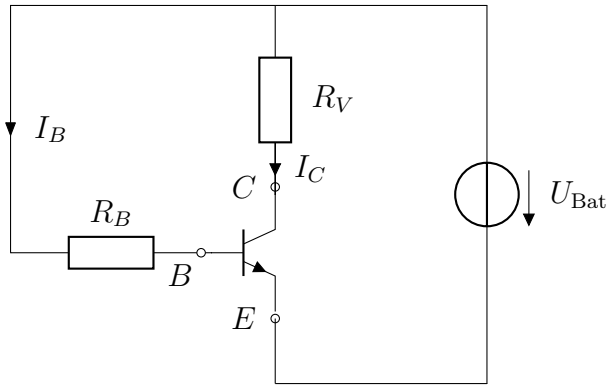
Aufgabe 28: *Transistor / Arbeitspunkteinstellung*

Von der rechts gegebenen Schaltung soll der Arbeitspunkt eingestellt werden

Gegebene Daten Transistor: $R_{CE} = 2000\,\Omega$, $R_{BE} = 400\,\Omega$, $U_{BE0} = 0.6\,\mathrm{V}$, $B = 200$
Schaltung: $R_V = 200\,\Omega$, $U_{\mathrm{Bat}} = 12\,\mathrm{V}$



Als erstes soll die Arbeitsgerade bestimmt werden

28.1 Bestimmen Sie aus der rechten Masche die Arbeitsgerade im Ausgangskennlinienfeld des Transistors, also $I_C(U_{CE})$. Skizzieren Sie die Arbeitsgerade.

Jetzt wird der Arbeitspunkt eingestellt. Im Nennbetrieb soll ein Strom von $I_C = 40\,mA$ fließen.

28.2 Zeichnen Sie das linearisierte Gleichstromersatzschaltbild.

28.3 Nun soll R_B so gewählt werden, dass der Nennstrom $I_c = 40\,mA$ fließt.

- Bestimmen Sie dazu zuerst U_{CE} . ($U_{CE} = 4\ V$)
- Bestimmen Sie dann den Strom I_{CE} am Widerstand R_{CE} . ($I_{CE} = 2\,mA$)
- Damit können Sie den Strom I_{C0} ermitteln. ($I_{C0} = 38\,mA$)
- und damit I_B . ($I_B = 0.19\,mA$)
- Aus dem Basis-Emitter-Kreis kann dann R_B bestimmt werden. ($R_B = 59.6\,k\Omega$)

Versuchen Sie R_B allgemein anzugeben.

Nun sollen Leistungen untersucht werden

28.4 Geben Sie die Verlustleistung des Transistors und die Leistung am Verbraucher R_V an. ($P_T = 160\,mW$, $P_V = 320\,mW$)

28.5 Bestimmen Sie nun I_C ganz allgemein in Abhängigkeit von R_B (aus Teil **3**).

28.6 Setzen Sie jetzt einmal $R_B = 100\,k\Omega$ und einmal $R_B = 40\,k\Omega$. Bestimmen Sie jeweils die Verlustleistung des Transistors und die Leistung am Verbraucher R_V . Vergleichen Sie dies mit ihrem Ergebnis aus Teil **4**.

($R_B = 100\,k\Omega$: $P_T = 177\,mW$, $P_V = 136\,mW$. $R_B = 40\,k\Omega$: $P_T = 40\,mW$, $P_V = 644\,mW$)

Lösung

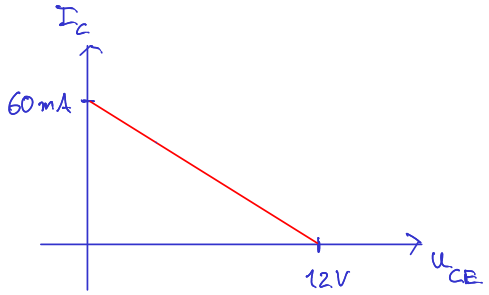
① Arbeitsgerade (Ausgangskennlinienfeld Transistor)

Gesucht ist Fkt. $I_C(U_{CE})$

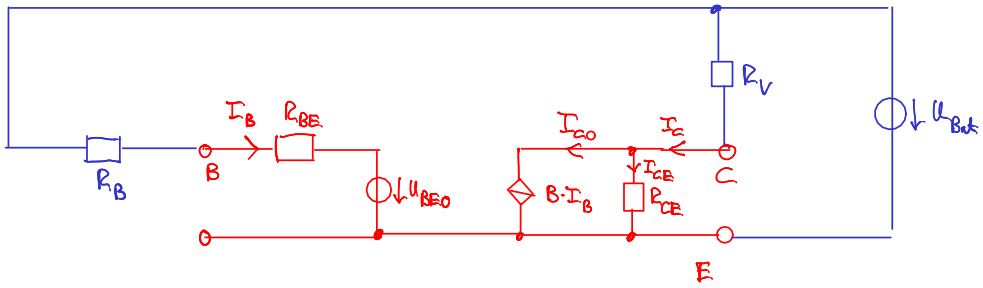
Aus rechter Masche: $U_{Bat} = R_V I_C + U_{CE}$

$$\rightsquigarrow \boxed{I_C = \frac{1}{R_V} U_{Bat} - \frac{1}{R_V} U_{CE}}$$

Skizze:



② linearisiertes Ersatzschaltbild



③ Arbeitspunkteinstellung

Es gilt $I_{C,AP} = 40\,mA$

- Aus rechter Masche: $U_{Bat} = I_{C,AP} \cdot R_V + U_{CE}$

$$\rightsquigarrow U_{CE} = U_{Bat} - I_{C,AP} \cdot R_V = 12V - 0{,}04 \cdot 200 \rightsquigarrow \boxed{U_{CE} = 4V}$$

- Im Kollektor-Emitter-Kreis

$$I_{CE} = \frac{U_{CE}}{R_{CE}} = \frac{4V}{2000\Omega} \rightsquigarrow \boxed{I_{CE} = 2mA}$$

- Berechne I_{C0}

Knotenregel: $I_C = I_{C0} + I_{CE}$

$$\rightsquigarrow I_{C0} = I_C - I_{CE} = 40mA - 2mA \rightsquigarrow \boxed{I_{C0} = 38\,mA}$$

- Berechne damit I_B

$$I_B \cdot B = I_{C0} \rightsquigarrow I_B = \frac{I_{C0}}{B} = \frac{38mA}{200} \rightsquigarrow \boxed{I_B = 0{,}19\,mA}$$

- aus linker Masche

$$U_{Bat} = I_B \cdot R_B + I_B \cdot R_{BE} + U_{BE0}$$

$$\rightsquigarrow R_B = \frac{U_{Bat} - U_{BE0}}{I_B} - R_{BE} = \frac{12V - 0{,}6V}{0{,}19mA} - 400\Omega$$

$$\rightsquigarrow \boxed{R_B = 59{,}6\,k\Omega}$$

Dies kann auch ohne Zahlenwerte angegeben werden:

$$R_B = \frac{U_{Bat} - U_{BE0}}{I_C(R_{CE} + R_V) - U_{Bat}} B \cdot R_{CE} - R_{BE} \quad (*)$$

④ Verlustleistung Transistor

$$P_T = I_B \cdot U_{BE} + I_C \cdot U_{CE} = \underbrace{I_B \cdot (U_{BE0} + I_B R_{BE})}_{0{,}13\,mW} + \underbrace{I_C \cdot U_{CE}}_{160mW}$$

$$\boxed{P_T = 160\,mW}$$

Verbraucher: $P_V = U_V \cdot I_C = R_V \cdot I_C^2 \rightsquigarrow \boxed{P_V = 320\,mW}$

⑤ (*) auflösen nach I_C
(aus Teil 3)

$$\frac{1}{R_B + R_{BE}} = \frac{(R_{CE} + R_V)\, I_C - U_{Bat}}{(U_{Bat} - U_{BE0}) \cdot B \cdot R_{CE}}$$

$$\boxed{I_C = \left(\frac{U_{Bat} - U_{BE0}}{R_B + R_{BE}} \cdot B \cdot R_{CE} + U_{Bat} \right) \cdot \frac{1}{R_{CE} + R_V}}$$

⑥ und damit dann die nötigen Größen für die Verlustleistung

$$U_{CE} = U_{Bat} - I_C \cdot R_V$$

$$I_B = \frac{I_{C0}}{B} = \frac{1}{B} \cdot (I_C - I_{CE}) = \frac{1}{B} \left(I_C - \frac{U_{Bat} - I_C \cdot R_V}{R_{CE}} \right)$$

$$U_{BE} = U_{BE0} + I_B \cdot R_{BE}$$

Sieht mit Zahlenwerten:

$R_B = 100\ k\Omega$: $I_a = 26{,}1\ mA$ $U_{CE} = 6{,}78V$ $I_B = 0{,}11\ mA$ $U_{BE} = 0{,}65V$

$$\rightsquigarrow P_T = I_C \cdot U_{CE} + I_B \cdot U_{BE} \rightsquigarrow \boxed{P_T \approx 177\ mW}$$

$$P_V = R_V \cdot I_C^2 \rightsquigarrow \boxed{P_V = 136\ mW}$$

$R_B = 40\ k\Omega$: $I_C = 56{,}8\ mA$ $U_{CE} = 0{,}65V$ $I_B = 0{,}28\ mA$ $U_{BE} = 0{,}71V$

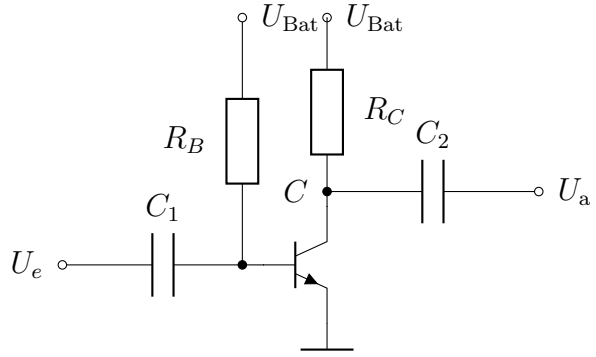
$$P_T = 36{,}8\ mW + 0{,}2\ mW \rightsquigarrow \boxed{P_T = 40\ mW}$$

$$P_V = R_V \cdot I_C^2 \rightsquigarrow \boxed{P_V = 644\ mW}$$

R_B größer überlastet Transistor, R_B kleiner überlastet Verbraucher

Aufgabe 29: *Transistor / Wechselspannungsverstärker*

Die Ausgangsspannung U_a der untenstehenden Transistorschaltung soll in Abhängigkeit von U_e und den Schaltungsparametern berechnet werden.
Zahlenwerte Transistor: $B = 150 \quad (= \beta)$, $U_{\mathrm{BE0}} = 0.6\,\mathrm{V}$, $R_{\mathrm{BE}} = 150\,\Omega$, $R_{\mathrm{CE}} \to \infty$
Weitere Zahlenwerte: $R_{\mathrm{C}} = 100\,\Omega$, $U_{\mathrm{Bat}} = 12\,\mathrm{V}$, $C_2 \to \infty$



29.1 Stellen Sie das Ersatzschaltbild der Transistorschaltung auf und berechnen Sie die Ausgangs(gleich-)spannung (in Abhängigkeit von R_B).

29.2 Welcher Wert muss für R_{B} gewählt werden, damit die Ausgangsspannung $U_{\mathrm{CE}} = 0,5 \cdot U_{\mathrm{Bat}}$ wird? ($R_B = 28.35\,k\Omega$)

29.3 Bestimmen Sie den Wert für C_1 so, dass die untere Grenzfrequenz $f_u = 20\,\mathrm{Hz}$ wird. ($C_1 = 53\,\mu F$)

Nun wird eine sinusförmige Eingangsspannung $u_{\mathrm{e}}(t) = 10\,m\mathrm{V}{\cdot}\sin\left(1000\,\mathrm{s}^{-1} \cdot t\right)$ angelegt.

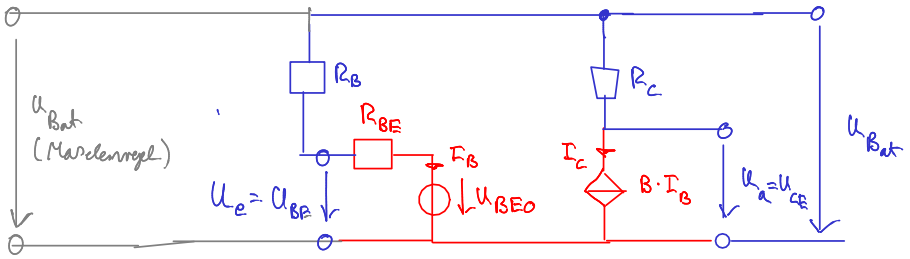
29.4 Stellen Sie das Ersatzschaltbild der linearisierten Wechselstrommtransistorschaltung auf. Warum kann $C_1 \to \infty$ gesetzt werden? Bestimmen Sie die Ausgangsspannung $u_{\mathrm{a}}(t)$.

29.5 Wie groß ist die Wechselspannungsverstärkung? ($\nu = -100$)

29.6 Für welche Eingangsspannung (Scheitelwerte) erreicht die Ausgangsspannung die maximal/minimal möglichen Werte (Begrenzung)? ($u_e = \pm 60\,mV$)

Lösung

① Ersatzschaltbild



Gleichspannungsrechnung:

rechts: $U_a = U_{Bat} - I_C \cdot R_C = U_{Bat} - R_C \cdot I_B \cdot B$ (1)

links: $U_{Bat} = U_{BEO} + I_B (R_{BE} + R_B)$ (2) (C_1 sperrt Gleichstrom)

aus (2): $I_B = \dfrac{U_{Bat} - U_{BEO}}{R_{BE} + R_B}$

in (1) $\boxed{U_a = U_{Bat} - R_C \cdot B \dfrac{U_{Bat} - U_{BEO}}{R_{BE} + R_B}}$

② Auflösen von U_a nach R_B

mit $U_a = 0{,}5\, U_{Bat} = 6\,V$ ($U_a = U_{CE}$ wegen Kondensator C_2)

$$R_C B (U_{Bat} - U_{BEO}) = \frac{1}{2} U_{Bat} (R_{BE} + R_B)$$

$$\rightsquigarrow R_B = \frac{2 R_C B (U_{Bat} - U_{BEO})}{U_{Bat}} - R_{BE}$$

$$= \frac{2 \cdot 100 \cdot 150 \,(12 - 0{,}6)}{12}\,\Omega - 150\,\Omega$$

$\boxed{R_B = 28{,}35\ k\Omega}$

③ Untere Grenzfrequenz:

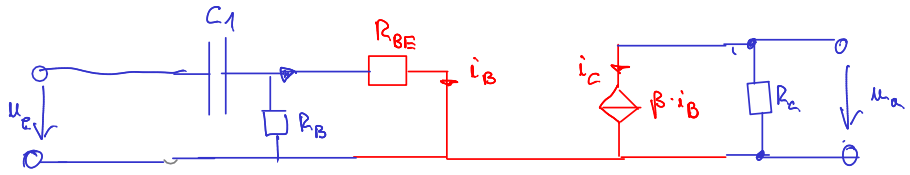
$$\omega_u = \frac{1}{R_e C_e} \qquad \text{mit} \quad C_e = C_1$$

$$\text{und} \quad R_e = \frac{R_B \cdot R_{BE}}{R_B + R_{BE}}$$

$$\text{also:} \quad C_1 = \frac{1}{R_e \cdot \omega_u} = \frac{R_B + R_{BE}}{R_B \cdot R_{BE} \cdot 2\pi \cdot f} = \underline{\underline{53\,\mu F}}$$

④ Wechselstromersatzschaltbild

U_{Bat} wird kurzgeschlossen



Die Schaltung wird mit Frequenz $f = \frac{1000\,\frac{1}{s}}{2\pi} = 159\,Hz$ betrieben. Dies ist deutlich größer als untere Grenzfrequenz.

Da die obere Grenzfrequenz durch C_{BC} bestimmt ist und wir diesen klein wählen, ist die obere Grenzfrequenz groß.

Damit sind wir im mittleren Frequenzbereich und alle Kapazitäten können vernachlässigt werden. Um dies zu tun wird $C_1 = \infty$, damit ist $X_{C_1} = 0$

also gilt:

$$u_e = \left(R_{BE} + X_{C_1}\right) \cdot i_B \qquad \text{mit} \quad X_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1} = 0$$

(dies gilt im mittleren Frequenzbereich)

$$\text{also:} \quad u_e = R_{BE} \cdot i_B$$

damit im reellen Teil

$$i_C = \beta \cdot i_B \quad \rightsquigarrow \quad u_a = -u_{R_C} = -R_C \cdot i_C = -R_C \cdot \beta \cdot i_B$$

$$\boxed{u_a(t) = -\frac{R_C}{R_{BE}} \cdot \beta \cdot u_e(t)}$$

Mit Zahlen:

$$u_a(t) = -\frac{100\,\Omega}{150\,\Omega} \cdot 150 \cdot 10\,mV \cdot \sin\left(1000\,\frac{1}{s} \cdot t\right)$$

$$= -1\,V \sin\left(1000\,\frac{1}{s} \cdot t\right) = 1\,V \cdot \sin\left(1000\,\frac{1}{s} \cdot t + \pi\right)$$

also Betrag ist 1V und Phasenverschieb gegen $u_e(t)$ ist 180°

⑤ Verstärkungsfaktor

Allgemein: $V = \frac{u_a(t)}{u_e(t)} = -\frac{R_a}{R_{BE}} \cdot \beta$

liefert hier: $\boxed{V = -100}$

⑥ u_a maximal $\pm \frac{U_{Bat}}{2}$ (nur Scheitelwerte betrachten)

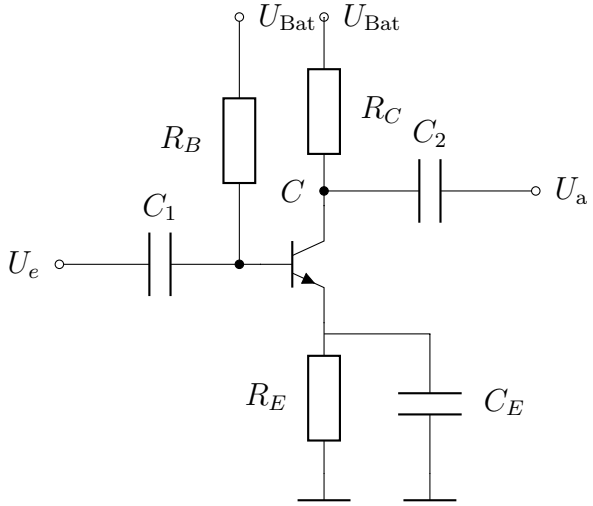
$$\rightsquigarrow u_e = -\frac{R_{BE}}{\beta \cdot R_a}\left(\pm \frac{U_{Bat}}{2}\right) = \mp \frac{R_{BE} \cdot U_{Bat}}{2\beta R_a}$$

$$= \mp \frac{150\,\Omega \cdot 12\,V}{2 \cdot 150 \cdot 100\,\Omega} \rightsquigarrow \boxed{u_e = \pm 60\,mV}$$

(nur größere Eingangsscheitelwerte übersteuert den Verstärker)

Aufgabe 30: *Transistor / Wechselspannungsverstärker*

Die Ausgangsspannung U_a der untenstehenden Transistorschaltung soll in Abhängigkeit von U_e und den Schaltungsparametern berechnet werden.
Dies Aufgabe ist eine Erweiterung der Aufgabe 29
Zahlenwerte Transistor: $B = 150 \quad (= \beta)$, $U_{\mathrm{BE0}} = 0.6\,\mathrm{V}$, $R_{\mathrm{BE}} = 150\,\Omega$, $R_{\mathrm{CE}} \to \infty$
Weitere Zahlenwerte: $R_E = 10\,\Omega$, $R_{\mathrm{C}} = 100\,\Omega$, $U_{\mathrm{Bat}} = 12\,\mathrm{V}$, $C_2 \to \infty$.
Der Kondensator C_E wird nur in Aufgabenteil **7.** berücksichtigt.



30.1 Stellen Sie das Ersatzschaltbild der Transistorschaltung auf und berechnen Sie die Ausgangs(gleich-)spannung (in Abhängigkeit von R_B).

30.2 Welcher Wert muss für R_{B} gewählt werden, damit die Ausgangsspannung $U_{\mathrm{CE}} = 0,5 \cdot U_{\mathrm{Bat}}$ wird? ($R_B = 26.84\,k\Omega$)

30.3 Bestimmen Sie den Wert für C_1 so, dass die untere Grenzfrequenz $f_u = 20\,\mathrm{Hz}$ wird. ($C_1 = 50\,\mu F$)

Nun wird eine sinusförmige Eingangsspannung $u_{\mathrm{e}}(t) = 10\,m\mathrm{V}{\cdot}\sin\left(1000\,\mathrm{s}^{-1} \cdot t\right)$ angelegt.

30.4 Stellen Sie das Ersatzschaltbild der linearisierten Wechselstrommtransistorschaltung auf. Warum kann $C_1 \to \infty$ gesetzt werden? Bestimmen Sie die Ausgangsspannung $u_{\mathrm{a}}(t)$.

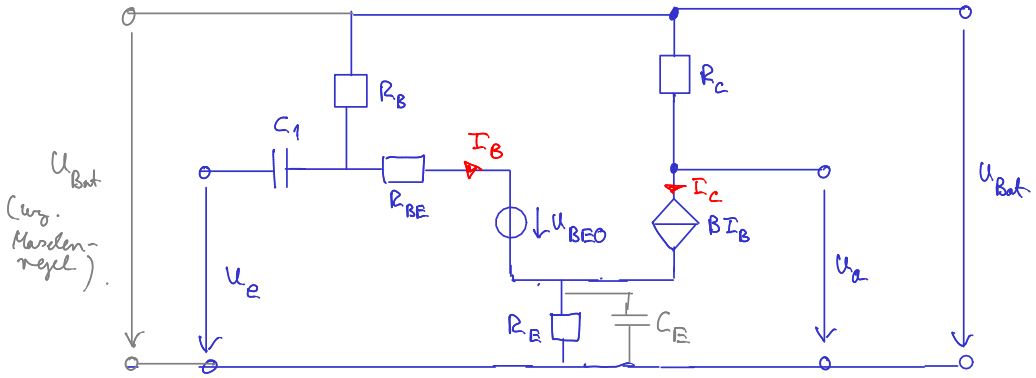
30.5 Wie groß ist die Wechselspannungsverstärkung? ($\nu = -9.04$)

30.6 Für welche Eingangsspannung (Scheitelwerte) erreicht die Ausgangsspannung die maximal/minimal möglichen Werte (Begrenzung)? ($u_e = \pm 0.66\,V$)

30.7 Jetzt wird der Kondensator C_E hinzugefügt. Was bewirkt dieser (betrachten Sie $C_E = \infty$)? Berechnen Sie damit nochmals die Teilaufgaben **4. - 6.** Was kann also durch R_E bzw. $C_E \to \infty$ erreicht werden. ($\nu = -100$, $u_e = \pm 0.06\,V$)

Lösung

① Ersatzschaltbild



Gleichspannungsrechnung: C_E und C_1 sperren Strom, also „weglassen"

links: $U_{Bat} = U_{BEO} + (R_{BE} + R_B) I_B + (I_B + BI_B) \cdot R_E$ (1)

rechts: $U_a = U_{Bat} - R_C \cdot B \cdot I_B$ (2)

aus (2): $I_B = \frac{U_{Bat} - U_a}{R_C \cdot B}$

in (1) $\left(U_{Bat} - U_{BEO}\right) R_C \cdot B = \left(R_{BE} + R_B + (1+B) R_E\right) \left(U_{Bat} - U_a\right)$

$\rightsquigarrow$ $$\boxed{U_a = U_{Bat} - \frac{R_C B}{R_{BE} + R_B + (1+B) R_E} \left(U_{Bat} - U_{BEO}\right)}$$ (3)

② Einstellung des Arbeitspunktes:

$U_a \overset{!}{=} \frac{1}{2} U_{Bat} = 6\,V$

auflösen von (3) nach R_B

$$R_B = \frac{U_{Bat} - U_{BEO}}{U_{Bat} - U_a} \cdot R_C \cdot B - R_{BE} - (1+B) R_E$$

$$= \frac{12 - 0{,}6}{12 - 6} \cdot 150 \cdot 100\,\Omega - 150\,\Omega - 151 \cdot 10\,\Omega$$

$$\underline{\underline{R_B = 26{,}84\ k\Omega}}$$

③ Untere Grenzfrequenz

$$\omega_u = \frac{1}{R_{Eingang} \cdot C_{Eingang}} \qquad \text{mit } C_{Eingang} = C_1$$

siehe WS-ESB in ④

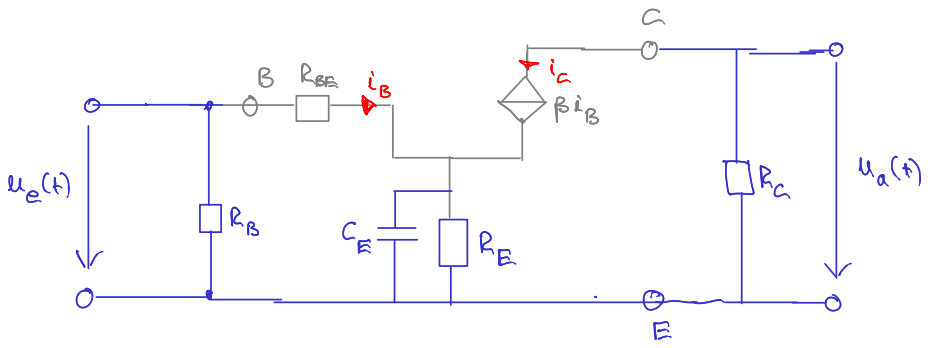
$$\text{und } R_{Eingang} = \frac{R_B\,(R_{BE} + R_E)}{R_B + (R_{BE} + R_E)} = 159\,\Omega$$

(schließe dazu U_{Bat} kurz, wegen $C_E = \infty$, liefert dies Blindwiderstand 0)

$$\rightsquigarrow \quad C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R_{Eingang}} \quad \rightsquigarrow \quad \underline{\underline{C_1 = 50\,\mu F}}$$

(als Näherung könnte man auch $R_B \parallel R_{BE} \approx R_{BE}$ nehmen
$C_1 = 49{,}74\,\mu F$)

④ Ersatzschaltbild Wechselspannung



Es gilt für $C_1 = \infty$ und $C_E = \infty$

linke Masche: $\quad u_e(t) = R_{BE}\, i_B + R_E\,(i_B + i_C) \quad$ mit $i_C = \beta\, i_B$

$$\rightsquigarrow \quad i_B = \frac{1}{R_{BE} + R_E(1+\beta)}\, u_e \qquad (1)$$

reelle Masche: $u_a(t) = -u_{R_C}$ (da $C_2 = \infty \rightsquigarrow X_{C_2} = \frac{1}{\omega \cdot C_2} = 0$)

$$= -R_C \cdot i_C = -R_C \cdot \beta\, i_B$$

also mit (1)

$$\boxed{u_a(t) = -\frac{R_C}{R_{BE} + R_E(1+\beta)} \cdot \beta \cdot u_e(t)} \qquad (*)$$

⑤ Spannungsverstärkung

Gesucht.

$$V = \frac{u_a(t)}{u_e(t)} = -\frac{R_C}{R_{BE} + R_E(1+\beta)} \cdot \beta \quad \rightsquigarrow \quad \underline{\underline{V = -9{,}04}}$$

⑥ $u_a \overset{!}{=} \pm \frac{1}{2} U_{Bat} = 6\,V$

$\rightsquigarrow$ aus (*)

$$u_e = \pm \frac{R_{BE} + (1+\beta) R_E}{R_C\, \beta} \cdot \frac{1}{2} U_{Bat} \quad \rightsquigarrow$$

maximaler Scheitelwert $\underline{\underline{u_e = \pm 0{,}66\,V}}$

⑦ C_E endlich

Speziell für $C_E \to \infty$ wird der Blindwiderstand 0,
d.h. Strom fließt über C_2!

Somit ist R_E kurzgeschlossen.

Das bedeutet für alle Rechnungen 4 - 6, daß $R_E = 0$ gesetzt wird.

Es folgt

$\underline{V = -100\,V}$ $\qquad$ $\underline{u_e = \pm 60\,mV}$

R_E stabilisiert Arbeitspunkt (Amplitude der Eingangsspannung kann größer werden)
Dies verschlechtert aber Verstärkung V
Durch C_E kann eine Mittelung gegangen werden.