



**Aufgabe 1)** Bahngebiete, Betriebsbereich, Ladungsträgerdichten.

Gegeben ist ein npn-Si-Bipolar-Transistor bei 300 K mit den folgenden Werten:

- Effektiver homogener vom Strom durchflossener Querschnitt:  
 $A = 20 \mu\text{m}^2$
- $L_n = L_p = 50 \mu\text{m}$
- Rechteckprofil-Dotierung mit

$$\begin{array}{ll} N_E = 10^{20} \text{ cm}^{-3} & 0 \leq x < x_{je} \\ N_B = 10^{17} \text{ cm}^{-3} & x_{je} \leq x \leq x_{jc} \\ N_C = 10^{15} \text{ cm}^{-3} & x_{jc} < x < x_k \end{array}$$

mit

$$\begin{array}{l} x_{je} = 2 \mu\text{m} \\ x_{jc} = 4 \mu\text{m} \\ x_k = 8 \mu\text{m} \end{array}$$

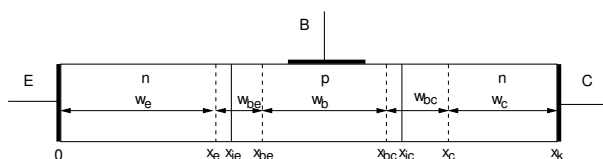


Abbildung 1: npn-Bipolar-Transistor.

Fehlende Werte können aus der Literatur oder aus dem Skript entnommen werden. z.B.  $\mu_n, \mu_p$  aus Tab. 2.5.

- Wie groß sind die Bahngebiete  $w_e, w_b, w_c$ , sowie die RLZ-Weiten  $w_{be}, w_{bc}$  des Transistors im thermodynamischen Gleichgewicht?
- Der Transistor befindet sich im Arbeitspunkt  $U_{BE} = 800 \text{ mV}$  und  $U_{BC} = -1 \text{ V}$ . In welchem Betriebsbereich befindet sich der Transistor?

- c) Welche Form besitzen die Minoritätsträgerverläufe in den Bahngebieten bei logarithmischer Darstellung ( $\log n_p(x), \log p_n(x)$ ) und bei linearer Darstellung?  
 Ist in allen Bahngebieten die Berechnung mit Hilfe der Näherungen für die kurze Diode möglich?
- d) Berechnen Sie die Sättigungsströme  $I_{es}, I_{bs}, I_{cs}$  des Transistors sowie seine Stromverstärkungen  $B_F$  und  $B_R$ .
- e) Welchen Wert besitzen die Ströme  $I_{CE}, I_{EC}$  des Transferstrom-Modells im Arbeitspunkt unter b)? Wie groß sind  $I_B, I_E$  und  $I_C$  an den Klemmen des Transistors? Wie groß ist demnach die Stromverstärkung  $B = \frac{I_C}{I_B}$ ?
- f) Bestimmen und zeichnen Sie die Kennlinien  $I_C(U_{CE}), I_C(I_B), I_B(U_{BE})$  mit  $U_{BE} = 0 \dots 850$  mV.  
 Wählen Sie in der Darstellung für  $U_{BE}$  eine geeignete Schrittweite. (Machen Sie geeignete Annahmen, falls Ihnen Angaben fehlen.)
- a) Bahngebiete, RLZ-Weiten  
 Basis-Emitter-RLZ

$$\begin{aligned}
 U_{D_e} &= U_T \cdot \log \left( \frac{N_E N_B}{n_i^2} \right) \\
 &= 26 \text{ mV} \cdot \log \left( \frac{10^{20} 10^{17}}{(1,45 \cdot 10^{10})^2} \right) \\
 &= 998 \text{ mV} \\
 x_{be} - x_{je} &\approx \sqrt{\frac{2 \epsilon U_{D_e}}{e N_B}} \quad , \text{ da } N_B \ll N_E \\
 &= 115 \text{ nm} \\
 x_{je} - x_e &= \frac{N_B}{N_E} \cdot (x_{be} - x_{je}) \\
 &= 0,115 \text{ nm} \\
 w_e = x_e = x_{je} &= 0,115 \text{ nm} \\
 &= 2 \mu\text{m} - 0,115 \text{ nm} \approx 2 \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

Basis-Kollektor-RLZ

$$\begin{aligned}
 U_{Dc} &= U_T \cdot \log \left( \frac{N_B N_C}{n_i^2} \right) \\
 &= 26 \text{ mV} \cdot \log \left( \frac{10^{17} 10^{15}}{(1,45 \cdot 10^{10})^2} \right) \\
 &= 699 \text{ mV} \\
 x_c - x_{jc} &\approx \sqrt{\frac{2 \epsilon U_{Dc}}{e N_C}} \quad , \text{ da } N_C \ll N_B \\
 &= 963 \text{ nm} \\
 x_{jc} - x_{bc} &= \frac{N_C}{N_B} \cdot (x_c - x_{jc}) \\
 &= 9,6 \text{ nm} \\
 w_b &= x_{bc} - x_{be} = x_{jc} - 9,6 \text{ nm} - (x_{je} + 115 \text{ nm}) \\
 &= 4 \mu\text{m} - 9,6 \text{ nm} - (2 \mu\text{m} + 115 \text{ nm}) \approx 1,89 \mu\text{m} \\
 w_c &= x_k - x_c = x_k - (x_{jc} + 963 \text{ nm}) \\
 &= 8 \mu\text{m} - 4 \mu\text{m} - 963 \text{ nm} = 3,04 \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

b) Betriebsbereich

$$\begin{aligned}
 U_{BE} &> 0 \quad U_{BC} < 0 \\
 &\Rightarrow \text{normal aktiv}
 \end{aligned}$$

c) Minoritätsträgerverläufe in den Bahngebieten

Berechnung der Ladungskonzentrationen an den Rändern der Raumladungszonen im thermodynamischen Gleichgewicht ( $U_{BE} = 0 \text{ V}$ ,  $U_{BC} = 0 \text{ V}$ ) mit  $U_{BE} = 800 \text{ mV}$ ,  $U_{BC} = 1 \text{ V}$

Majoritäten

$$\begin{aligned}
 n_{e0} &= N_E = 10^{20} \text{ cm}^{-3} \\
 p_{b0} &= N_B = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\
 n_{c0} &= N_C = 10^{15} \text{ cm}^{-3}
 \end{aligned}$$

Majoritäten

$$\begin{aligned}
 n_e(x_e) &= N_E = 10^{20} \text{ cm}^{-3} \\
 p_b(x_{be}) &= N_B = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\
 p_b(x_{bc}) &= N_B = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\
 n_c(x_c) &= N_C = 10^{15} \text{ cm}^{-3}
 \end{aligned}$$

Minoritäten

$$\begin{aligned}
 p_{e0} &= \frac{n_i^2}{n_{e0}} = 2,1025 \text{ cm}^{-3} \\
 n_{b0} &= \frac{n_i^2}{p_{b0}} = 2102,5 \text{ cm}^{-3} \\
 p_{c0} &= \frac{n_i^2}{n_{c0}} = 210250 \text{ cm}^{-3}
 \end{aligned}$$

Minoritäten

$$\begin{aligned}
 p_e(x_e) &= p_{e0}(x_e) \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \approx 4,8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \\
 n_b(x_{be}) &= n_{b0}(x_{be}) \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \approx 4,8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \\
 n_b(x_{bc}) &= n_{b0}(x_{bc}) \cdot e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} \approx 4,2 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^{-3} \\
 p_c(x_c) &= p_{c0}(x_{bc}) \cdot e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} \approx 4,2 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-3}
 \end{aligned}$$

Die Näherungen für die kurze Diode können verwendet werden, da  $L_p \gg w_e, L_n \gg w_b, L_p \gg w_c$ .

→ Die Ladungsträgerkonzentration der Minoritäten in den Bahngebieten verläuft linear.

d) Sättigungsströme, Stromverstärkungen

Für die Beweglichkeiten  $\mu_n$  bzw.  $\mu_p$  sind jeweils die Beweglichkeiten der Minoritätsträger entscheidend (also  $\mu_p$  im n-dotierten Bereich und umgekehrt). Diese sind im Skript nicht verzeichnet. Daher wird auf die Internetseite

<http://www.pvlighthouse.com.au/calculators/Mobility%20calculator/Mobility%20calculator.aspx>

zurückgegriffen.

$$I_{es} = e A D_{pe} \frac{p_{e0}}{w_e}$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 20 \mu\text{m}^2 \cdot 4,13 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{2,1025 \text{ cm}^{-3}}{2 \mu\text{m}} \approx 1,39 \cdot 10^{-21} \text{ A}$$

$$\text{mit } D_{pe} = U_T \mu_p = 26 \text{ mV} \cdot 159 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \approx 4,13 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$I_{bs} = e A D_{nb} \frac{n_{b0}}{w_b}$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 20 \mu\text{m}^2 \cdot 17,6 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{2102,5 \text{ cm}^{-3}}{1,89 \mu\text{m}} \approx 5,90 \cdot 10^{-18} \text{ A}$$

$$\text{mit } D_{nb} = U_T \mu_n = 26 \text{ mV} \cdot 675 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \approx 17,6 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$I_{cs} = e A D_{pc} \frac{p_{c0}}{w_c}$$

$$= 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 20 \mu\text{m}^2 \cdot 12 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{210250 \text{ cm}^{-3}}{3 \mu\text{m}} \approx 2,70 \cdot 10^{-16} \text{ A}$$

$$\text{mit } D_{pc} = U_T \mu_p = 26 \text{ mV} \cdot 462 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \approx 12 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$B_F = \frac{I_{bs}}{I_{es}} = \frac{5,90 \cdot 10^{-18} \text{ A}}{1,39 \cdot 10^{-21} \text{ A}} \approx 4245$$

$$B_R = \frac{I_{bs}}{I_{cs}} = \frac{5,90 \cdot 10^{-18} \text{ A}}{2,70 \cdot 10^{-16} \text{ A}} \approx 0,022$$

e) Klemmenströme, Stromverstärkung

$$I_{CE} = I_{bs} \cdot \left( \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) - 1 \right) \approx 136 \mu\text{A}$$

$$I_{EC} = I_{bs} \cdot \left( \exp\left(\frac{U_{BC}}{U_T}\right) - 1 \right) \approx -5,9 \cdot 10^{-18} \text{ A}$$

$$I_B = I_{BC} + I_{BE} \approx I_{BE} \quad , \text{da B-E-Diode in Flusspolung und B-C-Diode in Sperrpolung}$$

$$I_{BE} = I_{es} \cdot \left( \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) - 1 \right) \approx 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ A}$$

$$I_C = I_{CE} - I_{EC} - I_{BC} \approx 136 \mu\text{A}$$

$$I_E = I_{CE} - I_{EC} + I_{BE} \approx 136 \mu\text{A}$$

$$B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{136 \mu\text{A}}{32 \text{ nA}} \approx 4250$$

f) Kennlinien

$I_C(U_{CE})$

gegeben sei  $U_{BE}$ , Beispiel:  $U_{BE} = 800 \text{ mV}$

$$I_C = I_{CE} - I_{EC} - I_{BC}$$

$$= I_{bs} \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) - I_{bs} \left( e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right) - I_{cs} \left( e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right)$$

$$= I_{bs} \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) - (I_{bs} + I_{cs}) \left( e^{\frac{U_{BE} - U_{CE}}{U_T}} - 1 \right)$$

$$= I_{bs} \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) - (I_{bs} + I_{cs}) \left( \frac{e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}}{e^{\frac{U_{CE}}{U_T}}} - 1 \right)$$

→ Für  $U_{CE} > U_{BE}$  (normal-aktiv), nahezu keine Abhängigkeit von  $U_{CE}$ .

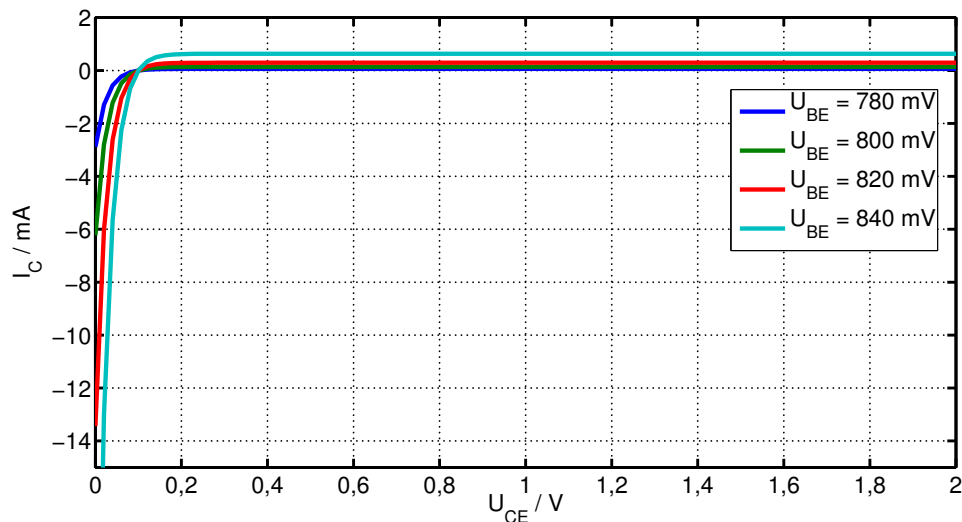


Abbildung 2:  $I_C(U_{CE})$ .

### $I_C(I_B)$ für normal-aktiven Betrieb

$$\begin{aligned} I_C &= I_{bs} \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \\ I_B &= I_{BC} + I_{BE} \approx I_{BE} \\ &= I_{es} \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \\ \rightarrow U_{BE} &= U_T \ln \left( \frac{I_{BE}}{I_{es}} + 1 \right) \\ \rightarrow I_C &= I_{bs} \frac{I_{BE}}{I_{es}} \\ &= \frac{I_{bs}}{I_{es}} I_{BE} = B_F I_{BE} \approx B_F I_B \end{aligned}$$

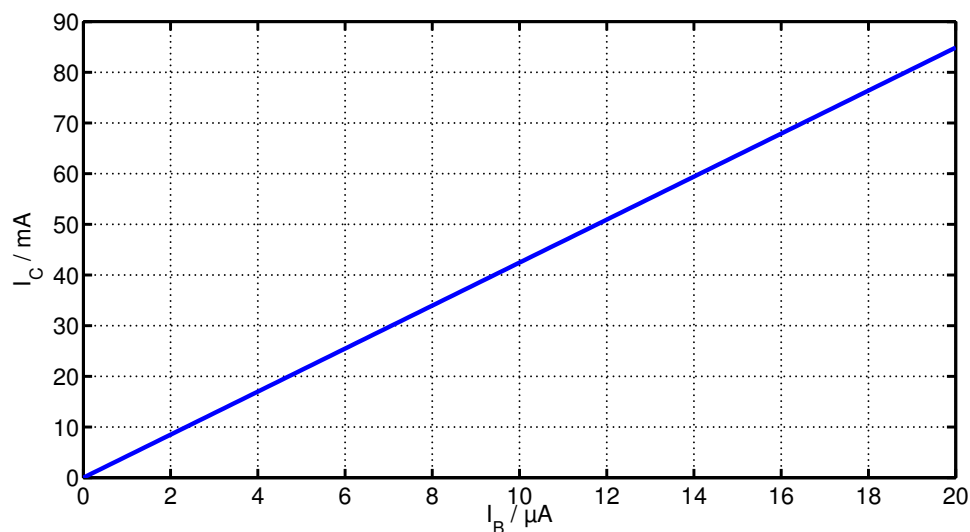


Abbildung 3:  $I_C(I_B)$ .

### $I_B(U_{BE})$ für normal-aktiven Betrieb

$$I_B = I_{es} \left( e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

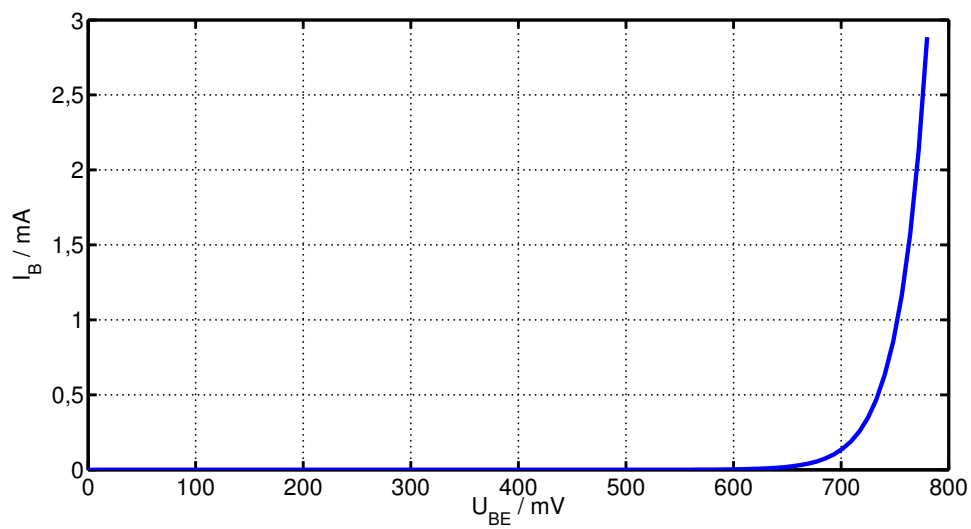


Abbildung 4:  $I_B(U_{BE})$ .