

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 11**Kurzfragen ohne Unterlagen** (Bearbeitungszeit: 30 min)

- 1) Zeichnen Sie in das nebenstehende kartesische Koordinatensystem folgende Richtungen/Ebenen ein: $[110]$, (110) , $[\bar{1}21]$. (Bitte entsprechend kennzeichnen.)
- 2) Wie groß ist der Abstand zweier nächster Nachbaratome der gleichen Art in einem Kristallgitter mit der Gitterkonstante a

im Zinkblendegitter?

im Diamantgitter? $\frac{\sqrt{3}}{4} a$

- 3) 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?

- 4) Welche der Aussagen zum Bipolartransistor sind richtig?

- 5) Um welche digitale Grundsaltung handelt es sich bei dem Bild rechts unten?

Um welche Transistoren handelt es sich bei M_1 und M_2 ?

Stellen Sie die Wahrheitstabelle zur Schaltung auf:

- 6) Welche der Aussagen zum Stromfluss durch einen idealen pn -Übergang sind zutreffend?
- 7) Betrachten Sie die nebenstehende Schaltung mit einem idealen Operationsverstärker. Bestimmen Sie die Ausgangsspannung u_a in Abhängigkeit von den Eingangsspannungen u_1 und u_2 sowie den Widerständen.

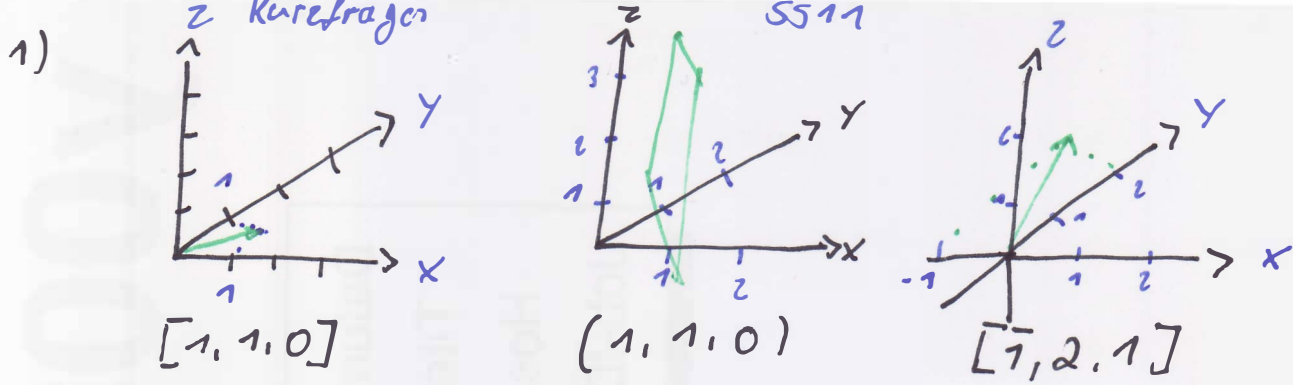
 $u_a =$

Wie lässt sich die Funktion der Schaltung beschreiben?

- 8) Der schematische Querschnitt rechts zeigt zwei CMOS-Transistoren. Ergänzen Sie jeweils den Kanaltyp und beschriften Sie in dem unteren Feld das markierte Material, bzw. die Schicht.

CMOS ist die Abkürzung für:

- 9) Konstruieren Sie die Stromkennlinie aus dem Ausgangskennlinienfeld. Um welche Art von Transistor handelt es sich? (Hinweis zur Stromrichtung: Alle Ströme fließen in den Transistor hinein.)
- 10) Welche der Aussagen zu einer Doppelheterostruktur-LED sind richtig?



2) zinkblendengitter: $(= \frac{\sqrt{2}}{2} a$ $a = 5,654 \text{ \AA}$

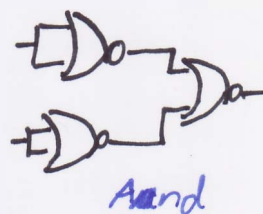
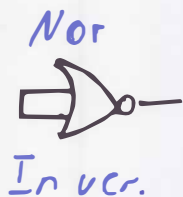
Diamantgitter: $(= \frac{\sqrt{3}}{4} a$ $a = 5,431 \text{ \AA}$

3) annahme:
 W_F liegt mittig zwischen W_V u. W_C

- 4) - Early-Effekt Abhängigkeit von C zu B Spannung
 - β Verhältnis von Emitter in Basis Majoritäts
 - Basistransportfaktor β_T ist das Verhältnis B.strom zum gesamten Emitterstrom
 - Stromgesteuert

siehe SS09 Lennert Kurzfragen.

5.



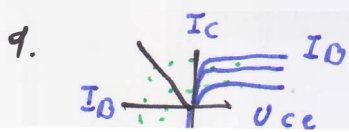
6.

- äußere Spj. in Sperrrichtung \rightarrow Sperrstrom durch Minoritätsträger
 " " in Durchlassrichtung $\rightarrow I_F$ Strom

7. DPs Wikipedia OP Invertierend/Nicht In.

8. npn / pnp

Complementary Metal Oxide semiconductor



10. - niedrige Schwellstromdichte
 - Wirkungsgrad

Skript

Klausur: Grundlagen der Elektronik SS 11

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Klausurnote gemeinsam mit meiner Matrikelnummer im Institut ausgehängt wird.

Braunschweig, den 8. 8. 2011

Unterschrift: _____

Aufgaben ohne Unterlagen (Bearbeitungszeit: 2 Std.)

1) Ein homogen mit Donatoren und Akzeptoren dotierter Halbleiter weist folgende Daten auf:

$$W_G = 1,5 \text{ eV}; W_L - W_{D1} = 10 \text{ meV}; W_A - W_V = 10 \text{ meV}; N_L = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} (T/T_0)^{3/2}; \\ N_V = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} (T/T_0)^{3/2}; N_{D1} = 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}; N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}; \text{ zur Vereinfachung sei } W_V = 0.$$

Sein elektrisches Verhalten soll bei $T_0 = 300 \text{ K}$ untersucht werden ($kT_0 \approx 26 \text{ meV}$).

- Berechnen Sie Eigenleitungskonzentration $n_i = (n \cdot p)^{0,5}$ und -niveau $W_i = (W_V + W_L)/2 + 0,5 \cdot kT \cdot \ln(N_V/N_L)$.
- Zeichnen Sie unter Verwendung obiger Daten die Konzentrationen der freien Ladungsträger n und p sowie asymptotisch der ionisierten Störstellen N_{D1}^+ und N_A^- in Abhängigkeit von der Lage des Fermi-Niveaus W_F in das Shockley-Diagramm (Abb. 1a und b). Markieren Sie in Teil a alle wichtigen Größen ($N_L, N_V, n_i, W_{D1}, W_A, W_L, W_V, W_i, W_{F1}$). Geben Sie für Ladungsneutralität die Lage des Fermi-Niveaus W_{F1} sowie die sich einstellenden Elektronen- und Löcherkonzentrationen n_1 und p_1 an (Werte).
- Derselbe Halbleiter wird zusätzlich mit einem zweiten Donator $N_{D2} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $W_L - W_{D2} = 750 \text{ meV}$ dotiert. Berechnen Sie die Konzentration ionisierter Donatoren N_{D2}^+ für $W_F = 1,25 \text{ eV}$ mit

$$N_D^+ = N_D \left(2 \exp \left(\frac{W_F - W_D}{kT} \right) + 1 \right)^{-1}.$$

- Ergänzen Sie Abb. 1b um den asymptotischen Verlauf der ionisierten Störstellen N_{D2}^+ unter Verwendung des bei c) berechneten Wertes und geben Sie für Ladungsneutralität

die Lage des Fermi-Niveaus W_{F2} sowie die sich einstellenden Elektronen- und Löcherkonzentrationen n_2 und p_2 an (Werte).

- e) Stellen Sie die Gleichung für Elektroneutralität auf. Vereinfachen Sie sie für beide Fälle (1 und 2) durch Vernachlässigungen aufgrund der Informationen aus den Shockley-Diagrammen in Abb. 1 a und b. Berechnen Sie daraus $W_{F1,2}$ sowie $n_{1,2}$ und $p_{1,2}$. Diskutieren Sie das Ergebnis kurz.

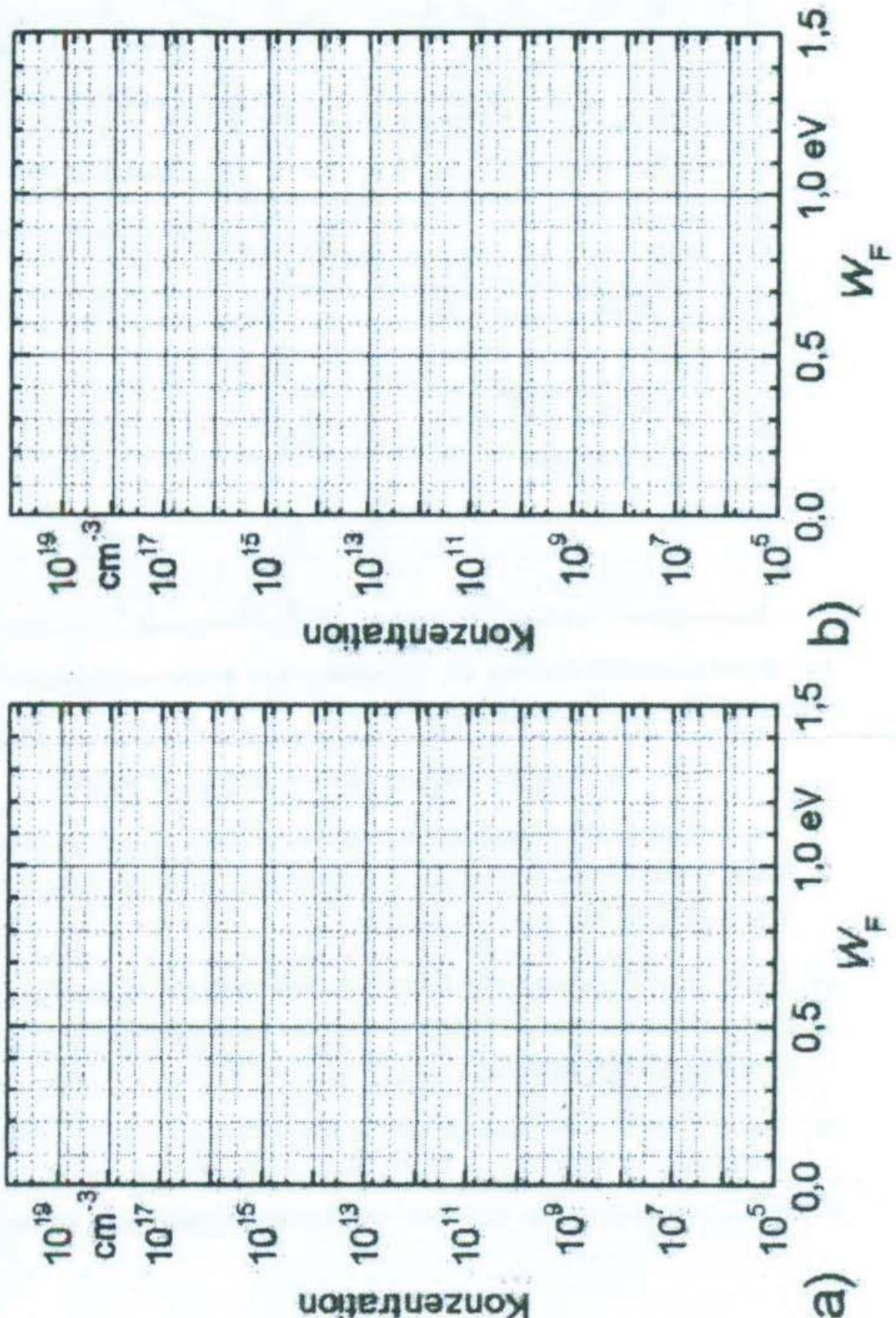
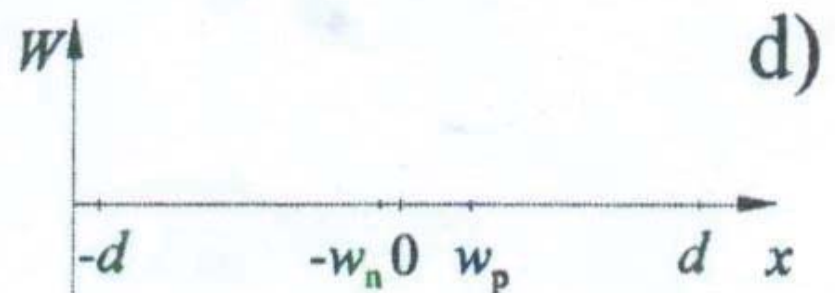
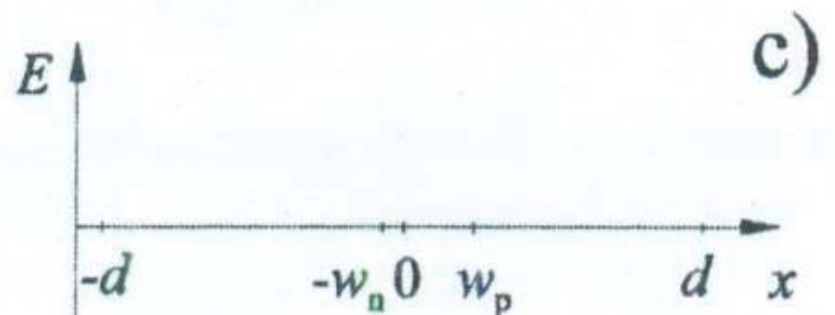
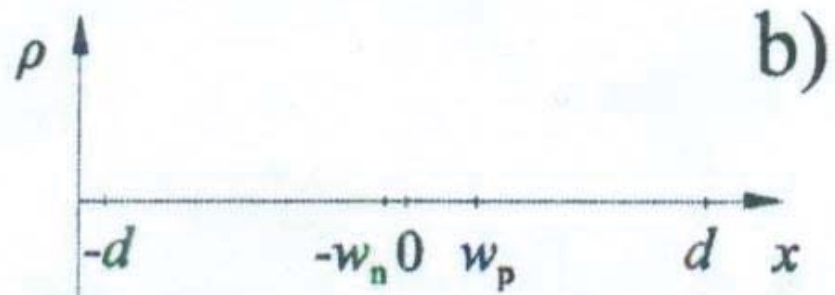
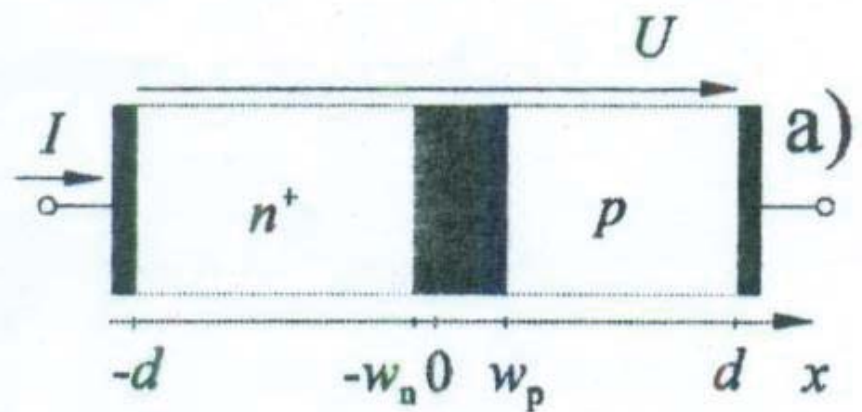


Abb. 1: Shockley-Diagramme

Gegeben ist der abrupte n^+p -Übergang in Abb. 2 mit den konstanten Dotierungen $N_D^+ = N_D = 6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ und $N_A^- = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Bekannt sind weiterhin: Eigenleitungskonzentration $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; Permittivität $\epsilon = 10^{-12} \text{ As/(Vcm)}$; Diffusionslängen $L_n = L_p = 5 \text{ }\mu\text{m}$; Lebensdauern $\tau_p = \tau_n = 20 \text{ }\mu\text{s}$, Temperatur $T = 300 \text{ K}$ ($kT = 26 \text{ meV}$).



- a) Skizzieren Sie die Verläufe der Raumladungsdichte ρ , der Feldstärke E und der Bandkanten W_L und W_V in der Diode für thermodynamisches Gleichgewicht ($U = 0$). Dabei soll angenommen werden, dass die Raumladungszone ($-w_n \leq x \leq w_p$) vollständig an beweglichen Ladungsträgern verarmt ist und ihre Ränder scharf sind. Achten Sie auf vollständige Beschriftung!
- b) Tragen Sie die Diffusionsspannung U_D in Abb. 2d ein und berechnen Sie sie (Formel und Wert) unter Verwendung der bekannten Abb. 2: n^+p -Diode Gleichungen für $n, p = f(W_F)$ aus diesem Diagramm. Wie groß sind $n_{n0}(-w_n)$ und $n_{p0}(w_p)$?
- c) Der Strom durch den n^+p -Übergang soll analysiert werden. Stellen Sie dazu für die Minoritätsladungsträger die Strom- und Kontinuitätsgleichungen in den beiden Bahngebieten ($-d \leq x \leq -w_n$ und $w_p \leq x \leq d$) auf. Allgemein gilt

$$J_n = J_{nF} + J_{nD} = \sigma_n E + q D_n \text{grad} n_p ; \frac{dn_p}{dt} = \frac{1}{q} \text{div} J_n - r + g ; r = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} ; L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$J_p = J_{pF} + J_{pD} = \sigma_p E - q D_p \text{grad} p_n ; \frac{dp_n}{dt} = -\frac{1}{q} \text{div} J_p - r + g ; r = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} ; L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

Bilden Sie daraus für den eingeschwungenen Zustand die Differentialgleichungen, die die Verläufe der Minoritätsladungsträgerkonzentrationen beschreiben.

- d) An den Kontakten bei $\pm d$ herrscht Gleichgewicht. Wie lauten die vier Randbedingungen für die Minoritätsladungsträgerkonzentrationen in Abhängigkeit von U (vgl. Abb. 2a) an den Orten $x = -d, -w_n, w_p, d$ (Formeln)?
- e) Lösen Sie die DGLs mit den Randbedingungen aus d) in Abhängigkeit von U und den Ansätzen

$$n_p = A \cdot \sinh\left(\frac{x - w_p}{L_n}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{d - x}{L_n}\right) + C \text{ und}$$

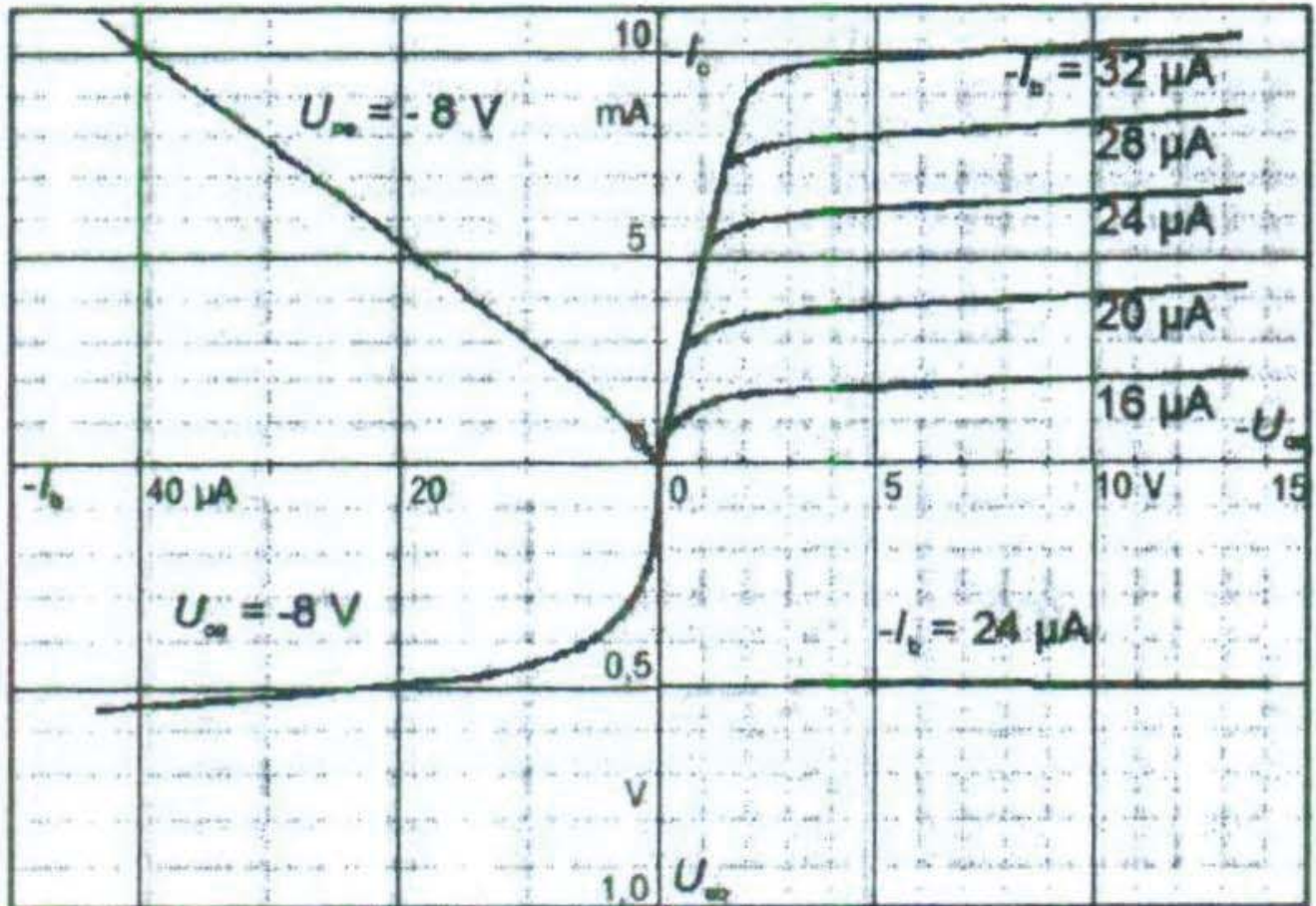
$$p_n = D \cdot \sinh\left(\frac{-d - x}{L_p}\right) + E \cdot \sinh\left(\frac{x + w_n}{L_p}\right) + F .$$

Hinweis: Bestimmen Sie zunächst die Konstanten C und F unter Zuhilfenahme des Aufgabenteils c).

- f) Berechnen Sie das Verhältnis von Elektronen- zu Löcherstromdichte über den n^+p -Übergang J_n / J_p unter Vernachlässigung von Generation und Rekombination in der Verarmungszone und einem Spannungsabfall über den Bahngebieten. Geben Sie das Verhältnis näherungsweise an für den Fall, dass $|d| \gg w_n, w_p$ ist (Formel und Wert). Diskutieren Sie kurz das Ergebnis.

3) Ein *pnp*-Transistor wird in Emitterschaltung betrieben und durch sein Vierquadranten-Kennlinienfeld (Abb. 3) spezifiziert.

- a) Tragen Sie den Arbeitspunkt ($U_{ce} = -8 \text{ V}$, $I_b = -24 \mu\text{A}$) in die Diagramme ein. Wie groß sind U_{ce} und I_c ? (Hinweis: Transistor-Strompfeile zeigen in das Bauelement hinein.)



- b) Das Kleinsignalverhalten des Transistors soll durch seine hybride Stromverstärker-Matrix für die Emitterschaltung

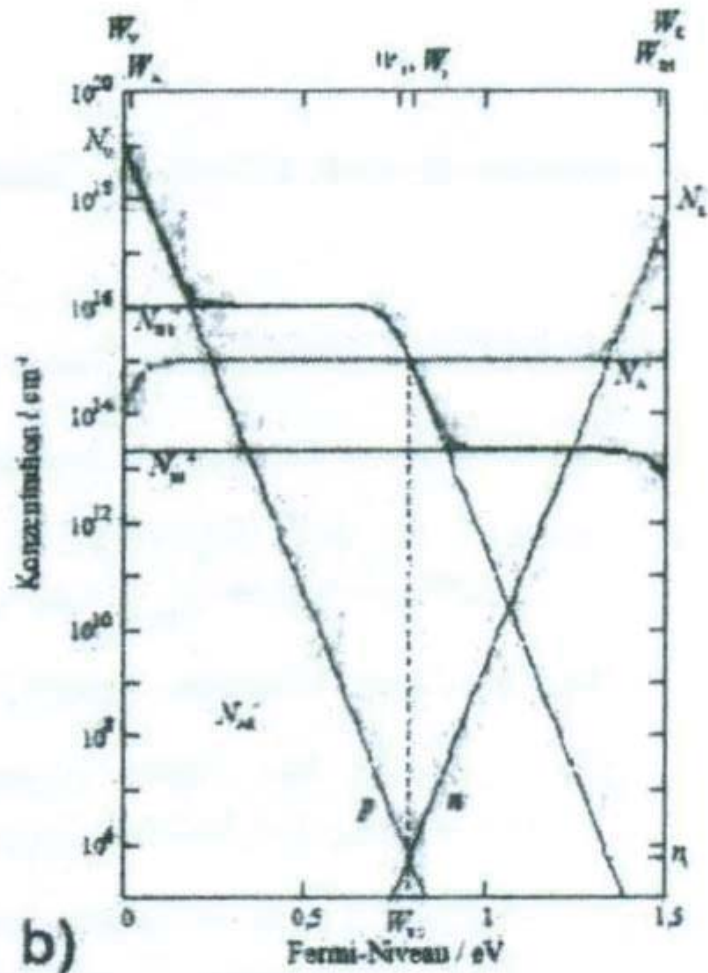
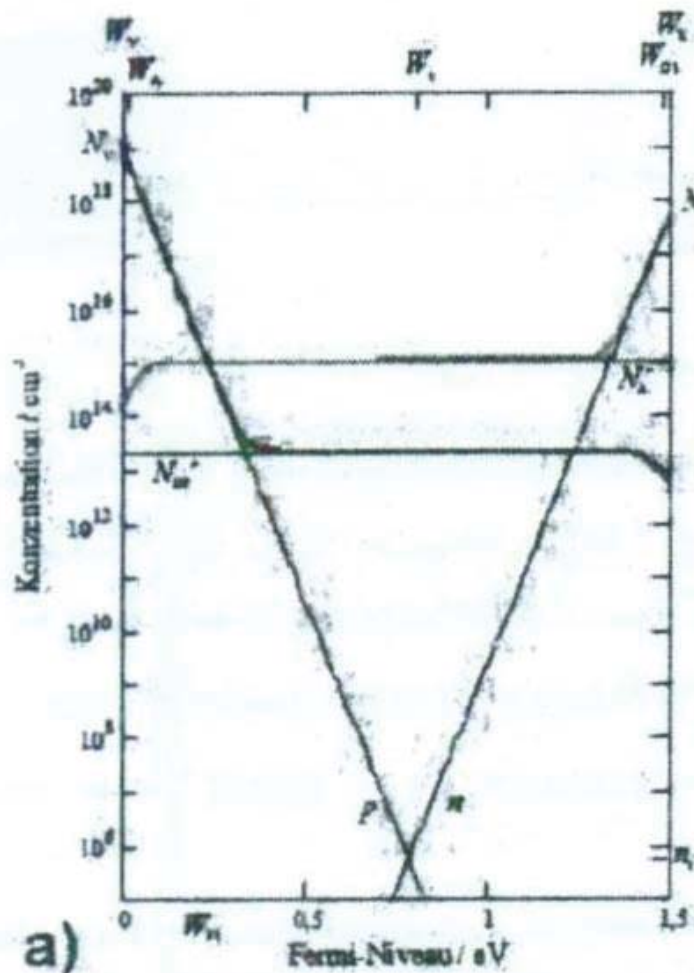
$$u_1 = h_{11e} i_1 + h_{12e} u_2 \quad \text{und} \quad i_2 = h_{21e} i_1 + h_{22e} u_2$$

beschrieben werden. Skizzieren Sie unter Verwendung der Matrix-Elemente das Vierpol-Ersatzschaltbild des Transistors, und beschriften Sie seine Anschlussklemmen mit *E* (Emitter), *B* (Basis) und *C* (Kollektor).

- c) Geben Sie die Zuordnung der Ströme und Spannungen ($u_{1,2}$ und $i_{1,2}$) zu den Größen der Kennlinienfelder an und bestimmen Sie Zahlenwerte für h_{11e} , h_{12e} , h_{21e} und h_{22e} aus den Kennlinienfeldern (Abb. 3).
- d) Rechnen Sie für die Emitterschaltung die *h*-Parameter in die *y*-Parameter der Leitwertmatrix um (Gleichungen und Werte). Geben Sie dazu zunächst die beiden Gleichungen der *y*-Matrix an und skizzieren Sie den zugehörigen Vierpol.

Lösung zu 1):

- a) $n_i(T) = [N_L(T) \cdot N_V(T)]^{1/2} \cdot \exp[-W_G/(2kT)] = 5,6 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$, $W_i = 0,79 \text{ eV}$ mit $W_G = W_L$ da $W_V = 0$.
- b) Shockley-Diagramm siehe unten (a). Ablesen der Werte an der Kreuzung der Summenkurven für positive und negative Ladungen: $W_{F1} = 0,24 \text{ eV}$; $p_1 = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$; $n_1 = n_i^2/p_1 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$.



- c) $N_{D2}^+(W_F = 1,25 \text{ eV}) = 2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$
- d) Damit folgt das Shockley-Diagramm oben (b) aus dem man ablesen kann: $W_{F2} = W_i = 0,79 \text{ eV}$; $n_2 = p_2 = n_i = 5,6 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$.
- e) Elektroneutralität heißt $n + N_A^- = p + N_D^+$.

Im Fall 1 ist $N_{D1} < N_A$. Folglich haben wir einen p -Halbleiter mit $p_1 = N_A^- = N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ \rightarrow $n_1 = n_i^2/p_1 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ und $W_F = -kT \cdot \ln(N_A/N_V) + W_V = 0,24 \text{ eV}$.

Im Fall 2 zeigt das Shockley-Diagramm, dass N_{D2}^+ und $N_A^- > N_{D1}^+$, n und p . Also folgt $N_{D2}^+ \approx N_A^- = N_A$ bzw. $W_{F2} - W_V \approx W_{D2} - W_L + W_G + kT \cdot \ln[(N_{D2}/N_A - 1)/2] = 0,789 \text{ eV} \approx W_i$ und $n_2 = p_2 = n_i = 5,6 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$. Durch den "tiefen" Donator wird der Akzeptor kompensiert und quasi Eigenleitung erreicht.

Lösung zu 2):

a) Siehe Abb.

b) Aus Abb. d) folgt $qU_D = (W_L - W_F)|_{w_p} - (W_L - W_F)|_{-w_n}$. Mit $n_{n0}(-w_n) = N_D = N_L \cdot \exp[(W_F - W_L)/kT]$ und $p_{p0}(w_p) = N_A = N_V \cdot \exp[(W_V - W_F)/kT]$ sowie $n_{p0}(w_p) = n_i^2/N_A$ folgt

$$U_D = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) = 0,76 \text{ V.}$$

c) Im stationären Zustand ($dp_n/dt = dn_p/dt = 0$) ergeben sich die gesuchten Differenzialgleichungen

$$0 = \frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{L_n^2} \quad \text{und} \quad 0 = \frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{L_p^2}.$$

d) $p_n(-d) = p_{n0} = n_i^2/N_D$, $n_p(d) = n_{p0} = n_i^2/N_A$ für Gleichgewicht und mit der Pfeilrichtung der Spannung gilt

$$p_n(-w_n) = p_{n0} \cdot e^{\frac{-qU}{kT}} \quad \text{und} \quad n_p(w_p) = n_{p0} \cdot e^{\frac{-qU}{kT}}.$$

e) Die Konstante C ergibt sich nach Einsetzen des Ansatzes in die DGL.

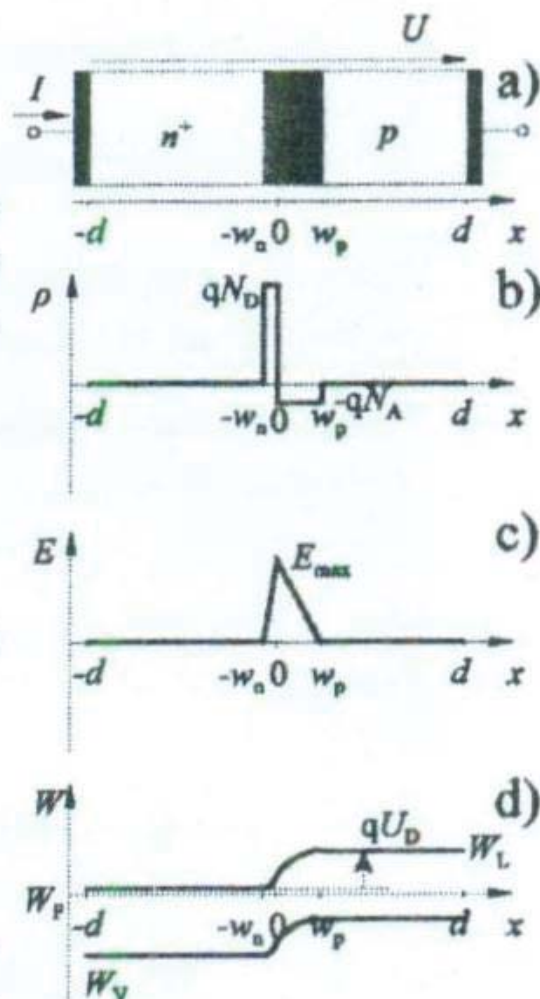
$$\frac{A}{L_n^2} \cdot \sinh\left(\frac{x-w_p}{L_n}\right) + \frac{B}{L_n^2} \cdot \sinh\left(\frac{d-x}{L_n}\right) - \frac{A \cdot \sinh\left(\frac{x-w_p}{L_n}\right) + B \cdot \sinh\left(\frac{d-x}{L_n}\right) + C - n_{p0}}{L_n^2} = 0$$

$$\rightarrow C = n_{p0}; \text{ analog folgt } F = p_{n0}.$$

Mit den Randbedingungen (aus d) folgen direkt die Konstanten A und B

$$x = d: n_p = n_{p0} = A \cdot \sinh\left(\frac{d-w_p}{L_n}\right) + B \cdot 0 + n_{p0} \rightarrow A = 0$$

$$x = w_p: n_p = n_{p0} \cdot e^{\frac{-qU}{kT}} = A \cdot 0 + B \cdot \sinh\left(\frac{d-w_p}{L_n}\right) + n_{p0} \rightarrow B = \frac{n_{p0} \left(e^{\frac{-qU}{kT}} - 1 \right)}{\sinh\left(\frac{d-w_p}{L_n}\right)}.$$



bzw. D und E

$$x = -d: p_n = p_{n0} = D \cdot 0 + E \cdot \sinh\left(\frac{-d+w_n}{L_p}\right) + p_{n0} \rightarrow E = 0$$

$$x = -w_n: p_n = p_{n0} \cdot e^{-\frac{qU}{kT}} = D \cdot \sinh\left(\frac{-d+w_n}{L_p}\right) + p_{n0} \rightarrow D = \frac{p_{n0} \left(e^{-\frac{qU}{kT}} - 1 \right)}{\sinh\left(\frac{-d+w_n}{L_p}\right)}$$

und daraus

$$n_p - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{-\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{d-x}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{d-w_p}{L_n}\right)} \quad \text{bzw.} \quad p_n - p_{n0} = p_{n0} \left(e^{-\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \frac{\sinh\left(\frac{-d-x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{-d+w_n}{L_p}\right)}$$

- f) Wegen der feldfreien Bahngebiete und der vernachlässigbaren Generation/Rekombination in der Verarmungszone folgt

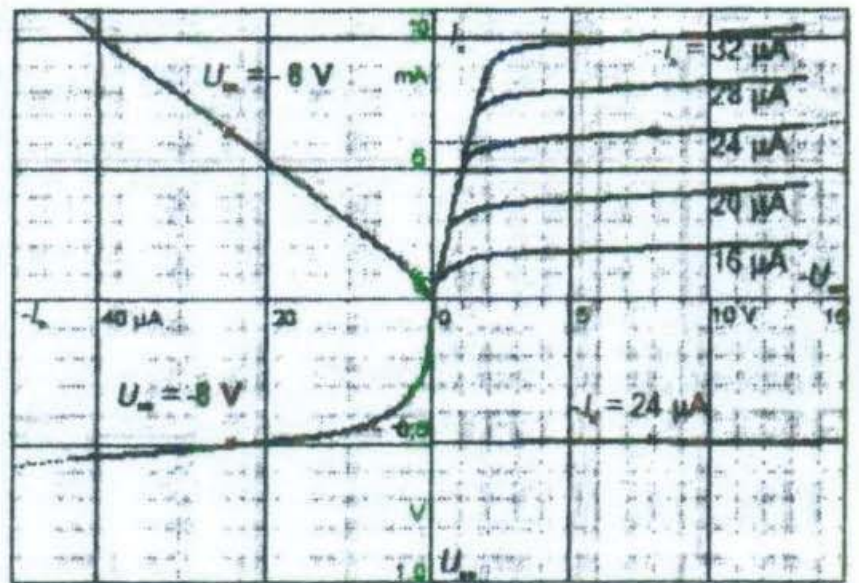
$$J_n = q D_n \frac{dn_p}{dx} \Big|_{x=-w_p} = \frac{q D_n n_{p0} \left(e^{-\frac{qU}{kT}} - 1 \right)}{-L_n \cdot \tanh\left(\frac{d-w_p}{L_n}\right)} \quad \text{und}$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp_n}{dx} \Big|_{x=-w_n} = -\frac{q D_p p_{n0} \left(e^{-\frac{qU}{kT}} - 1 \right)}{-L_p \cdot \tanh\left(\frac{-d+w_n}{L_p}\right)}$$

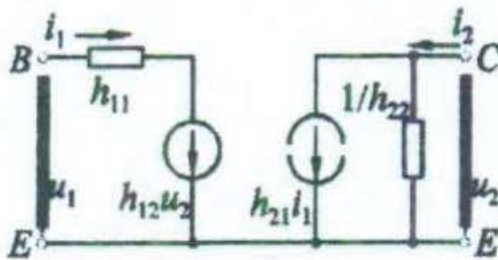
Für den gesuchten Quotienten ergibt sich näherungsweise (bei Vernachlässigung der schmalen Verarmungszonen) $J_n/J_p = n_{p0}/p_{n0} = N_D/N_A = 600$. Die hoch dotierte Seite dominiert also den Strom – in diesem Falle die Elektronen.

Lösung zu 3:

- a) Mit den gegebenen Daten lässt sich der **Arbeitspunkt** in alle vier Kennlinien eintragen (siehe rechts). Man kann ablesen, dass $U_{ce} = 0,5 \text{ V}$ und $I_c = -6,3 \text{ mA}$ sind.



- b) Das Ersatzschaltbild folgt direkt aus den gegebenen Gleichungen (siehe unten).



- c) Damit ergeben sich folgende Zuordnungen: $u_1 = -u_{cb}$, $i_1 = i_b$, $u_2 = u_{ce}$ und $i_2 = i_c$.

Aus den Steigungen im Arbeitspunkt folgen die h -Parameter:

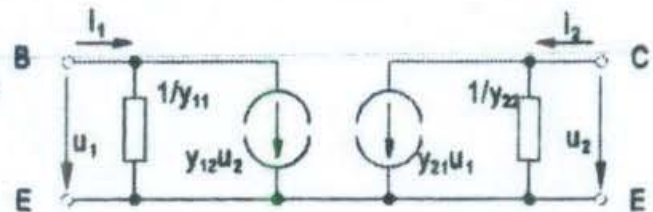
$$h_{11e} = - \left. \frac{\partial U_{cb}}{\partial I_b} \right|_{U_{ce}} = \frac{0,15 \text{ V}}{50 \mu\text{A}} = 3 \text{ k}\Omega, \quad h_{12e} = - \left. \frac{\partial U_{cb}}{\partial U_{ce}} \right|_{I_b} = 0,$$

$$h_{21e} = \left. \frac{\partial I_c}{\partial I_b} \right|_{U_{ce}} = \frac{9,3 \text{ mA}}{44 \mu\text{A}} = 211, \quad h_{22e} = \left. \frac{\partial I_o}{\partial U_{ce}} \right|_{I_b} = \frac{0,9 \text{ mA}}{15 \text{ V}} = 60 \mu\text{S}.$$

- d) Die y -Parameter mit Schaltung sehen so aus:

$$i_1 = y_{11e} u_1 + y_{12e} u_2$$

$$i_2 = y_{21e} u_1 + y_{22e} u_2.$$



Umstellen der h -Parameter-Gleichungen liefert

$$i_1 = \frac{1}{h_{11e}} u_1 - \frac{h_{12e}}{h_{11e}} u_2$$

$$i_2 = h_{21e} \left(\frac{1}{h_{11e}} u_1 - \frac{h_{12e}}{h_{11e}} u_2 \right) + h_{22e} u_2 = \frac{h_{21e}}{h_{11e}} u_1 + \frac{h_{22e} h_{11e} - h_{12e} h_{21e}}{h_{11e}} u_2.$$

Ein Koeffizientenvergleich liefert direkt:

$$y_{11e} = \frac{1}{h_{11e}} = 333 \mu\text{S}; \quad y_{12e} = - \frac{h_{12e}}{h_{11e}} = 0;$$

$$y_{21e} = \frac{h_{21e}}{h_{11e}} = 70 \text{ mS}; \quad y_{22e} = \frac{h_{22e} h_{11e} - h_{12e} h_{21e}}{h_{11e}} = 60 \mu\text{S}.$$