

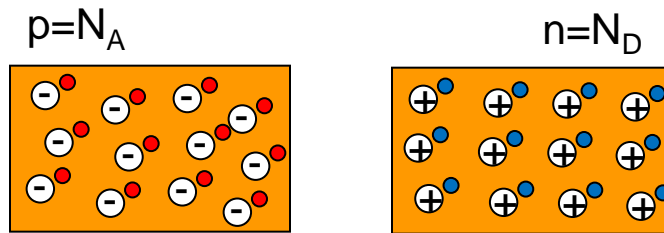
4 pn Übergänge

Einführung

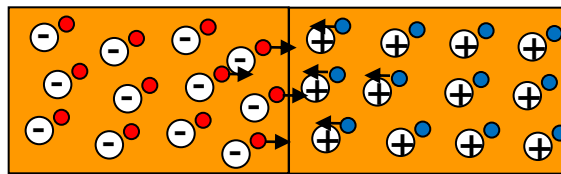
- pn-Übergang ist Grundlage für viele elektronische und optoelektronische Bauelemente
- Verbindung von p- mit n-leitendem Material
 - Idealfall: abrupter Übergang
 - Praxis: Übergang in weniger als 2 bis 3 Atomlagen
- Gitterfehlانpassung von $> 0,1$ % bilden Defektstellen (Störstellen) an Grenzfläche aus
- „gleichrichtender“ Übergang
- Homo- vs. Heterostrukturen

Entstehung eines pn-Übergangs (schematisch)

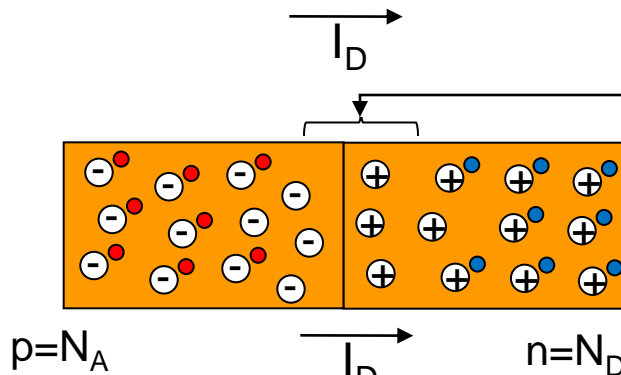
Annahme: Änderung der Dotierung durch Sprungfunktion darstellbar



- \oplus Donator
- \ominus Akzeptor



I_D : Diffusionsstrom



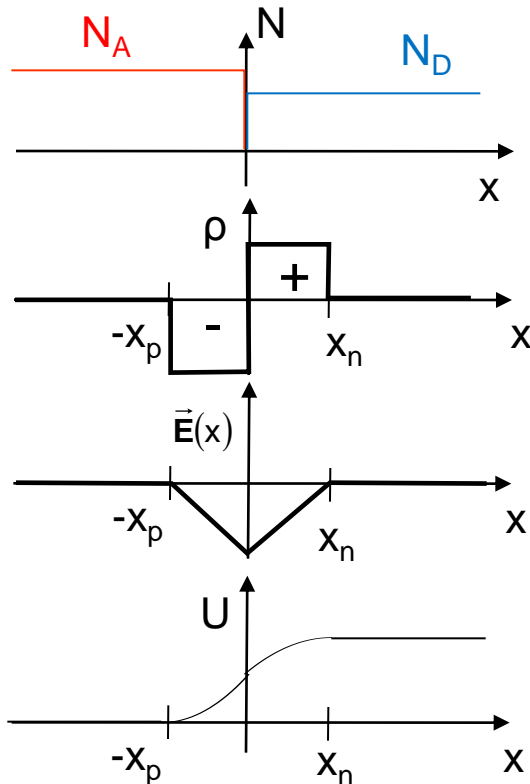
Sperrschicht, Verarmungszone
(hochohmig), $n=p=n_i$

I_E : Driftstrom
(Driftstromdichte = Diffusionsstromdichte)

U_D : Potentialunterschied,
„Diffusionsspannung“

Sperrschichtaufbau Bändermodell des pn-Übergangs

im Gleichgewicht



Dotierungsprofil

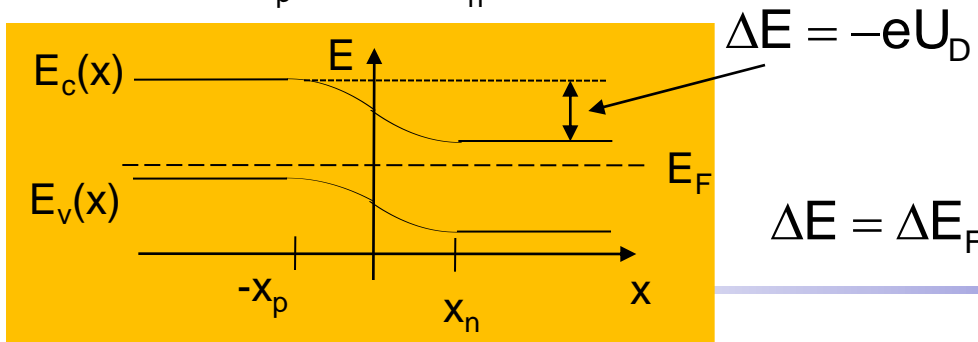
Raumladungsdichte $\rho(x)$

Elektrische Feldstärke

$$\rho(x) = \text{div} \mathbf{D} \Rightarrow \vec{\mathbf{E}}(x) = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \int \rho(x) dx$$

Potentialverlauf

$$U(x) = -\int \vec{\mathbf{E}}(x) dx \Rightarrow U(x) = f(x)^2$$



Bandverlauf (Energie)

$$E(x) = -eU(x)$$

Breite der Sperrschicht

Diffusionsspannung

Diffusionsspannung...
(2maliges Integrieren der
Raumladung nach dem Ort)

$$U_D = \frac{e}{2\epsilon_r\epsilon_0} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2)$$

... wird aus den Ladungsträgerdichten $n(x)$ $p(x)$ berechnet:

$$U_D = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$

Breite der Sperrschicht

$$N_A x_p \stackrel{!}{=} N_D x_n \longleftarrow \text{Neutralität zwischen p- und n-Raumladungsgebieten}$$

$$b = x_p + x_n$$

$$b = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0}{e}} \sqrt{\frac{N_D + N_A}{N_D N_A}} \sqrt{U_D}$$

Beispiele

symmetrische Siliziumdiode ($N_A=N_D=10^{15}\text{cm}^{-3}$)
bei Raumtemperatur

1. Diffusionsspannung

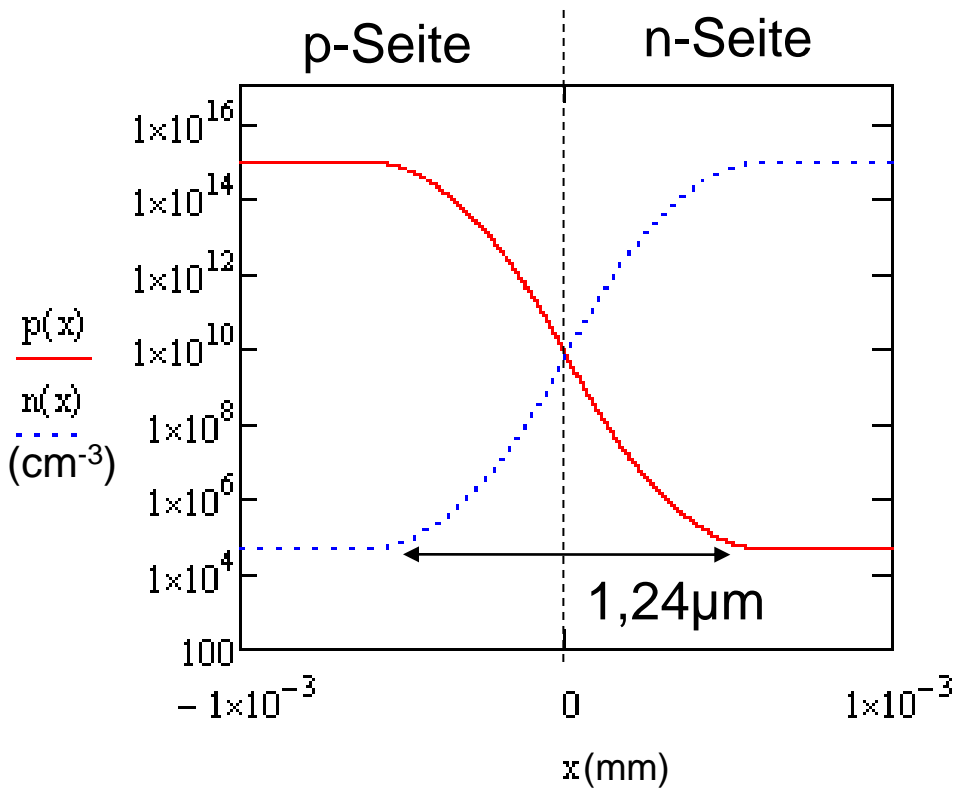
$$U_D = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) = 0,026\text{V} \cdot \ln\frac{10^{30}}{(7 \cdot 10^9)^2} = 0,61\text{V}$$

2. Sperrschichtbreite

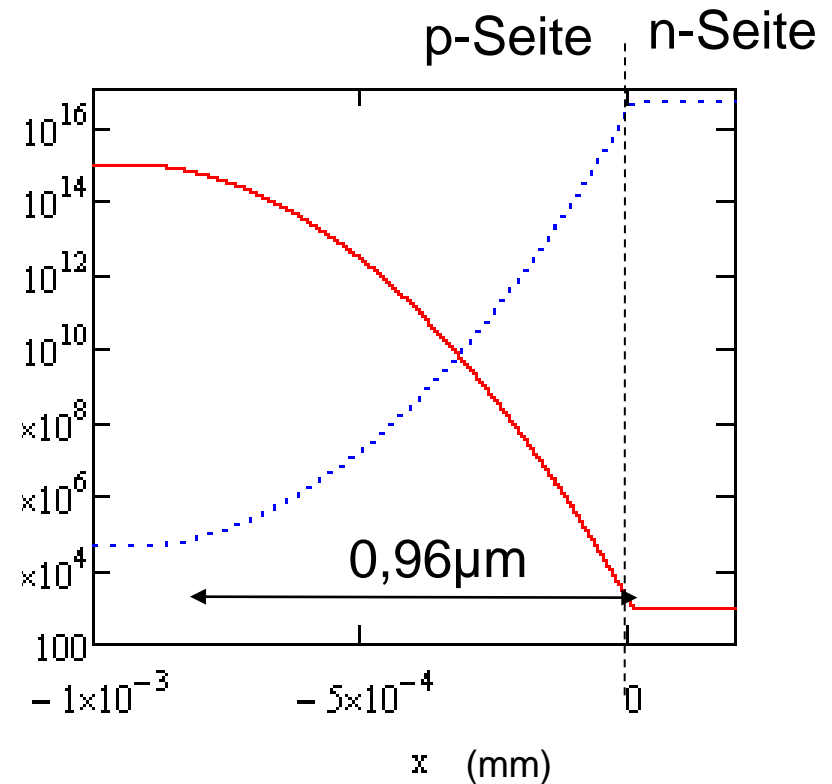
$$b = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0}{e}} \sqrt{\frac{N_D + N_A}{N_D N_A}} \sqrt{U_D} = 1,24\mu\text{m}$$

Ladungsträgerverteilung am Übergang in Abhängigkeit der Dotierung

Si ($N_A = N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$)



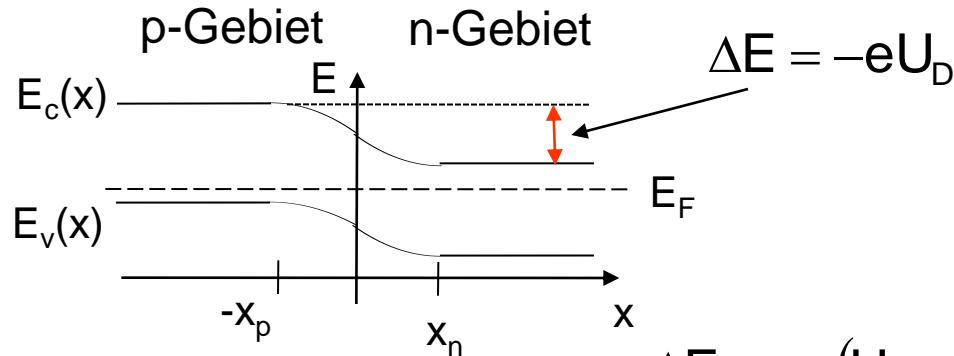
Si ($N_A = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ $N_D = 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)



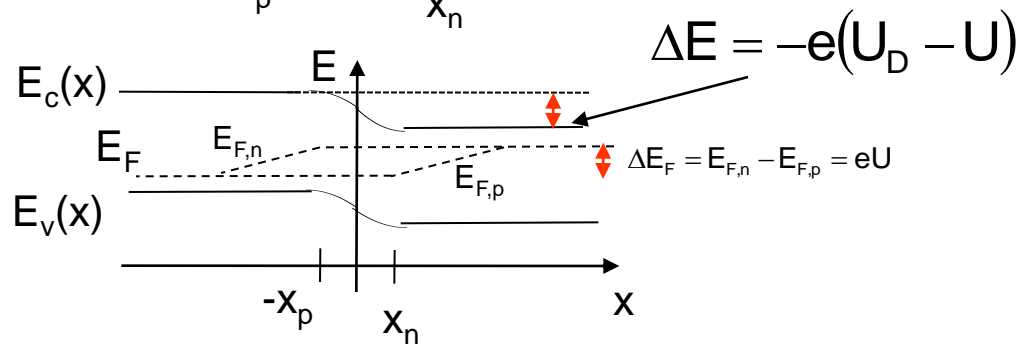
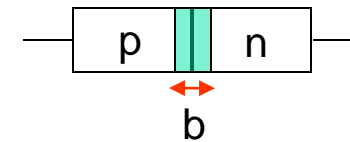
Sperrschicht: symmetrisch, $b = 1,24 \mu\text{m}$

asymmetrisch, $b = 0,96 \mu\text{m}$

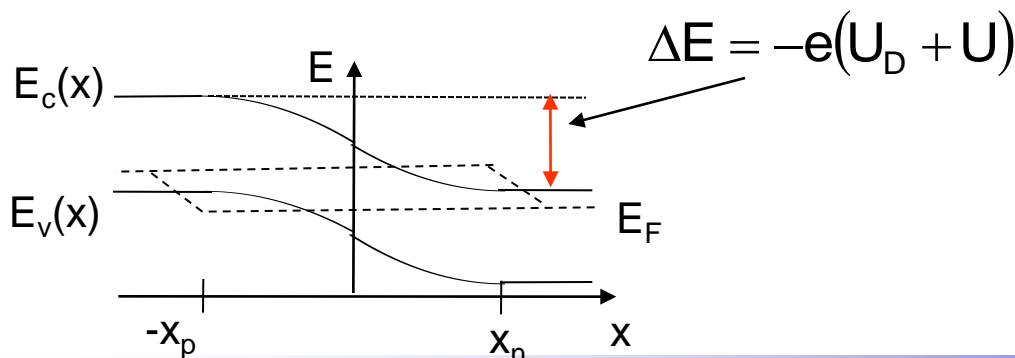
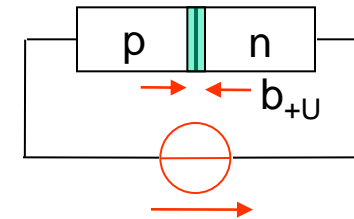
pn-Übergang mit äußerer Spannung



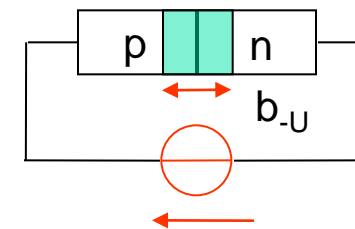
ohne äußere Spannung U



mit äußerer Spannung $+U$
(Durchlass- od. Flussrichtung)

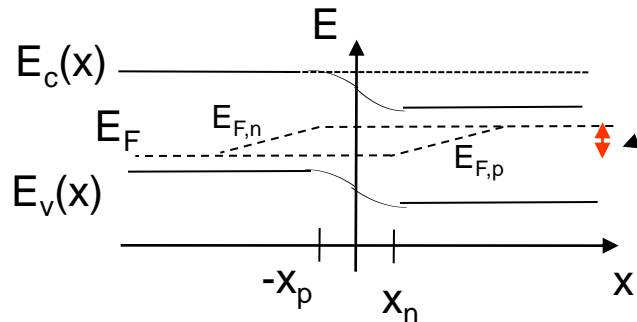


mit äußerer Spannung $-U$
(Sperrrichtung)



Nichtgleichgewicht in Durchlassrichtung Breite der Sperrschicht

Nichtgleichgewicht der Ladungsträger:



$$\Delta E_F = E_{F,n} - E_{F,p} = eU$$

$$np = n_i^2 e^{\frac{\Delta E_F}{k_B T}} \gg n_i^2$$

$$n = n_i e^{\frac{E_{F,n} - E_{F,i}}{k_B T}} \quad p = n_i e^{\frac{E_{F,i} - E_{F,p}}{k_B T}}$$

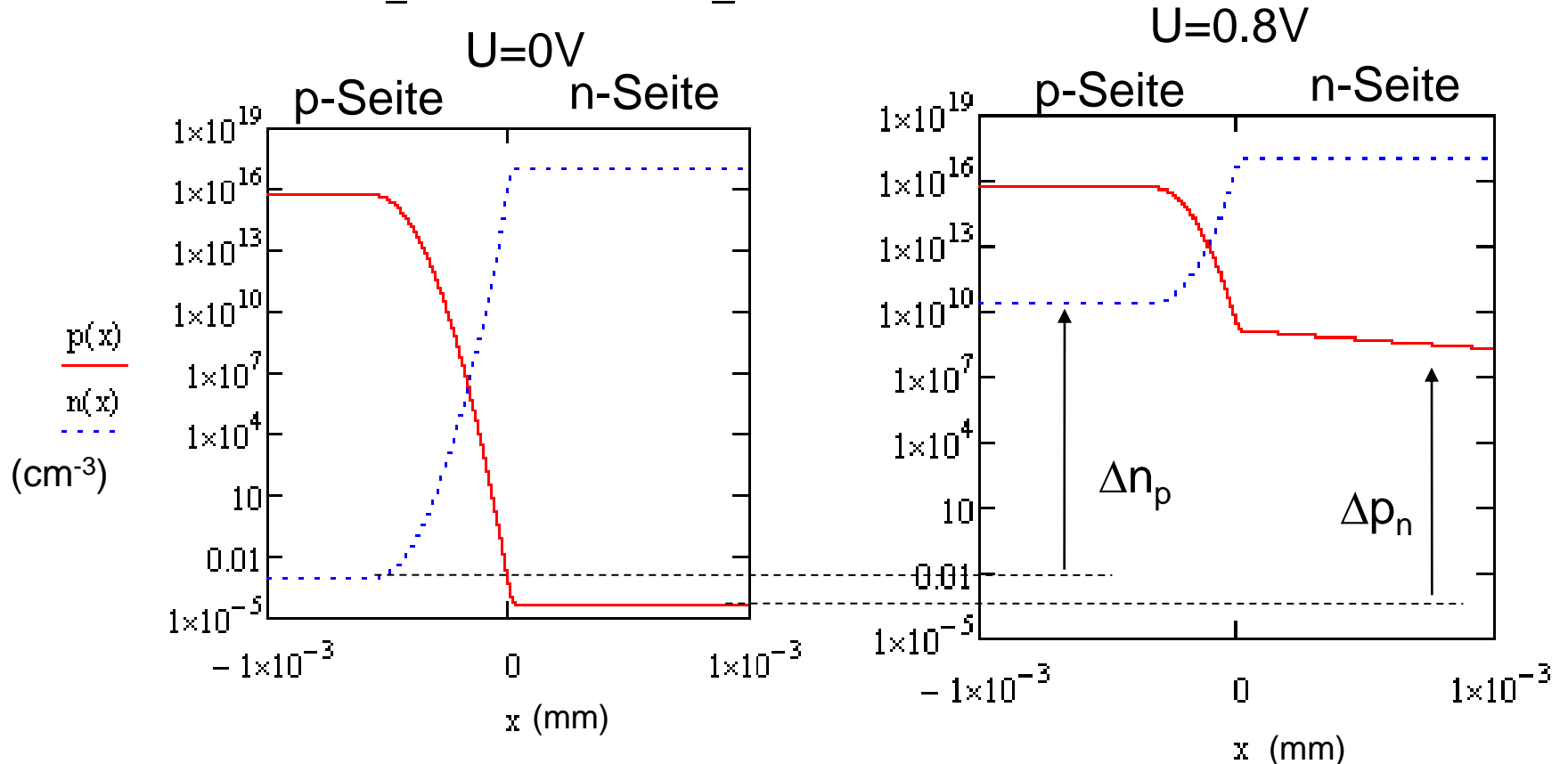
Ladungsträgerüberschuss durch
Nichtgleichgewicht:
Wesentliche Bedingung für
optische Strahlungsaktivität

Breite der Sperrschicht:

$$b(U) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0}{e}} \sqrt{\frac{N_D + N_A}{N_D N_A}} \sqrt{U_D - U} < b(U = 0)$$

Räumliche Ladungsträgerverteilung bei Vorwärtsspannung am pn-Übergang

GaAs ($N_A=5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ $N_D=1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)

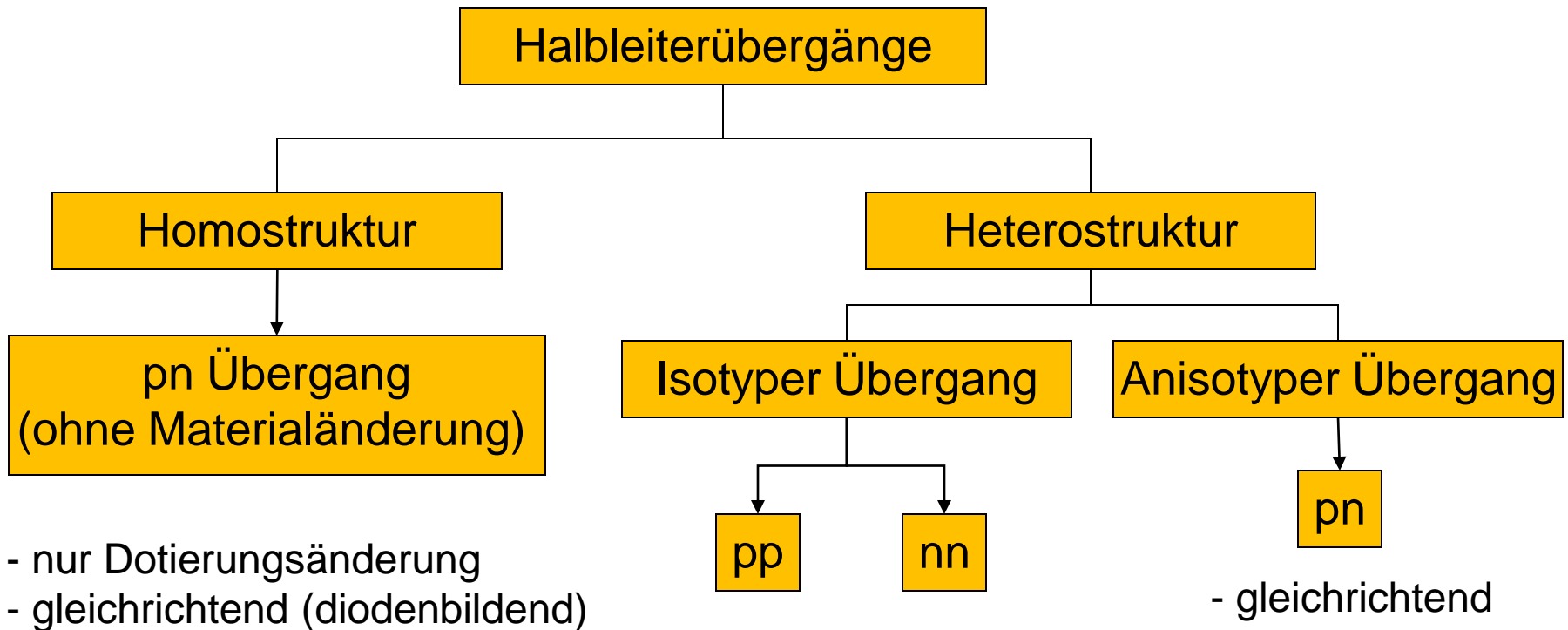


thermisches Gleichgewicht: $np=n_i^2$

Ladungsträgerinjektion: $np \gg n_i^2$
(„Minoritätsladungsträgerinjektion“)

Übergänge in Heterostrukturen

Halbleiterheterostruktur: Struktur aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien

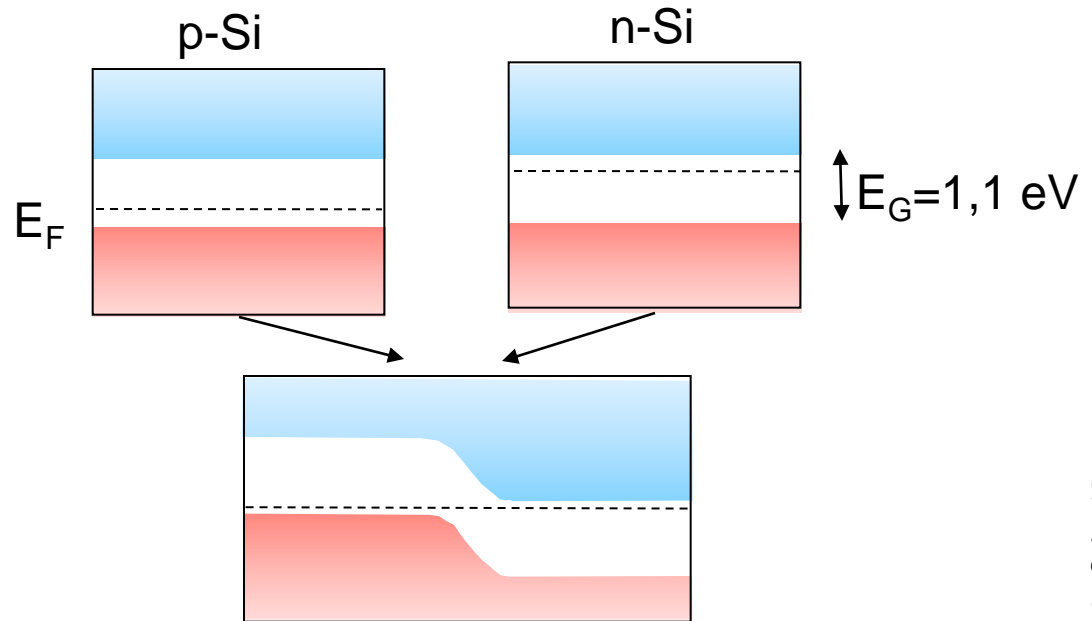


Design von

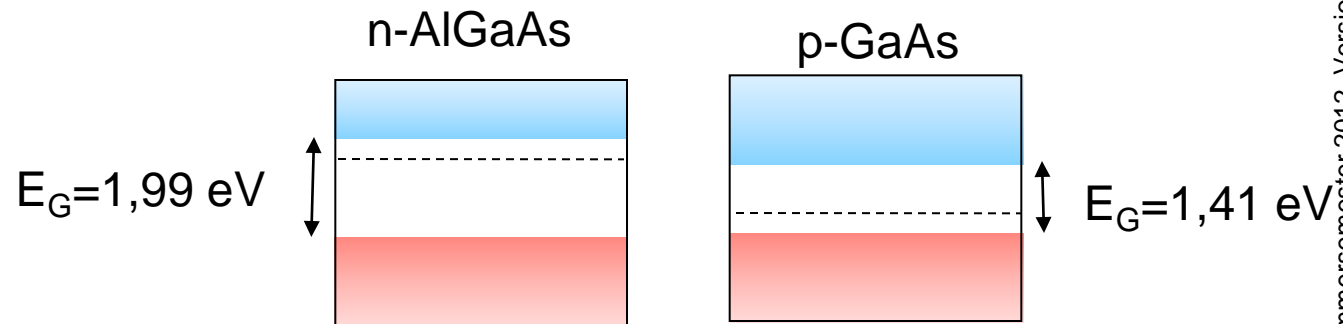
- räumlichen Potentialverläufen
- räumlichen Brechungsindexverläufen

Homostruktur und Heterostruktur

Homostruktur
(pn Übergang im Si)

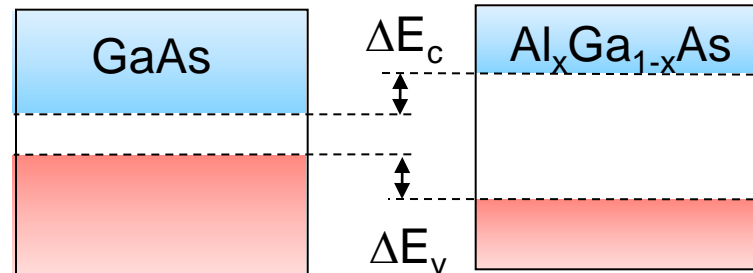


Heterostruktur
(pn Übergang im
Materialsystem
n-AlGaAs, p-GaAs)

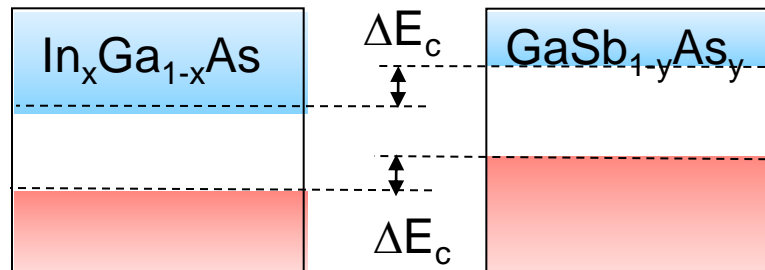


Klassifizierung der Heterostrukturen

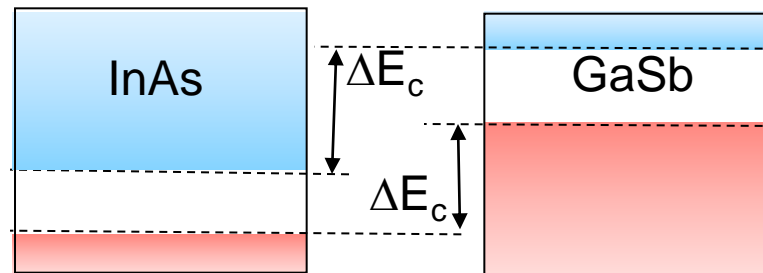
Typ I:
Normale
Bandkantenverschiebung



Typ I':
Versetzte verbotene Zone



Typ II:
Unterbrochene
verbotene Zone



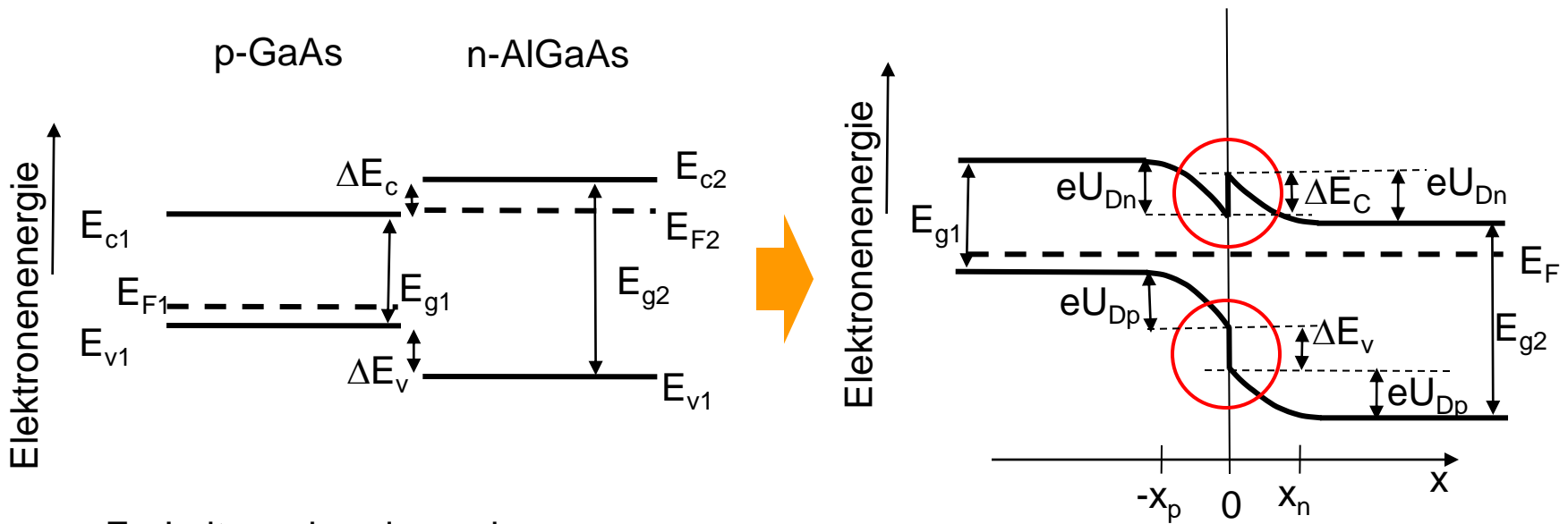
Konvention
für Dotierung:

Großer Buchstabe = \rightarrow Pn \leftarrow kleiner Buchstabe =
größere Bandlücke kleinere Bandlücke

Idealer pn-Übergang in Heterostrukturen

Bändermodell

Beispiel pN-Übergang:



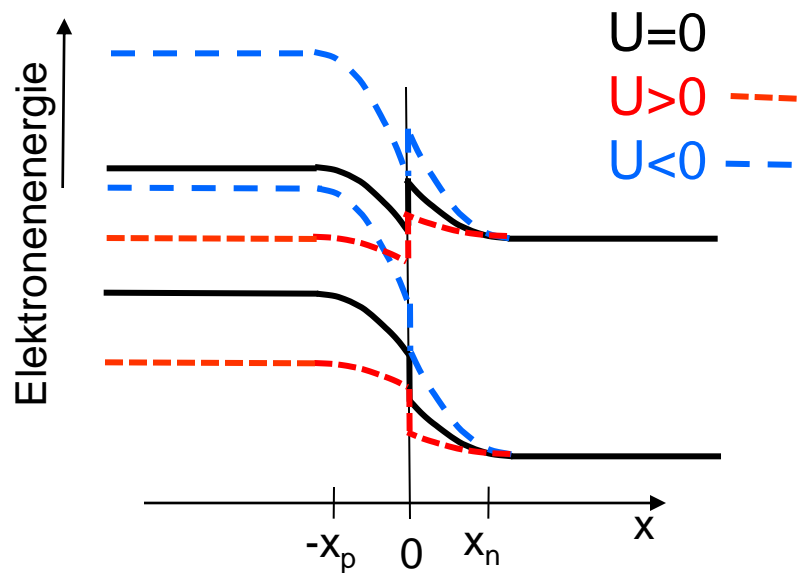
E_c : Leitungsbandenergie
 E_v : Valenzbandenergie
 E_g : Bandlückenenergie
 E_{vac} : Vakuum-Energie-Niveau

$$eU_D = eU_{Dn} + eU_{Dp}$$

$$eU_D = \Delta E_F$$

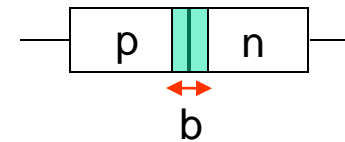
$N_p \rightarrow$ Spitze im Leitungsband
 $n_P \rightarrow$ Spitze im Valenzband

pn Übergang in Heterostrukturen mit äußerer Spannung

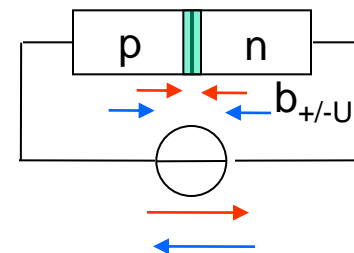


Änderung der Sperrschichtdicke vernachlässigt

ohne äußere Spannung U

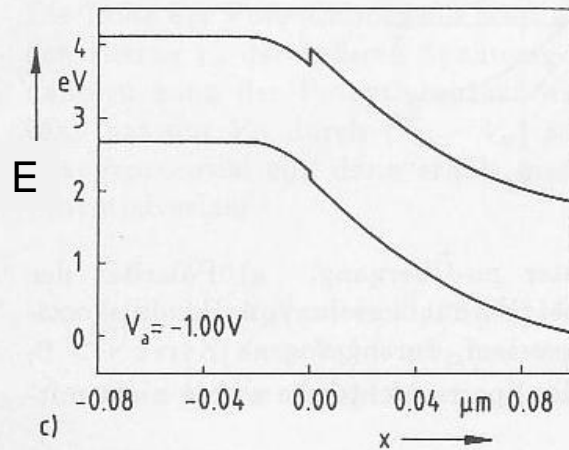
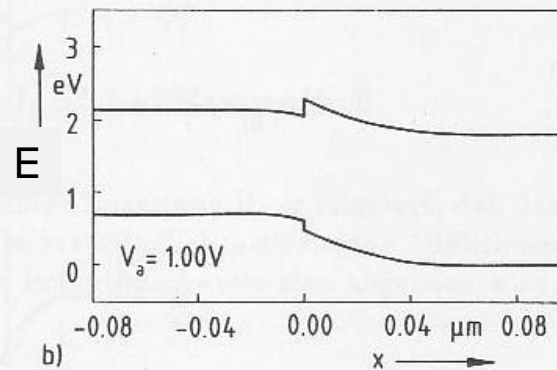
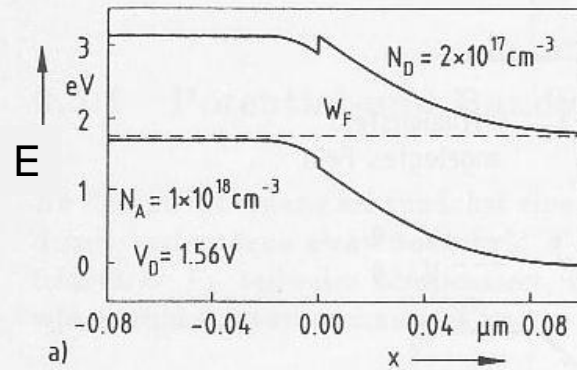


mit äußerer Spannung $\pm U$
(Durchlass- od. Flussrichtung)
(Sperrrichtung)



Beispiel 1: pN Übergang GaAs / Al_{0,3}Ga_{0,7}As

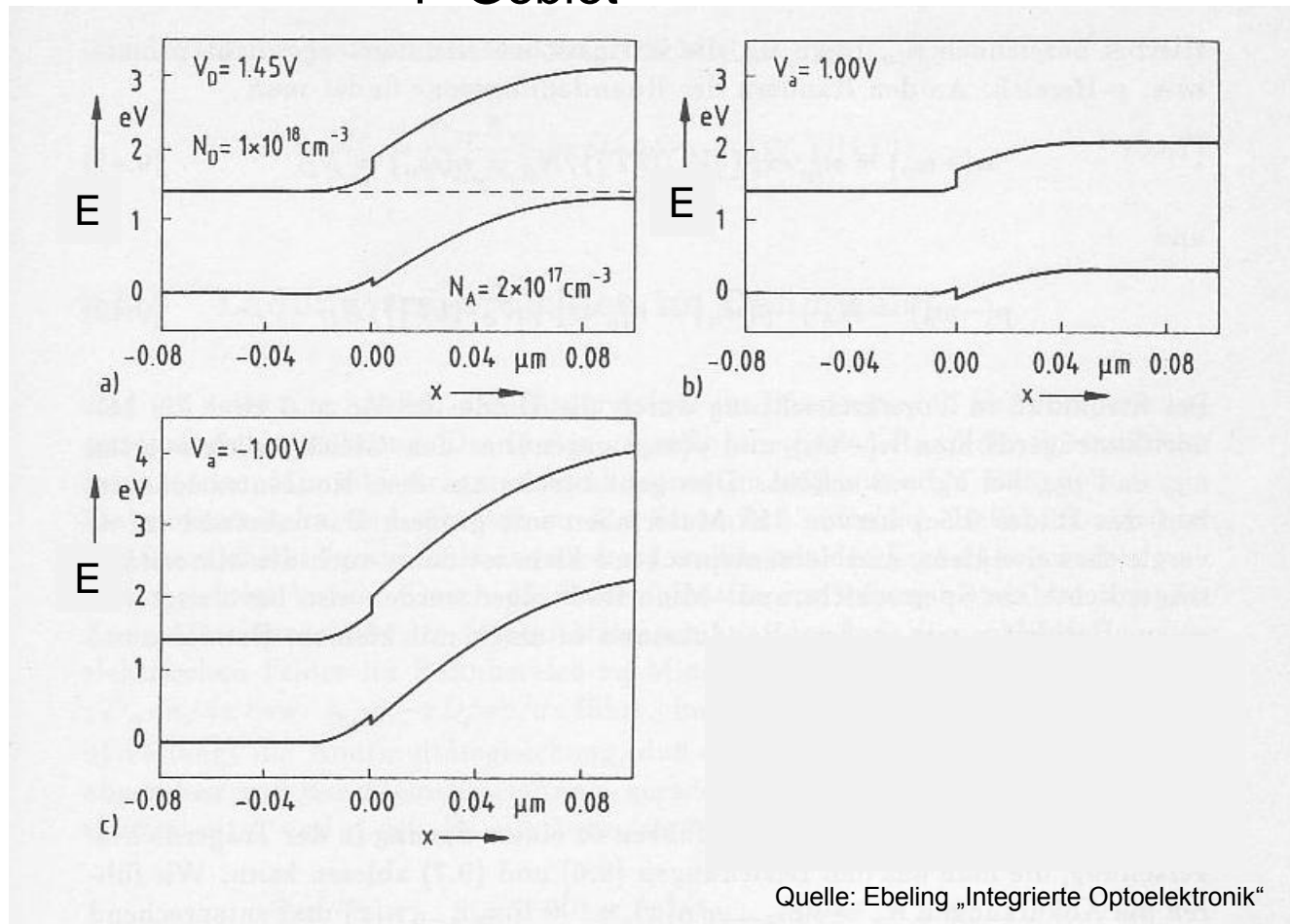
p-Gebiet N-Gebiet



Quelle: Ebeling „Integrierte Optoelektronik“

Beispiel 2: nP Übergang GaAs / $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$

n-Gebiet P-Gebiet

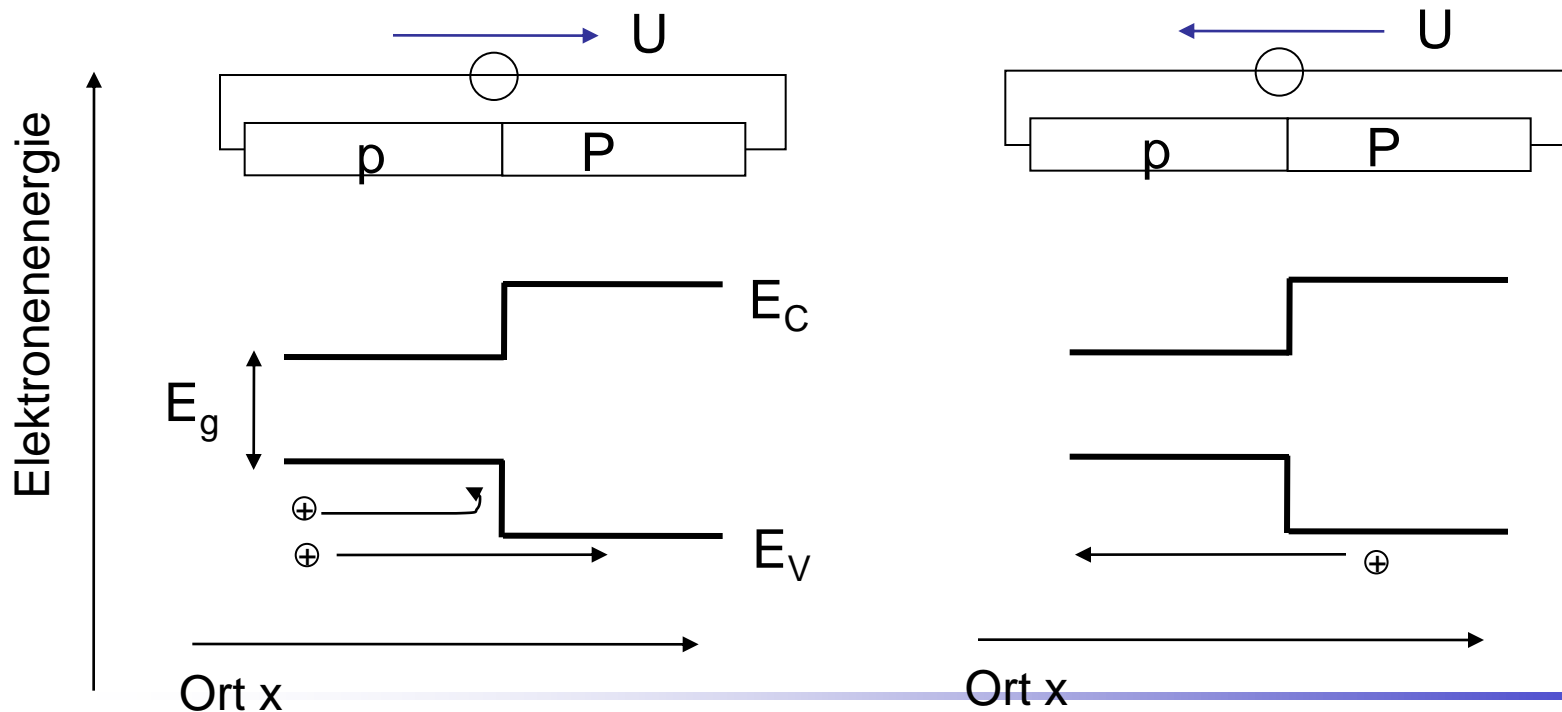


Quelle: Ebeling „Integrierte Optoelektronik“

Isotype Übergänge

- sehr kleine Raumladungszonen, kaum Bandverbiegungen und Diffusionsspannungen, nicht diodenbildend
- äußere Spannung \rightarrow Stromfluss (getragen von Majoritätsladungsträger, Elektronen bei nN, Löcher bei pP)

Beispiel: pP-Übergang:



Einfach-Heterostruktur vs. Doppel-Heterostruktur

Einfach-Heterostruktur (single-heterstructure):

nur zwei Schichten und ein Übergang
(pn, pN, Pn, pP, nN)

Doppel-Heterostruktur (double-heterostructure):

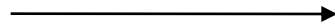
Drei-Schichtstrukturen

PpN

PnN

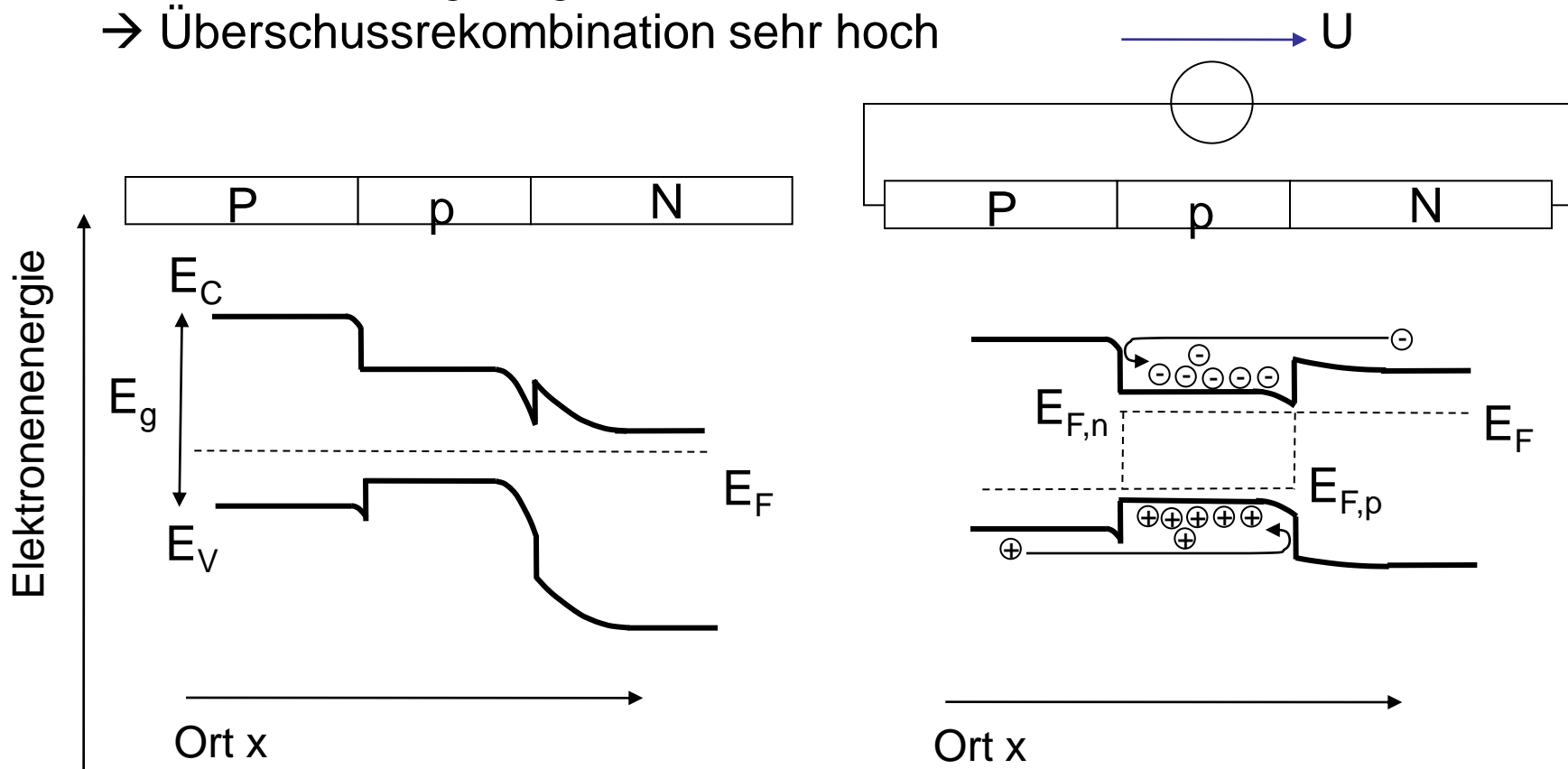
Material kleiner Bandlücke

sandwich-artig zwischen Material mit
größer Bandlücke



PpN Doppel-Heterostruktur

effektiver Ladungsträgerereinschluss in Potentialmulden
→ Überschussrekombination sehr hoch



Lernziele Kapitel 4

- Entstehung eines pn-Übergangs
- Bändermodell des pn-Übergangs
- Diffusionsspannung und Sperrschicht
- Ladungsträgerverteilung (qualitative Beschreibung) bei unterschiedlichen Dotierungen
- pn-Übergang mit äußerer Spannung
- Ladungsträgerinduktion und Nichtgleichgewichtszustand als Voraussetzung für effiziente strahlende Rekombination
- Heterostrukturen
- Bändermodell von Heterostrukturen (qualitative Beschreibung)
- Ladungsträger in Heterostrukturen (qualitative Potentialverläufe und Ladungsträgereinschluss)