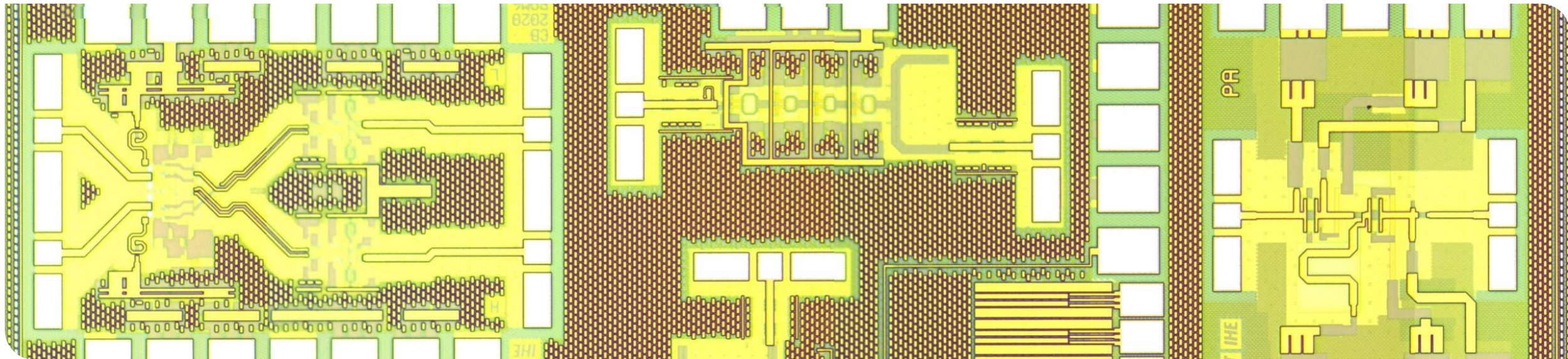


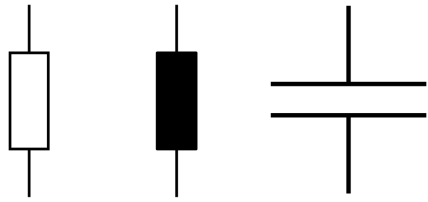
ES Übung 5 – Grundlagen Analoger Schaltungen

M.Sc. Selina Eckel



Was bisher geschah ...

Linear



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

Ü1

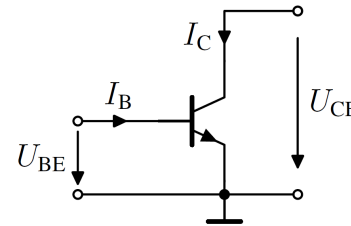
Nichtlinear



Dioden

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

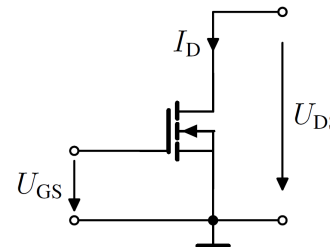
Ü2



Bipolartransistoren

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

Ü3



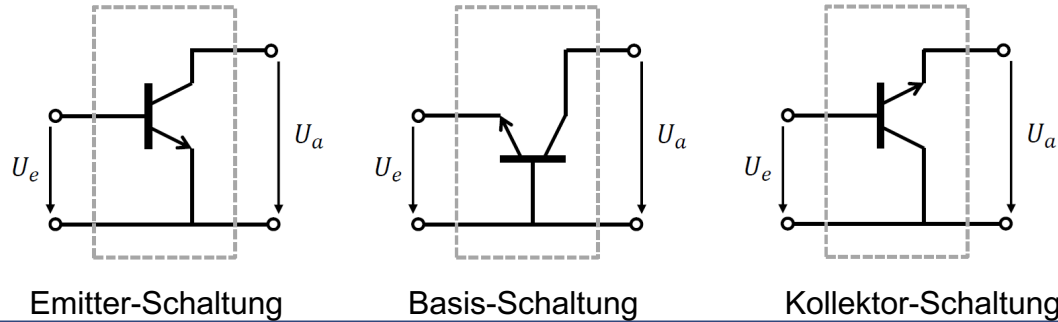
Feldeffekttransistoren

$$I_D = \frac{\beta}{2} (U_{GS} - U_{th})^2 \left(1 + \frac{U_{DS}}{U_A} \right)$$

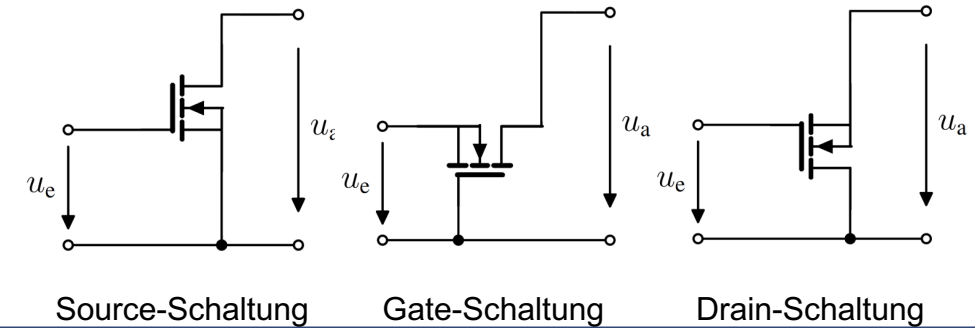
Ü4

Ü5

Bipolartransistoren



FETs



Grundlagen Analoger Schaltungen

Erweiterungen

(Aufg. 1)

- Strom-gegenkopplung
- Spannungs-gegenkopplung

Frequenzgang

(Aufg. 2)

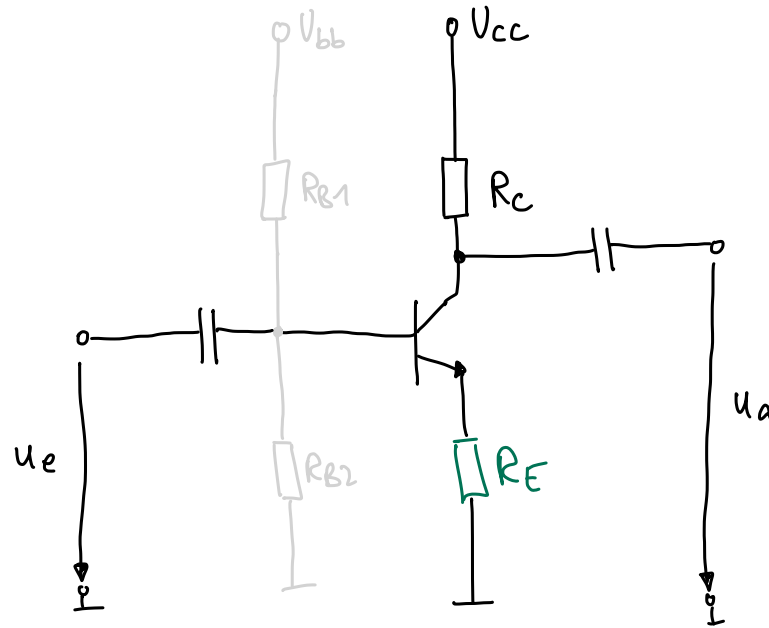
- Berücksichtigung der Koppelkondensatoren und parasitären Kapazitäten
- Miller-Effekt

Differenzverstärker

(Aufg. 3)

- Differentielles Paar
- Stromspiegel

Emitter-Schaltung mit Stromgegenkopplung



Kleinsignal-Parameter:

$$r_e \approx r_{BE} (1 + S \cdot R_E)$$

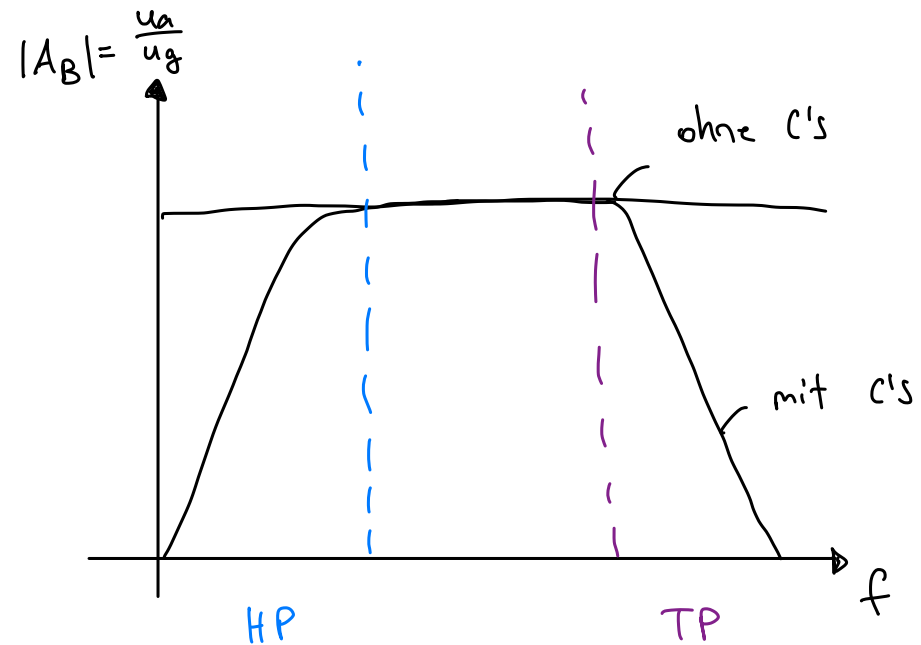
$$r_a \approx R_C$$

$$A \approx - \frac{S \cdot R_C}{1 + S \cdot R_E} \stackrel{S \cdot R_E \gg 1}{=} - \frac{R_C}{R_E}$$

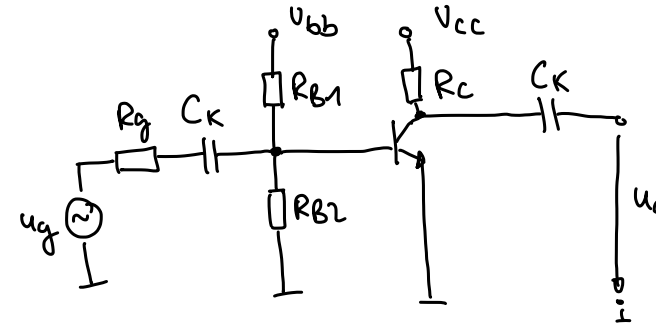
Annahmen: $R_{B1}, R_{B2} \gg r_{BE}$

$r_{CE} \rightarrow \infty$ (Early-Effekt vernachlässigbar)

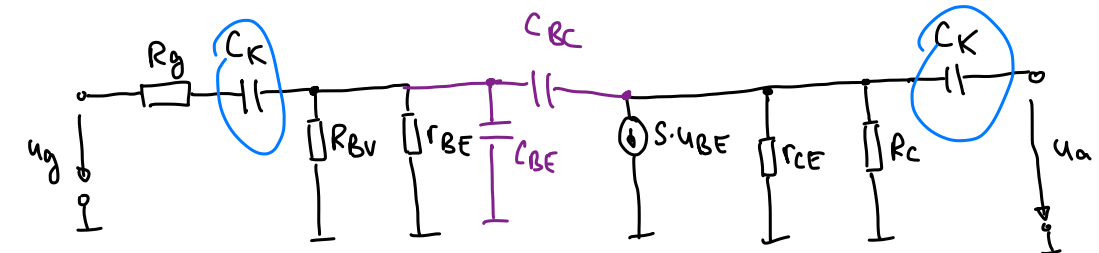
Frequenzgang



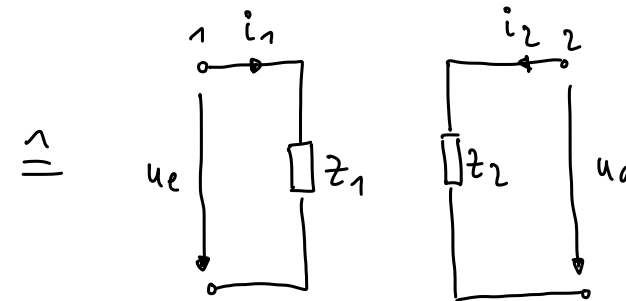
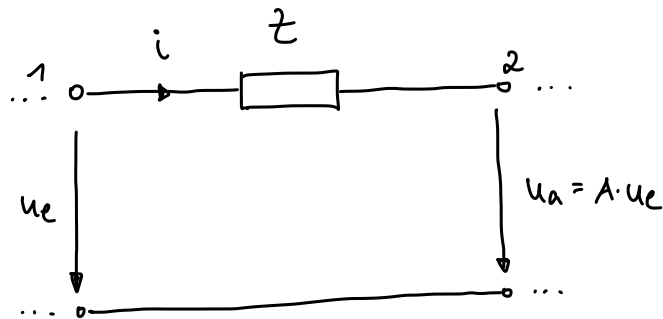
Emitterschaltung:



↳ KS-ESB:



Miller-Theorem



$$i = i_1$$

$$\frac{u_e - u_a}{z} = \frac{u_e}{z_1}$$

$$z_1 = \frac{u_e \cdot z}{u_e - A \cdot u_e}$$

$$= \frac{z}{1 - A}$$

$$-i = i_2$$

$$-\frac{u_e - u_a}{z} = \frac{u_a}{z_2}$$

$$z_2 = \frac{u_a \cdot z}{u_a - u_a/A} = \frac{z}{1 - 1/A}$$

$$= \frac{z \cdot A}{A - 1}$$

Differenzverstärker mit ohmscher Last

■ Gleich- und Gegentaktspannung

$$\left. \begin{aligned} U_G &= \frac{U_{e1} + U_{e2}}{2} \\ U_D &= U_{e1} - U_{e2} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} U_{e1} &= U_G + \frac{U_D}{2} \\ U_{e2} &= U_G - \frac{U_D}{2} \end{aligned}$$

■ Gleich- und Gegentaktverstärkung

$$A_G = \frac{u_{a1,2}}{u_G} \quad | \quad u_D = 0 \quad \text{ideal: } A_G \approx 0$$

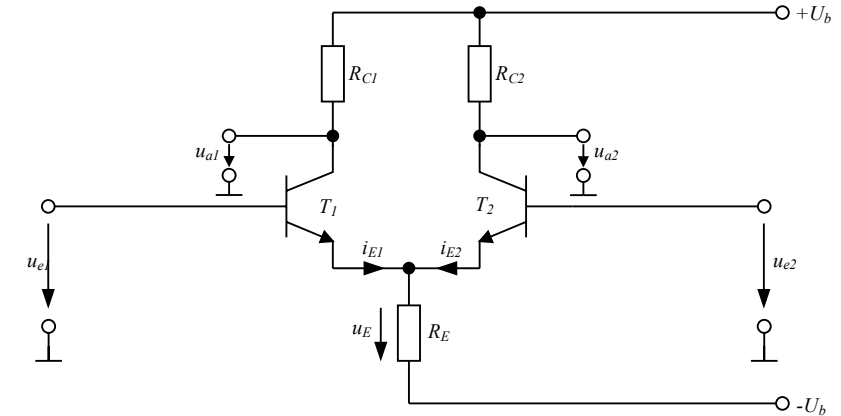
$$A_D = \frac{u_{a1} - u_{a2}}{u_D} \quad | \quad u_G = \text{konst}$$

■ Gleichtaktunterdrückung

$$G = \text{CMRR} = \frac{|A_D|}{|A_G|} \quad \text{ideal: } \text{CMRR} \rightarrow \infty$$

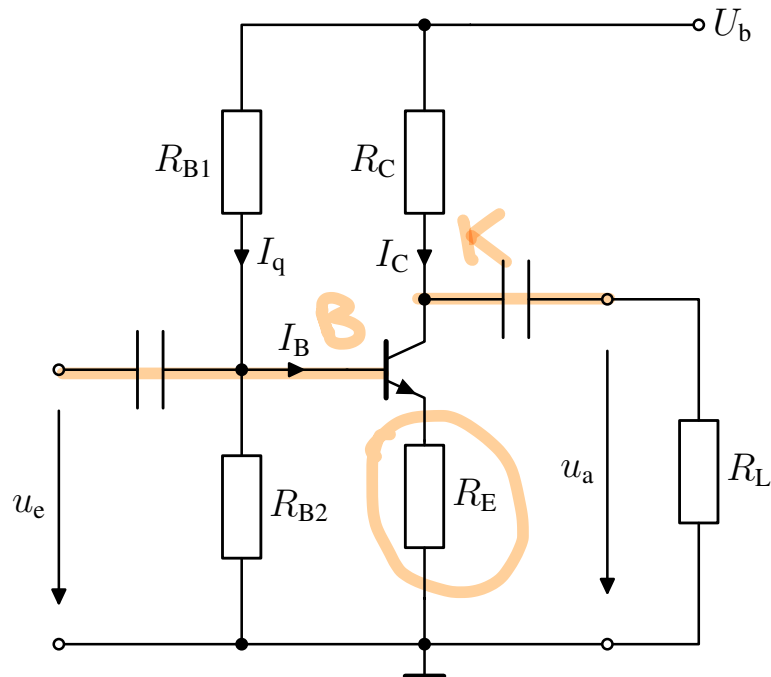
■ Eigenschaften:

- Verstärkt die Differenzspannung an den Eingängen unabhängig von der Gleichtaktspannung



Aufgabe 1 – Einfache Verstärkerstufe

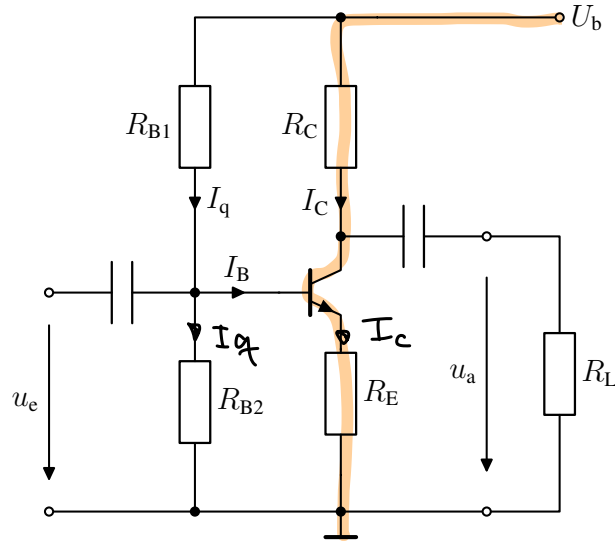
a) ges.: Grundsaltung



Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

Aufgabe 1 – Einfache Verstärkerstufe

b) ges.: R_{B1} , R_C



Gegeben:

$$U_b = 15 \text{ V}, U_T = 26 \text{ mV}, \beta = 290$$

$$R_{B2} = 50 \text{ k}\Omega, R_E = 1,1 \text{ k}\Omega, R_L = 3,9 \text{ k}\Omega$$

$$\text{AP: } U_{BE} = 0,7 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 5 \text{ V}$$

Annahmen:

$$I_B \ll I_Q, I_B \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachlässigbar}$$

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

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

R_{B1} : $\frac{U_{RB2}}{U_b} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$

$$U_{RB2} = U_{BE} + I_C \cdot R_E = 2,9 \text{ V}$$

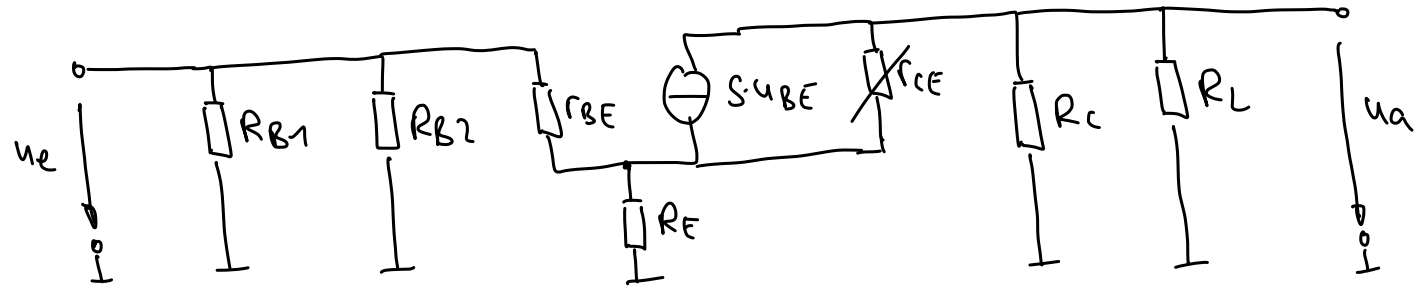
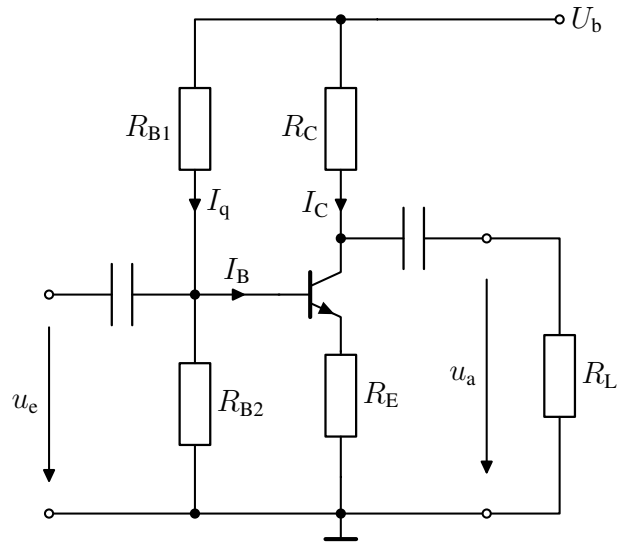
$$\hookrightarrow \frac{U_{RB2}}{U_b} \cdot (R_{B1} + R_{B2}) = R_{B2}$$

$$R_{B1} \cdot \frac{U_{RB2}}{U_b} = R_{B2} \left(1 - \frac{U_{RB2}}{U_b} \right) \quad | \cdot \frac{U_b}{U_{RB2}}$$

$$R_{B1} = R_{B2} \cdot \left(\frac{U_b}{U_{RB2}} - 1 \right) \approx 209 \text{ k}\Omega$$

Aufgabe 1 – Einfache Verstärkerstufe

c) ges.: Kleinsignal-ESB



Gegeben:

$$U_b = 15 \text{ V}, U_T = 26 \text{ mV}, \beta = 290$$

$$R_{B2} = 50 \text{ k}\Omega, R_E = 1,1 \text{ k}\Omega, R_L = 3,9 \text{ k}\Omega$$

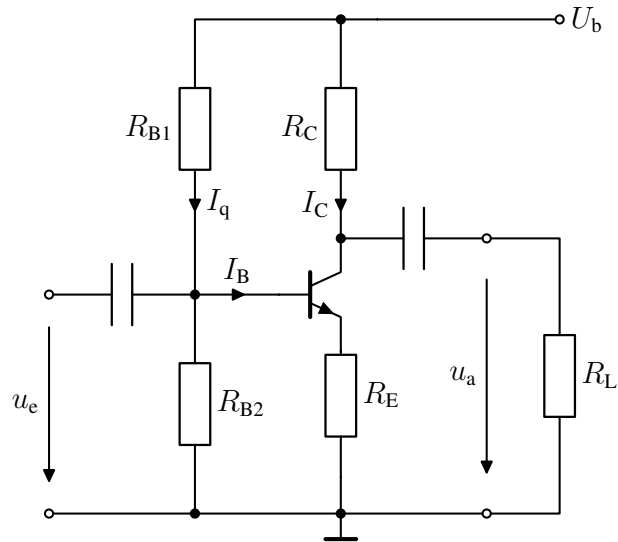
$$\text{AP: } U_{BE} = 0,7 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 5 \text{ V}$$

Annahmen:

$$I_B \ll I_q, I_B \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachlässigbar}$$

Aufgabe 1 – Einfache Verstärkerstufe

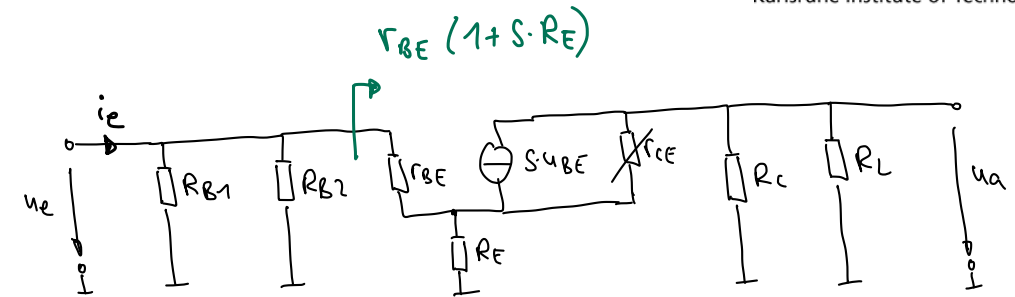
d) ges.: r_e



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

$$= R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel (r_{BE} (1 + S \cdot R_E))$$

$$\approx 35,8 \text{ k}\Omega$$



$$R_{B1} \parallel R_{B2} = 209 \text{ k}\Omega \parallel 50 \text{ k}\Omega \approx 40,3 \text{ k}\Omega$$

$$r_{BE} = \frac{U_T}{I_B} = \frac{U_T \cdot \beta}{I_C} \approx 3,8 \text{ k}\Omega$$

$$S = \frac{I_C}{U_T} \approx 77 \text{ mS}$$

Gegeben:

$$U_b = 15 \text{ V}, U_T = 26 \text{ mV}, \beta = 290$$

$$R_{B2} = 50 \text{ k}\Omega, R_E = 1,1 \text{ k}\Omega, R_L = 3,9 \text{ k}\Omega$$

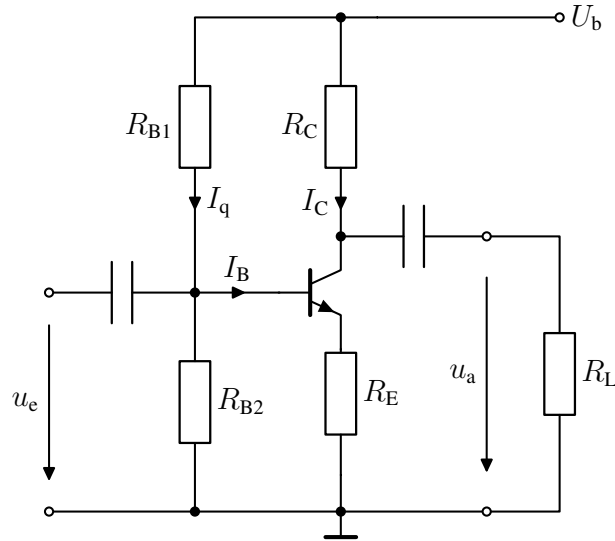
$$\text{AP: } U_{BE} = 0,7 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 5 \text{ V}$$

Annahmen:

$$I_B \ll I_q, I_B \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachlässigbar}$$

Aufgabe 1 – Einfache Verstärkerstufe

e) ges.: r_a, A



Gegeben:

$$U_b = 15 \text{ V}, U_T = 26 \text{ mV}, \beta = 290$$

$$R_{B2} = 50 \text{ k}\Omega, R_E = 1,1 \text{ k}\Omega, R_L = 3,9 \text{ k}\Omega$$

$$\text{AP: } U_{BE} = 0,7 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 5 \text{ V}$$

Annahmen:

$$I_B \ll I_q, I_B \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachlässigbar}$$

$$r_a = \frac{u_a}{i_a} = R_C \parallel R_L$$

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

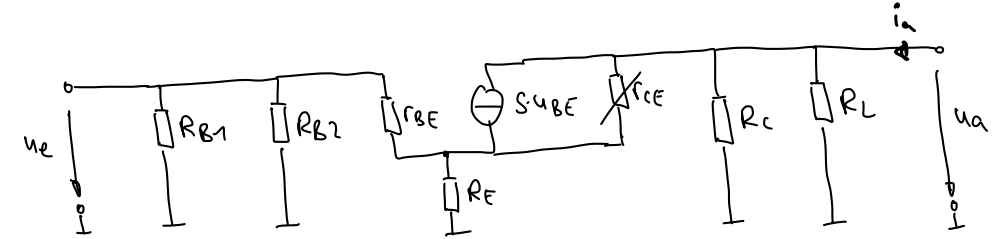
$$2) R_L = 3,9 \text{ k}\Omega : r_a = 1,95 \text{ k}\Omega$$

$$A \approx - \frac{S \cdot r_a}{1 + S \cdot R_E} \stackrel{S \cdot R_E \gg 1}{\approx} - \frac{r_a}{R_E}$$

$$77 \text{ mS} \cdot 1,1 \text{ k}\Omega = 84,6 \gg 1$$

$$1) R_L \rightarrow \infty \rightarrow A = -3,55$$

$$2) R_L = 3,9 \text{ k}\Omega \rightarrow A = -1,77$$

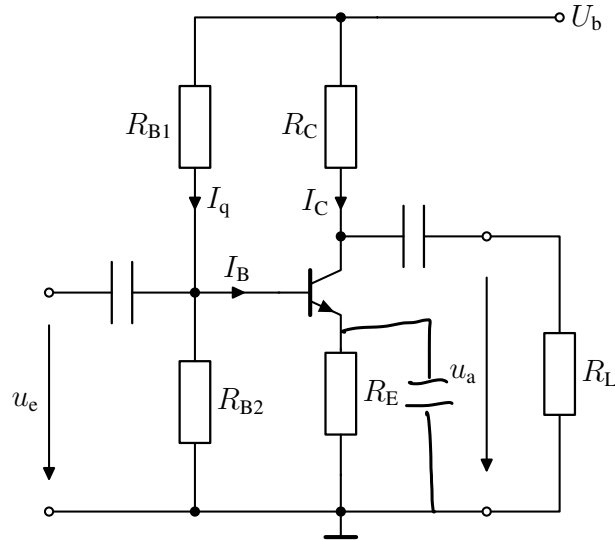


Aufgabe 1 – Einfache Verstärkerstufe

f) ges.: Vor- und Nachteile

Vorteil: - geringere Temperaturabhängigkeit
- A hängt nur noch von äußerer Beschaltung ab

Nachteil: - A ist geringer



Gegeben:

$$U_b = 15 \text{ V}, U_T = 26 \text{ mV}, \beta = 290$$

$$R_{B2} = 50 \text{ k}\Omega, R_E = 1,1 \text{ k}\Omega, R_L = 3,9 \text{ k}\Omega$$

$$\text{AP: } U_{BE} = 0,7 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 5 \text{ V}$$

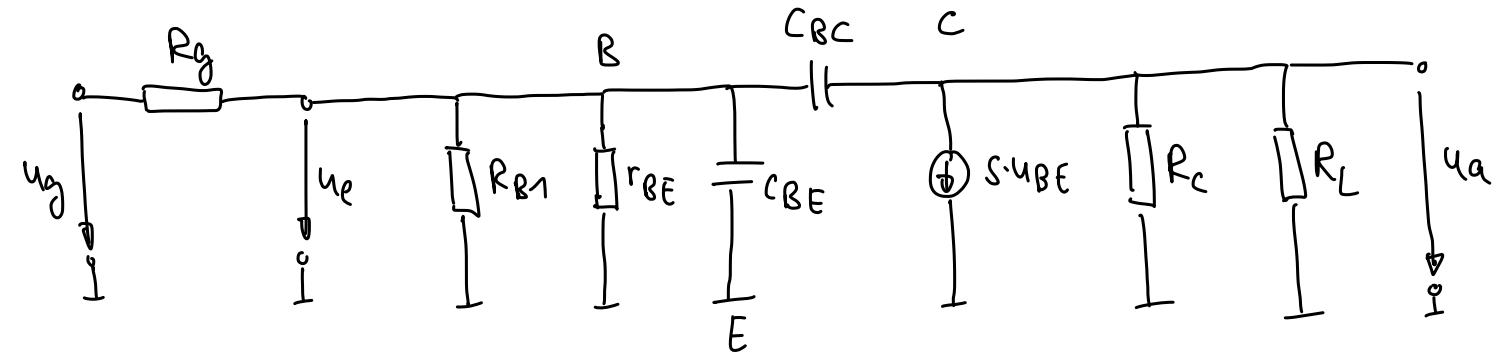
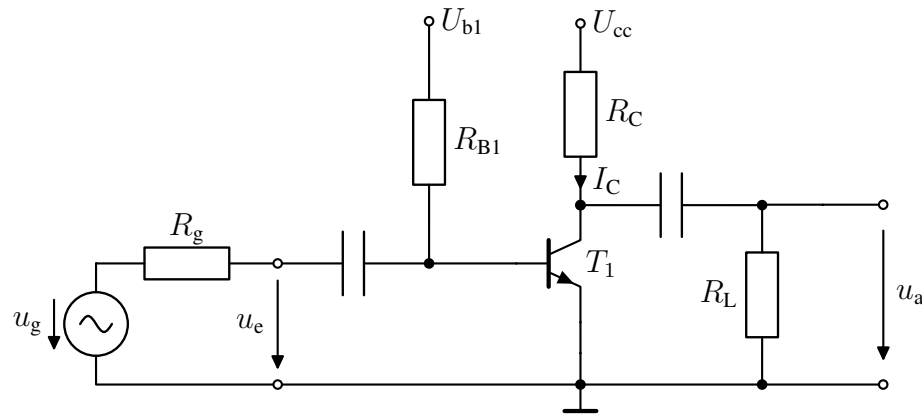
Annahmen:

$$I_B \ll I_Q, I_B \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachlässigbar}$$

Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

Teil 1: Emitterschaltung

a) ges.: Kleinsignal-ESB



Gegeben:

$$U_{cc} = 1,9 \text{ V}, U_T = 26 \text{ mV}, B = \beta = 250$$

$$R_g = 10 \Omega, R_{B1} = 10 \text{ k}\Omega, R_C = R_L = 200 \Omega$$

$$\text{AP: } U_{BE} = 0,9 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 1,5 \text{ V}$$

$$C_{BE} = 3 \text{ pF}, C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$$

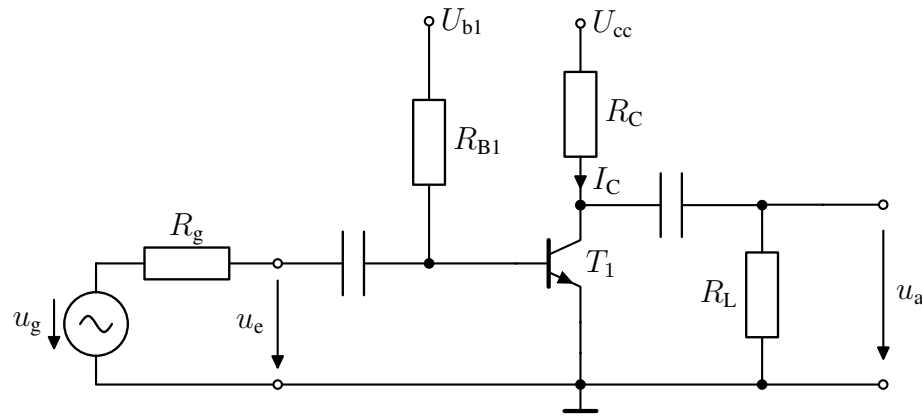
Annahmen:

Early Effekt vernachlässigbar

Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

Teil 1: Emitterschaltung

b) ges.: $A_{B0} = \frac{u_a}{u_g}$

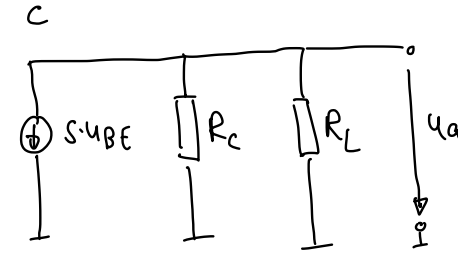
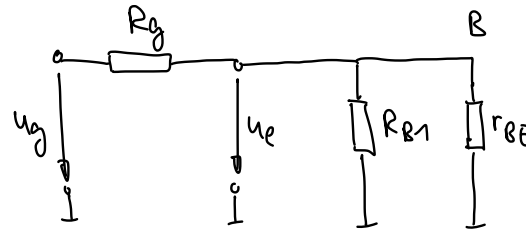


Gegeben:

$U_{cc} = 1,9 \text{ V}$, $U_T = 26 \text{ mV}$, $B = \beta = 250$
 $R_g = 10 \Omega$, $R_{B1} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_C = R_L = 200 \Omega$
 AP: $U_{BE} = 0,9 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ mA}$, $U_{CE} = 1,5 \text{ V}$
 $C_{BE} = 3 \text{ pF}$, $C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$

Annahmen:

Early Effekt vernachlässigbar



$$A_o = \frac{u_a}{u_e} = -S \cdot r_a = -S \cdot \underbrace{(R_C \parallel R_L)}_{100 \Omega} = -7,7$$

$$\text{mit } S = \frac{I_C}{U_T} = 77 \text{ mS}$$

$$\frac{u_e}{u_g} = \frac{R_{B1} \parallel r_{BE}}{R_g + R_{B1} \parallel r_{BE}} \stackrel{R_{B1} \parallel r_{BE} \gg R_g}{=} 1 \rightarrow u_e \approx u_g$$

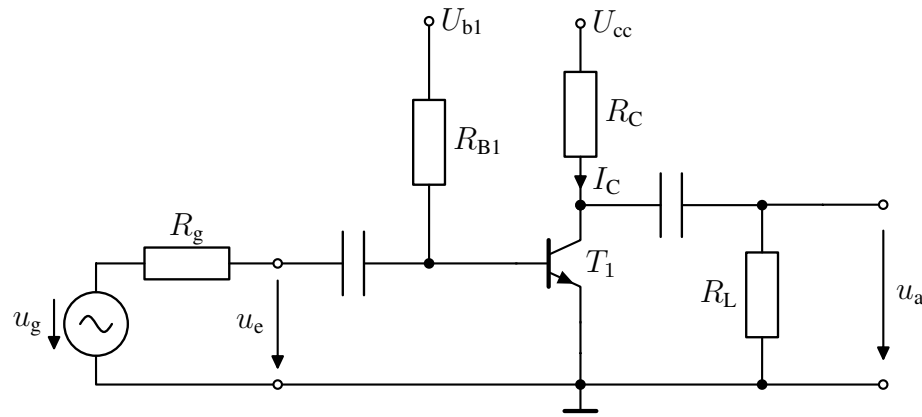
$$\text{mit } r_{BE} = \frac{U_T}{I_B} = \frac{U_T \cdot \beta}{I_C} = 3,25 \text{ k}\Omega, \quad R_{B1} \parallel r_{BE} \approx 2,45 \text{ k}\Omega$$

$$A_{B0} = A_o = -S \cdot (R_C \parallel R_L) = -7,7 //$$

Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

Teil 1: Emitterschaltung

c) ges.: C_e , C_a mittels Miller-Theorem, vereinfachte KS-ESB

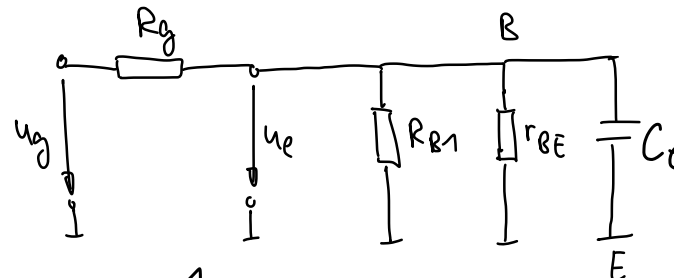


Gegeben:

$U_{cc} = 1,9 \text{ V}$, $U_T = 26 \text{ mV}$, $B = \beta = 250$
 $R_g = 10 \text{ } \Omega$, $R_{B1} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_C = R_L = 200 \text{ } \Omega$
 AP: $U_{BE} = 0,9 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ mA}$, $U_{CE} = 1,5 \text{ V}$
 $C_{BE} = 3 \text{ pF}$, $C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$

Annahmen:

Early Effekt vernachlässigbar



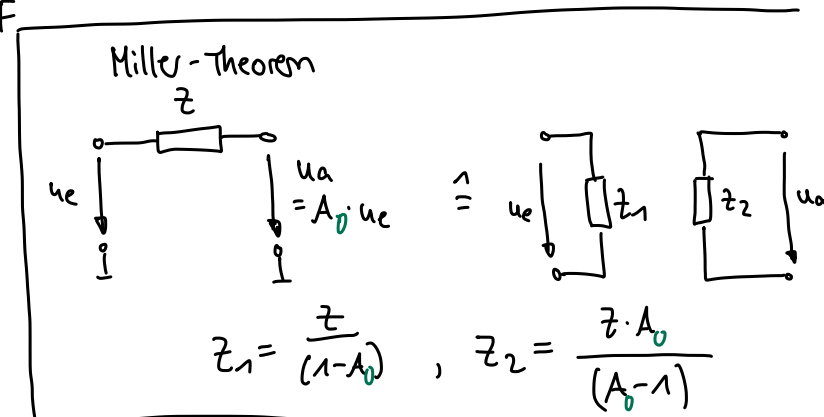
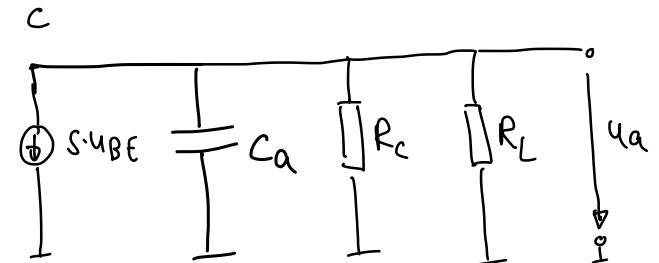
$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_{BC}} = \frac{1}{j\omega C_{BC}(1-A_0)}$$

$$C_1 = C_{BC}(1 + s \cdot R_C || R_L) = 4,35 \text{ pF}$$

$$C_e = C_{BE} + C_{BC}(1 + s \cdot R_C || R_L) = 7,35 \text{ pF}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_{BC} \cdot A_0} = \frac{1}{j\omega C_{BC} \cdot (A_0 - 1)}$$

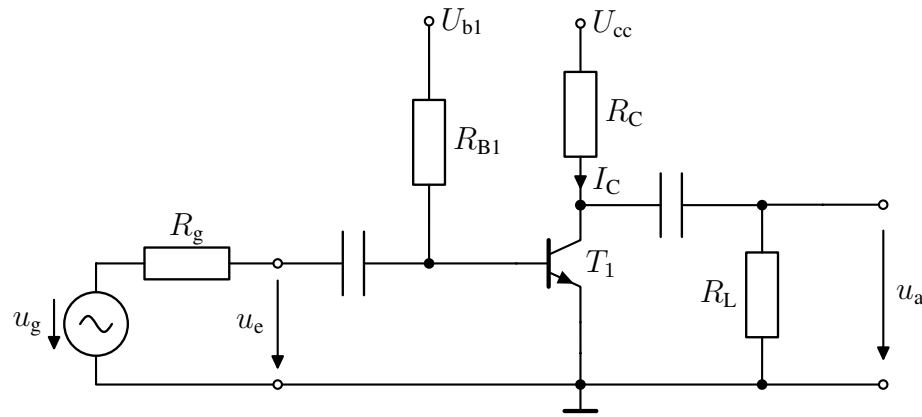
$$C_2 = C_a = C_{BC} \left(1 - \frac{1}{A_0}\right) = 565 \text{ fF}$$



Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

Teil 1: Emitterschaltung

d) ges.: $|A_B(f)|$

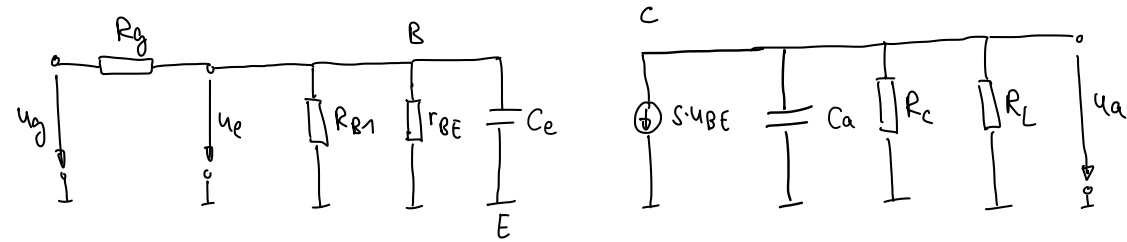


Gegeben:

$U_{CC} = 1,9 \text{ V}$, $U_T = 26 \text{ mV}$, $B = \beta = 250$
 $R_g = 10 \Omega$, $R_{B1} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_C = R_L = 200 \Omega$
 AP: $U_{BE} = 0,9 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ mA}$, $U_{CE} = 1,5 \text{ V}$
 $C_{BE} = 3 \text{ pF}$, $C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$

Annahmen:

Early Effekt vernachlässigbar



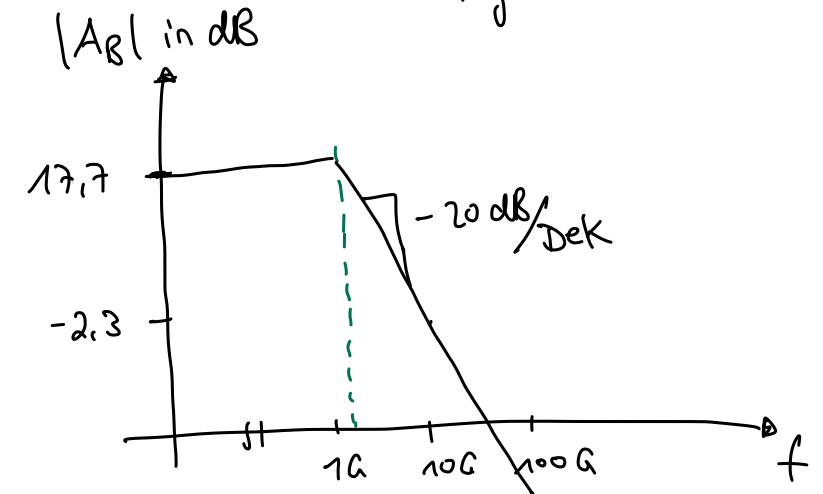
$$f_{p1} = f_{3dB} = \frac{1}{2\pi C_E \cdot r_e}$$

$$= 2,1 \text{ GHz}$$

$$r_e = r_{BE} \parallel R_{B1} \parallel R_g$$

$$\approx R_g = 10 \Omega$$

$$|A_B|_{dB} = 20 \cdot \log(7,7) \approx 17,7$$

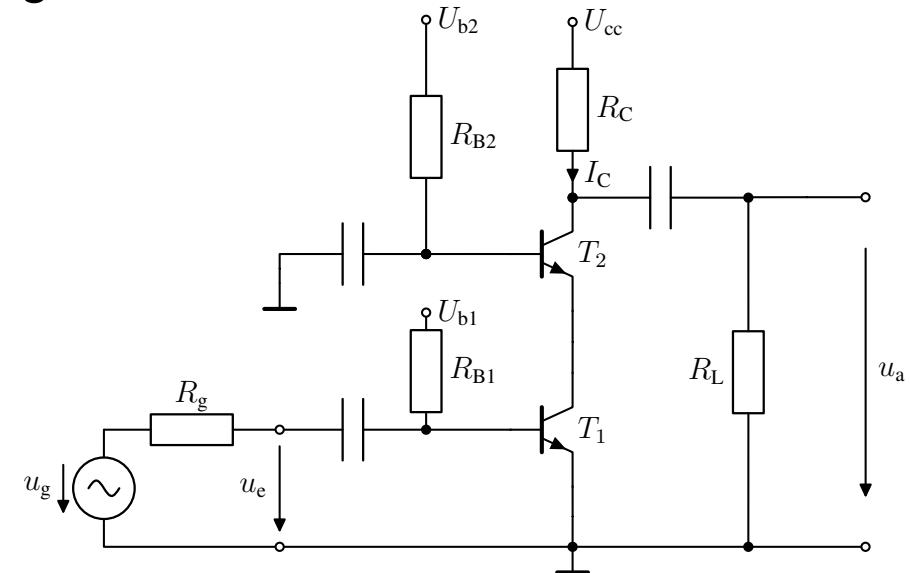


Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

Teil 2: 2-stufige Verstärkerschaltung: Emitter- und Basisschaltung

f) ges.: Bezeichnung

Kaskode



Gegeben:

$$U_T = 26 \text{ mV}, B = \beta = 250$$

$$R_g = 10 \Omega, R_{B1} = R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega, R_C = R_L = 200 \Omega$$

$$\text{AP für } T_1 \text{ \& } T_2: U_{BE} = 0,9 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 1,5 \text{ V}$$

$$C_{BE} = 3 \text{ pF}, C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$$

Annahmen:

$$I_{B1} \text{ \& } I_{B2} \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachlässigbar}$$

Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

Teil 2: 2-stufige Verstärkerschaltung: Emitter- und Basisschaltung

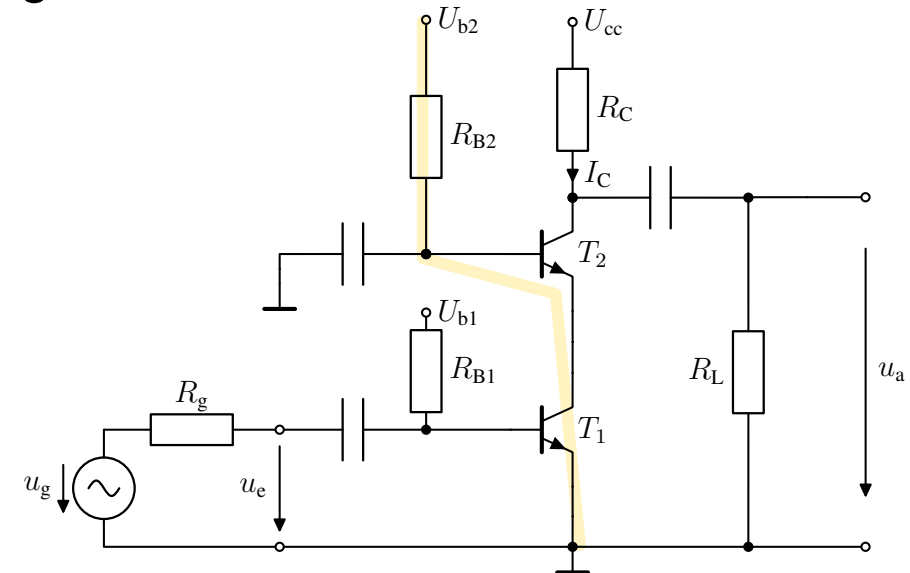
g) ges.: U_{b2} , U_{cc}

$$U_{cc} = 1,9V + 1,5V = 3,4V //$$

$$U_{b2} = I_{B2} \cdot R_{B2} + U_{BE2} + U_{CE}$$

$$\frac{I_C}{\beta} = 8\mu A$$

$$= 0,08V + 0,9V + 1,5V = 2,48V //$$



Gegeben:

$$U_T = 26 \text{ mV}, B = \beta = 250$$

$$R_g = 10 \Omega, R_{B1} = R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega, R_C = R_L = 200 \Omega$$

$$\text{AP für } T_1 \text{ \& } T_2: U_{BE} = 0,9 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 1,5 \text{ V}$$

$$C_{BE} = 3 \text{ pF}, C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$$

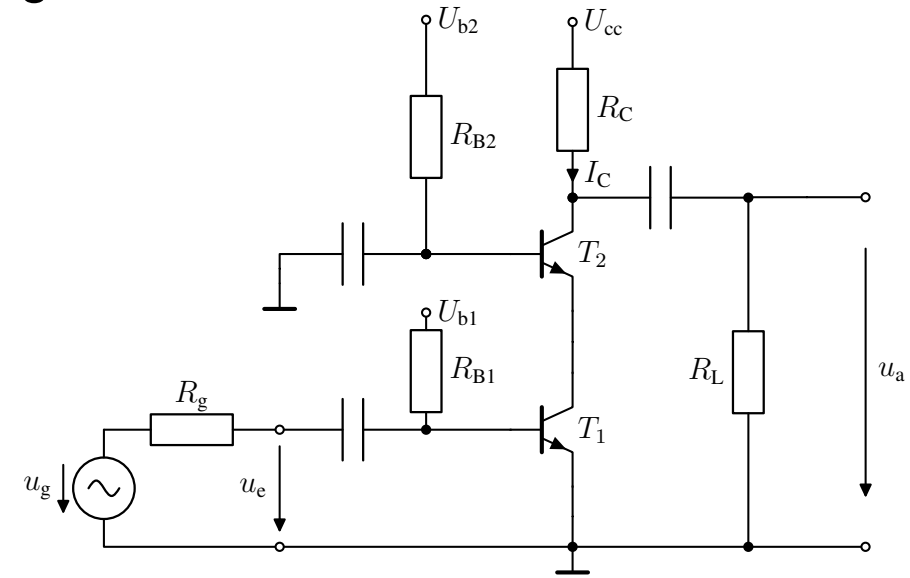
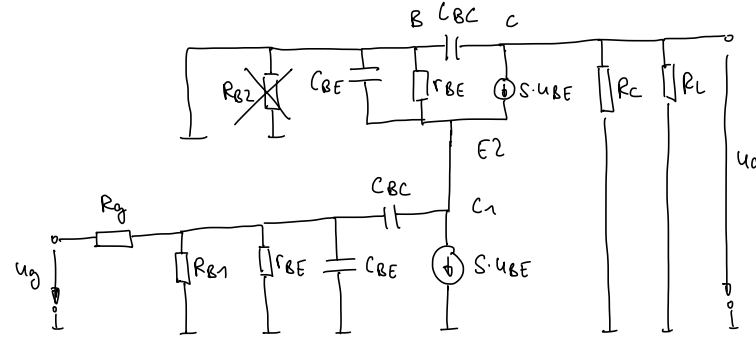
Annahmen:

$$I_{B1} \text{ \& } I_{B2} \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachlässigbar}$$

Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

Teil 2: 2-stufige Verstärkerschaltung: Emitter- und Basisschaltung

h) ges.: KS-ESB



Gegeben:

$$U_T = 26 \text{ mV}, B = \beta = 250$$

$$R_g = 10 \Omega, R_{B1} = R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega, R_C = R_L = 200 \Omega$$

$$\text{AP für } T_1 \text{ \& } T_2: U_{BE} = 0,9 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 1,5 \text{ V}$$

$$C_{BE} = 3 \text{ pF}, C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$$

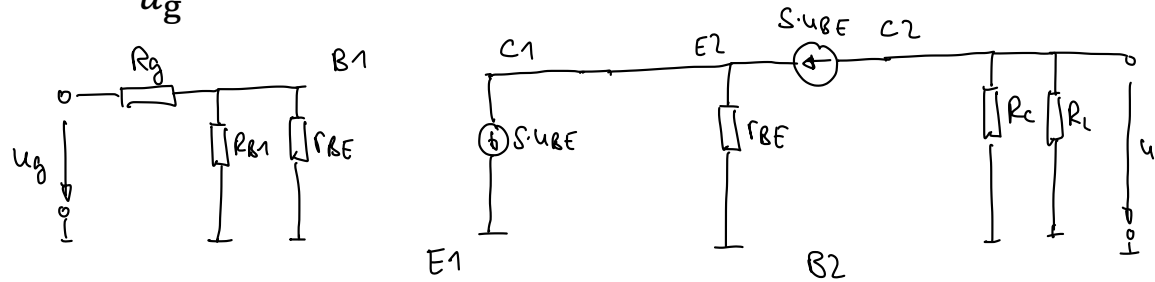
Annahmen:

$$I_{B1} \text{ \& } I_{B2} \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachlässigbar}$$

Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

Teil 2: 2-stufige Verstärkerschaltung: Emitter- und Basisschaltung

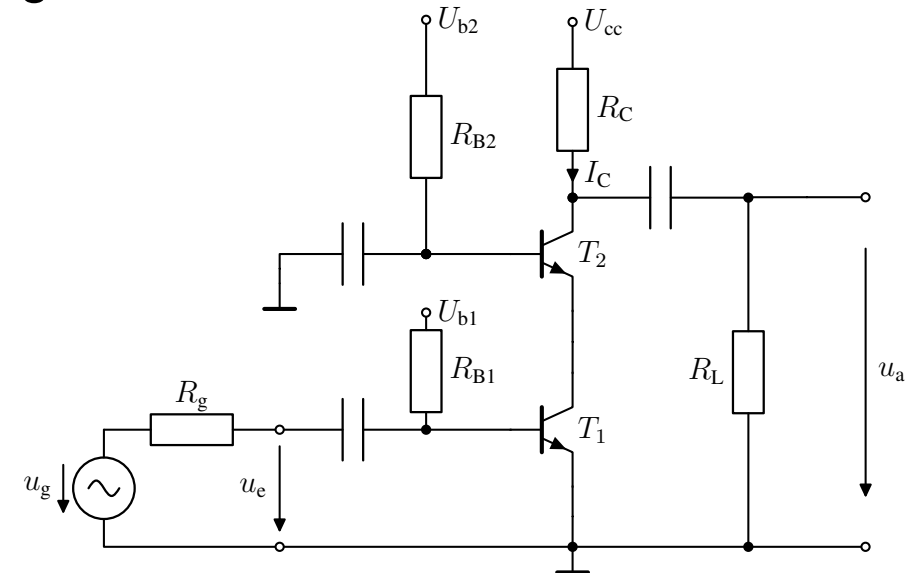
i) ges.: $A_{B0} = \frac{u_a}{u_g}$



$$A_{B0} = A_1 \cdot A_2 = -S \cdot r_{a1} \cdot (S \cdot r_{a2}) = -\cancel{S} \cdot \frac{1}{\cancel{S}} \cdot (S \cdot R_c || R_L)$$

↓ emitter
↓ Basis
↳ r_{e2}

$$= -S \cdot (R_c || R_L) = -7,7$$



Gegeben:

$$U_T = 26 \text{ mV}, B = \beta = 250$$

$$R_g = 10 \Omega, R_{B1} = R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega, R_C = R_L = 200 \Omega$$

$$\text{AP f\"ur } T_1 \text{ \& } T_2: U_{BE} = 0,9 \text{ V}, I_C = 2 \text{ mA}, U_{CE} = 1,5 \text{ V}$$

$$C_{BE} = 3 \text{ pF}, C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$$

Annahmen:

$$I_{B1} \text{ \& } I_{B2} \ll I_C, \text{ Early Effekt vernachl\"assigbar}$$

Aufgabe 2 – Frequenzverhalten

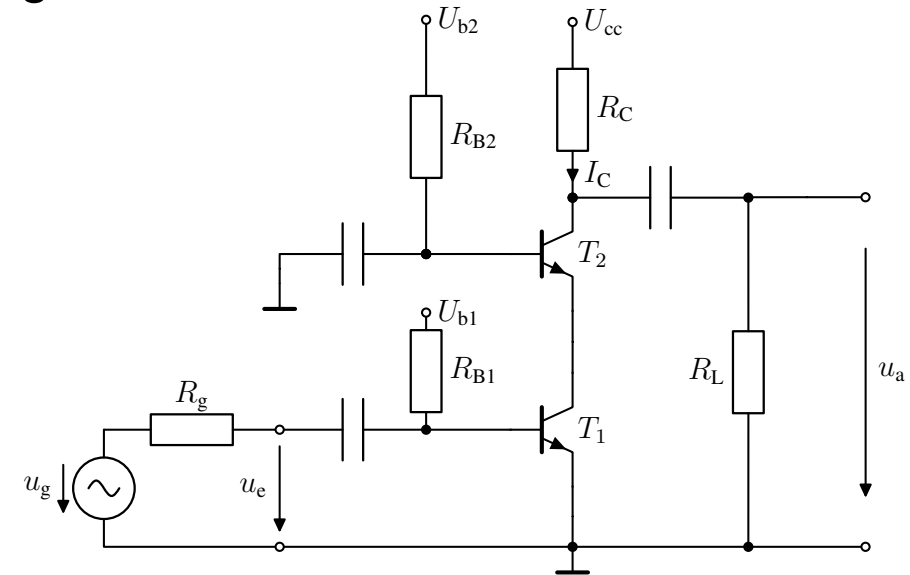
Teil 2: 2-stufige Verstärkerschaltung: Emitter- und Basisschaltung

j) ges.: C_e , f_{3dB}

$$C_e = C_{BE} + C_{BC} (1 - A_{0,1}) \quad A_{0,1} = 1$$

$$= 3 \text{ pF} + 0,5 \text{ pF} \cdot 2 = 4 \text{ pF}$$

$$f_{3dB} = f_{p,e} = \frac{1}{2\pi \cdot r_e \cdot C_e} \approx \frac{1}{2\pi \cdot R_g \cdot C_e} = 4 \text{ GHz}$$



Gegeben:

$U_T = 26 \text{ mV}$, $B = \beta = 250$

$R_g = 10 \text{ } \Omega$, $R_{B1} = R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_C = R_L = 200 \text{ } \Omega$

AP für T_1 & T_2 : $U_{BE} = 0,9 \text{ V}$, $I_C = 2 \text{ mA}$, $U_{CE} = 1,5 \text{ V}$

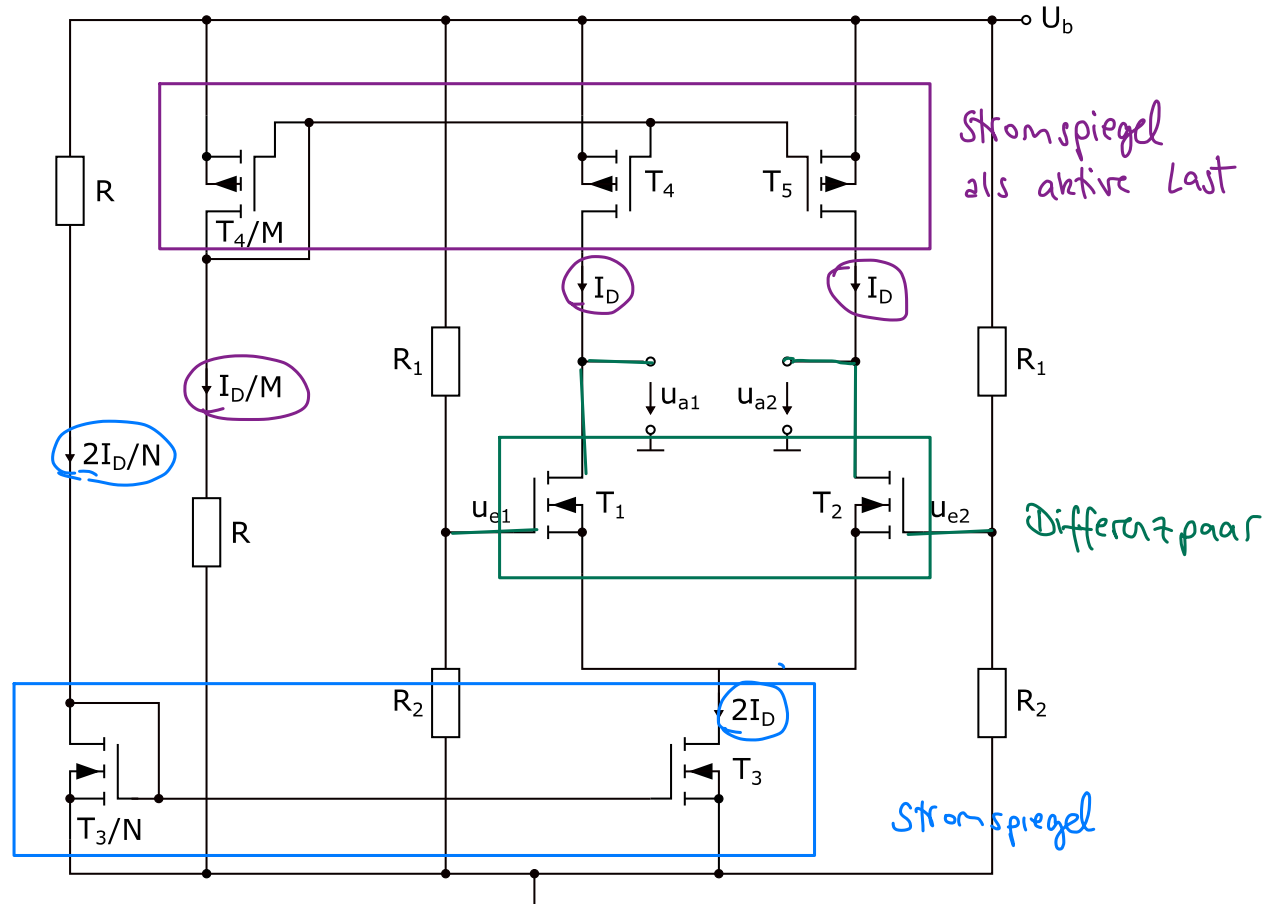
$C_{BE} = 3 \text{ pF}$, $C_{BC} = 0,5 \text{ pF}$

Annahmen:

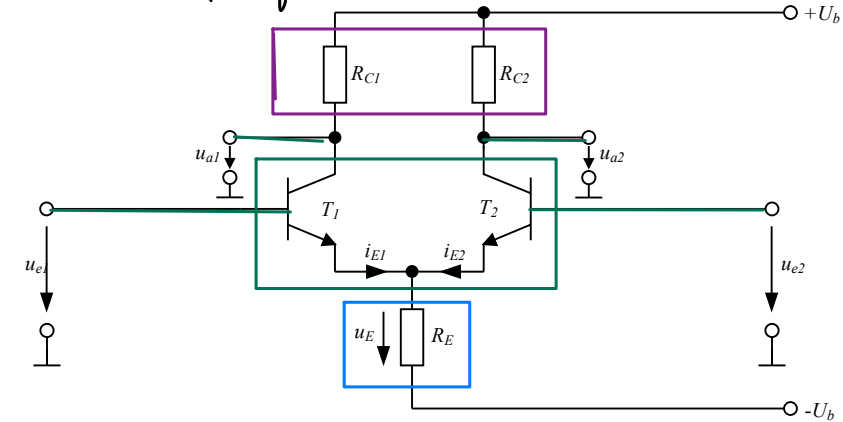
$I_{B1} \text{ \& } I_{B2} \ll I_C$, Early Effekt vernachlässigbar

Aufgabe 3 – Differenzverstärker

a) ges.: Aufgabe der Transistoren

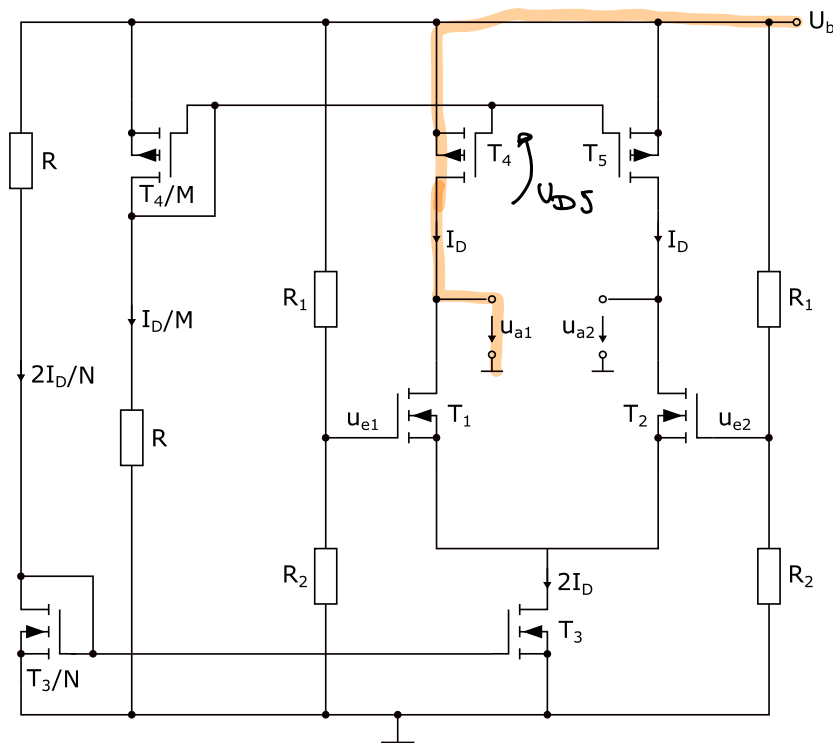


Von Zusammenfassung:



Aufgabe 3 – Differenzverstärker

b) ges.: $U_{a(1,2)}$

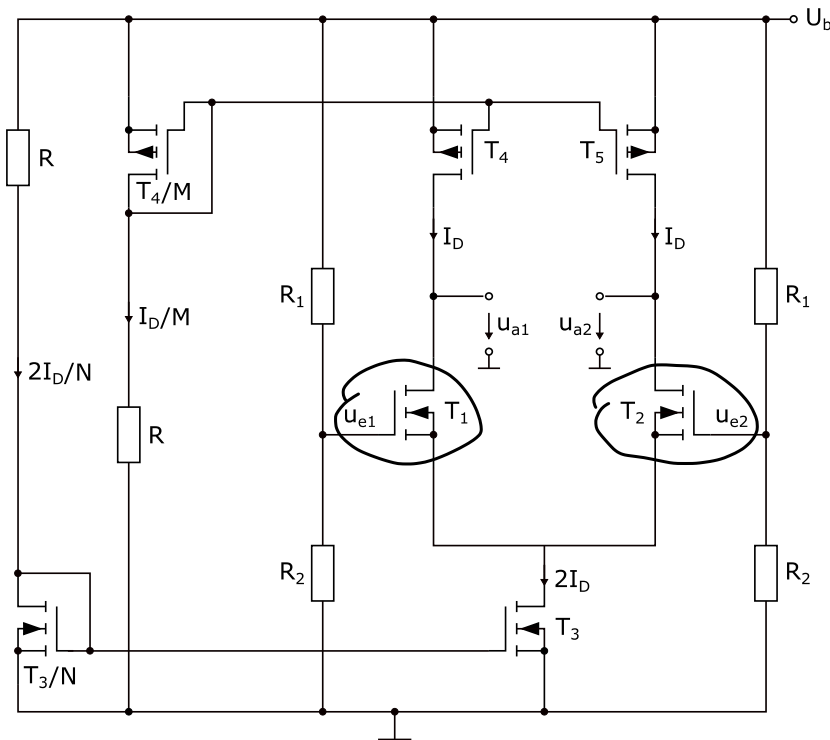


$$U_{a1} = U_{DS} + U_b = -2,3V + 3,3V = 1V$$

$$U_{a2} = 1V$$

Aufgabe 3 – Differenzverstärker

c) ges.: $S_{(1,2)} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}$

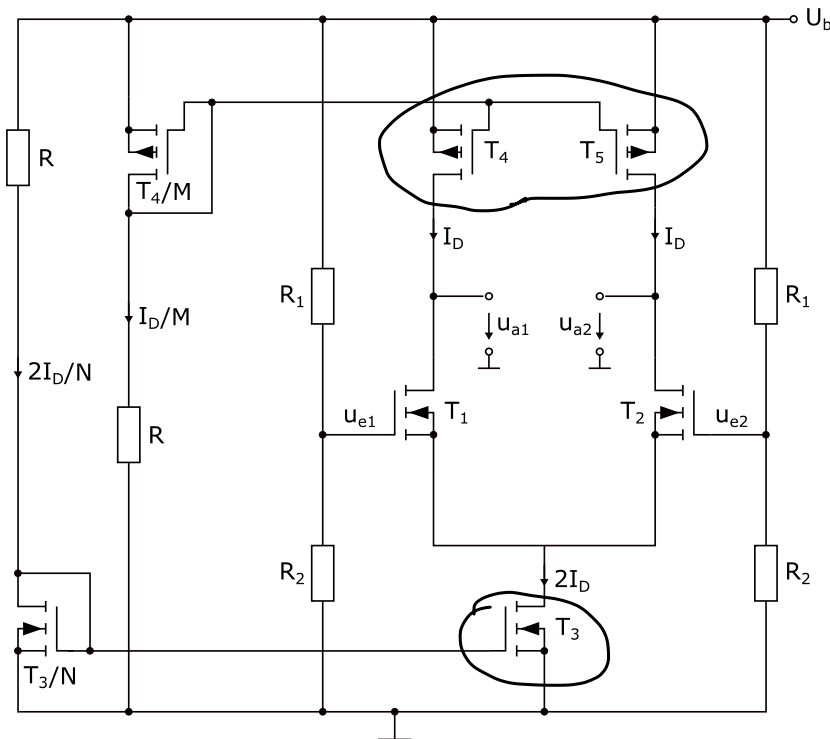


$$S_{1,2} = \beta \cdot (V_{GS} - V_{th}) = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (1,5\text{V} - 0,5\text{V})$$

$$= 1 \text{ mS}$$

Aufgabe 3 – Differenzverstärker

■ d) ges.: $r_{DS(4,5)}, r_{DS3} = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D}$



$T_4, T_5:$

$$\left| \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right| = \frac{5 \mu A}{1 V}$$

$$r_{DS} = \frac{1}{\frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}} = 200 k\Omega$$

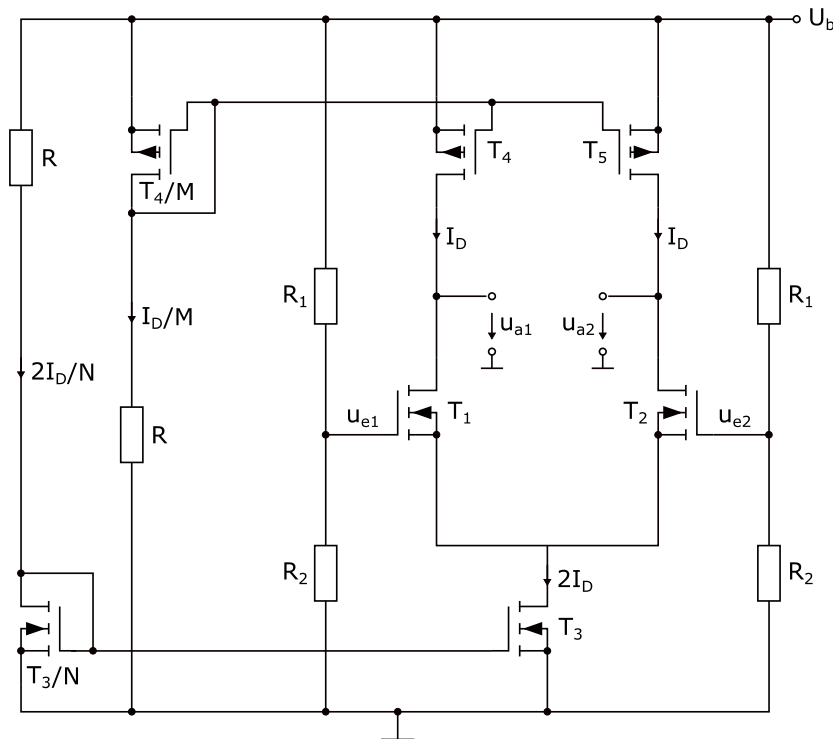
$T_3:$

$$\left| \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right| = \frac{2 \mu A}{1 V}$$

$$r_{DS} = 500 k\Omega$$

Aufgabe 3 – Differenzverstärker

■ e) ges.: Gegentaktverstärkung $A_D = \frac{u_{a1} - u_{a2}}{u_e - u_{e2}} = \frac{u_{a1} - u_{a2}}{u_D}$

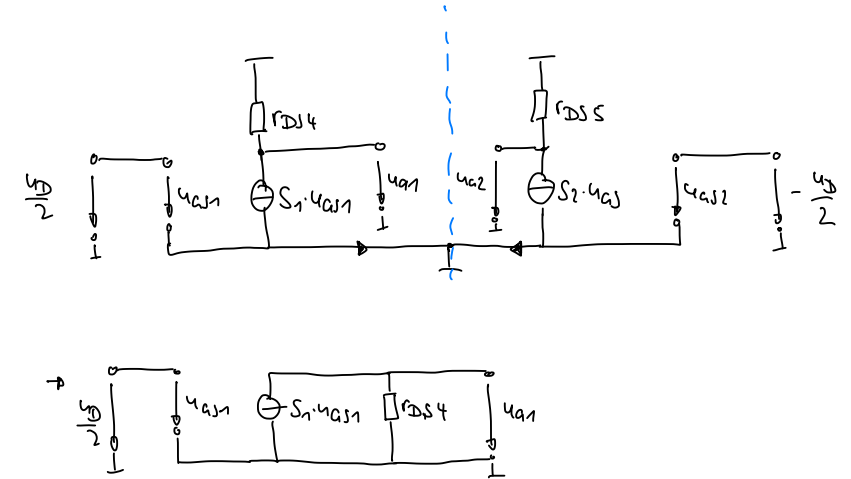


$$\frac{u_{a1}}{u_D} = -S_1 \cdot r_{DS,4} \cdot \frac{1}{2}$$

$$\frac{u_{a2}}{u_D} = S_2 \cdot r_{DS,5} \cdot \frac{1}{2}$$

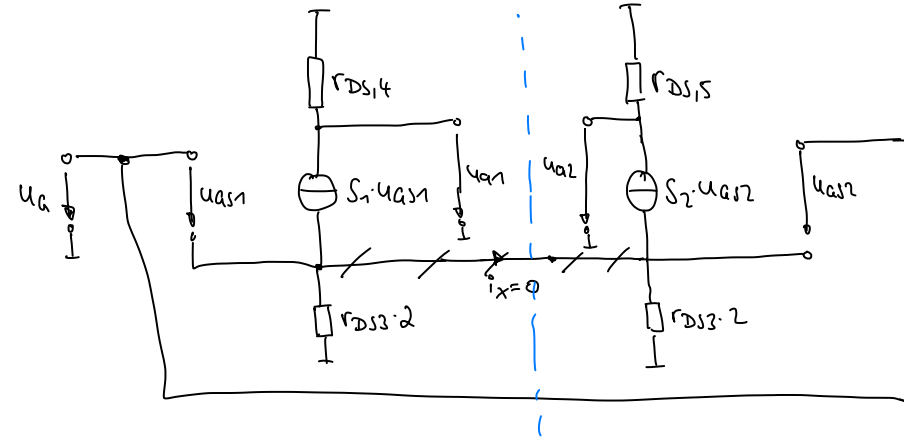
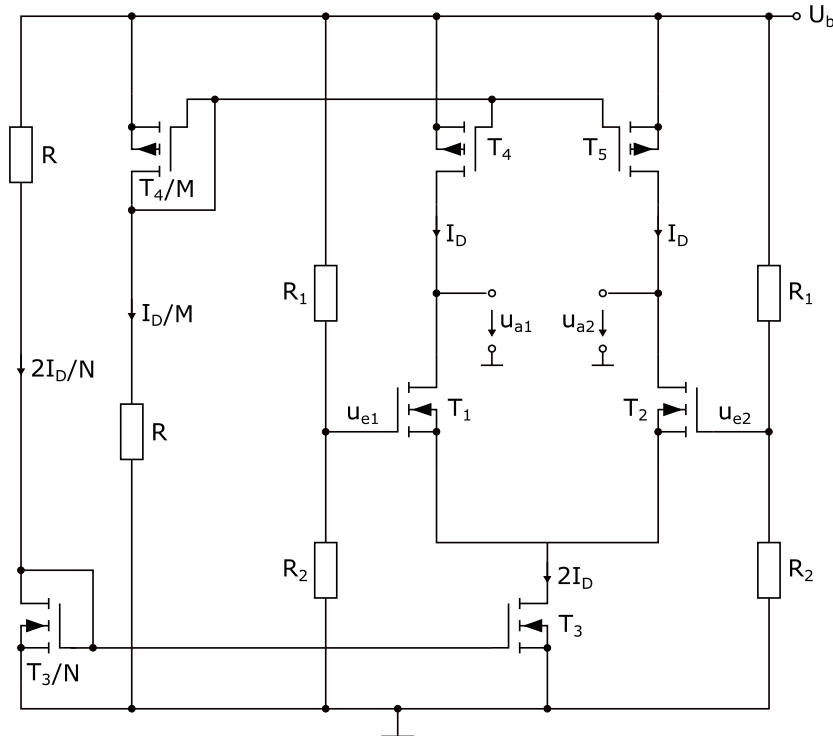
$$S_1 = S_2 = S, \quad r_{DS,4} = r_{DS,5} = r_{DS}$$

$$\frac{u_{a1} - u_{a2}}{u_D} = -\frac{1}{2} \cdot S \cdot r_{DS} - \frac{1}{2} \cdot S \cdot r_{DS} = -S \cdot r_{DS} = -1 \text{ mS} \cdot 200 \text{ k}\Omega = -200$$



Aufgabe 3 – Differenzverstärker

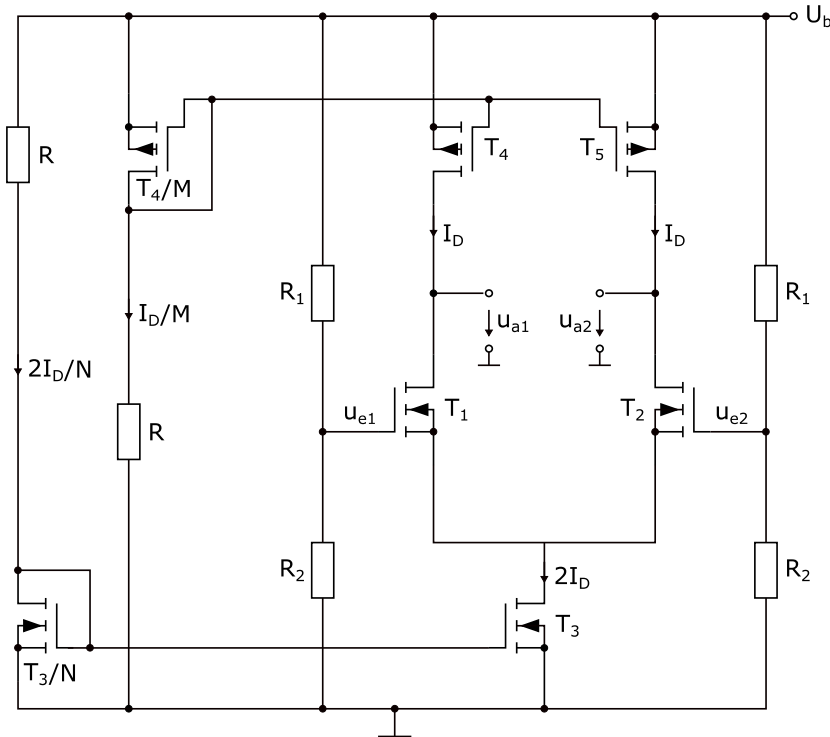
■ f) ges.: Gleichtaktverstärkung $A_G = \frac{u_{a1,2}}{u_G}$



$$A_G \approx - \frac{r_{DS,4}}{2 \cdot r_{DS,3}} = - \frac{200 \text{ k}\Omega}{2 \cdot 500 \text{ k}\Omega} = -0,2$$

Aufgabe 3 – Differenzverstärker

■ g) ges.: Gleichtaktunterdrückung CMRR



$$CMRR = \frac{|A_D|}{|A_G|} = \frac{200}{0,2} = 1000 //$$