

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 09**Kurzfragen ohne Unterlagen** (Bearbeitungszeit: 30 min)

- 1) Welche der Aussagen zu einem Halbleiter im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?
- 2) Welche der Aussagen zum Lawinendurchbruch eines abrupten n - p -Übergangs sind zutreffend?
- 3) Welche der Aussagen zum Stromfluss durch einen idealen pn -Übergang sind zutreffend?
- 4) 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?
☐ n -Typ ☐ p -Typ
Zeichnen Sie für hohe 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 $C(U_g)$ -Kennlinie.
- 5) Zeichnen Sie ausschließlich unter Verwendung von NOR-Gattern mit 2 Eingängen die folgenden logischen Schaltungen.
- 6) Tragen Sie in die Strom-Spannungskennlinien eines pn -Übergangs die üblichen Arbeitspunkte in Form eines Kreuzes mit entsprechendem Buchstaben für folgende optoelektronischen Bauelemente ein:
A - Photodiode, B - Solarzelle, C - Laserdiode, D - Lawinenphotodiode, E - Lumineszenzdiode.
- 7) Welche der Aussagen zu den gegebenen Verstärkerschaltungen a bis c sind zutreffend?
- 8) Welche der Aussagen zum Bipolartransistor sind richtig?
- 9) Bezeichnen Sie im Schnitt durch eine CMOS-Struktur die Schichten bzw. Strukturen in den weißen Rechtecken mit (1) für das Substrat, (2) das Feldoxid, (3) das Gateoxid, (4) das Gate-Metall oder polykristallines Si, (5) die epitaktische Schicht und (6) Drain- oder Source-Kontakt (Metall).
- 10) In welchem Bereich liegen die Gitterkonstanten und Bandabstände der am meisten verwendeten Halbleitermaterialien (unter normalen Bedingungen)?

1. Welche Aussagen für einen Halbleiter im thermodynamischen Gleichgewicht sind richtig?
 - (a) Die intrinsische Ladungskonzentration n_i hängt exponentiell von der Bandlücke ab.
 - (b) Für die Generation g und Rekombination r gilt $g = r = 0$.
 - (c) Wegen der Elektroneutralität sind insgesamt genauso viele Elektronen im Leitungsband wie Löcher im Valenzband.
 - (d) für $T = 0K$ ist der Halbleiter ein elektrischer Isolator.
2. Welche Aussagen treffen auf den Lawinen-Effekt an einem $p - n$ -Übergang zu?
 - (a) Der Multiplikationsfaktor M_n ist definiert als Verhältnis der Elektronenstromdichte $J_n(w_n)/J_n(-w_p)$ an beiden Rändern der Verarmungszone.
 - (b) Die Durchbruchspannung lässt sich über die Dotierungskonzentration N_A der niedrig dotierten Seite einstellen.
 - (c) Die stärkere Elektronenstreuung bei höheren Temperaturen führt dazu, dass die Durchbruchspannung zunimmt.
 - (d) Ein Lawinendurchbruch tritt auf, wenn Elektronen unter Wirkung eines starken Elektrischen Feldes vom Valenz- ins Leitungsband tunneln.
3. Welche Aussagen zu einem idealen $p - n$ -Übergang sind zutreffend?
 - (a) Das Fermi-Niveau verläuft waagerecht durch die gesamte Struktur, ist also ortsunabhängig.
 - (b) In Bahngebieten sehr weit vom $p - n$ -Übergang entfernt kann von reinem Majoritätsladungsträgerstrom ausgegangen werden.
 - (c) Im Durchlassbereich gilt in der Verarmungszone $W_{F_n} < W_{F_p}$, $np < n_i^2$, also Nettogeneration.
 - (d) Für einen symmetrischen $p - n$ -Übergang gilt: In der Verarmungszone sind Löcher- und Elektronenstromdichte gleich groß.
4. Keine Ahnung...
5. Bilden Sie folgende Logik-Gatter ausschließlich aus NOR-Gattern:
 - (a) Inverter
 - (b) AND-Gatter
 - (c) OR-Gatter
6. Tragen Sie in die Strom-Spannungskennlinien eines $p - n$ -Übergangs die üblichen Arbeitspunkte in Form eines Kreuzes mit entsprechenden Buchstaben für folgende opto-elektronische Bauelemente ein (Graphik: Skript Kap. 9 Folie 47):
 - (a) Photodiode
 - (b) Solarzelle
 - (c) Laser-Diode
 - (d) Lawinen-Diode
 - (e) Lumineszenz-Diode
7. Welche Aussagen zu folgenden Transistor-Schaltungen a), b) und c) sind zutreffend? (Hat jemand die Schaltungen?)
 - (a) Alle haben eine Drain-Schaltung am Eingang.
 - (b) Alle haben eine Emitter-Schaltung am Ausgang.
 - (c) Nur a) und b) haben Rückkopplungswiderstände vom Ausgang zum Eingang

8. Welche Aussagen zum Bipolartransistor sind richtig?

- (a) Im Gegensatz zu FETs ist er spannungsgesteuert.
- (b) Die Ermitterergiebigkeit γ ergibt sich aus dem Verhältnis vom aus dem Emitter in die Basis injizierten Majoritätsladungsträgerstroms (bezogen auf den Emitter) zum gesamten Emitterstrom.
- (c) Der Basistransportfaktor β_T ist als Verhältnis von Kollektorstrom zu Emitterstrom definiert und ist normalerweise $\gg 1$.
- (d) Der Early-Effekt beschreibt die Abhängigkeit des Emitterstroms von der Kollektor-Basis-Spannung.

9. Keine Ahnung...

10. Wie groß sind Gitterabstand und Bandkante von häufig benutzten Halbleitern?

- (a) 0.5nm,
- (b) 5nm
- (c) 50nm
- (d) 10meV
- (e) 100meV
- (f) 1eV

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 09

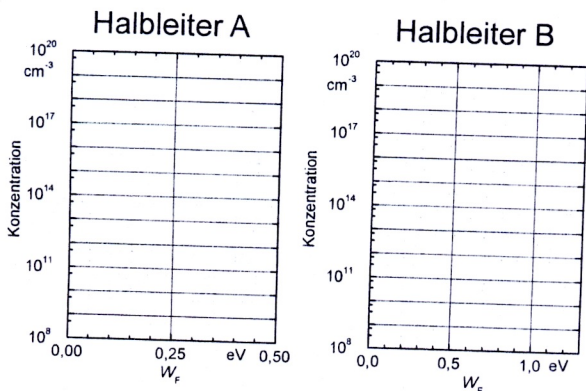
Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

- 1) Zwei homogen dotierte Halbleiter (A und B) sollen bezüglich ihrer elektronischen Eigenschaften bei Raumtemperatur $T_0 = 300$ K untersucht werden. In folgenden Daten stimmen beide Materialien überein: $m_e^* = 1,6$; $m_h^* = 1,6$; $N_A = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; $N_D = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; $W_A - W_V = W_B - W_V = 170 \text{ meV}$. Unterschiedlich sind dagegen die Bandabstände von $W_{GA} = 0,5 \text{ eV}$ und $W_{GB} = 1,3 \text{ eV}$; zur Vereinfachung sei $W_V = 0$. Weiterhin gilt $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, $h = 1 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
- a) Berechnen Sie für beide Halbleiter die effektiven Zustandsdichten N_L und N_V , Eigenleitungskonzentration n_i und -niveau W_i sowie die Konzentration ionisierter Akzeptoren N_A^- für $W_F = 0$ und die ionisierter Donatoren N_D^+ für $W_F = W_V$. Dabei gilt:

$$N_{L,V} = 2 \left(\frac{m_{L,V}^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}; \quad n_i^2 = np = N_L N_V \exp\left(-\frac{W_G}{kT}\right); \quad W_i = \frac{W_G}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_L}\right);$$

$$N_D^+ = N_D \left(2 \exp\left(\frac{W_F - W_D}{kT}\right) + 1 \right)^{-1}; \quad N_A^- = N_A \left(4 \exp\left(\frac{W_A - W_F}{kT}\right) + 1 \right)^{-1};$$

$$n = N_L \exp\left(\frac{W_F - W_L}{kT}\right); \quad p = N_V \exp\left(\frac{W_V - W_F}{kT}\right).$$



pfg@tu-bs.de
http://pfg-et.campus-bs.de

- b) Bestimmen Sie die Lage des Fermi-Niveaus für Ladungsneutralität. Skizzieren Sie dazu unter Verwendung obiger Daten für beide Halbleiter die Konzentrationen der freien Ladungsträger n und p sowie der ionisierten Störstellen N_A^- und N_D^+ in Abhängigkeit von W_F in den vorbereiteten Shockley-Diagrammen (Vorderseite). Markieren Sie jeweils alle wichtigen Größen (N_L , N_V , n_i , W_G , W_A , W_D , W_V , W_F). Lesen Sie für Ladungsneutralität die Lage des Fermi-Niveaus für beide Fälle sowie die Majoritätsträgerkonzentrationen ab.
- c) Stellen Sie die Gleichung für die Ladungsneutralität auf, und vereinfachen Sie sie für beide Halbleiter durch Vernachlässigungen aufgrund der Informationen aus den Shockley-Diagrammen. Berechnen Sie daraus $W_{FA,B}$ sowie $n_{A,B}$ und $p_{A,B}$. Diskutieren Sie das Ergebnis kurz.

- 2) Gegeben ist ein npn -Transistor mit Kurzschluss zwischen Basis und Kollektor (Abb. 2).

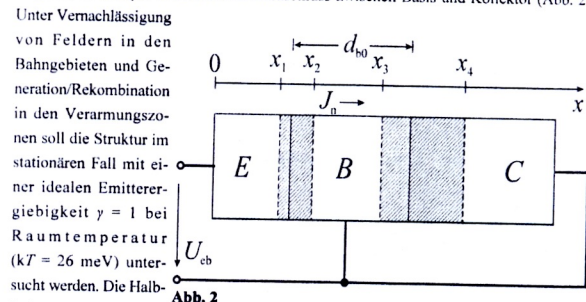


Abb. 2

Unter Vernachlässigung von Feldern in den Bahngeländen und Generation/Rekombination in den Verarmungszonen soll die Struktur im stationären Fall mit einer idealen Emittereffizienz $\gamma = 1$ bei Raumtemperatur ($kT = 26 \text{ meV}$) untersucht werden. Die Halbleiterdaten sind:

$N_{De} = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Ab} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_{Dc} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; $e = 10^{-12} \text{ As/Vcm}$; $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$; für die Basis gilt $d_{b0} = 3 \mu\text{m}$; $L_{nb} = 1,4 \mu\text{m}$; $D_{nb} = 50 \text{ cm}^2/\text{s}$.

- a) Wie groß ist die effektive Basisdicke $d_b = x_3 - x_2$ allgemein und für $U_{eb} = +0,5 \text{ V}$? Berechnen Sie dazu zunächst die Diffusionsspannungen U_{Deb} und U_{Dbc} mit

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_{D0}}{n_{p0}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{p_{D0}}{p_{p0}}\right) \text{ sowie}$$

$$w = \sqrt{\frac{2q(U_D - U)}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = w_n + w_p \text{ und } N_A w_p = N_D w_n.$$

- b) Wie groß sind die Minoritätsträgerkonzentrationen bei x_2 und x_3 allgemein

- c) Berechnen Sie den Eingangswiderstand R_e (bei offenem Ausgang) und den Ausgangswiderstand R_a (bei offenem Eingang) sowie die Kurzschlussstromverstärkung v_{ks} (unter der Annahme, dass kein Strom durch r_e fließt) jeweils allgemein und als Werte.

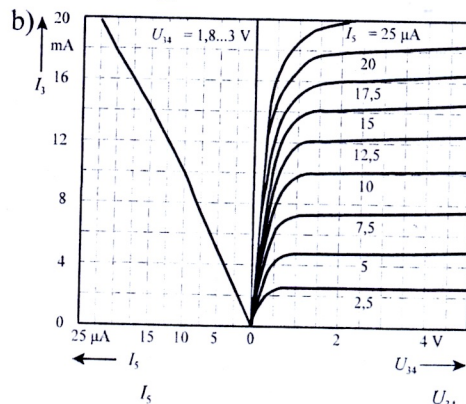
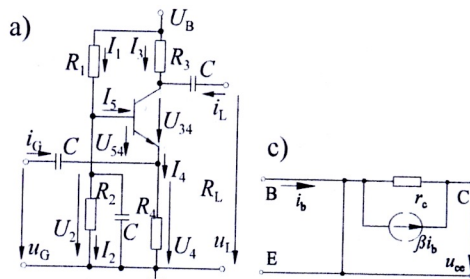


Abb. 3

Matrikelnr.: Name:

und bei $U_{eb} = +0,5 \text{ V}$ (Formeln und Werte)?

- c) Die Minoritätsträgerstromdichten $J_n(x_2)$ und $J_n(x_3)$ an beiden Rändern der neutralen Basis sollen bestimmt werden. Stellen Sie dazu aus Strom- und Kontinuitätsgleichungen

$$J_n = J_{np} + J_{nd} = \sigma_n E + q D_n \text{ grad } n_p$$

$$\frac{dn_p}{dx} = \frac{1}{q} \text{div } J_n - r + g \text{ mit } r = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} \text{ und } L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

die Differentialgleichung auf.

- d) Lösen Sie diese mit den Randbedingungen aus b) und dem Ansatz

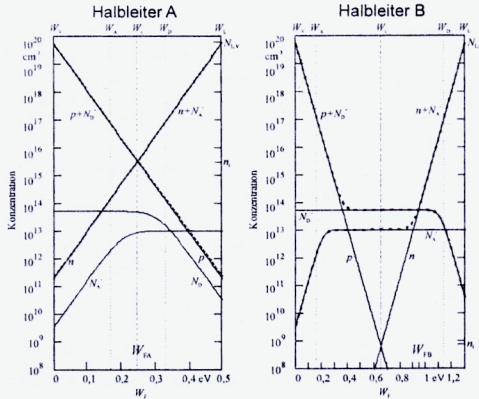
$$n_p - n_{p0} = A \sinh\left(\frac{x_2 - x}{L_{nb}}\right) + B \sinh\left(\frac{x - x_3}{L_{nb}}\right).$$

- e) Wie groß sind die Stromdichten $J_n(x_2)$ und $J_n(x_3)$ sowie der Basistransportfaktor $\beta_T = J_n(x_3)/J_n(x_2)$ (Formeln und Werte)? Diskutieren Sie das Ergebnis!

- 3) Gegeben ist die Verstärkerschaltung in Abb. 3a, die bei $U_a = 5 \text{ V}$ betrieben wird. Der Transistor ist durch die Kennlinienfelder in Abb. 3b und das Kleinsignal-Ersatzschaltbild in Abb. 3c charakterisiert.

- a) Um welchen Transistortyp und um welche Grundschaltung handelt es sich?
- b) Zunächst soll der Arbeitspunkt (AP) bestimmt werden. Zeichnen Sie dazu das Gleichstrom-Ersatzschaltbild. Gegeben sind $R_1 = 250 \Omega$ und $R_4 = 50 \Omega$. Tragen Sie die entsprechende Arbeitsgerade in das Ausgangs-Kennlinienfeld des Transistors ein (Abb. 3b). $R_1 = 32 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 8 \text{ k}\Omega$ sind so dimensioniert, dass für den Querstrom $I_s < I_1 = I_2$ gilt und $U_{14} = 0,5 \text{ V}$ ist. Bestimmen Sie den Arbeitspunkt ($I_s = I_1$; U_{14} ; I_4) und tragen ihn in beide Teile der Abb. 3b ein.
- c) Für die Wechselstromanalyse stellen die Kapazitäten C Kurzschlüsse dar. Der Transistor wird durch sein Kleinsignal-Ersatzschaltbild (Abb. 3c) charakterisiert. Zeichnen Sie das Wechselstrom-Ersatzschaltbild der Gesamtschaltung.
- d) Bestimmen Sie aus den Kennlinienfeldern in Abb. 3b die beiden unbekannten Größen des Transistor-Ersatzschaltbildes (Abb. 3c) r_e und β .

- a) Die gesuchten Größen lassen sich aus den gegebenen Gleichungen berechnen zu $N_{VA} = N_{VB} = N_{VA} = N_{VB} = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; $n_{VA} = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $n_{VB} = 6,1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$; $W_{VA} = 0,25 \text{ eV}$; $W_{VB} = 0,65 \text{ eV}$; $V_{VA} (W_F = 0) = N_{VA} (W_F = 0) = 3,5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$; $N_{VB} (W_F = W_{VB}) = N_{VB} (W_F = W_{VB}) = 3,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.
- b) Mit den Daten aus a) können die Shockley-Diagramme für beide Fälle konstruiert werden. Die fett gezeichneten Verläufe entsprechen den Summenkurven der positiven und negativen Ladungen. Für Neutralität ergibt sich $W_{VA} = W_{VB} = 0,25 \text{ eV}$ also $n = p = n_{VA} = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ bzw. $W_{VB} = 0,95 \text{ eV}$ und $n = N_D = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.



- c) Die Elektroneutralitätsbedingung lautet: $n + N_A^- = p + N_D^+$.

Zunächst betrachten wir Halbleiter A. Im Shockley-Diagramm (links) wird deutlich, dass die Beiträge der Dotierstoffe zur Ladungsneutralität vernachlässigt werden können, die sich also vereinfacht zu $n_A = p_A = n_{VA} = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Das Fermi-Niveau liegt beim Eigenleitungswert $W_{FA} = W_{VA} = 0,25 \text{ eV}$. Trotz der Dotierstoffe ist der Halbleiter A eigenleitend. Beim Halbleiter B dominieren dagegen die Donatoren und Elektronen das Shockley-Diagramm, sodass für die Neutralitätsbedingung gilt $n_B = N_D^+ = N_D = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Nach (1.14b) ergibt sich

$$W_{FB} = kT \ln \left(\frac{N_D}{N_L} \right) + W_{GB} = 0,94 \text{ eV} \text{ und } p_B = \frac{n_B^2}{n_B} = 7,5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}.$$

5

$$J_n(x_2) = \frac{-q D_{nb} n_{p0} \left[\exp \left(\frac{-q U_{cb}}{kT} \right) - 1 \right]}{L_{nb} \tanh(d_b / L_{nb})} = 8,7 \frac{\text{nA}}{\text{cm}^2};$$

$$J_n(x_3) = \frac{q D_{nb} n_{p0} \left[\exp \left(\frac{-q U_{cb}}{kT} \right) - 1 \right]}{L_{nb} \sinh(d_b / L_{nb})} = 6,5 \frac{\text{nA}}{\text{cm}^2}$$

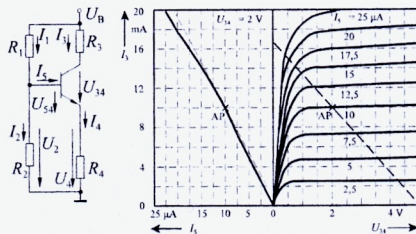
und

$$\beta_T = \frac{J_n(x_3)}{J_n(x_2)} = \frac{1}{\cosh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)} = 75\%.$$

Der geringe Wert von β_T ist auf die zu kleine Diffusionslänge der Elektronen in der Basis ($\beta_T = d_b$) zurückzuführen.

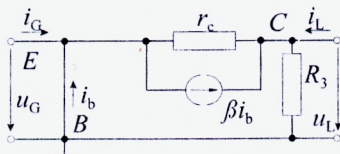
Lösung zu 3:

- a) Es handelt sich um einen *npn*-Bipolartransistor in Basischaltung (der Basiskontakt ist im Wechselstrom-ESB sowohl im Eingangs- als auch im Ausgangskreis enthalten).



- b) Die Arbeitsgerade ergibt sich zwischen $U_{B4} (I_3 = 0) = U_B$ und $I_3 (U_{B4} = 0) = U_B / (R_3 + R_4) = 16,7 \text{ mA}$. Der Maschenumlauf $U_2 = U_{B4} + I_3 R_4$ führt zu $I_3 = I_2 = 10 \text{ mA}$. Aus dem Ausgangskennlinienfeld liest man ab, dass $U_{B4} = 2 \text{ V}$. Daraus folgt $I_2 = 10 \mu\text{A}$.

- c)



7

Der Halbleiter B ist also in der Störstellenschöpfung, da alle Dotierstoffe ionisiert sind.

Lösung zu 2:

- a) Die Sperrschicht-Ausdehnungen der Emitter-Basis-Diode bzw. der Kollektorbasisdiode ins Basisgebiet sind nach (1.52a):

$$w_1 = \sqrt{\frac{2 e (U_{Deb} + U_{cb})}{q N_{Ab}}} = 1,28 \mu\text{m}; \quad U_{Deb} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{Dc} N_{Ab}}{n_i^2} \right) = 0,82 \text{ V};$$

$$w_2 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 e U_{Dbe}}{q 2 N_{Ab}}} = 0,61 \mu\text{m}; \quad U_{Dbe} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_{Dc} N_{Ab}}{n_i^2} \right) = 0,6 \text{ V},$$

und man erhält $d_b = d_{b0} - w_1 - w_2 = 1,11 \mu\text{m}$.

- b) Nach (1.63a) und (1.16) berechnet man $n_p(x_2) = n_i^2 / N_{Ab} \exp[-q U_{cb} / (kT)] = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-3} = 0$ und $n_p(x_3) = n_i^2 / N_{Ab} = 10^3 \text{ cm}^{-3}$.
- c) Strom- und Kontinuitätsgleichung für den eindimensionalen, feldfreien und stationären Fall ineinander einsetzen ergibt die Differentialgleichung
- $$0 = \frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_{nb}^2}.$$
- d) Einsetzen der Randbedingungen aus b) in den Ansatz liefert für $x = x_1$ dass $A = 0$ ist und für $x = x_2$ folgt

$$B = \frac{n_{p0} \left[\exp \left(\frac{-q U_{cb}}{kT} \right) - 1 \right]}{\sinh \left(\frac{x_2 - x_1}{L_{nb}} \right)} = - \frac{n_{p0} \left[\exp \left(\frac{-q U_{cb}}{kT} \right) - 1 \right]}{\sinh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)}.$$

$$\text{und } n_p(x) - n_{p0} = - \frac{\sinh \left(\frac{x - x_1}{L_{nb}} \right)}{\sinh \left(\frac{d_b}{L_{nb}} \right)} \left[\exp \left(\frac{-q U_{cb}}{kT} \right) - 1 \right].$$

- e) Da die neutrale Basis feldfrei ist, ergeben sich die Elektronenstromdichten als reine Diffusionsströme zu

- d) Aus dem Transistor-ESB kann man ablesen, dass $\beta = i_c / i_b|_{u_{ce}=0}$ und $r_e = u_{ce} / i_c|_{u_{be}=0}$ sind, d. h. die Steigungen der Kennlinien in Abb. 2c (s. o.). Im Arbeitspunkt ergibt sich jeweils $\beta = \Delta I_c / \Delta I_b = 900$ und $r_e = \Delta U_{ce} / \Delta I_c = 12,5 \text{ k}\Omega$.
- e) Aus dem Wechsel-ESB kann direkt abgelesen werden, dass $R_e = u_{ce} / i_c = 0$. Bei Leerlauf am Eingang gilt

$$u_L = (i_L + i_b) R_3 \rightarrow i_b = \frac{u_L}{R_3} - i_L \text{ und } u_L = -(1 - \beta) i_b r_e \rightarrow u_L \left(1 + (1 - \beta) \frac{r_e}{R_3} \right) = (1 - \beta) r_e i_L$$

$$R_a = \frac{u_L}{i_L} = \frac{(1 - \beta) r_e}{1 + (1 - \beta) \frac{r_e}{R_3}} = R_3 = 250 \Omega.$$

Mit einem Kurzschluss am Ausgang gilt, wenn kein Strom durch r_e fließt

$$i_L = -i_G - i_b \text{ und } i_L + \beta i_b = 0 \rightarrow i_b = -\frac{i_L}{\beta} \rightarrow i_L \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) = -i_G$$

$$v_{iGS} = \frac{i_L}{i_G} = -\frac{1}{1 - 1/\beta} = -1.$$

8