

Name: .....

## Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 12

### Kurzfragen ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 30 min)

- 1) Gegeben ist das Bändermodell  $W(x)$  von  $p$ -dotiertem Si. Skizzieren Sie die Zustandsdichten der Elektronen im Leitungsband und der Löcher im Valenzband  $D(W)$  in parabolischer Näherung, sowie die Fermi-Verteilung  $f(W)$  und die Elektronen- und Löcherkonzentrationen im Leitungs- bzw. Valenzband  $n(W)$ ,  $p(W)$  in den vorbereiteten Koordinatensystemen.
- 2) Welche der Aussagen zu einem idealen  $pn$ -Übergang mit angelegter Spannung  $U$  sind zutreffend?
- 3) Welche der Aussagen zur Kapazität  $C$  einer  $pn$ -Diode mit abruptem Übergang, homogenen Dotierungen und Vorspannung  $U_0$  zwischen  $p$ - und  $n$ -Bereich sind zutreffend?
- 4) Skizzieren Sie in den vorbereiteten Diagrammen rechts die örtlichen Verläufe der Raumladungsdichte  $\rho(x)$ , des elektrischen Feldes  $E(x)$  und des Bändermodells  $W(x)$  in der angedeuteten, idealen Metall-Oxid- $n$ -Halbleiterstruktur für den Fall der Inversion. Beschriften Sie  $W_F$ ,  $W_L$ ,  $W_V$  sowie die angelegte Spannung  $U$ . Welches Vorzeichen muss dann die Spannung am Metall gegenüber dem Halbleiter aufweisen?
- 5) Welche der Aussagen zu dem gezeigten Bändermodell mit den Bandkanten  $W_V$  und  $W_L$  sowie den beiden Quasi-Ferminiveaus  $W_{Fn}$  und  $W_{Fp}$  für die Elektronen und Löcher sind richtig unter der Voraussetzung gleicher effektiver Zustandsdichten im Leitungs- und Valenzband?
- 6) Die Steilheit eines MOSFETs kann erhöht werden, wenn man ...
- 7) Gegeben ist eine ideale Metall-Isolator-Halbleiter-Struktur (Bild a) mit gleichen Austrittsarbeiten von Halbleiter und Metall sowie in den Bildern c bis e die zugehörigen Bändermodelle für drei Arbeitspunkte. Um welchen Halbleitertyp handelt es sich? Zeichnen Sie für niedrige Frequenzen den  $C(U_g)$ -Verlauf in das Diagramm (Bild b). Markieren Sie die Arbeitspunkte der drei angegebenen Bändermodelle mit dem zugehörigen Buchstaben (c bis e) in der  $C/C_i(U_g)$ -Kennlinie.
- 8) Welche der Aussagen zu einer MOS-Kapazität sind zutreffend?
- 9) Welche der Aussagen zum Bipolartransistor sind richtig?
- 10) Skizzieren Sie in dem vorbereiteten Diagramm den Konzentrationsverlauf der Minoritätsträger in der neutralen Basis ( $x_2$  bis  $x_3$ ) eines  $nnp$ -Transistors (Diffusionsdreieck). Vernachlässigen Sie die Variation der Verarmungszonenbreiten mit der Spannung. Markieren Sie die Verläufe mit dem Buchstaben der Teilaufgaben;  $U_{eb}$ : Emitter-Basis-Spannung und  $U_{cb}$ : Kollektor-Basis-Spannung.

Name: .....

# Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 12

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

- 1) Die spezifische Leitfähigkeit  $\sigma(T)$  eines reinen  $p$ -Halbleiters ( $N_D = 0$ ) soll in den zwei Temperaturbereichen (1) und (2) analysiert werden. Die effektiven Zustandsdichten  $N_L$  und  $N_V$  im Leitungs- und valenzband sowie die Beweglichkeiten  $\mu_n$  und  $\mu_p$  der Elektronen und Löcher sollen bei  $T = T_0 = 300$  K jeweils gleich groß sein und folgende Temperaturabhängigkeiten aufweisen:

$$N_L(T) = N_V(T) = N_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2}; \text{ für beide Bereiche (1) und (2)}$$

$$\mu_p(T) = \mu_n(T) = \mu_1; \text{ im Bereich (1)}$$

$$\mu_p(T) = \mu_n(T) = \mu_2 \left( \frac{T_0}{T} \right)^{3/2}; \text{ im Bereich (2).}$$

Es liegt vollständige Ionisation der Dotierstoffe ( $N_A^+ = N_A$ ) vor, und der Halbleiter ist im thermodynamischen Gleichgewicht ( $np = n_i^2$ ). Nutzen Sie:

$$n_i = \sqrt{N_L(T) N_V(T)} \exp\left(-\frac{W_G}{2kT}\right); \sigma(T) = q[n(T)\mu_n(T) + p(T)\mu_p(T)]$$

- a) Ermitteln Sie ausgehend von Ladungsneutralität ( $N_D^+ + p = N_A^+ + n$ ) unter Berücksichtigung der genannten Bedingungen eine quadratische Gleichung für  $p$ , die als weitere Parameter nur noch  $N_A$  und  $n_i$  enthält. Lösen Sie diese Gleichung, so dass sich für die Bereiche (1) und (2) näherungsweise ergibt:

$$p = N_A; \text{ mit } 2n_i/N_A \ll 1; \text{ im Bereich (1)}$$

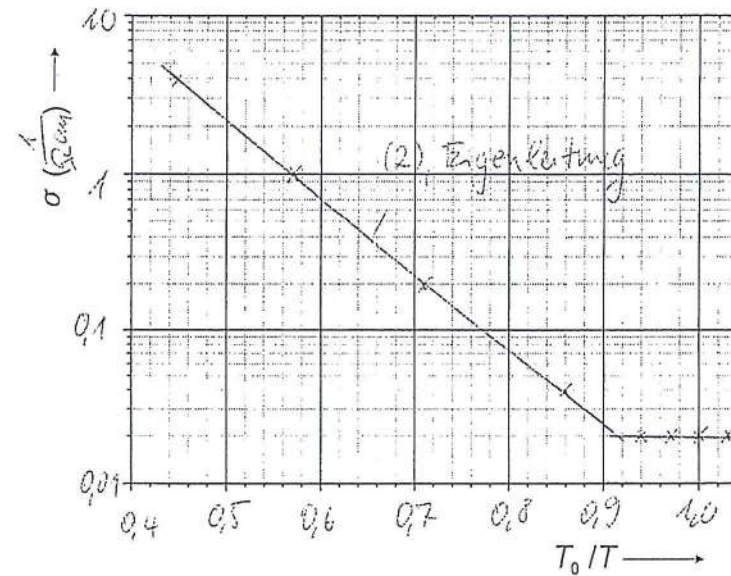
$$p = n_i; \text{ mit } 2n_i/N_A \gg 1; \text{ im Bereich (2)}$$

- b) Leiten Sie nun die Temperaturabhängigkeiten der Löcherkonzentration  $p(T)$  in den Bereichen (1) und (2) formelmäßig ab. Wie groß ist jeweils im Vergleich  $n(T)$ ?
- c) Ermitteln Sie anschließend die Temperaturabhängigkeiten der spezifischen Leitfähigkeit  $\sigma(T)$  in den Bereichen (1) und (2). Die abgeleiteten Formeln sollen jeweils alle Temperaturabhängigkeiten explizit enthalten.
- d) Der betrachtete Halbleiter weist die in der Tabelle gegebenen Werte für  $\sigma$  in Abhängigkeit von  $T$  auf. Markieren Sie in der dritten Zeile die Bereiche (1) und (2). Ergänzen Sie in der Tabelle auch die Werte von  $T_0/T$ .

$T$ (K)	290	300	310	320	350	420	525	665
$\sigma$ (1/ $\Omega$ cm)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,2	1,0	4,0
Bereich	(1)				(2)			
$T_0/T$	1,03	1	0,97	0,94	0,86	0,71	0,57	0,45

Tragen Sie die Werte für  $\sigma(T)$  nun in das Diagramm unten ein. Ergänzen Sie die Achsenbeschriftung. Einer der beiden Bereiche ist charakteristisch für Eigenleitung. Markieren Sie diesen Bereich im Diagramm.

Formen Sie die für Eigenleitung abgeleitete Temperaturabhängigkeit  $\sigma(T)$  so um, dass sich in Abhängigkeit von  $T_0/T$  eine lineare Funktion  $\ln(\sigma) = a \cdot (T_0/T) + b$  ergibt. Geben Sie  $a$  und  $b$  formelmäßig an. Bestimmen Sie aus der Auftragung von  $\ln(\sigma)$  den Bandabstand  $W_G$  formel und zahlenmäßig. Folgende Daten sind gegeben:  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C;  $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$  eV/K.





$$1a) N_D^+ + p = N_A^- + n, N_D^+ = N_D = 0, N_A^- = N_A = \frac{n_i^2}{p}$$

$$\Rightarrow p \approx N_A + \frac{n_i^2}{p} \Leftrightarrow p^2 - N_A p - n_i^2 = 0$$

$$\Rightarrow p_{A2} = \frac{N_A}{2} \pm \sqrt{\frac{N_A^2}{4} + n_i^2} = \frac{N_A}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_A^2}} \right)$$

nur + sign sinnvoll

$$(1) p \approx \frac{N_A}{2} (1+1) = N_A; (2) p \approx \frac{N_A}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_A^2}} \right) = \frac{N_A}{2} \left( 1 + \frac{2n_i}{N_A} \right) \approx \frac{2n_i N_A}{2N_A} = n_i$$

$$b) (1) p(x) = N_A, n(x) = \frac{n_i^2(x)}{N_A} = \frac{n_i^2(x)}{N_A^2} N_A \ll N_A$$

$$(2) p(x) = n(x) = N_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{W_L}{kT}\right), n(x) = p(x)$$

$$c) (1) G(T) = q \mu_n [n(x) + p(x)] = q \mu_n N_A \left( 1 + \frac{n_i^2(x)}{N_A^2} \right) \approx q \mu_n N_A$$

$$(2) G(T) = 2q n_i(x) \mu_n \left( \frac{T_0}{T} \right)^{3/2} = 2q N_0 \mu_n \underbrace{\left( \frac{T_0}{T} \right)^{3/2}}_{=1} \exp\left(-\frac{W_L}{2kT}\right)$$

d) (2) → Signalfunktion:

$$\ln[G(T)] = -\frac{W_L}{2kT_0} \frac{T_0}{T} + \ln[2q N_0 \mu_n]$$

$$\ln[G(T_1)] - \ln[G(T_2)] = -\frac{W_L}{2kT_0} \left( \frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2} \right)$$

$$\Rightarrow W_L = -2kT_0 \frac{\ln[G(T_1)/G(T_2)]}{\frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2}} = 2kT_0 \frac{\ln\left(\frac{9.06}{7}\right)}{0.82 - 0.40} = 0.59 \text{ eV}$$

Name: .....

- 2) Ermitteln Sie die Abschnürspannung  $U_p$  eines  $n$ -Kanal-Sperrschicht-Feldeffekttransistors (JFET). In der gradual-channel-approximation (Abb. 2) soll angenommen werden, dass das elektrische Feld in der Verarmungszone unterhalb des Gates (schraffierte Fläche) in  $y$ -Richtung und im Kanal in  $x$ -Richtung verläuft. Gehen Sie, wie für die ideale  $pnn$ -Diode bei 300 K üblich, davon aus, dass die Dotierstoffe vollständig ionisiert sind und die beweglichen Ladungsträger in der Sperrschicht keine Rolle spielen.

- a) Ermitteln Sie ausgehend vom Verlauf der Raumladung  $\rho(y) = q(N_D^+ + p - N_A^- - n)$  der

$$\text{Gate-Diode durch Integration der Poisson-Gleichung: } \frac{d^2 W_L(y)}{dy^2} = q \frac{dE(y)}{dy} = \frac{q}{\epsilon} \rho(y)$$

den Verlauf der elektrischen Feldstärke  $E(y)$  und der Leitungsbandkante  $W_L(y)$  im Bereich der Sperrschicht jeweils für den  $p$ - und den  $n$ -Bereich. Skizzieren Sie die Verläufe (Vorlage). Markieren Sie charakteristische Parameter  $[-qN_A, qN_D, q(U_D - U_p)]$ .

- b) Bestimmen Sie die Bandaufwölbung  $W_L(w_n) - W_L(-w_p)$  am Ort  $x = l$  näherungsweise unter Beachtung von  $N_D \ll N_A$ . Ermitteln Sie hieraus nun die Abschnürspannung  $U_p$  ( $U_{gs} = 0$ ) näherungsweise unter Beachtung von  $N_D \ll N_A$ . Folgende Daten sind gegeben:  $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ;  $d = 1.5 \text{ } \mu\text{m}$ ; relative Dielektrizitätskonstante:  $\epsilon_r = 11.7$ ;  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$ ;  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $U_D = 0.7 \text{ V}$ .

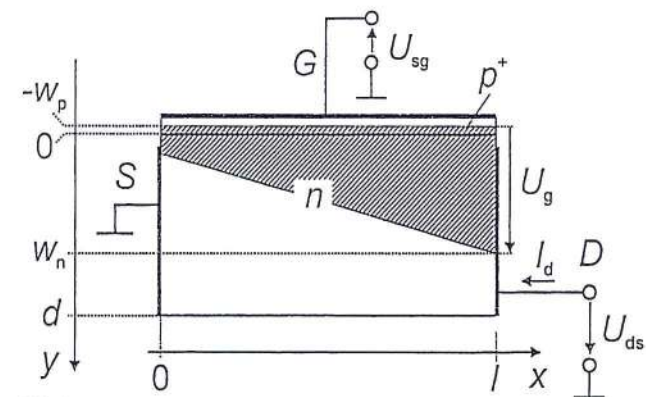


Abb. 2

2a)  $p(y) = q [N_D(y) - N_A(y)]$  in der p-n-Basis

p-Basis:  
 $p(y) = -q N_A$

n-Basis:  
 $p(y) = q N_D$

1. Integration der Poisson-Gl.  $E(y) = \frac{q}{\epsilon} \int p(y) dy + C$

$E(y) = -\frac{q}{\epsilon} N_A \int dy + C = -\frac{q}{\epsilon} N_A y + C$  |  $E(y) = \frac{q}{\epsilon} N_D \int dy + C = \frac{q}{\epsilon} N_D y + C$

$C = E(-w_p) + \frac{q}{\epsilon} N_A (-w_p)$  |  $C = E(w_n) - \frac{q}{\epsilon} N_D w_n$

$\Rightarrow E(y) = -\frac{q}{\epsilon} (y + w_p)$  |  $\Rightarrow E(y) = \frac{q}{\epsilon} N_D (y - w_n)$

2. Integration:  $W_L(y) = q \int E(y) dy + C$

$W_L(y) = -\frac{q^2}{2\epsilon} N_A \int (y + w_p) dy + C$  |  $W_L(y) = \frac{q^2}{2\epsilon} N_D \int (y - w_n) dy + C$

$= -\frac{q^2}{2\epsilon} N_A \left( \frac{1}{2} y^2 + w_p y \right) + C$  |  $= \frac{q^2}{2\epsilon} N_D \left( \frac{1}{2} y^2 - w_n y \right) + C$

$C = W_L(-w_p) - \frac{q^2}{2\epsilon} N_A \frac{w_p^2}{2}$  |  $C = W_L(w_n) + \frac{q^2}{2\epsilon} N_D \frac{w_n^2}{2}$

$\Rightarrow W_L(y) - W_L(-w_p) = -\frac{q^2}{2\epsilon} N_A (y + w_p)^2$  |  $\Rightarrow W_L(y) - W_L(w_n) = \frac{q^2}{2\epsilon} N_D (y - w_n)^2$

b)  $W_L(w_n) - W_L(-w_p) = W_L(w_n) - W_L(0) + W_L(0) - W_L(-w_p) = -q(u_p - u_j)$

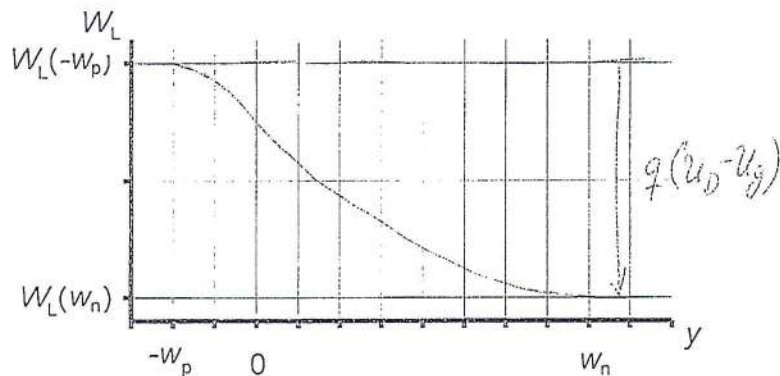
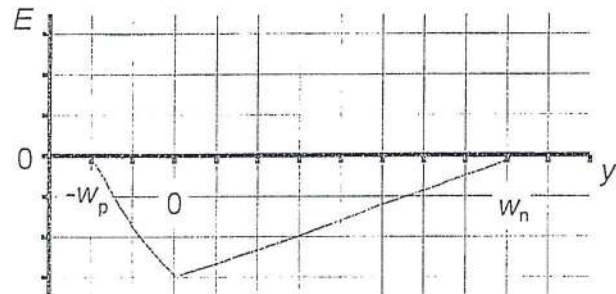
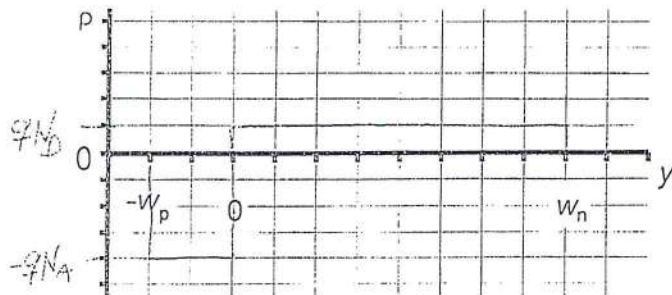
$= -\frac{q^2}{2\epsilon} (N_D w_n^2 + N_A w_p^2) = -\frac{q^2}{2\epsilon} N_D w_n^2 \left( 1 + \frac{N_A w_p^2}{N_D w_n^2} \right) = -\frac{q^2}{2\epsilon} N_D w_n^2 \left( 1 + \frac{w_p^2}{w_n^2} \right)$

$\approx -\frac{q^2}{2\epsilon} N_D w_n^2$   $\frac{N_A w_p^2}{N_D w_n^2} = 1$

bei Abschirmung:  $w_n = d \Rightarrow u_p - u_j = \frac{q}{2\epsilon} N_D d^2$

Spannungsteilung:  $-u_p = u_j + u_d = 0 \Rightarrow u_j = -u_d = -u_p$

$\Rightarrow u_p + u_p = \frac{q}{2\epsilon} N_D d^2 \Rightarrow u_p = \frac{q}{2\epsilon} N_D d^2 = 1,1 \text{ V}$



Name: .....

- 3) Analysieren Sie die Schaltung in Abb. 3a. Der Transistor ist durch das Kennlinienfeld in Abb. 3b charakterisiert. Folgende Betriebsparameter sind gegeben:  $U_B = 8\text{ V}$ ,  $U_{ce} = 3,2\text{ V}$ ,  $U_{eb} = -0,7\text{ V}$ ,  $U_E = 0,6\text{ V}$ ,  $I_b = 8\text{ }\mu\text{A}$ ,  $I_q = 4 \times I_b$ ,  $R_G = 50\text{ }\Omega$ ,  $R_L = 3\text{ k}\Omega$ .

- Welcher Transistortyp liegt vor? Zeichnen Sie das Gleichstromersatzschaltbild. Ermitteln Sie den Arbeitspunkt ( $U_{ce}$ ,  $I_c$ ) und die Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_E$  und  $R_C$ . Wie groß ist  $I_c$  ( $U_{ce} = 0$ )? Tragen Sie Arbeitspunkt und -gerade in das Kennlinienfeld ein.
- Führen Sie eine Wechselstromanalyse durch. Welcher Schaltungstyp liegt vor? Zeichnen Sie hierzu die Ersatzschaltung unter Verwendung des vereinfachten Kleinsignal-Ersatzschaltbildes für den Transistor (Abb. 3c) mit den Parametern  $\alpha = 0,995$ ;  $r_b = 2,5\text{ k}\Omega$  und  $r_e = 12\text{ }\Omega$ . Die Kondensatoren stellen im betrachteten Frequenzbereich Kurzschlüsse dar.
- Bestimmen Sie aus b) mit Hilfe der in a) ermittelten Werte den Eingangswiderstand  $R_e = u_1/i_1$ , die Stromverstärkung  $v_i = i_2/i_1$ , die Leerlaufspannungsverstärkung  $v_{uL} = u_2/u_1$  ( $i_2 = 0$ ), die Spannungsverstärkung  $v_u = u_2/u_G$  ( $i_2 \neq 0$ ) und den Ausgangswiderstand  $R_a = u_2/i_2$  ( $u_G = 0$ ) der Schaltung formel- und zahlenmäßig. Nutzen Sie bei der Herleitung der Formeln sich aus den Zahlenwerten ergebende sinnvolle Näherungen.

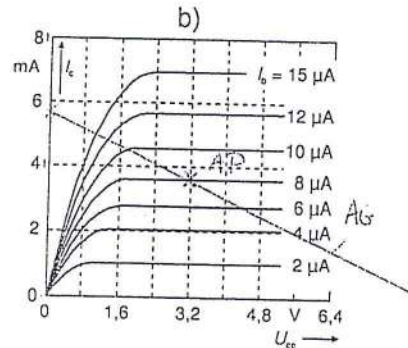
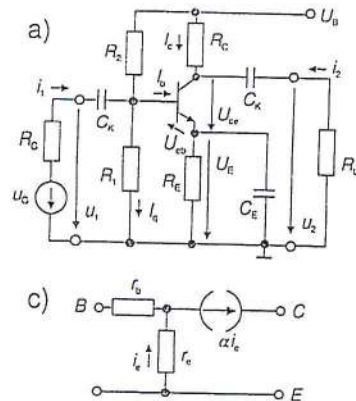
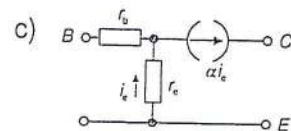
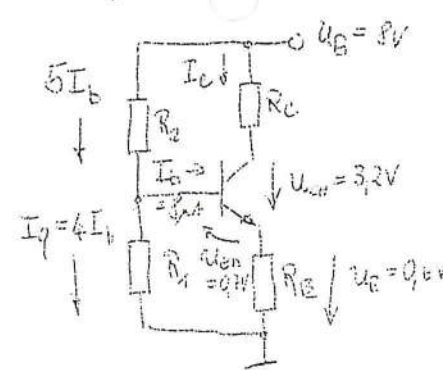


Abb. 3



3a) 17 Transistor



aus Kennlinienfeld:  $I_c = 3,5\text{ mA}$

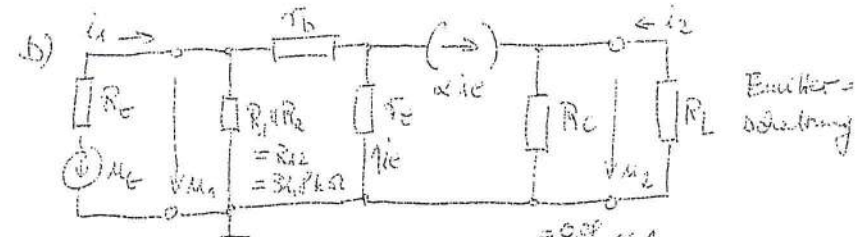
$$R_C = \frac{U_B - U_{ce} - U_E}{I_c} = \frac{(8 - 3,2 - 0,6)\text{ V}}{3,5\text{ mA}} = 1,2\text{ k}\Omega$$

$$R_E = \frac{U_E}{I_c + I_b} = \frac{U_E}{I_c} = \frac{0,6\text{ V}}{3,5\text{ mA}} = 171\text{ }\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_B - U_{be}}{4 I_b} = \frac{(8 - (-0,7))\text{ V}}{32\text{ }\mu\text{A}} = 40,6\text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_B - (U_E - U_{be})}{5 I_b} = \frac{(8 - 1,3)\text{ V}}{40\text{ }\mu\text{A}} = 167,5\text{ k}\Omega$$

Arbeitspunkt:  $I_c(U_{ce}=0) = \frac{U_B}{R_E + R_C} = \frac{8\text{ V}}{(1,2 + 0,17)\text{ k}\Omega} = 5,8\text{ mA}$



c)

$$u_1 = (i_1 - \frac{u_1}{R_{12}}) r_b - i_c r_e \Rightarrow u_1 (1 + \frac{r_b}{R_{12}}) = i_1 r_b - i_c r_e$$

$$i_1 = \frac{u_1}{R_{12}} - (1 - \alpha) i_c \Rightarrow i_c = -\frac{i_1}{1 - \alpha} + \frac{u_1}{R_{12}(1 - \alpha)} \approx 0,997 \ll 1$$

$$\Rightarrow u_1 = i_1 r_b + i_1 \frac{r_e}{1 - \alpha} - \frac{u_1 r_e}{R_{12}(1 - \alpha)} \Rightarrow u_1 (1 + \frac{r_e}{R_{12}(1 - \alpha)}) = i_1 (r_b + \frac{r_e}{1 - \alpha})$$

$$\Rightarrow R_e = \frac{u_1}{i_1} = r_b + \frac{r_e}{1 - \alpha} = 4,9\text{ k}\Omega$$

$$i_c = -\alpha i_e \frac{R_C}{R_C + R_L} \approx \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{R_C}{R_C + R_L} i_e$$

$$i_c = -\frac{i_1}{1 - \alpha} + \frac{u_1}{R_{12}(1 - \alpha)} = -\frac{i_1}{1 - \alpha} (1 - \frac{r_e}{R_{12}}) \approx -\frac{i_1}{1 - \alpha}$$

$$u_2 = \alpha i_c (R_C \parallel R_L)$$

$$\Rightarrow v_{uL} = \frac{u_2}{u_1} \Big|_{i_2=0} = \alpha R_C \frac{i_c}{u_1} = \alpha R_C \frac{i_c}{i_1} \frac{1}{u_1} \approx -\frac{\alpha R_C}{1 - \alpha} \frac{1}{r_b + \frac{r_e}{1 - \alpha}} = -4,9$$

$$v_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{u_2}{u_1} \bigg|_{u_1=0} \cdot \frac{R_C \parallel R_L}{R_C} \cdot \frac{u_1}{u_2} = v_{uL} \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_C}{R_C + R_L} = -35$$

$$R_i = \frac{u_2}{i_2} \bigg|_{u_2=0} \approx R_C = 12 \text{ k}\Omega$$

$\hookrightarrow u_1=0 \rightarrow i_2 \approx 0$