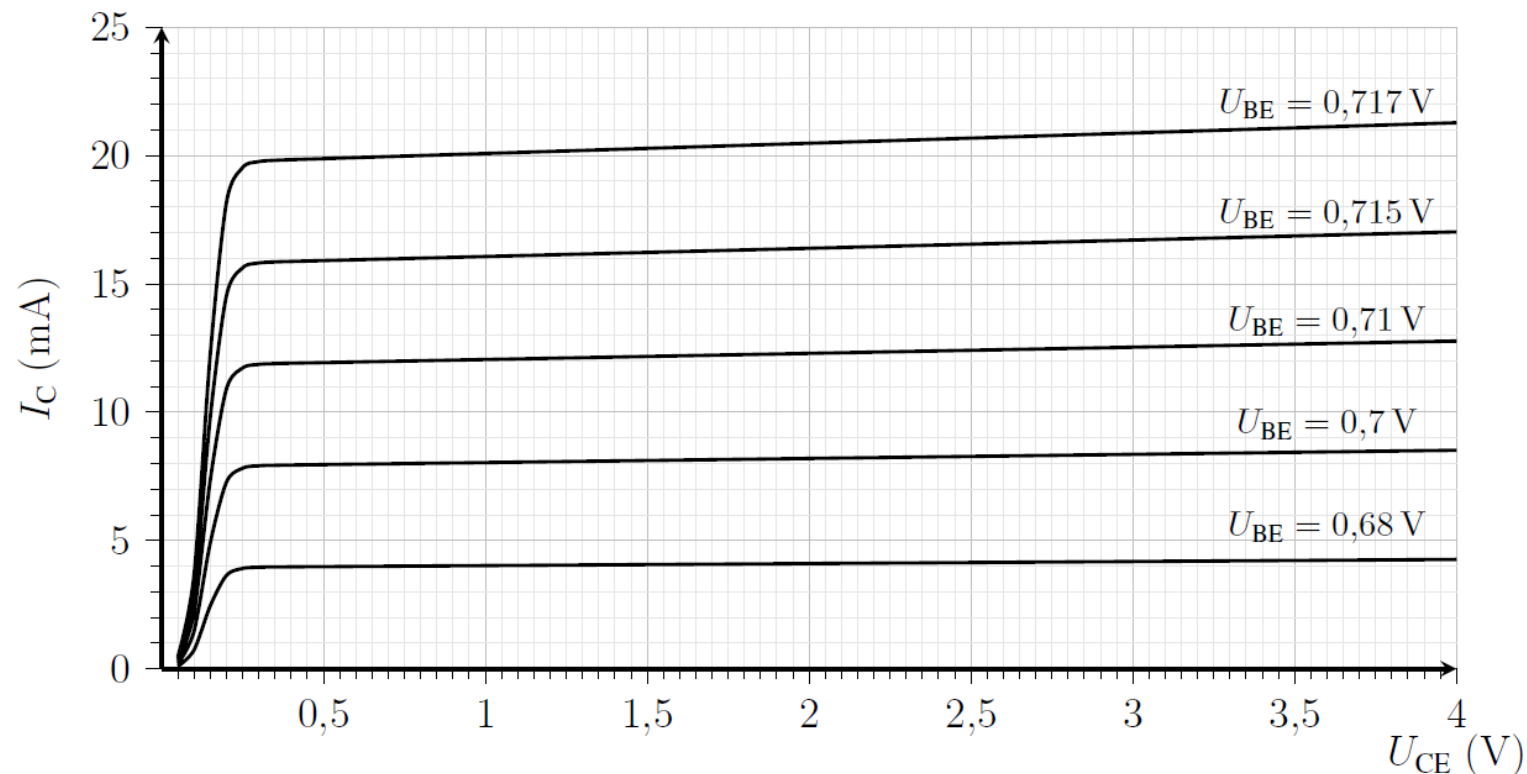
$$R_B = - \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$

$$R_B = - \frac{0,7 \text{ V} - 4 \text{ V}}{40 \text{ } \mu\text{A} - 0 \text{ } \mu\text{A}}$$

$$= 82.5 \text{ k}\Omega$$

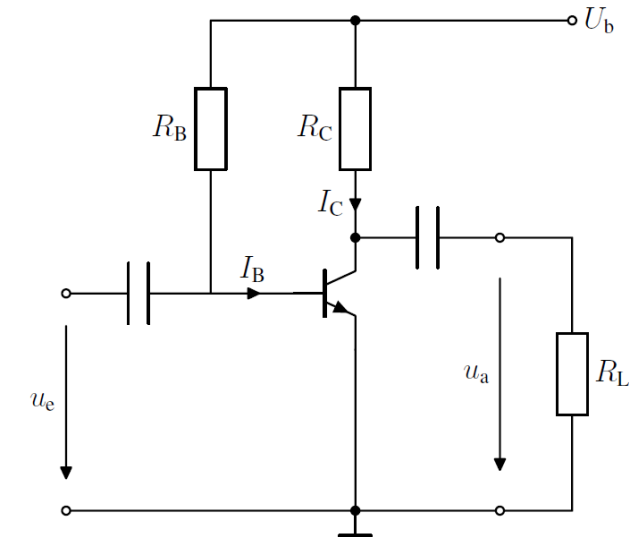
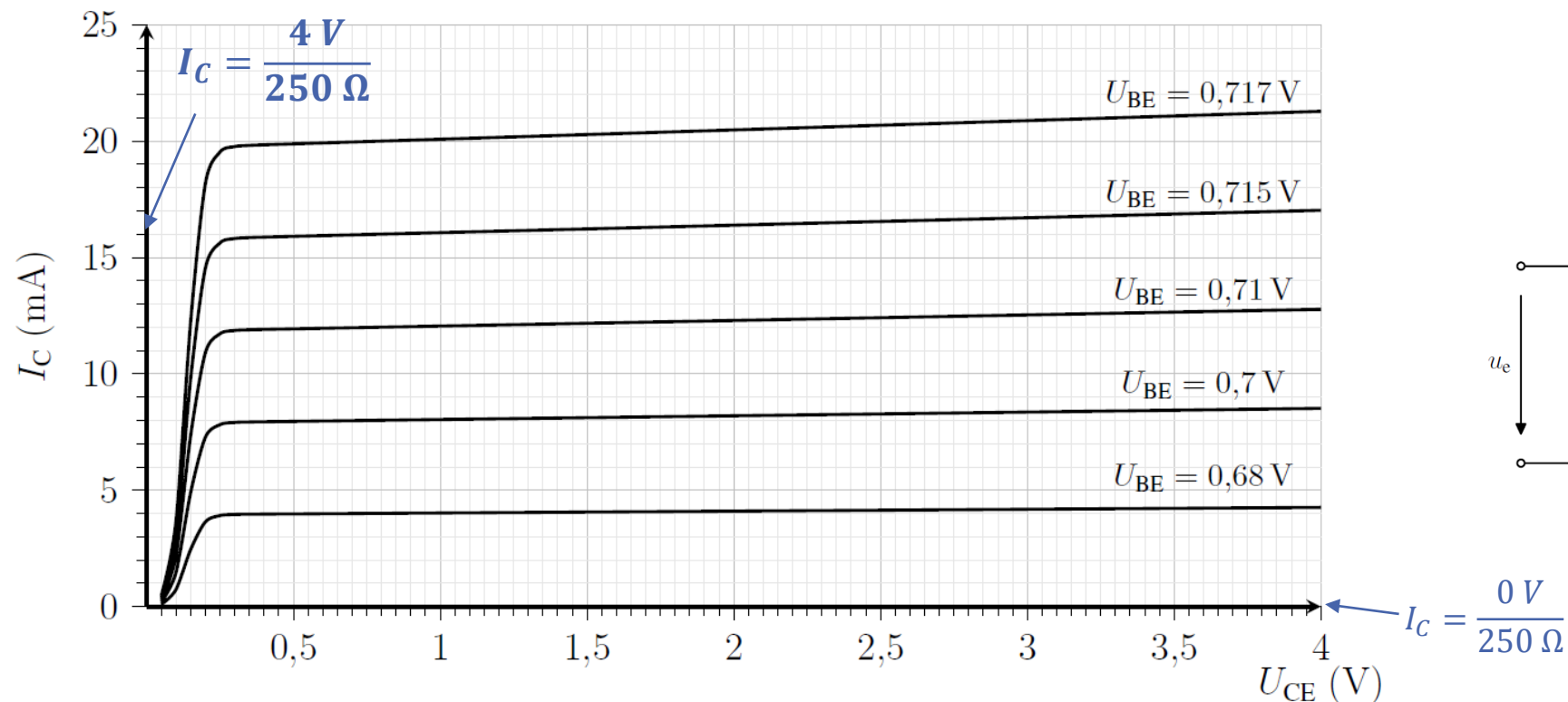
Aufgabe 1

c) Zeichnen Sie die Lastgerade für den Widerstand R_C und markieren Sie den Arbeitspunkt in Abb. 3



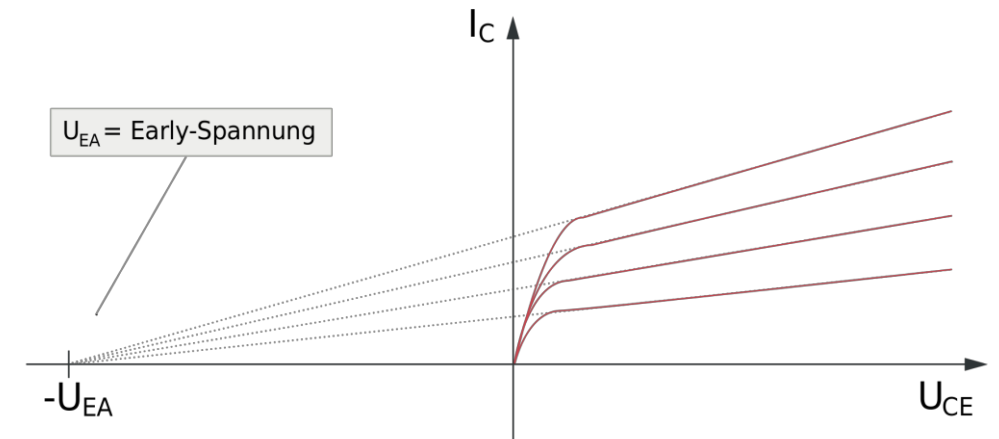
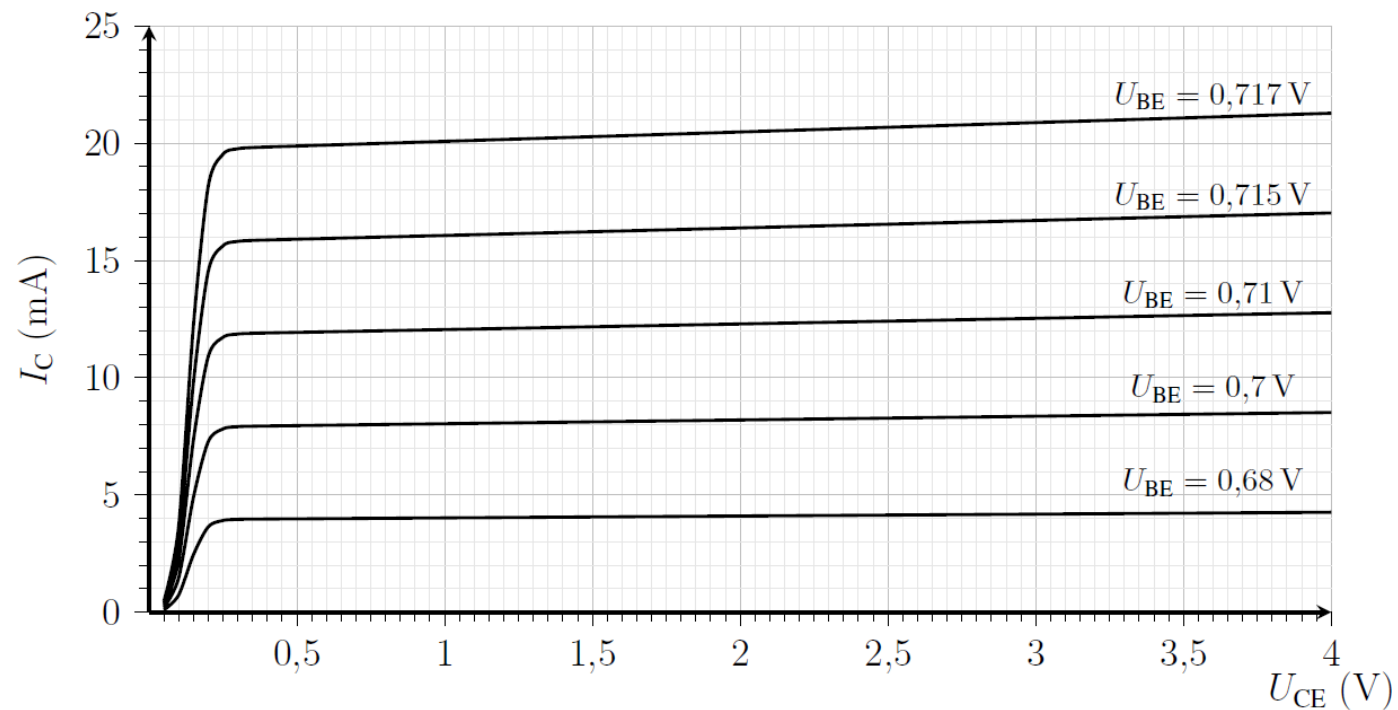
Aufgabe 1

c) Zeichnen Sie die Lastgerade für den Widerstand R_C und markieren Sie den Arbeitspunkt in Abb. 3



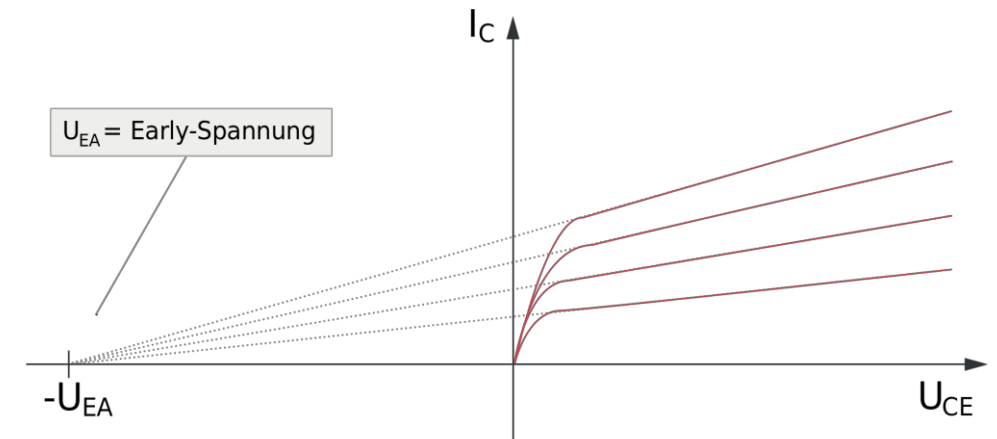
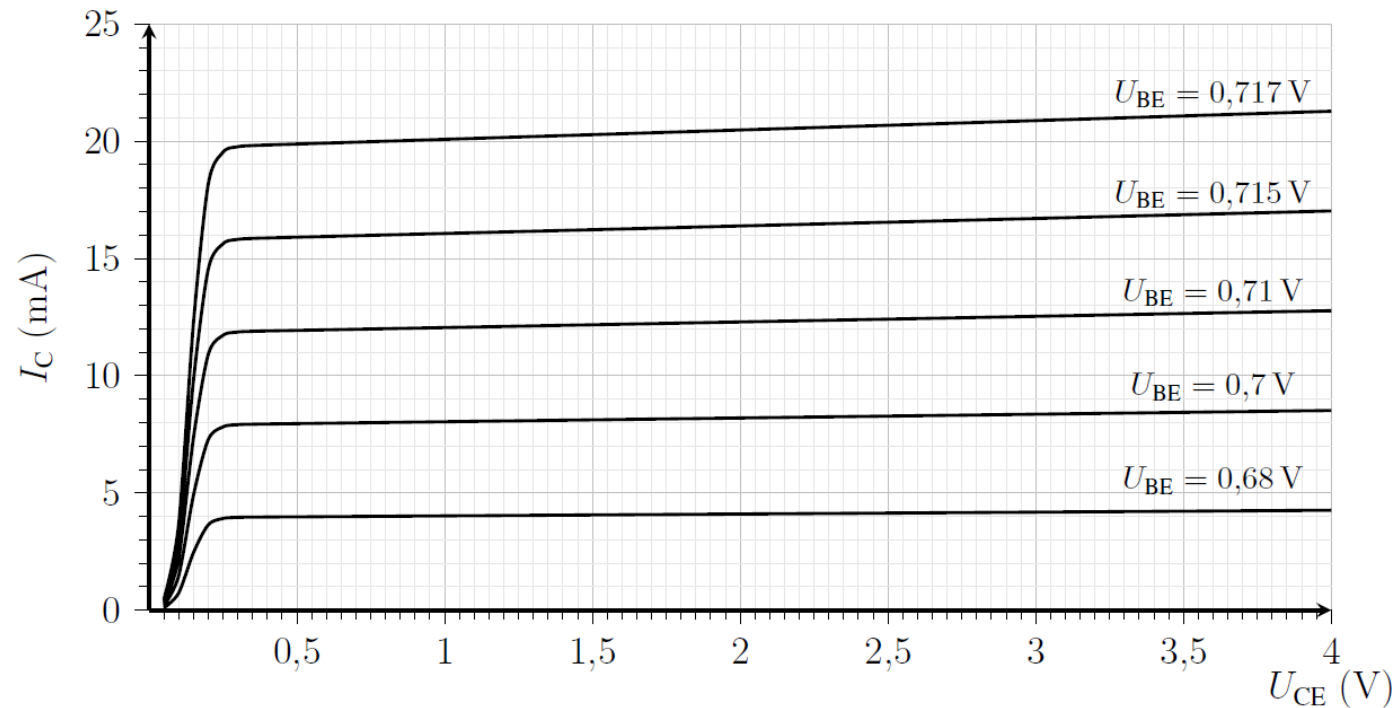
Aufgabe 1

d) Was ist der Early-Effekt?



Aufgabe 1

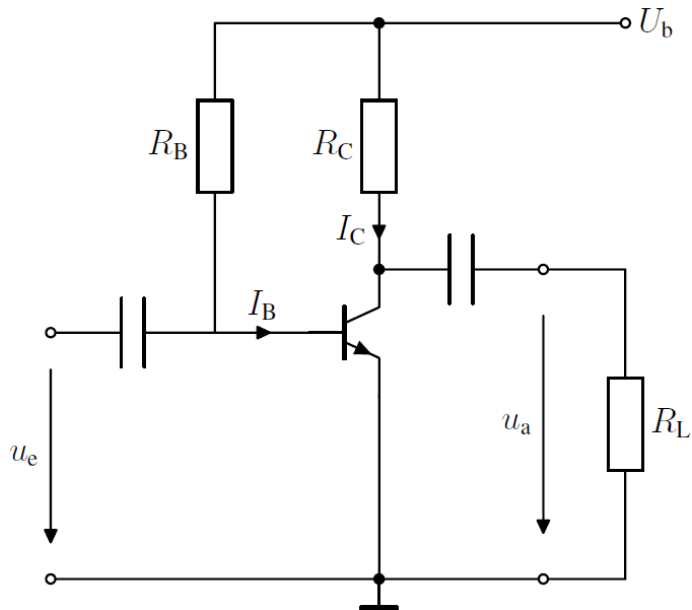
d) Was ist der Early-Effekt?

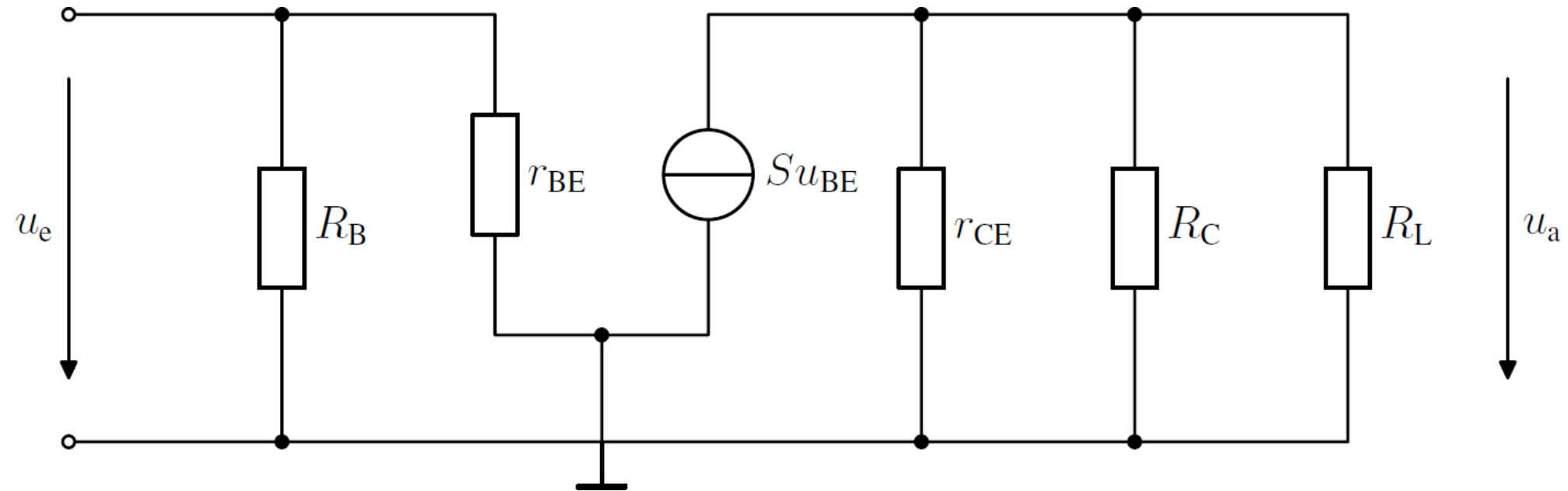


$$r_{CE} = \frac{|U_A| + U_{CE}}{I_C}$$

Aufgabe 1

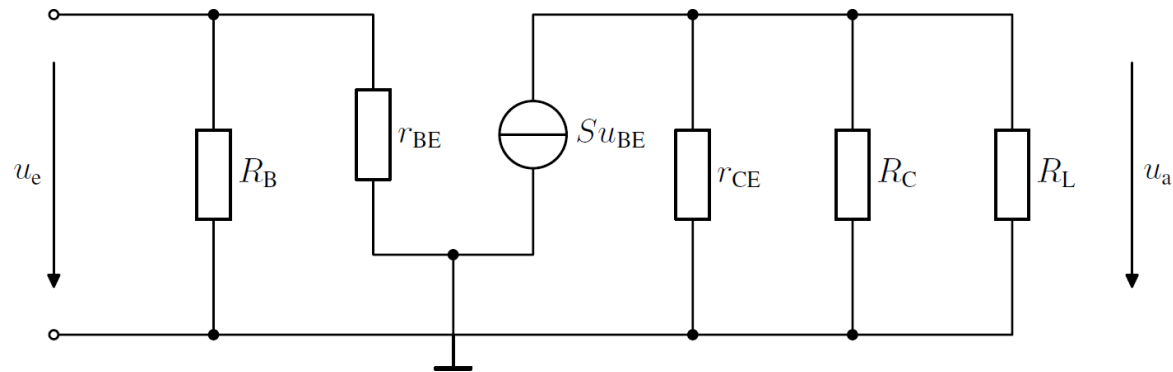
e) Zeichnen Sie das Kleinsignalersatzschaltbild der Schaltung.





Aufgabe 1

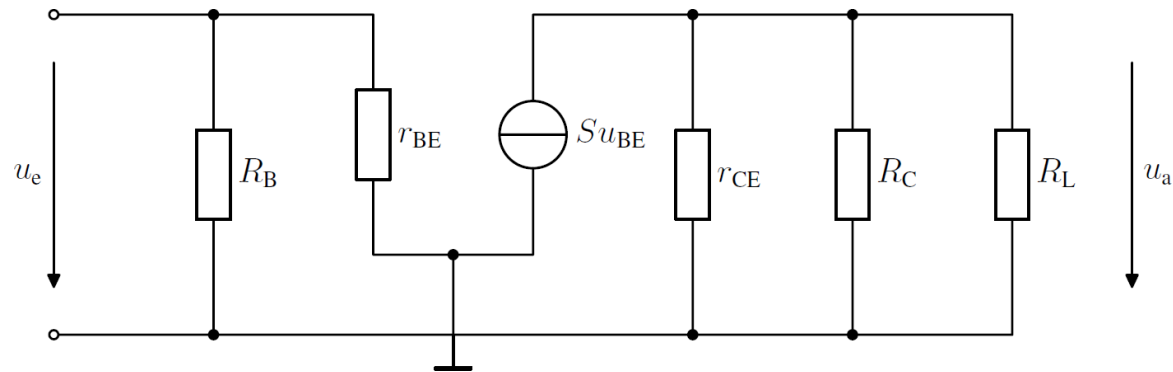
f) Bestimmen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung der Schaltung



$$A_V = -S r_a$$

Aufgabe 1

f) Bestimmen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung der Schaltung

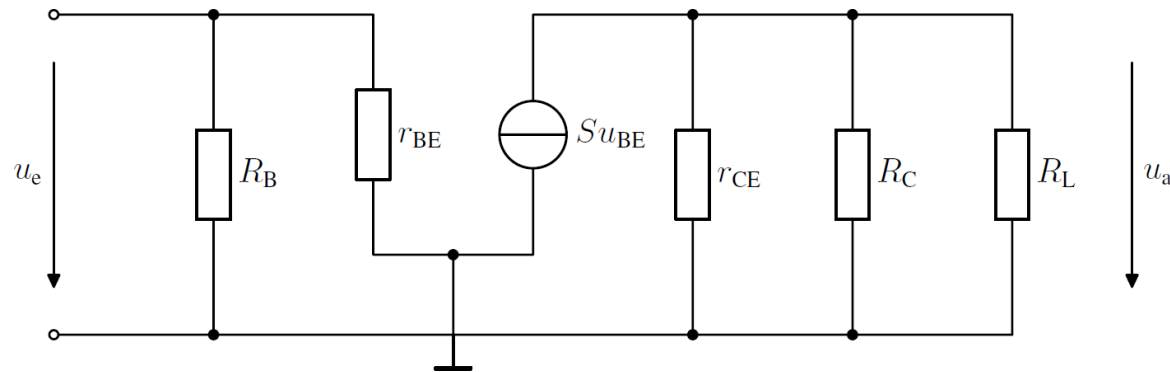


$$S = \frac{I_C}{U_T}$$

$$A_V = -S r_a$$

Aufgabe 1

f) Bestimmen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung der Schaltung

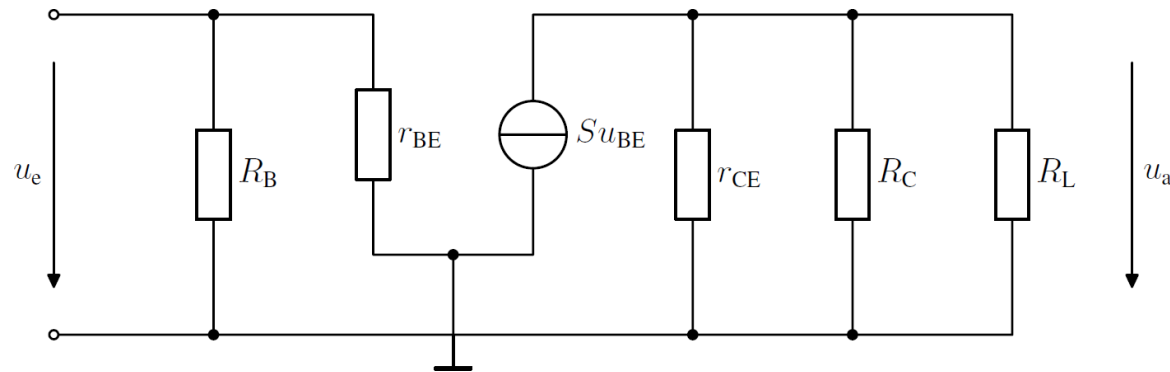


$$S = \frac{I_C}{U_T} = \frac{8 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 307.7 \text{ mS}$$

$$A_V = -S r_a$$

Aufgabe 1

f) Bestimmen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung der Schaltung



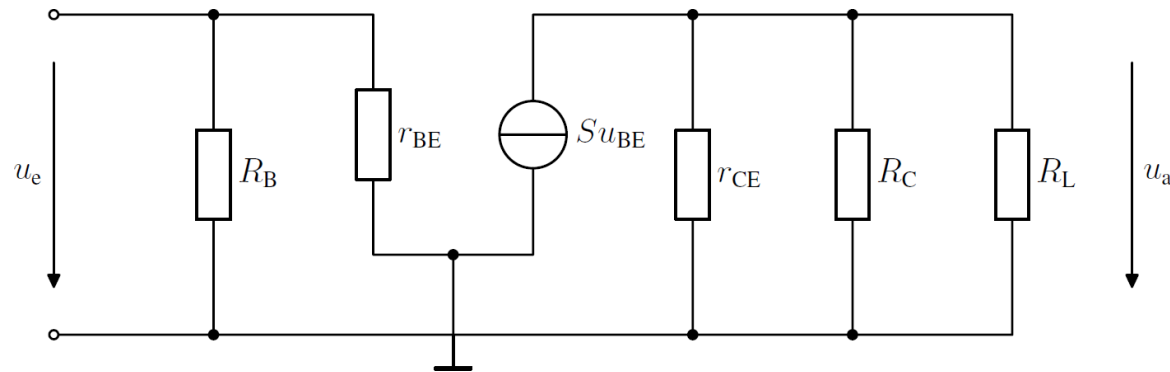
$$S = \frac{I_C}{U_T} = \frac{8 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 307.7 \text{ mS}$$

$$r_a = r_{CE} \parallel R_C \parallel R_L$$

$$A_V = -S r_a$$

Aufgabe 1

f) Bestimmen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung der Schaltung



$$A_V = -S r_a$$
$$= -12.7$$

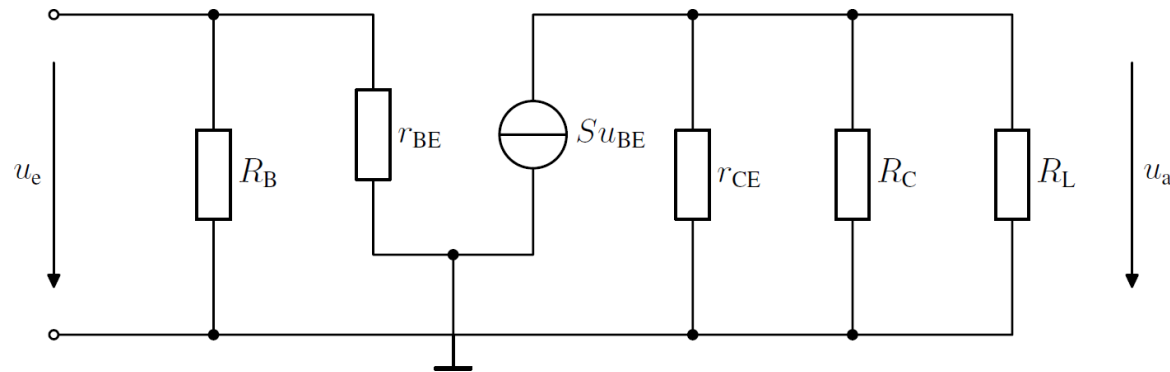
$$S = \frac{I_C}{U_T} = \frac{8 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 307.7 \text{ mS}$$

$$r_a = r_{CE} \parallel R_C \parallel R_L$$

$$r_a = \left(\frac{1}{6487.5 \Omega} + \frac{1}{250 \Omega} + \frac{1}{100} \right)^{-1} = 41.4 \Omega$$

Aufgabe 1

f) Bestimmen Sie die Kleinsignal-Spannungsverstärkung der Schaltung



$$A_V = -S r_a$$

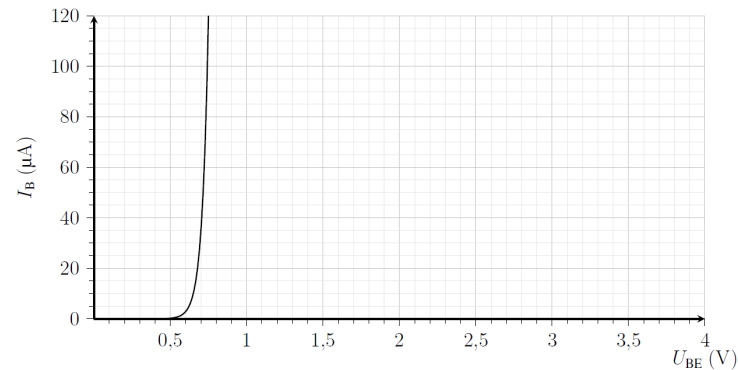
$$S = \frac{I_C}{U_T} = \frac{8 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 307.7 \text{ mS}$$

$$r_a = r_{CE} \parallel R_C \parallel R_L$$

$$r_a = \left(\frac{1}{6487.5 \Omega} + \frac{1}{250 \Omega} + \frac{1}{50 \Omega} \right)^{-1} = 41.4 \Omega$$

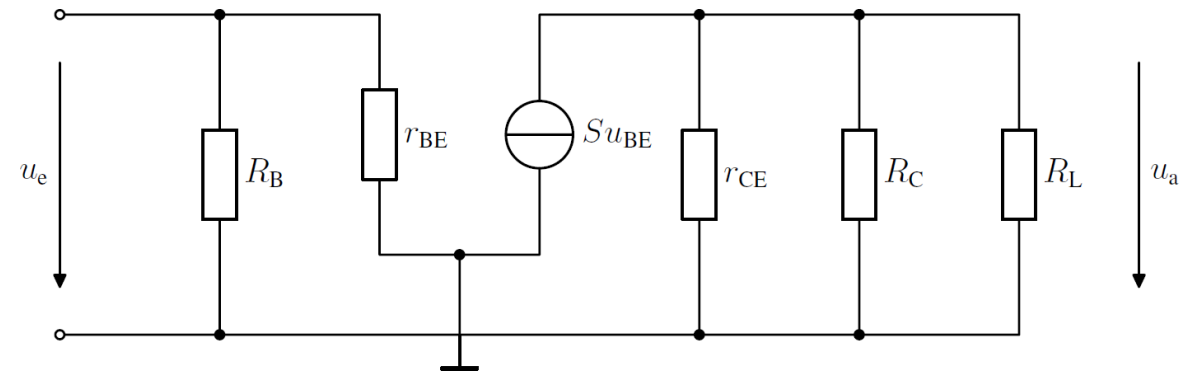
Aufgabe 1

g) Bestimmen Sie den Eingangs- und Ausgangswiderstand der Schaltung



$$r_{BE} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = \frac{U_T}{I_B}$$

$$= \frac{26 \text{ mV}}{40 \mu\text{A}} = 650 \Omega$$

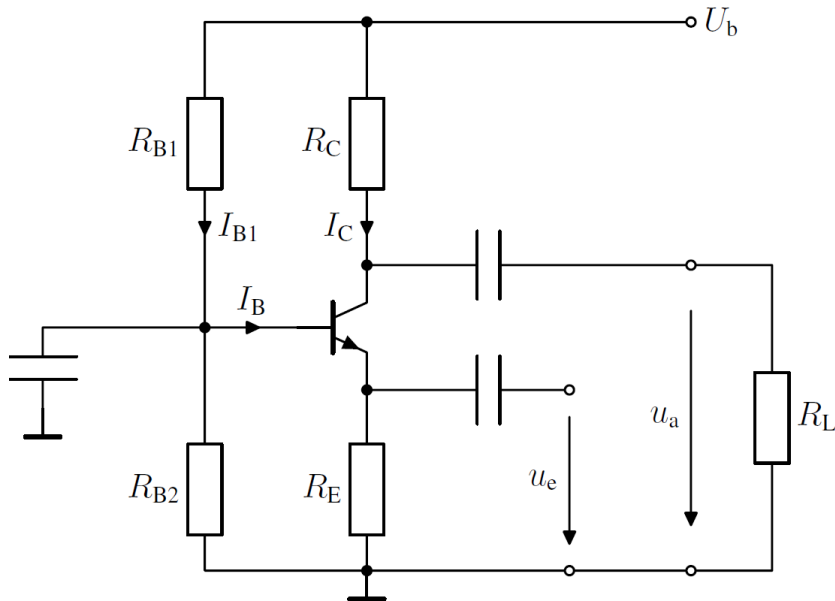


$$r_e = R_B \parallel r_{BE}$$

$$= \frac{82500 \Omega \cdot 650 \Omega}{82500 \Omega + 650 \Omega}$$

$$= 644.9 \Omega$$

Aufgabe 2

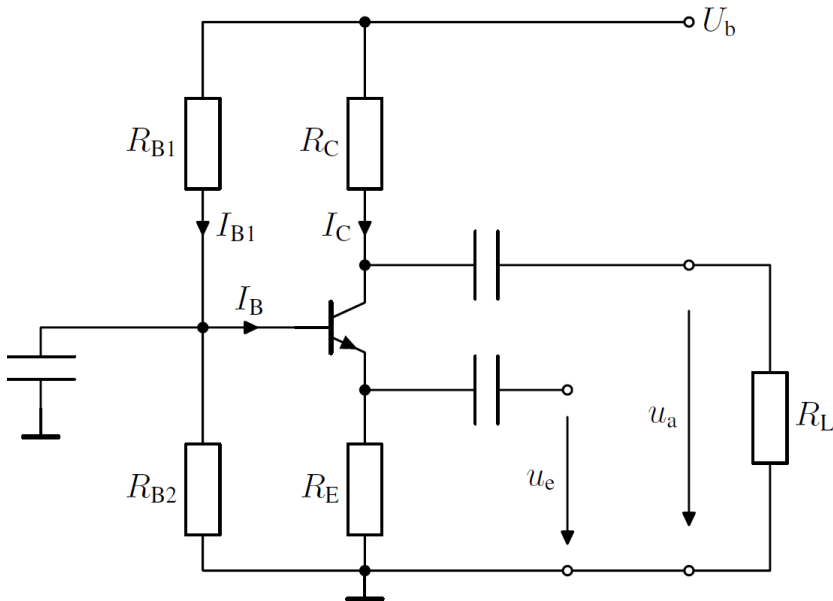


- $\beta = 250$
- $|U_A| = 100 \text{ V}$
- $I_C = 10 \text{ mA}$
- $I_E \approx I_C$
- $U_{BE} = 0.9 \text{ V}$
- $R_L = 100 \Omega, R_C = 200 \Omega,$
- $U_T = 26 \text{ mV}$

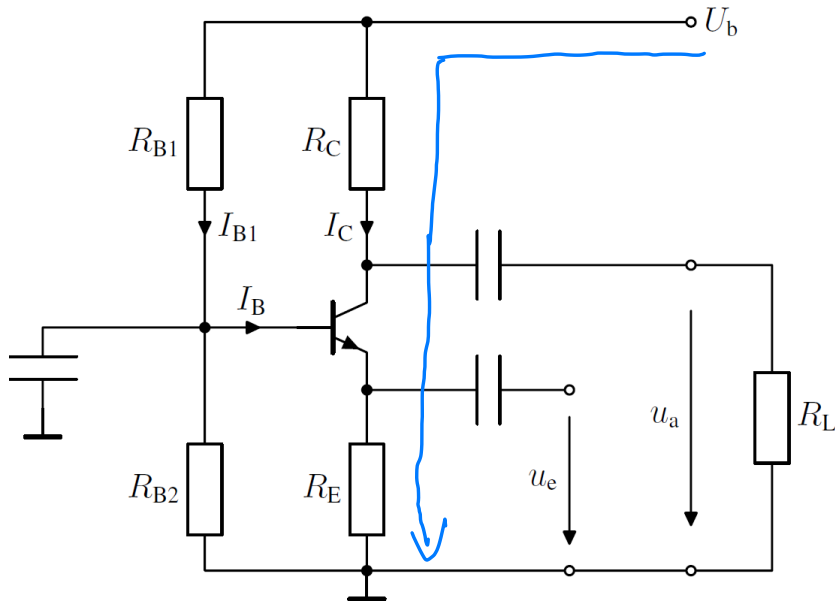
Aufgabe 2

a) In welcher Grundsaltung wird der Transistor betrieben?

Basisschaltung



Aufgabe 2



b) Gegeben: $U_{CE} = \underline{2V}$

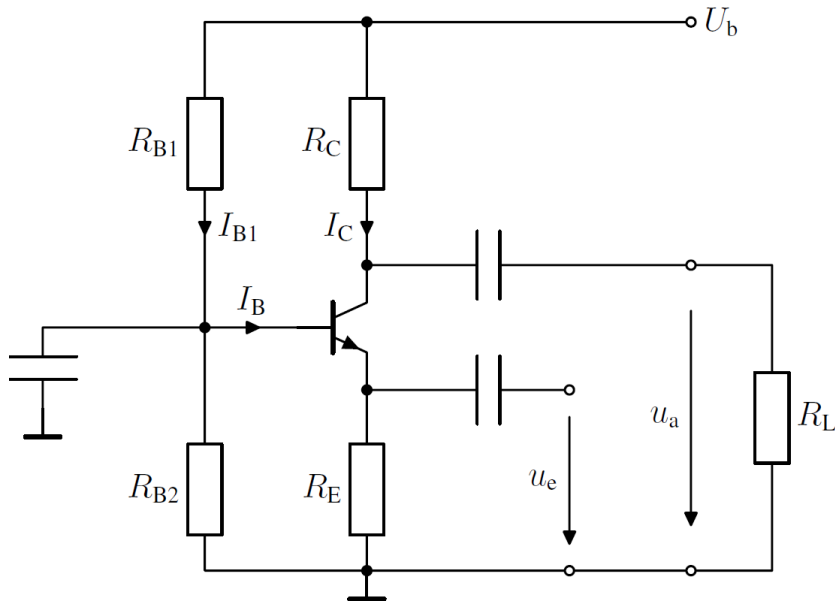
Gesucht: R_E

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

$$R_E = \frac{U_b - U_{CE}}{I_C} \sim R_C$$

$$= \frac{5V - 2V}{10mA} \sim 200\Omega = 100\Omega$$

Aufgabe 2



b) Gegeben: $U_{CE} = 2\text{ V}$

Gesucht: R_E

$$U_b = U_{RC} + U_{CE} + U_{RE}$$

$$U_b = I_C R_C + U_{CE} + I_C R_E$$

$$R_E = \frac{U_b - I_C R_C - U_{CE}}{I_C} = \frac{U_b - U_{CE}}{I_C} - R_C$$

$$R_E = \frac{(5\text{ V} - 3\text{ V})}{10\text{ mA}} - 200\ \Omega = 100\ \Omega$$

Aufgabe 2

C) Gegeben: $U_{BE} = 0.9 \text{ V}$, $I_{B1} = 10 I_B$

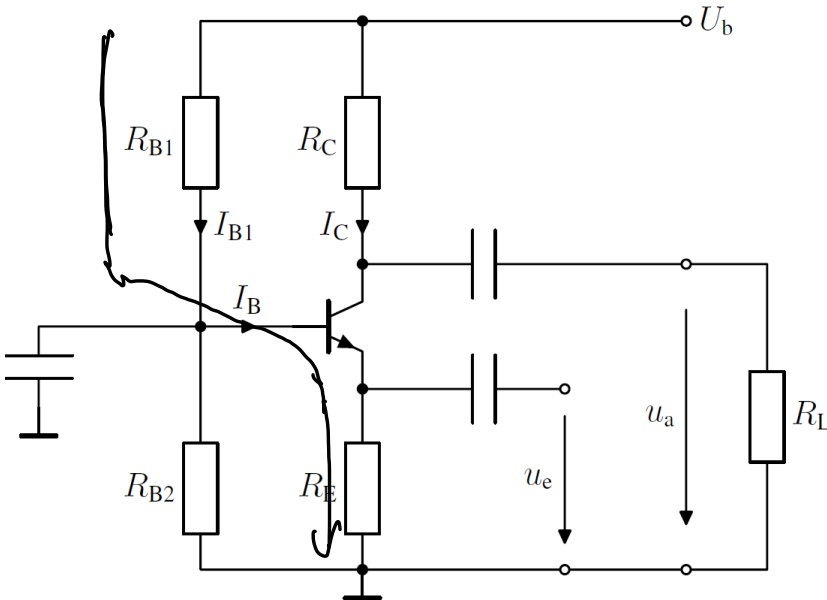
Gesucht: R_{B1}, R_{B2}

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10 \text{ mA}}{250} = 40 \mu\text{A}$$

$$I_{B1} = 10 I_B = 400 \mu\text{A}$$

$$U_b = R_{B1} \cdot I_{B1} + U_{BE} + I_C \cdot R_E$$

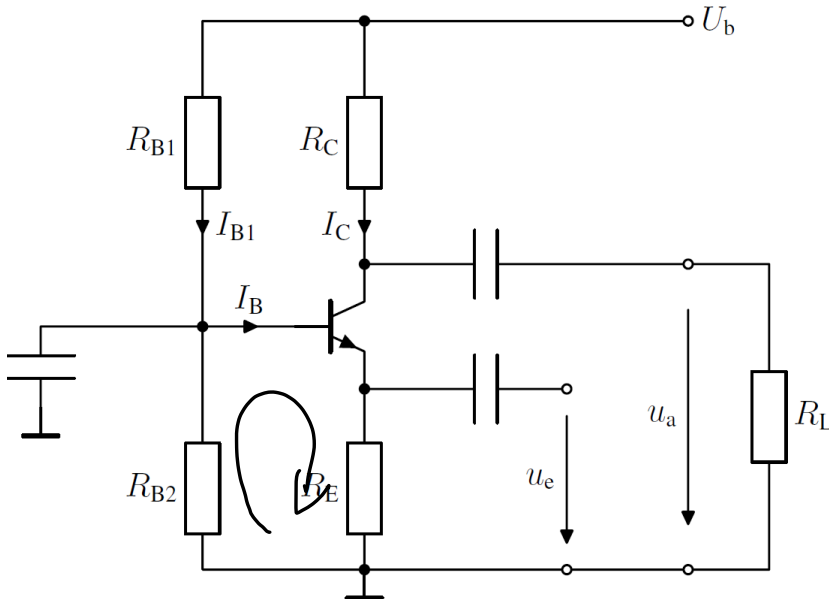
$$R_{B1} = \frac{U_b - U_{BE} - I_C R_E}{I_{B1}} = 7,75 \text{ k}\Omega$$



Aufgabe 2

C) Gegeben: $U_{BE} = 0.9 \text{ V}$, $I_{B1} = 10 I_B$

Gesucht: R_{B1}, R_{B2}



$$U_{RB2} = U_{BE} + I_C \cdot R_E$$

$$= 0.9 \text{ V} + 10 \text{ mA} \cdot 100 \Omega = 1.9 \text{ V}$$

$$I_{RB2} \cdot R_{B2}$$

$$9 \cdot I_B \cdot R_{B2} = 1.9 \text{ V}$$

$$R_{B2} \approx \frac{1.9 \text{ V}}{9 \cdot I_B} = 5.28 \text{ k}\Omega$$

Aufgabe 2

C) Gegeben: $U_{BE} = 0.9 \text{ V}$, $I_{B1} = 10 I_B$

Gesucht: R_{B1}, R_{B2}

$$U_{B2} = U_{RE} + U_{BE}$$

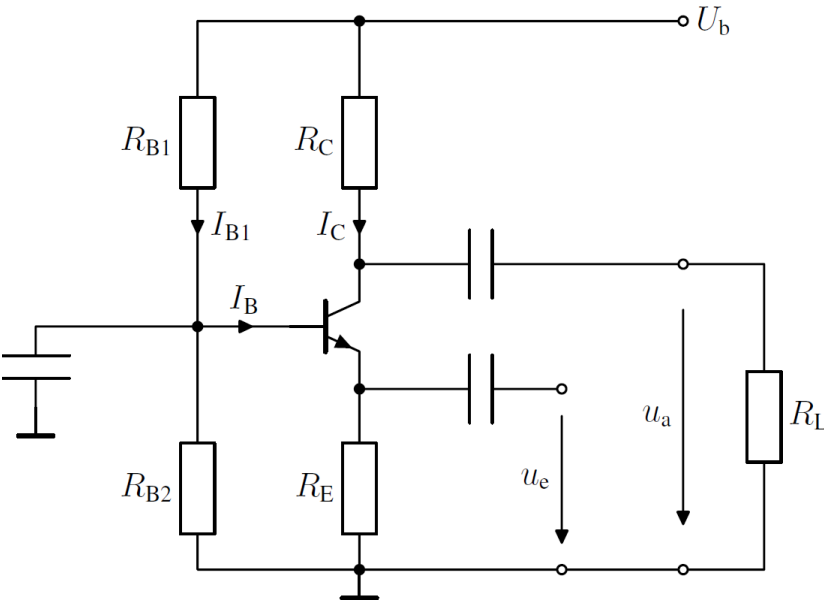
$$U_{B2} = I_C R_E + U_{BE} = 10 \text{ mA} \cdot 100 \, \Omega + 0.9 \text{ V} = 1.9 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10 \text{ mA}}{250} = 40 \, \mu\text{A}$$

$$I_{B1} = 10 I_B = 400 \, \mu\text{A}$$

$$I_{B2} = I_{B1} - I_B = 360 \, \mu\text{A}$$

$$R_{B2} = \frac{1.9 \text{ V}}{I_{B2}} = 5.28 \text{ k}\Omega$$



Aufgabe 2

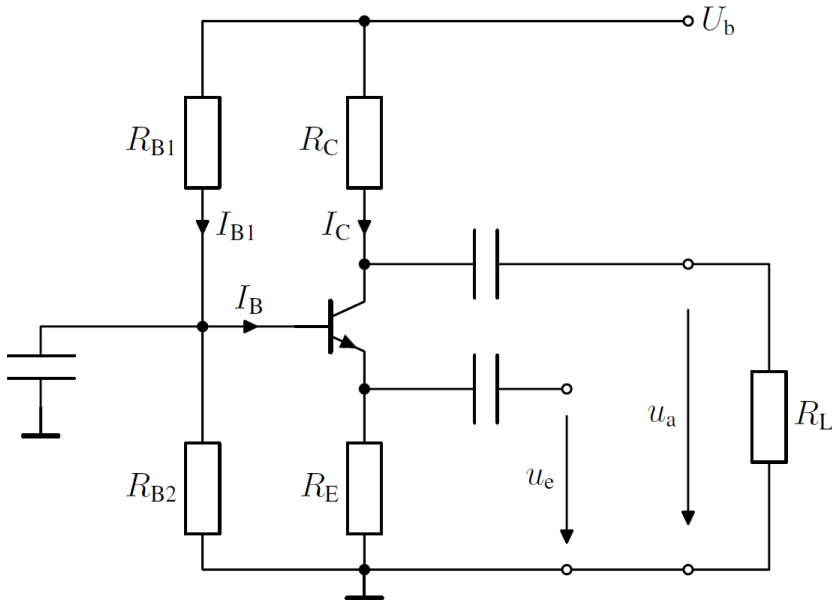
C) Gegeben: $U_{BE} = 0.9 \text{ V}$, $I_{B1} = 10 I_B$

Gesucht: R_{B1}, R_{B2}

$$U_{B1} = U_b - U_{B2} = 3.1 \text{ V}$$

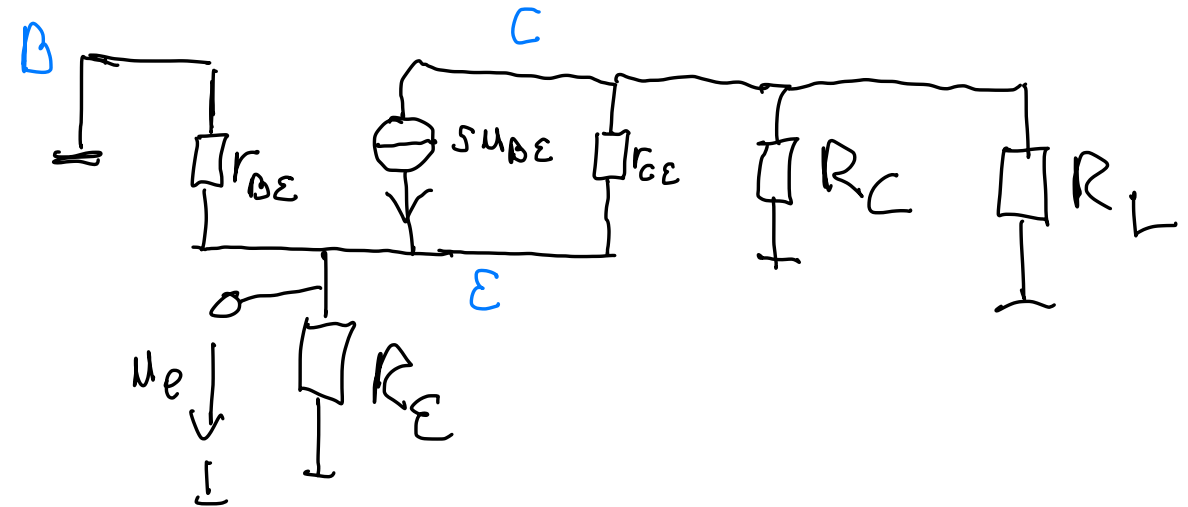
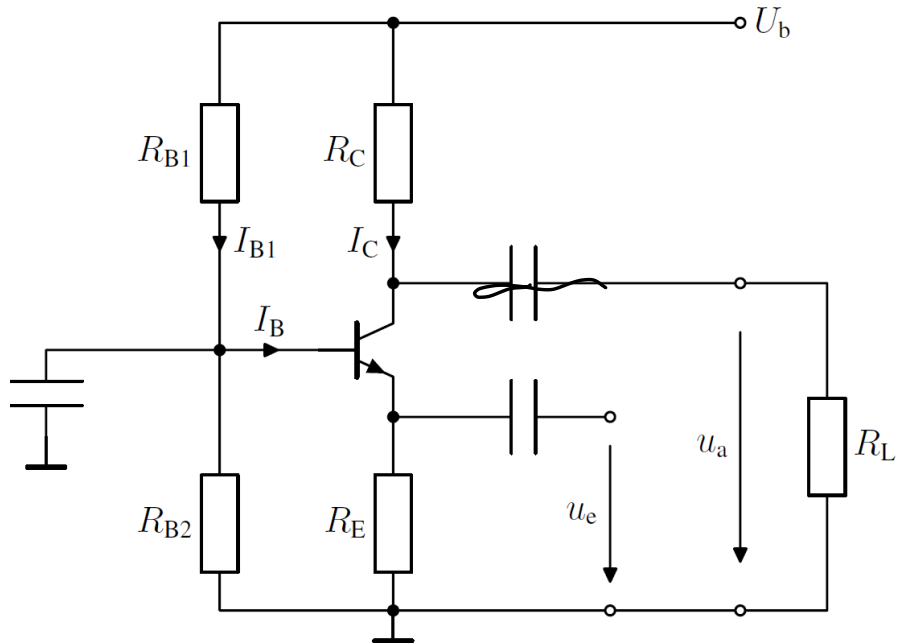
$$U_{B1} = I_{B1} R_{B1}$$

$$R_{B1} = \frac{U_{B1}}{I_{B1}} = \frac{3.1 \text{ V}}{400 \text{ mA}} = 7.75 \text{ k}\Omega$$



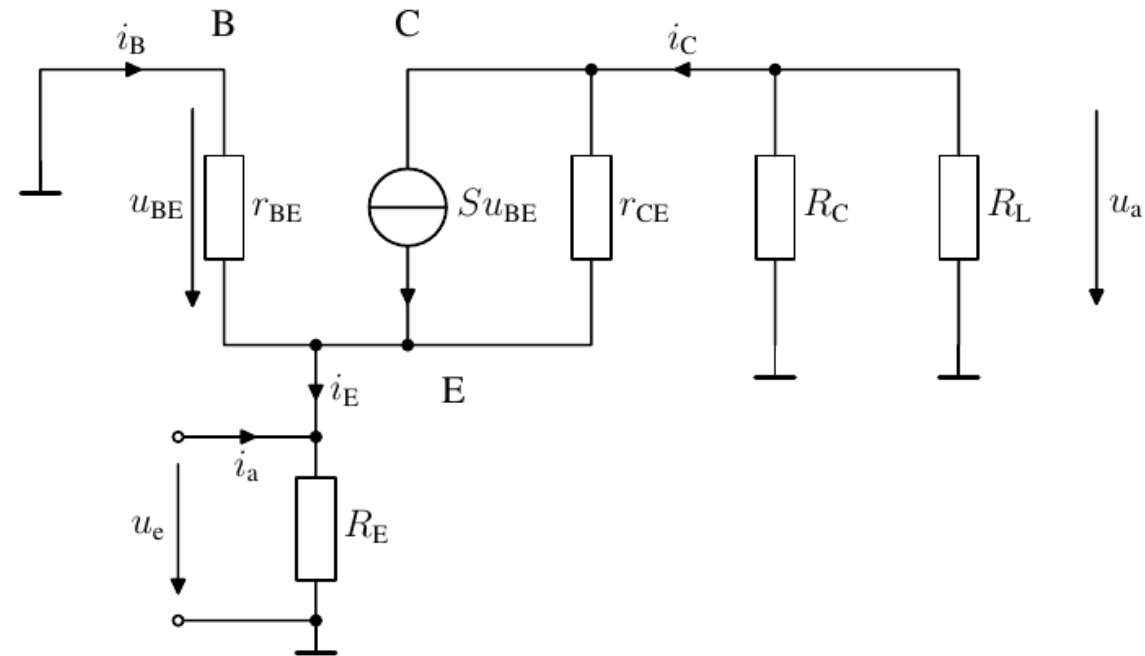
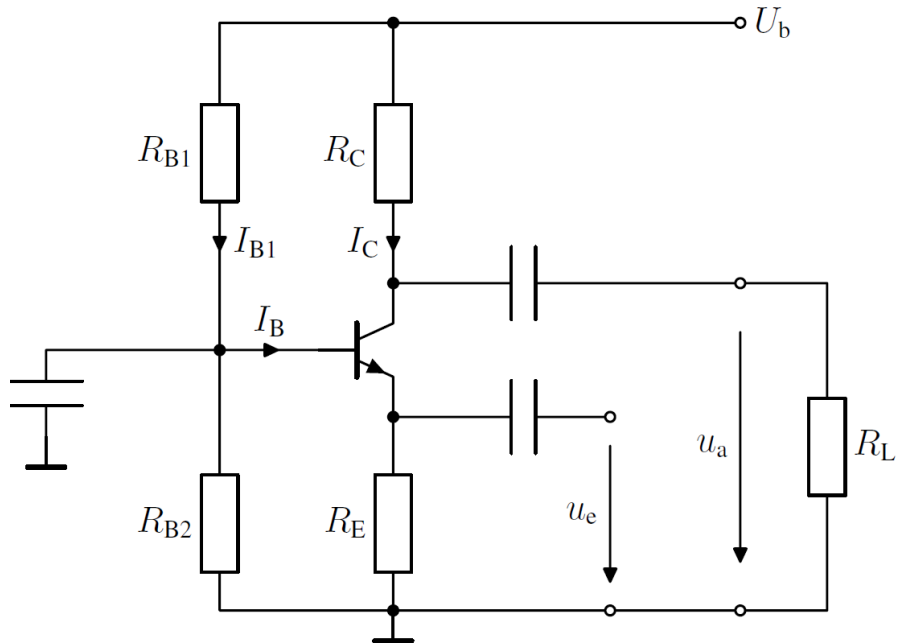
Aufgabe 2

d) Kleinsignal- ESB:



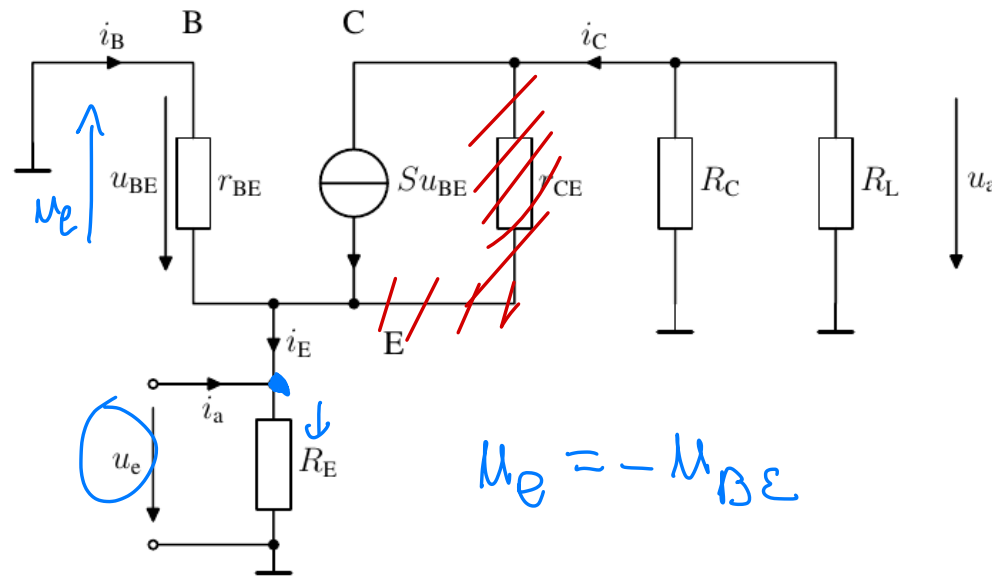
Aufgabe 2

d) Kleinsignal- ESB:



Aufgabe 2

e) Finden Sie r_e , r_a , A_0 . Early-Effekt kann vernachlässigt werden



$$r_e = \frac{u_e}{i_e}$$

$$i_a + \frac{u_{BE}}{r_{BE}} + S u_{BE} = \frac{u_e}{R_E}$$

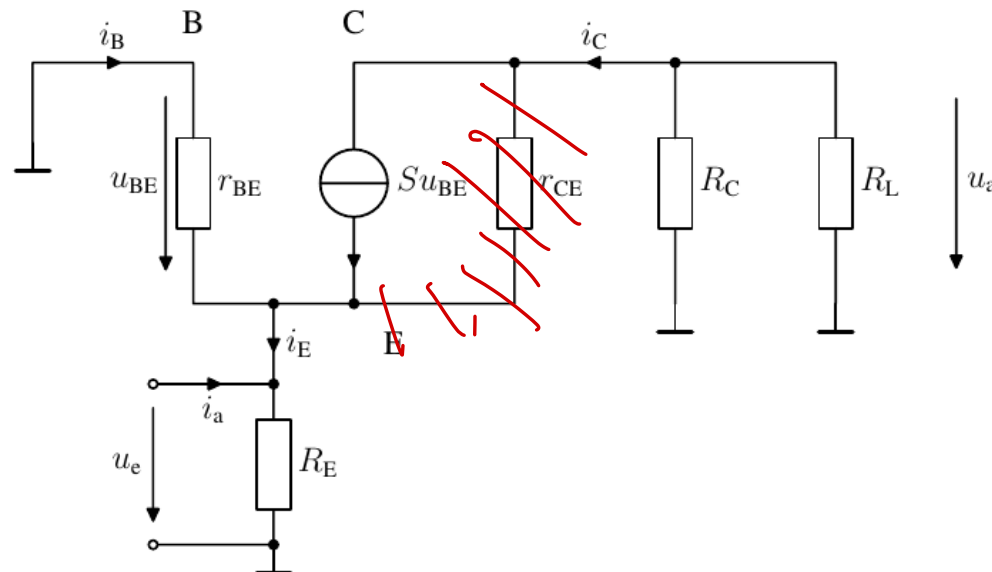
$$i_a - \frac{u_e}{r_{BE}} - S u_e = \frac{u_e}{R_E}$$

$$i_a = u_e \left(\frac{1}{r_{BE}} + S + \frac{1}{R_E} \right)$$

$$u_e = -u_{BE}$$

Aufgabe 2

e) Finden Sie r_e , r_a , A_0 . Early-Effekt kann vernachlässigt werden



$$r_e = \frac{u_e}{i_e}$$

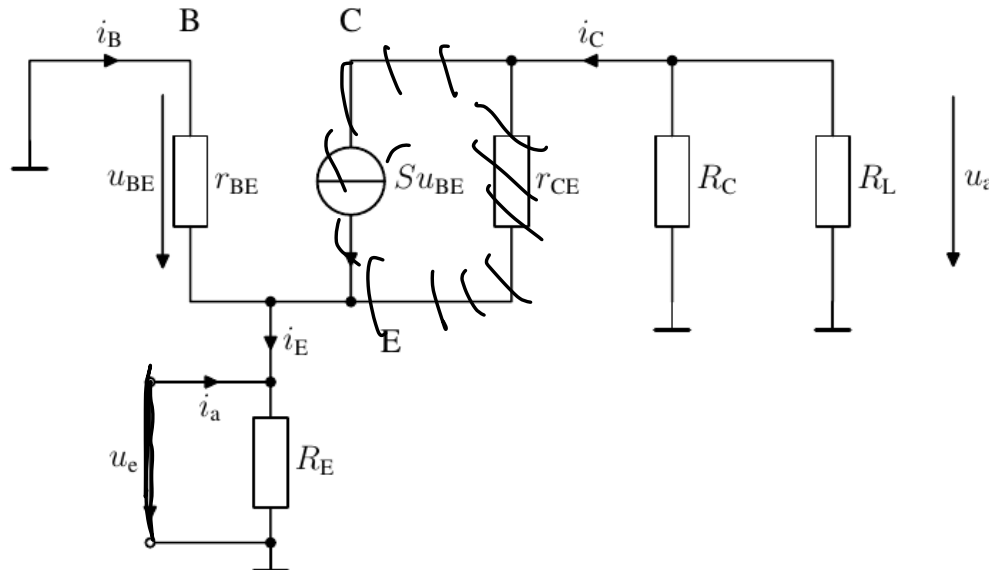
$$i_a = u_e \left(\frac{1}{r_{BE}} + s + \frac{1}{R_E} \right) \approx \frac{u_e}{\left(\frac{1}{r_{BE}} + s + \frac{1}{R_E} \right)^{-1}}$$

$$i_a \approx \frac{u_e}{\left(r_{BE} \parallel \frac{1}{s} \parallel R_E \right)}$$

$$\frac{u_e}{i_e} = \left(r_{BE} \parallel \frac{1}{s} \parallel R_E \right)$$

Aufgabe 2

e) Finden Sie r_e , r_a , A_0 . Early-Effekt kann vernachlässigt werden



$$r_a = \frac{u_a}{i_a}$$

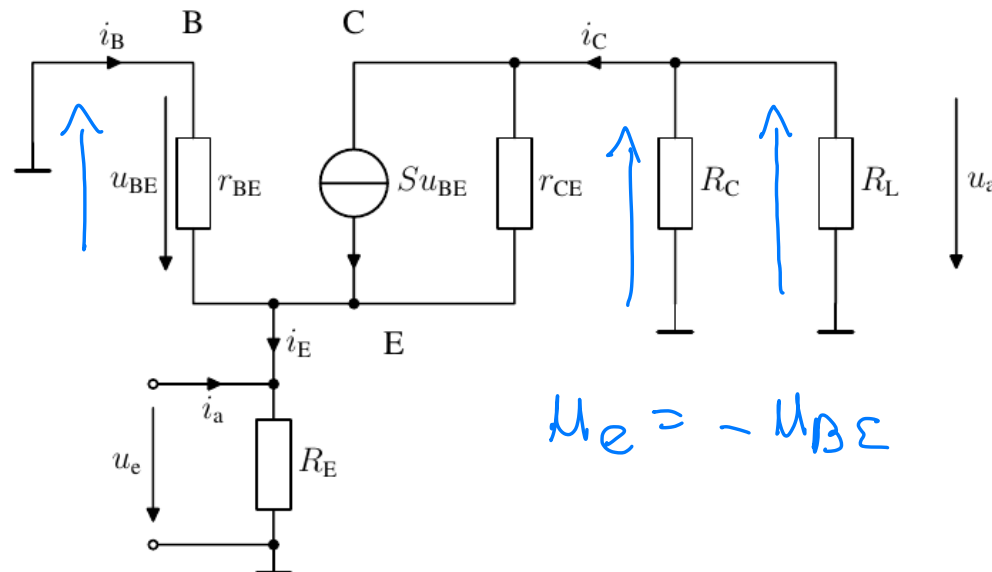
$$r_a \approx R_C \parallel R_L$$

$$= 200 \Omega \parallel 100 \Omega$$

$$= 66,7 \Omega$$

Aufgabe 2

e) Finden Sie r_e , r_a , A_0 . Early-Effekt kann vernachlässigt werden



$$A_0 = \frac{u_a}{u_e}$$

$$u_a = -i_C \cdot r_a$$

$$= -S \cdot u_{BE} \cdot r_a$$

$$= -S \cdot (-u_e) \cdot r_a$$

$$= S \cdot u_e \cdot r_a$$

$$A_a = S \cdot r_a = 384,6 \text{ mS} \cdot 66,7 \Omega$$

$$= 25,7$$

Aufgabe 3 (Designaufgabe mit LTSpice)

Gegeben ist die Schaltung in Abbildung 5. Am Eingang des Verstärkers werden Frequenzen im Bereich $10 \text{ kHz} < f_0 \leq 100 \text{ MHz}$ erwartet. Der Innenwiderstand der Signalquelle ist $R_g = 5 \Omega$. Das Signal soll um den Faktor $A_{0,\text{dB}} = 50 \text{ dB}$ verstärkt werden. Der Lastwiderstand beträgt $R_L = 600 \Omega$. Im Folgenden soll der Verstärker schrittweise entworfen werden.

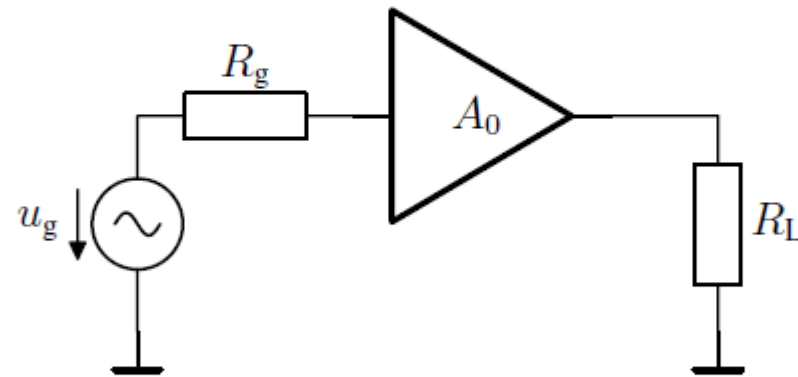
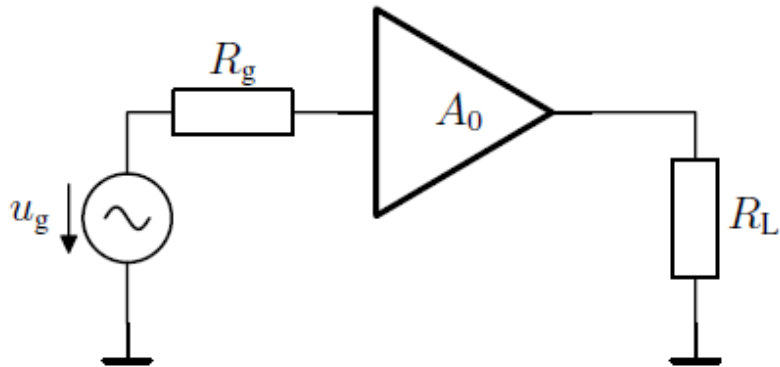


Abbildung 5

Nutzen Sie für die LTSpice Simulation den BC547C Transistor. Die Early-Spannung des Transistors beträgt $|U_A| = 52,64 \text{ V}$.

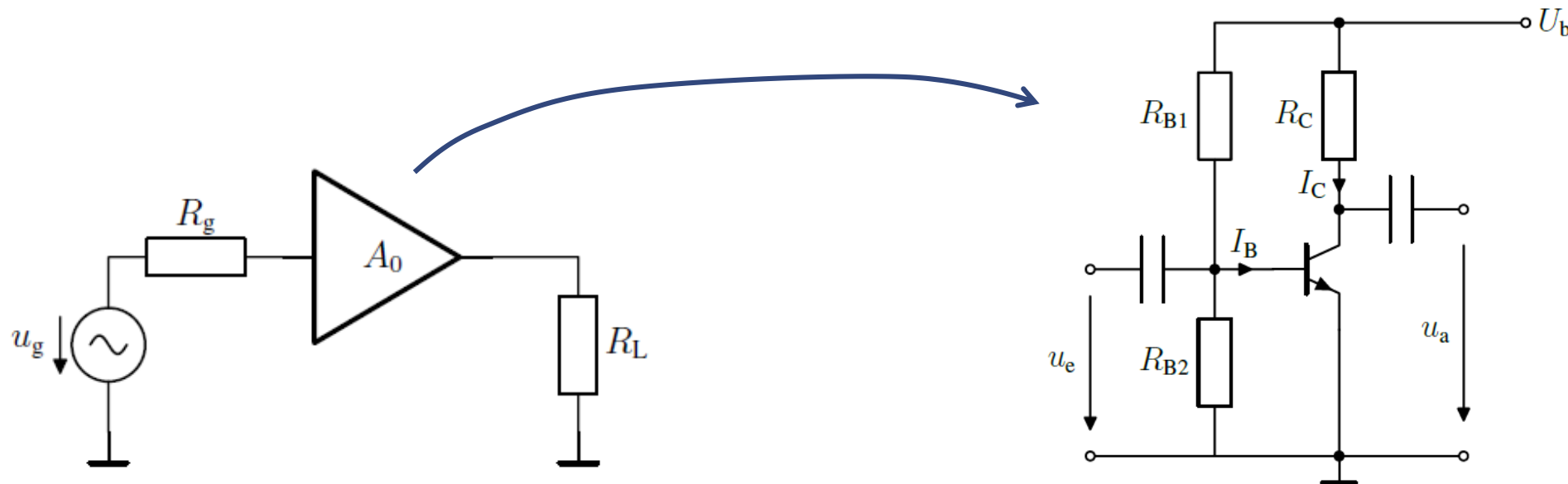
Aufgabe 3

- a) Welche einstufige Grundschialtung eignet sich am besten, um den Verstärker zu realisieren?
 - Große Verstärkung
 - Große Eingangsimpedanz



Aufgabe 3

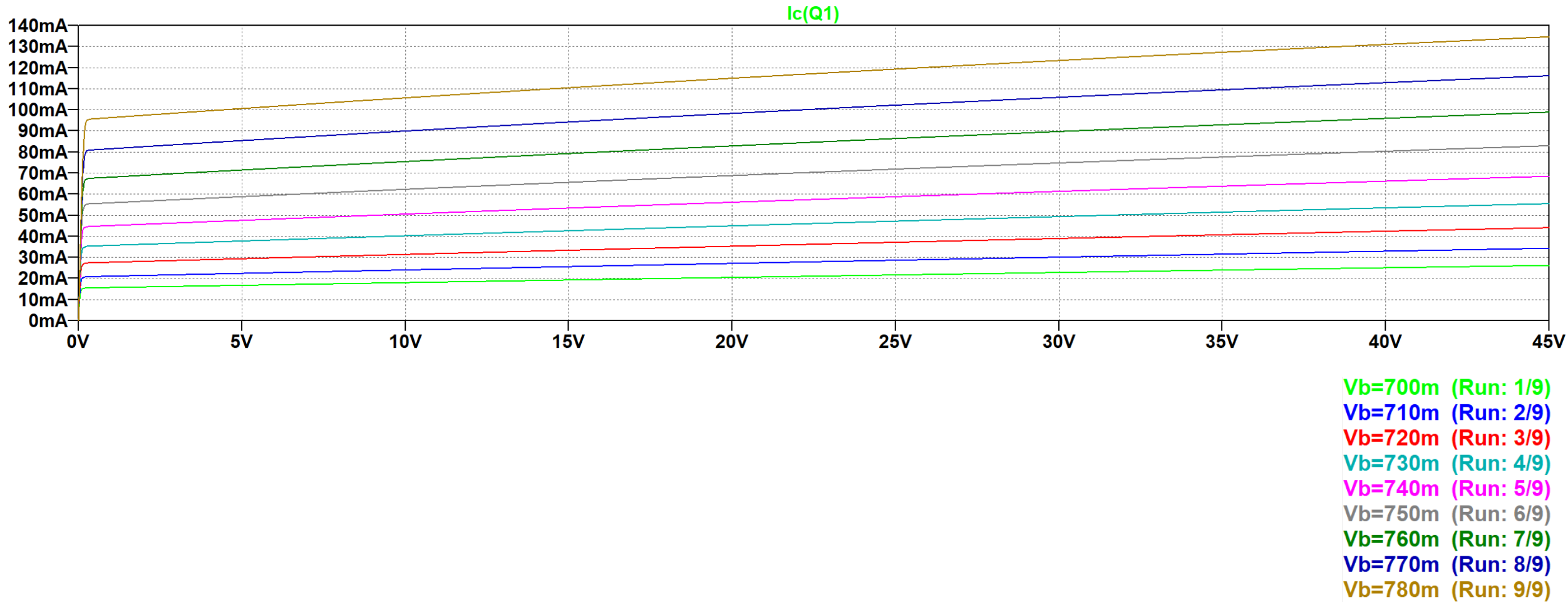
- a) Welche einstufige Grundschialtung eignet sich am besten, um den Verstärker zu realisieren?



Aufgabe 3

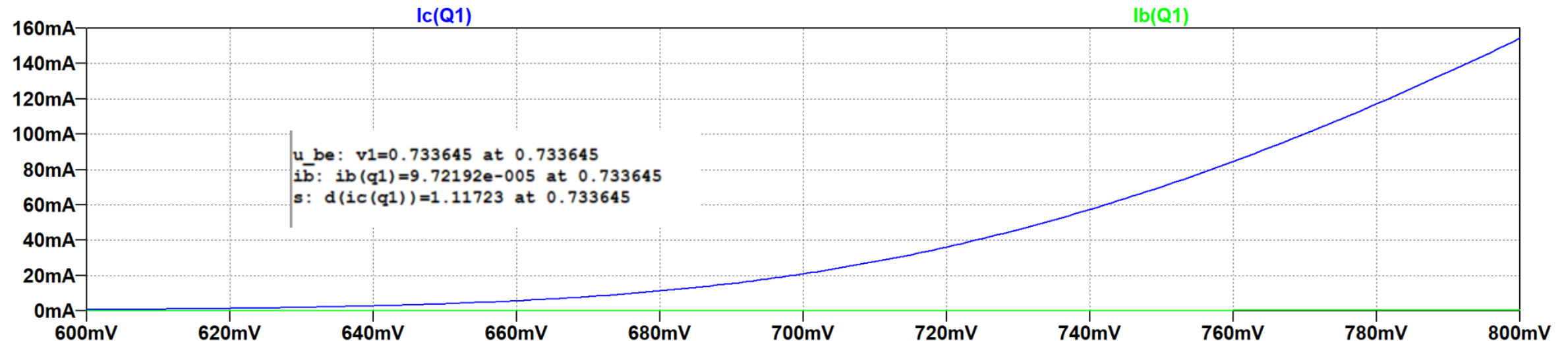
c) Kennlinienfeld simulieren und Arbeitspunkt für maximale Aussteuerbarkeit finden.

- $U_{CE,Max} = 45 \text{ V}$
- $I_{C,Max} = 100 \text{ mA}$



Aufgabe 3

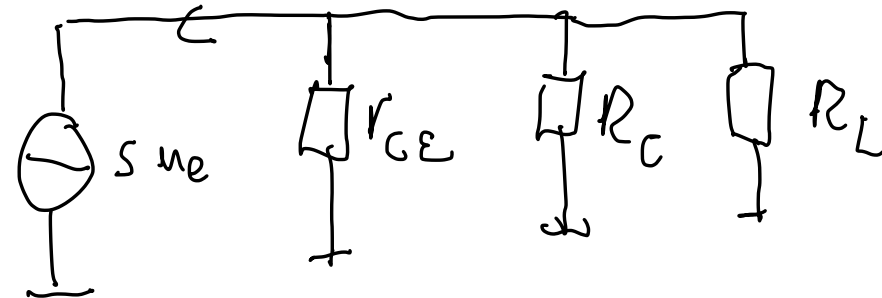
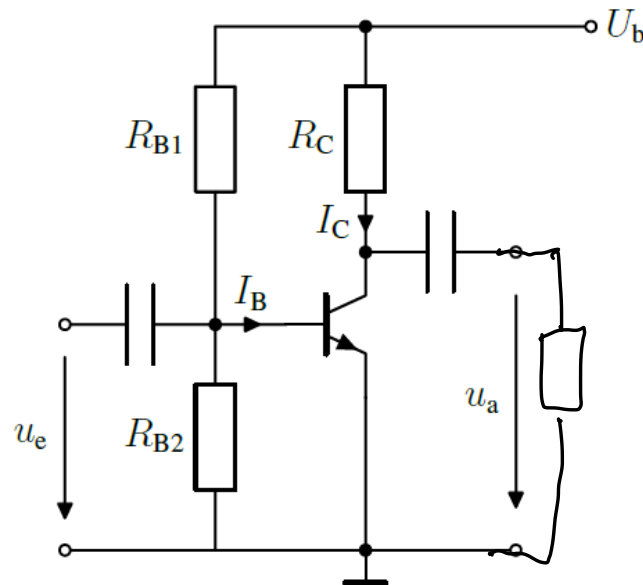
c) Gesucht: U_{BE} , I_B , S , R_C , U_b



Aufgabe 3

c) Gesucht R_C , U_b

- $A_0 = 50 \text{ dB}$
- Arbeitspunkt für maximale Aussteuerbarkeit

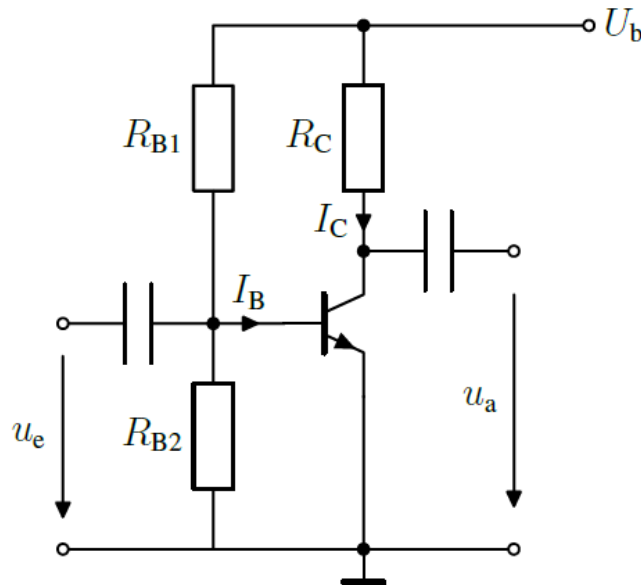


$$\begin{aligned}
 A_0 &= -S r_a \\
 &= -S (r_{ce} \parallel R_C \parallel R_L)
 \end{aligned}$$

Aufgabe 3

c) Gesucht R_C , U_b

- $A_0 = 50 \text{ dB}$ $|A_0| = 10^{\frac{50}{20}} = 316,2$
- Arbeitspunkt für maximale Aussteuerbarkeit



$$A_0 = -\beta r_a \stackrel{!}{=} -316,2$$

$$\begin{aligned} r_a &= \frac{A_0}{-\beta} = (R_C \parallel R_L \parallel r_{ce}) \\ &= R_C \parallel (R_L \parallel r_{ce}) \\ &= \frac{R_C \cdot (R_L \parallel r_{ce})}{R_C + (R_L \parallel r_{ce})} \end{aligned}$$

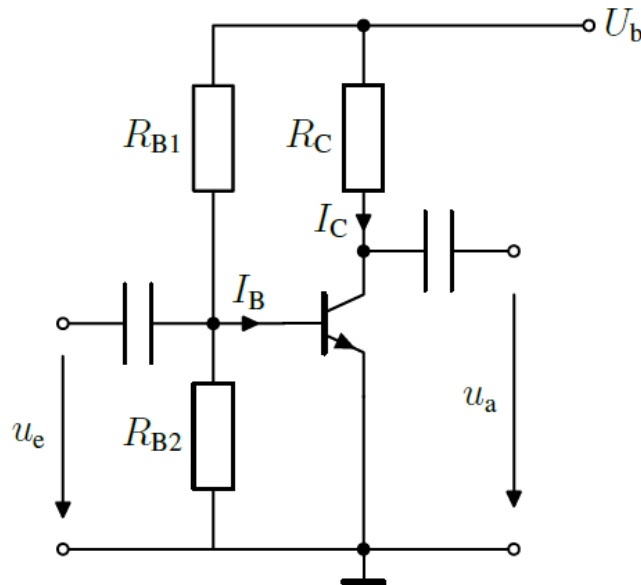
$$R_C = \frac{r_a \cdot (R_L \parallel r_{ce})}{(R_C \parallel r_{ce}) - r_a}$$

Aufgabe 3

c) Gesucht R_C , U_b

- $A_0 = 50 \text{ dB}$
- Arbeitspunkt für maximale Aussteuerbarkeit

$$R_C = \frac{r_a \parallel (R_L \parallel r_{CE})}{(R_C \parallel r_{CE}) - r_a}$$



$$r_{CE} = 1,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 600 \Omega$$

$$r_{CE} \parallel R_L = 428,6 \Omega$$

$$r_a = \frac{A_0}{-S} = 283,1 \Omega$$

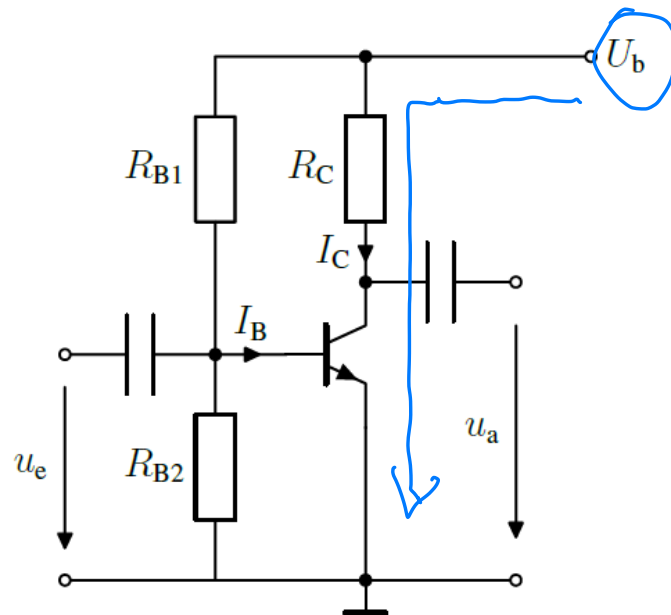
$$R_C = 833,9 \Omega$$

Aufgabe 3

c) Gesucht R_C , U_b

- $A_0 = 50 \text{ dB}$
- Arbeitspunkt für maximale Aussteuerbarkeit

$$R_C = 833,9 \Omega$$

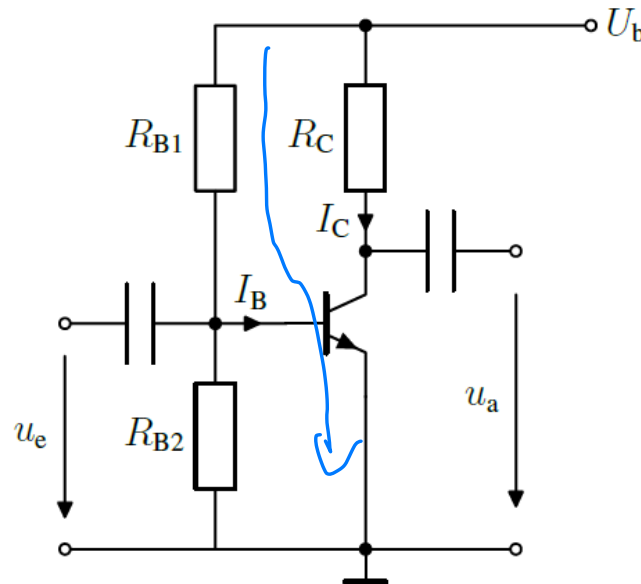


$$\begin{aligned}
 U_b &= I_C R_C + U_{CE} \\
 &= 50 \text{ mA} \cdot 833,9 \Omega + 22,6 \text{ V} \\
 &= 64,3 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Aufgabe 3

d) Spannungsteiler entwerfen

- Arbeitspunkt einstellen
- $I_{RB1} = 10 I_B$

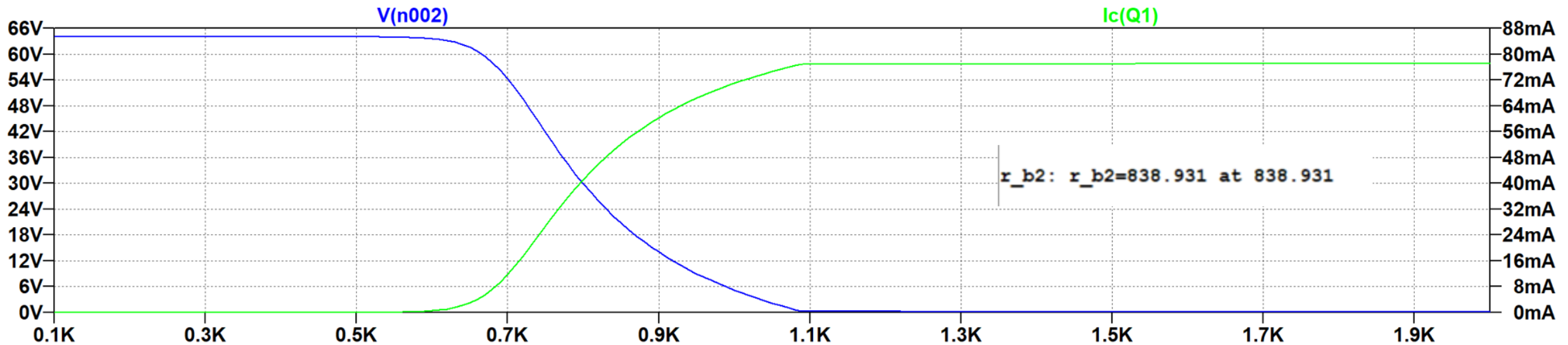


$$R_{B1} = \frac{U_b - U_{BE}}{10 I_B}$$

$$= \frac{64,3 \text{ V} - 0,733 \text{ V}}{10 \cdot 97,2 \text{ } \mu\text{A}}$$

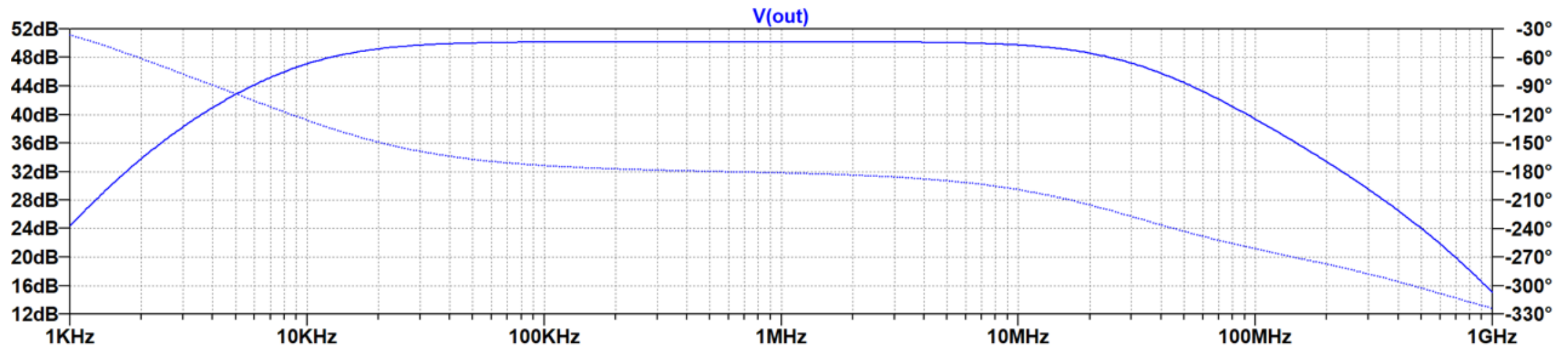
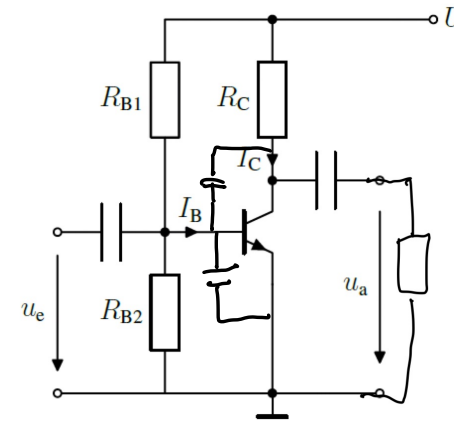
$$= 65,397 \text{ k}\Omega$$

Aufgabe 3



Aufgabe 3

e) Kleinsignal-Simulation (AC)



Aufgabe 3

f) Zeitbereich-Simulation (Transient)

- $u_g(t) = U_0 \sin(2\pi f_0 t)$
- $f_0 = 1 \text{ MHz}$

