

Die folgenden Aufgaben entstammen ursprünglich den Musterklausuren, die vom HLB-Team zur Verfügung gestellt werden. Ich habe die Aufgaben zur besseren Darstellung teilweise etwas abgewandelt. Diese Aufgaben wurden ausgewählt, weil sie besonders häufig in den 6 Musterklausuren vorkommen, oder besonders einfach zu lösen sind. Wohlgedemerkte erhebe ich **keinen Anspruch auf Vollständigkeit**. Die schwierigeren Aufgaben habe ich bewusst ausgelassen. Außerdem kann ich **nicht für die Korrektheit der Lösungen garantieren**. Auch kann ich nicht garantieren, dass der Stoff zum Bestehen der Klausur ausreichend ist. Ich habe dieses Blatt im Zuge meiner eigenen Klausurvorbereitung erstellt.

Die Aufgaben sind in die 3 Teilbereiche

1. Halbleiterphysik
2. pn-Übergang
3. Bauteile

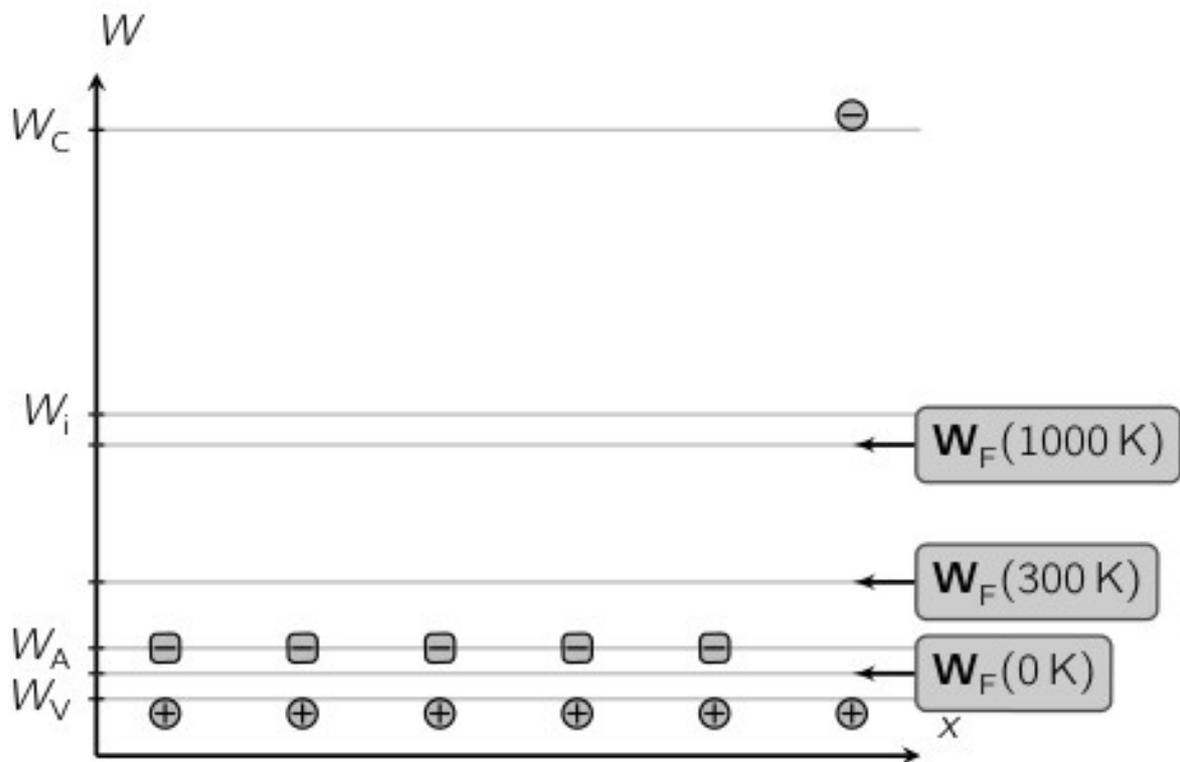
unterteilt.

Die Lösungen sind größtenteils den Übungsfolien entnommen.

Aufgabenbereich 1: Halbleiterphysik

1.)

Skizzieren Sie (ausreichend groß) das Bändermodell eines p-Halbleiters. Zeichnen Sie das Störstellenniveau (ca. 100meV oberhalb W_V), das intrinsische Fermienergie und das Fermienergie bei Raumtemperatur, sowie die Ladungszustände (beweglich / ortsfest) ein! Markieren Sie in dieser Skizze die Positionen der Fermienergie für a) $T \approx 0K$ und b) $T > 1000K$! (großzügige Skizze)



Hinweis: evtl. noch den Abstand $W_A - W_V = 100 \text{ meV}$ verdeutlichen, und dass die runden Ladungsträger beweglich, die eckigen unbeweglich sind.

2.)

Abbildung 1.1 zeigt den Verlauf der Leitfähigkeit über der reziproken Temperatur ($1/T$) eines dotierten HL. Benennen Sie die unterschiedlichen Bereiche. Wie verhält sich die Anzahl der freien Ladungsträger im mittleren (grau unterlegten) Temperaturbereich und worauf basiert die leichte Absenkung der Leitfähigkeit in diesem Bereich?

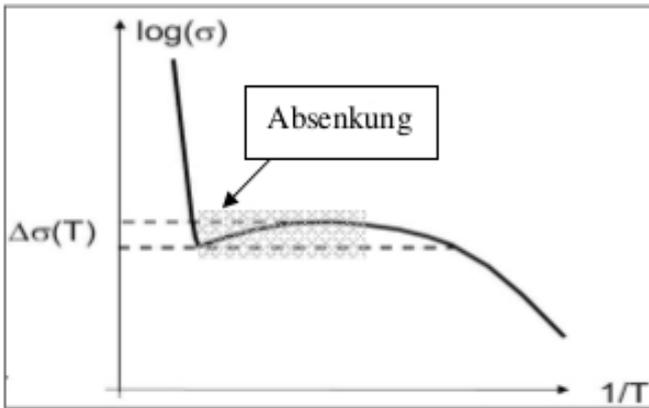
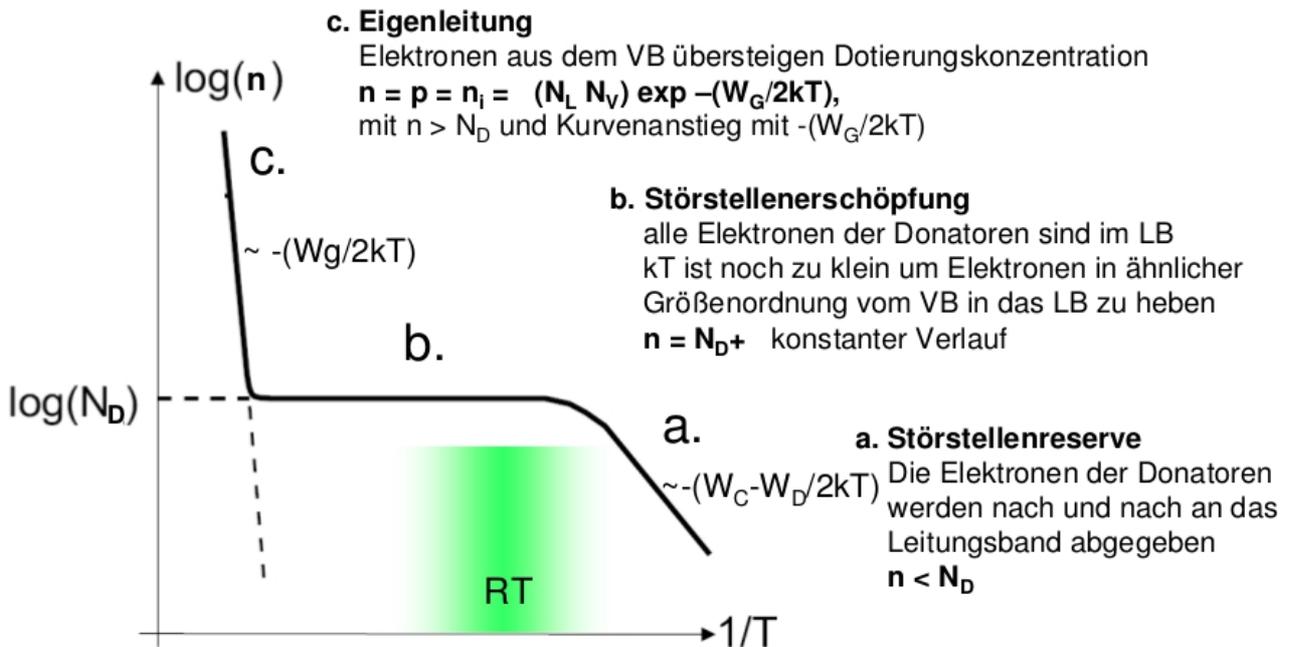


Abb. 1.1) Leitfähigkeit über reziproker Temp.

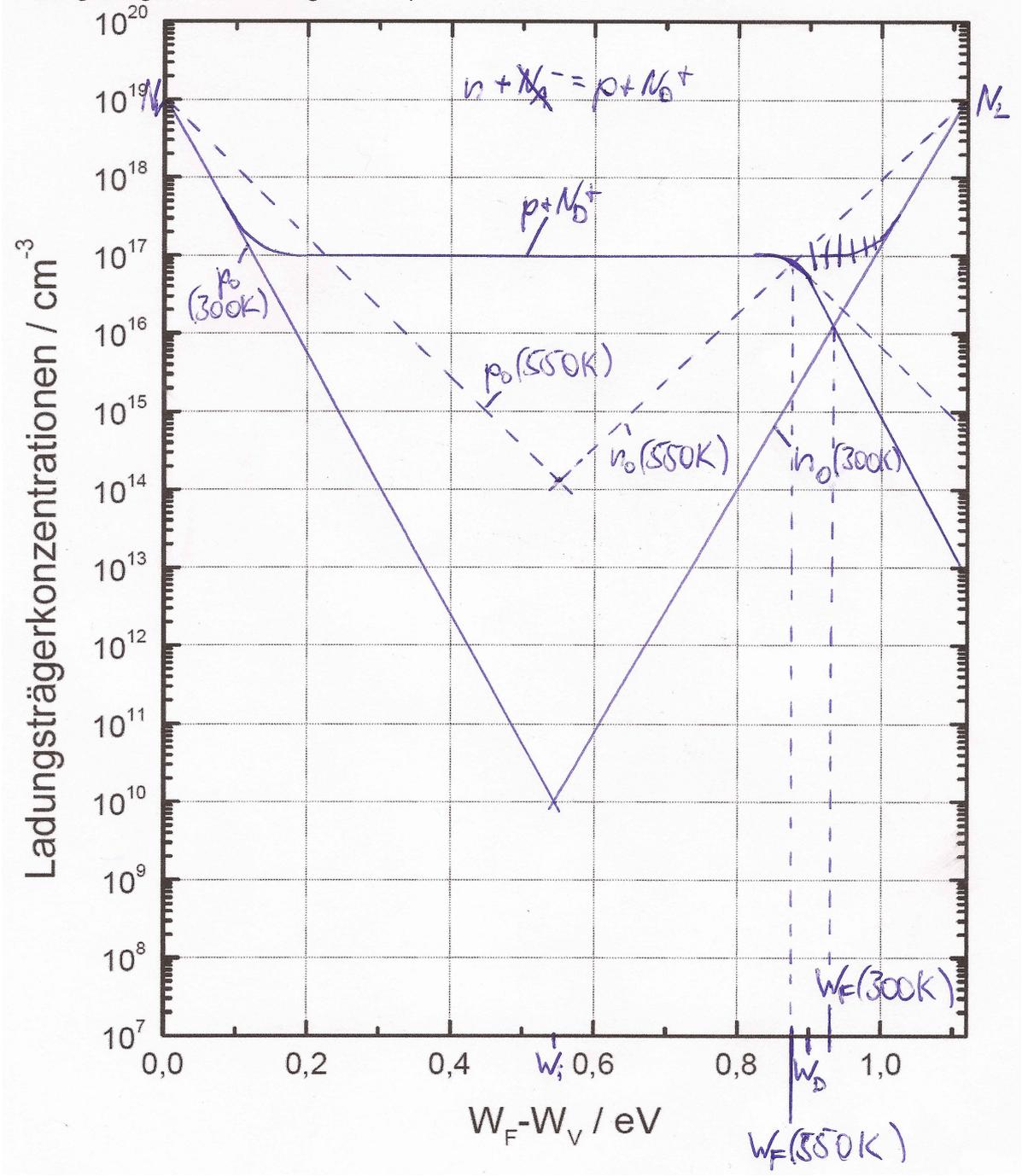


Die Absenkung der Leitfähigkeit resultiert aus den mit zunehmender Temperatur zunehmenden Gitterschwingungen innerhalb des Halbleiterkristalls. So kommt es vermehrt zu Stößen der Ladungsträger mit dem Gitter und die Beweglichkeit der Ladungsträger nimmt ab. Die Anzahl der Ladungsträger bleibt in diesem Bereich (relativ) konstant (wie man der unteren Abbildung entnehmen kann).

3.)

a) Bestimmen Sie grafisch die Fermi-Energie eines n-dotierten Halbleiters bei Raumtemperatur ($T = 300\text{K}$). Die Donatorkonzentration beträgt $N_D = 10^{17}\text{cm}^{-3}$. Hinweise: N_L & $N_V = 1 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}$; $n_i(T = 300\text{K}) = 1 \cdot 10^{10}\text{cm}^{-3}$; W_F liegt bei Eigenleitung etwa in der Mitte der Bandlücke. Das Energieniveau W_D der Donatoren liegt $0,9\text{ eV}$ oberhalb der Valenzbandenergie.

b) Jetzt wird derselbe Halbleiter (aus Aufgabe a) auf $T = 550\text{K}$ erhitzt. Hierbei steigt die intrinsische Ladungsträgerkonzentration n_i auf $1,3 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}$ an. Bestimmen Sie für diese Temperatur ebenfalls grafisch das Fermi-niveau.



Hinweis: Die Neutralitätsbedingung im HL lautet $n + N_A^- = p + N_D^+$. Da hier keine Akzeptoren eingebracht wurden, fliegen die aus der Gleichung raus. Der Anstieg der Geraden n_0 , p_0 beträgt $\pm 1/kT$ und wird durch Parallelverschiebung auf den rechten Teil der Gerade $p + N_D^+$ übertragen. An der Stelle W_D ist die Ladungsträgerkonzentration $N_D/2$. Das ergibt sich aus der Formel $N_D^+(W) = N_D \cdot 1/(1 + \exp((W - W_F)/kT))$

4.)

Geben Sie die vollständigen Stromgleichungen und die Bilanzgleichungen für beide Ladungsträgertypen an!

$$\begin{aligned} \vec{J}_n &= e \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + e \cdot D_n \cdot \text{grad}(n) & \frac{\partial n}{\partial t} &= + \frac{1}{e} \cdot \text{div } \vec{j}_n - (r - g) \\ \vec{J}_p &= e \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} - e \cdot D_p \cdot \text{grad}(p) & \frac{\partial p}{\partial t} &= - \frac{1}{e} \cdot \text{div } \vec{j}_p - (r - g) \end{aligned}$$

5.)

Die Minoritätsträgerkonzentration in einem p-leitenden Halbleiter beträgt $n_p = 10^5 \text{ cm}^{-3}$. Wie groß ist die Majoritätsträgerkonzentration p_p ? Geben Sie die zugehörige Bestimmungsgleichung an. (Rechnung, Formel, Hinweis: $T = 300\text{K}$)

$$n_i^2 = n_p \cdot p_p \Rightarrow p_p = n_i^2 / n_p = 10^{20} \text{ cm}^{-6} / 10^5 \text{ cm}^{-3} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

6.)

Welche Voraussetzung muss für W_F erfüllt sein, damit die Fermiverteilungsfunktion $f_F(W)$ durch die Boltzmannverteilung $f_B(W)$ angenähert werden darf?

$$\Delta W = |W - W_F| \geq 2kT$$

7.)

Wie lautet die Definitionsgleichung zur Bestimmung der Elektronen- und Löcherkonzentrationen (jeweils einfache Formel und den zu betrachtenden Energiebereich angeben)?

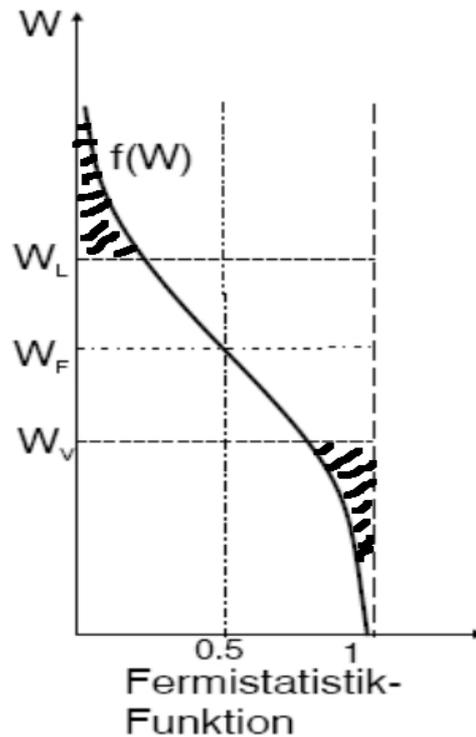
$$n = N_L \cdot \exp(-(W_L - W_F) / kT) \quad p = N_V \cdot \exp(-(W_F - W_V) / kT)$$

Die Formeln gelten, wenn die Boltzmannverteilung an Stelle der Fermiverteilung verwendet werden kann. Das heißt der zu betrachtende Energiebereich ist

$$W_L - W_F \geq 2kT \quad \text{bzw.} \quad W_F - W_V \geq 2kT$$

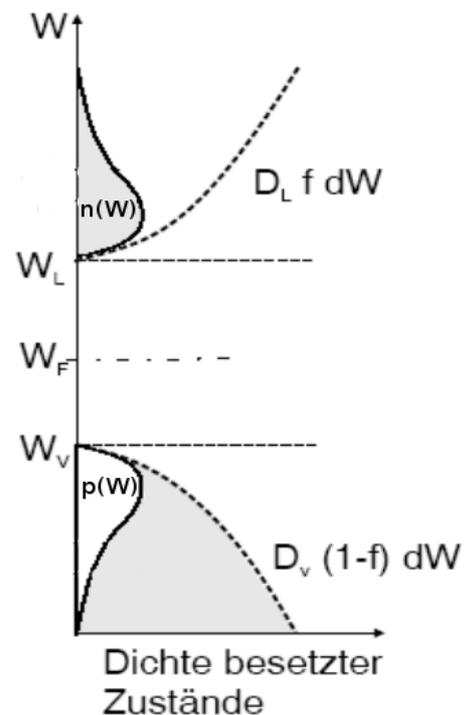
8.) Wie ist $f_F(W)$ definiert? Zeichnen Sie die Verteilungskurve für $T \gg 0$ K und schraffieren Sie die Bereiche in denen die Statistik für Elektronen und Löcher gilt.

$$f_F(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)}$$



9.) Zeichnen Sie die aus den Zustandsdichten und der Fermiverteilungsfunktion resultierenden Verläufe der Funktionen $n(W)$ und $p(W)$.

Hinweis: Im unteren Bereich ist die „Nase“ die Löcherdichte und der graue Bereich die Dichte der besetzten Zustände. Die Löcher sind natürlich die unbesetzten Zustände, also darauf achten wonach gefragt wird.



Aufgabenbereich 2: pn-Übergang

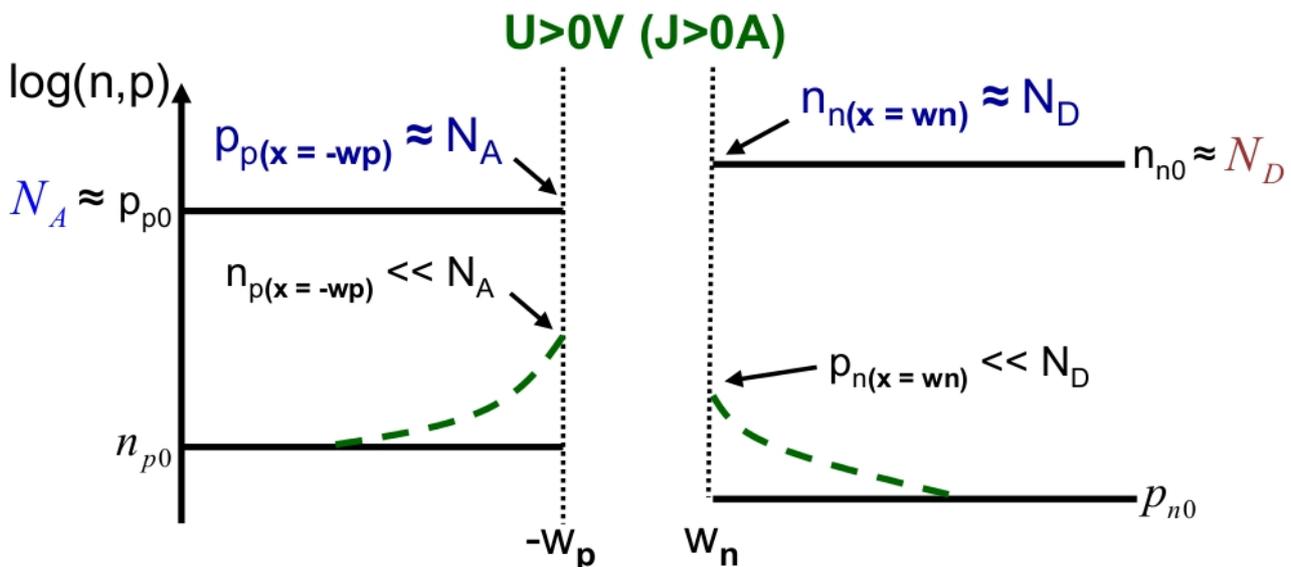
1.)

Wie lauten die Shockley'schen Voraussetzungen zur Bestimmung der Kennliniengleichung eines pn-Übergangs? (Stichpunkte)

1. Kein Spannungsabfall über den Bahngebieten
 - das Bahngebiet wird als optimal leitend angenommen
 - die gesamte angelegte Spannung fällt nur über der RLZ ab
 - Bei großen Strömen (in Vorwärtsrichtung) führt diese Vereinfachung zu Fehlern
2. Schwache Injektion
 - die angehobenen Minoritätskonzentrationen bleiben deutlich unterhalb der Majoritätskonzentrationen
 - so bleiben $p(x = -w_p) \approx N_A$ und $n(x = w_n) \approx N_D$ gültig (Fehler siehe 1.)
3. Keine Rekombination innerhalb der RLZ
 - Alle Ladungsträger die sich als Majoritätsträger in die RLZ bewegen kommen als Minoritätsträger auf der Gegenseite an

2.)

Zeichnen Sie den Verlauf der logarithmischen Ladungsträgerkonzentrationen einer n⁺p-Diode ($N_A \ll N_D$) außerhalb der RLZ im Gleichgewichtsfall ($U = 0V$) und benennen Sie alle relevanten Größen (w_n, w_p, p_{p0}, n_{p0} , usw.). (Skizze)



a) Wie ändern sich die Minoritätsträgerkonzentrationen an den Grenzen der RLZ mit dem Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung?

Siehe oben, gestrichelter Bereich

a) Wie lauten die Stromgleichungen der Minoritätsträger am RLZ-Rand? (Formel)

„Alle Ladungsträger die als Feldstrom am RLZ-Rand ankommen durchqueren die RLZ und bilden dann unvermindert den Diffusionsstrom auf der Gegenseite.“

$$J_n = e \cdot D_n \cdot \text{grad}(n(-w_p)) \quad J_p = -e \cdot D_p \cdot \text{grad}(p(w_n))$$

b) Wie kann der Gesamtstrom über dem pn-Übergang ermittelt werden? (Formel)

$$J_{\text{ges}} = J_n(-w_p) + J_p(w_n) = \text{Summe der Minoritätsdiffusionsströme}$$

2.)

Wie ist in Bezug auf die Stromanteile aus Aufgabe 1 der Emitterwirkungsgrad und der Transportfaktor definiert? (Formel)

$$\gamma = \frac{|I_{EB}|}{|I_E|} = \frac{|I_E - I_{BE}|}{|I_E|} = 1 - \text{konst} \cdot \frac{N_B}{N_E} \Rightarrow N_E \gg N_B$$

N_E : Dotierstoffkonzentration im Emitter

N_B : Dotierstoffkonzentration in der Basis

$$\alpha_T = \frac{|I_E| - |I_{BB}|}{|I_E|} \approx 1 - \frac{w_B^2}{2L_{pB}^2} \Rightarrow L_{pB} \gg w_B$$

L_{pB} : Diffusionslänge der Minoritäten in der Basis

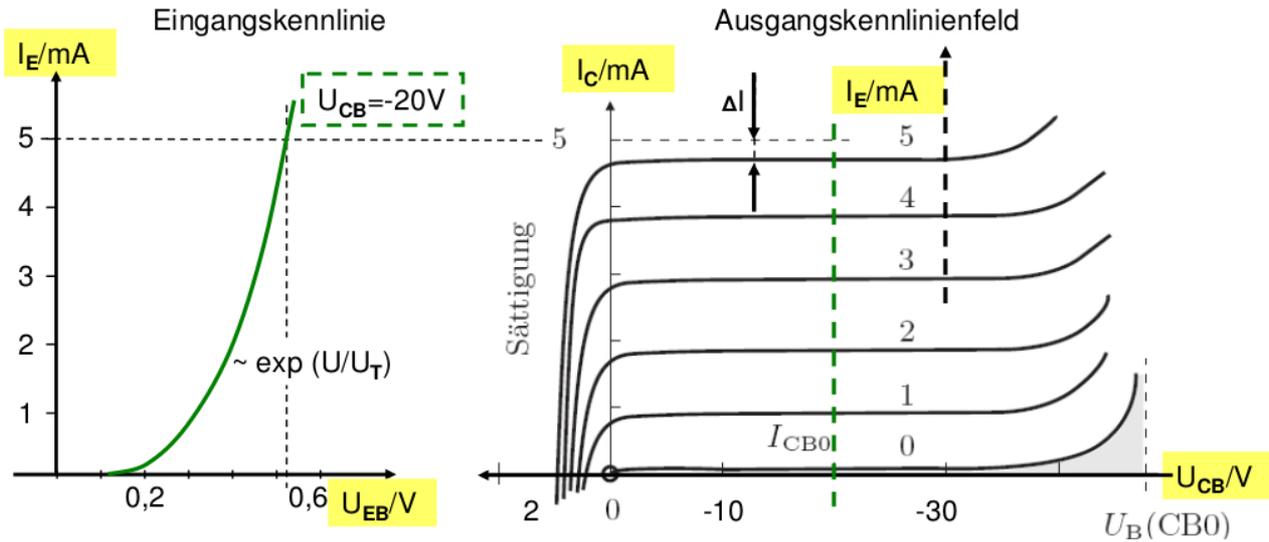
w_B : Basisweite

3.)

Geben Sie den formalen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsstrom eines Bipolartransistors in Basisschaltung an. Zeichnen Sie das Eingangs- und Ausgangskennlinienfeld des npn-Transistors in Basisschaltung. (Formeln, Diagramm)

formaler Zusammenhang: $I_C = \alpha \cdot I_E + I_{CB0}$

$\alpha = \gamma \cdot \alpha_T$

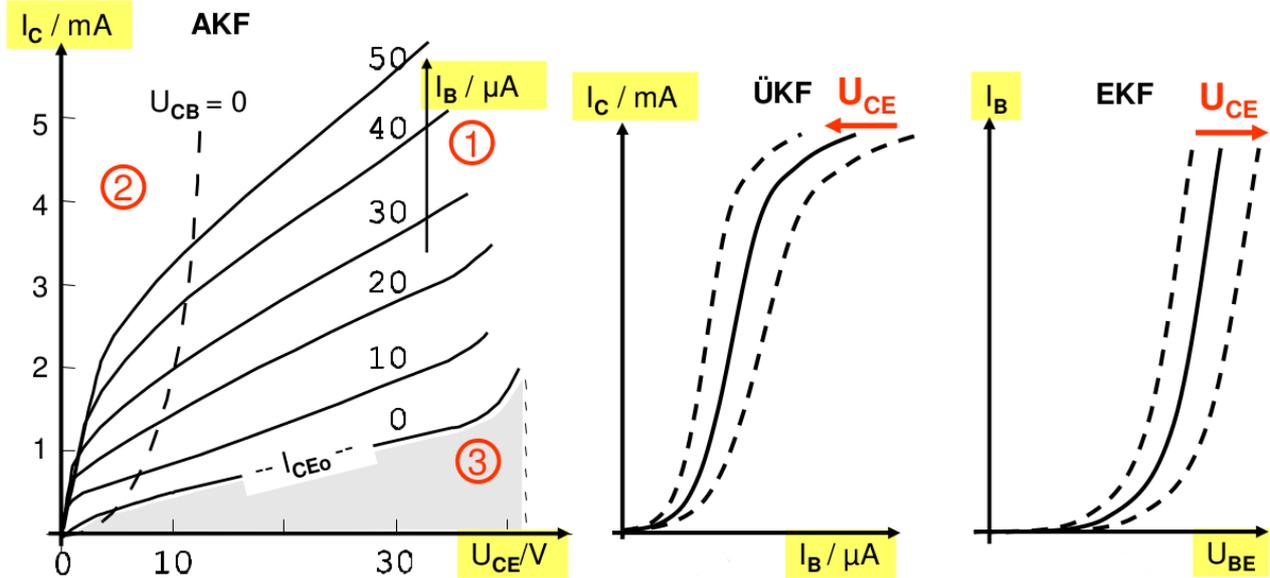


4.)

Geben Sie den formalen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsstrom eines npn-Transistors in Emitterschaltung an und zeichnen Sie dessen Eingangs- und Ausgangskennlinienfeld (AKF). Markieren und benennen Sie im AKF die drei verschiedenen Bereiche. (Formeln, Diagramm)

$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta)I_{CBO}$$

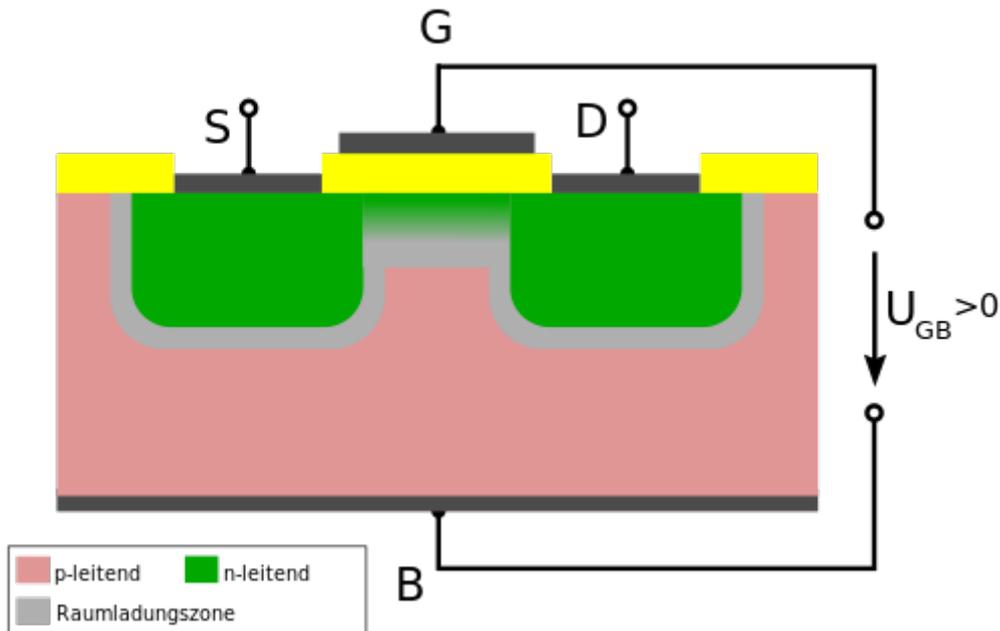
$$\beta = \alpha / (1 - \alpha) \gg 1$$



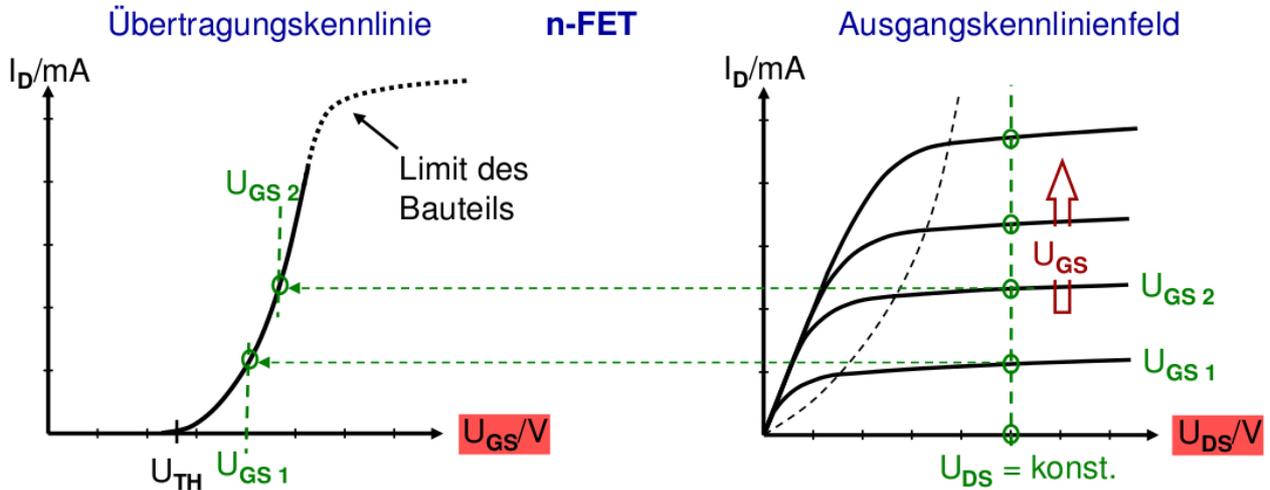
- 1 - aktiver Bereich; EB offen, BC geschlossen
- 2 - Sättigungsbereich; EB offen, BC offen
- 3 - Sperrbereich; EB, BC geschlossen

5.)

Skizzieren Sie den Querschnitt eines n-Kanal-MOSFETs und beschalten Sie den Transistor so, dass sich ein Kanal ausbilden kann. Benennen Sie alle relevanten Bauteilparameter (Dotierungsarten, Gate, Schichten, usw.) und zeichnen Sie den Kanal in die Skizze ein! (Skizze)



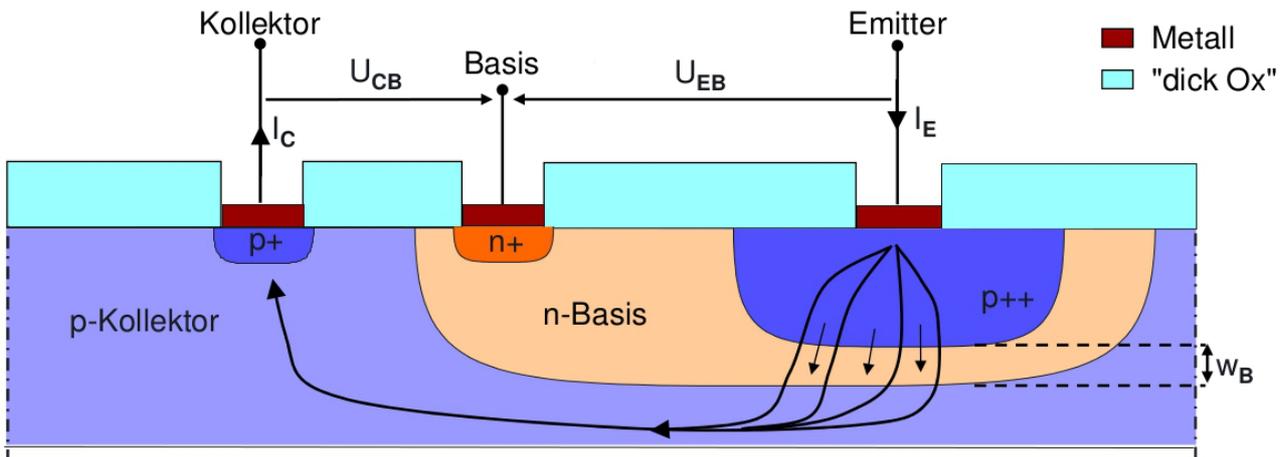
6.)
 Skizzieren Sie das Ausgangs-, und Übertragungskennlinienfeld eines MOSFETs in Source-Schaltung. Kennzeichnen und benennen Sie im Ausgangskennlinienfeld die drei unterschiedlichen Bereiche (Sperr-, parabolischer und Sättigungsbereich)! Durch welche Bedingungen werden diese Bereiche definiert? (Skizze und Stichpunkte)



Hinweis: die gestrichelte Parabel im rechten Bild ist die Spannung $U_{GS} - U_{TH}$

Sättigung: $U_{DS} > U_{GS} - U_{TH}$
 parabolisch: $U_{DS} < U_{GS} - U_{TH}$
 Sperrbereich: $U_{GS} < U_{TH}$

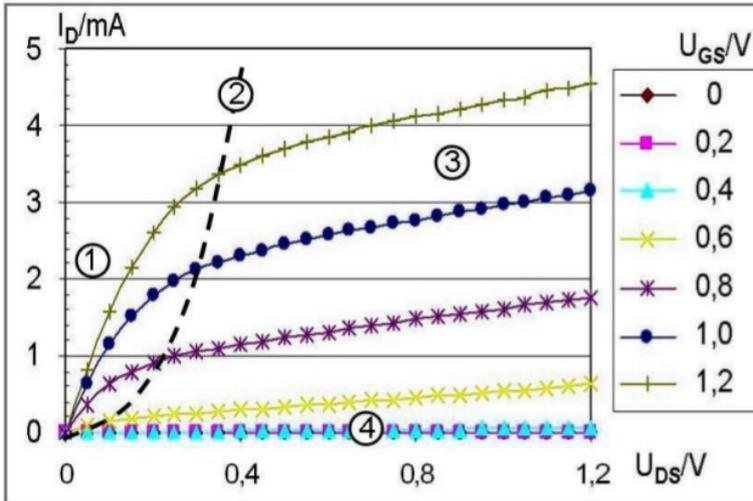
7.)
 Skizzieren Sie den Aufbau eines in Planartechnologie hergestellten bipolaren pnp-Transistors. Benennen Sie die einzelnen Kontakte, die Dotierstofftypen (p^{++} , n^+ , usw) und markieren Sie die wichtigste geometrische Größe dieser Anordnung.



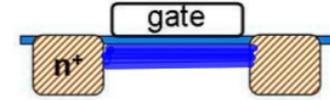
8.)

Abbildung 4 zeigt das AKF eines n-MOSFET in Sourceschaltung. Benennen Sie die mit 1 bis 4 gekennzeichneten Bereiche und zeichnen Sie in die vorbereiteten Gate-Strukturen die qualitativen Verläufe der Inversionskanäle ein.

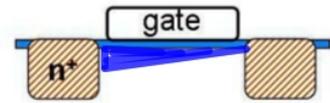
Abbildung 4



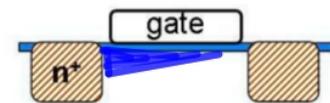
linearer oder
① parabolischer Bereich



② Pinch-Off



③ Sättigung



④ Sperrbereich

