

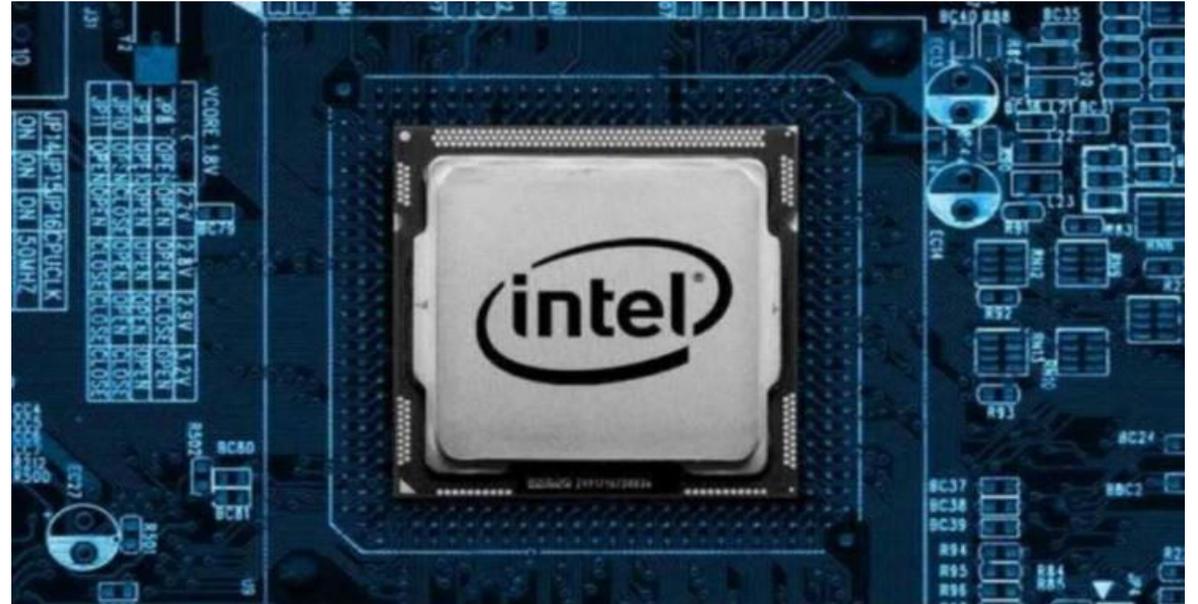


Elektrotechnik 1

Übung 12 – Halbleiter

Halbleiter

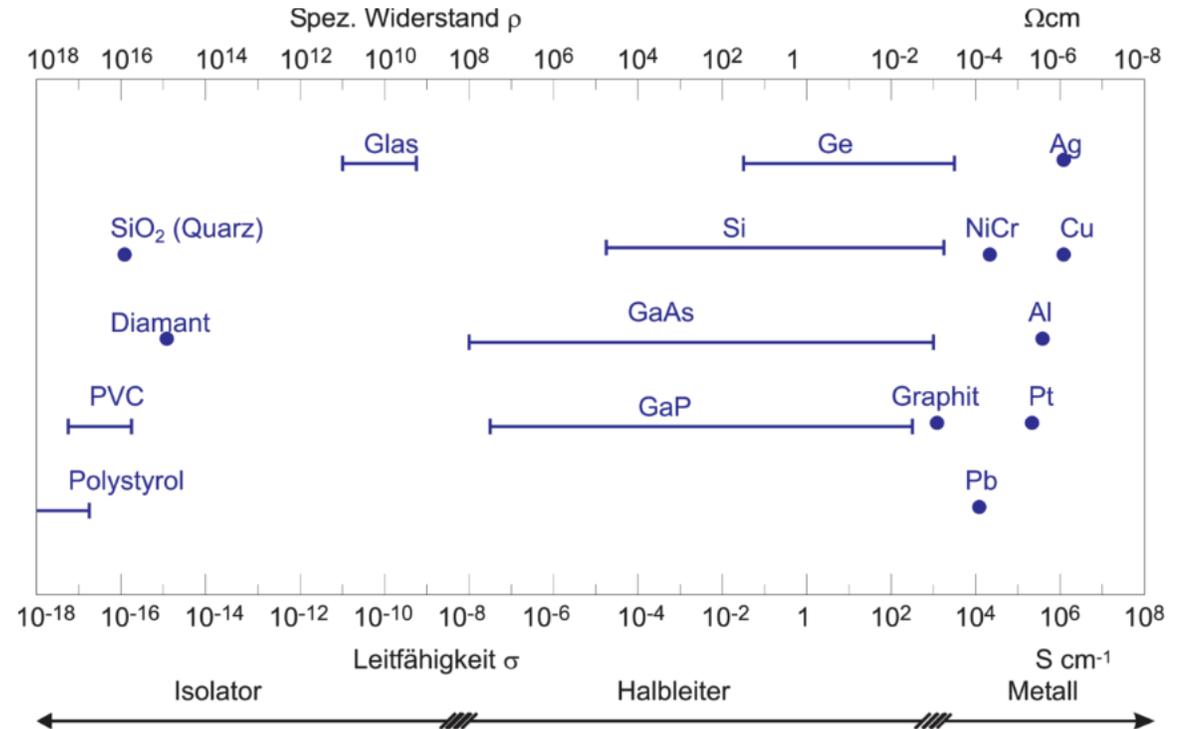
- Halbleiter sind überall!
- V.a. Transistoren
- Chips aus vielen Transistoren



Theorie: Halbleiter

3 Arten von Materie:

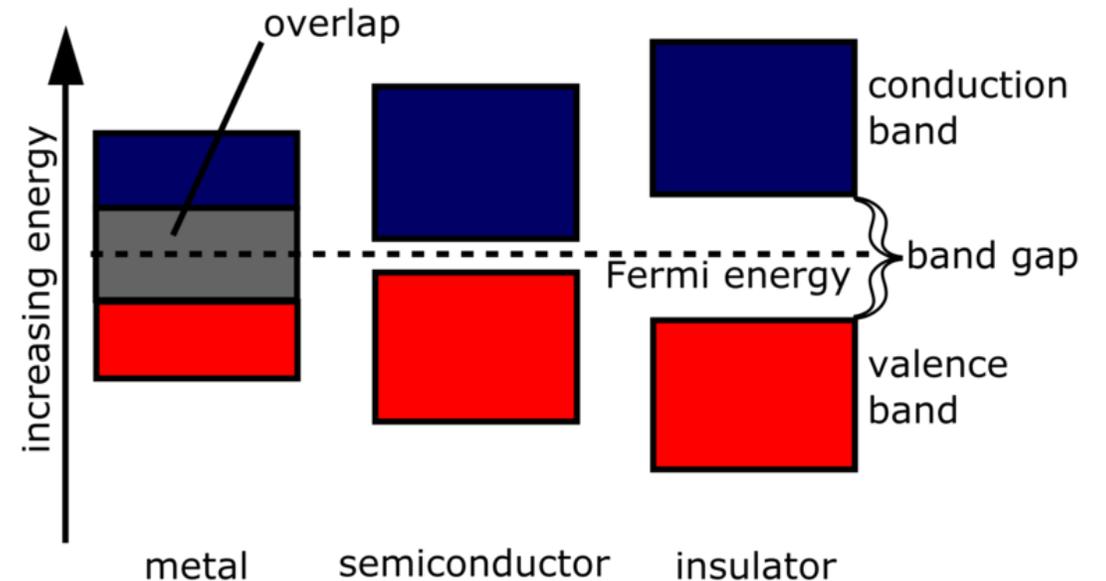
- Metalle/Leiter
- Halbleiter (HL)
- Isolatoren/Nichtleiter



<https://www.youtube.com/watch?v=lcrBqCFLHIY>

Theorie: Bandstruktur

- Nur gewisse Energien sind für Elektronen in der Gitterstruktur erlaubt (Quantenphysik) wir sprechen vom **Valenzband**.
- Auch für Elektronen die sich frei durch das Gitter bewegen sind nur gewisse Energien erlaubt, wir sprechen vom **Leitungsband**.
- Durch externe Energiezufuhr (z.B. Wärme, Licht) können Elektronen aus der Gitterstruktur gelöst werden und ins Leitungsband befördert werden.
- Der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband wird als **Bandlücke** (*energy gap*) bezeichnet. Die Energiedifferenz wird als E_G bezeichnet. Die Energie eines Elektrons darf nicht in diesem Bereich sein.



Fermi-Dirac-Verteilung

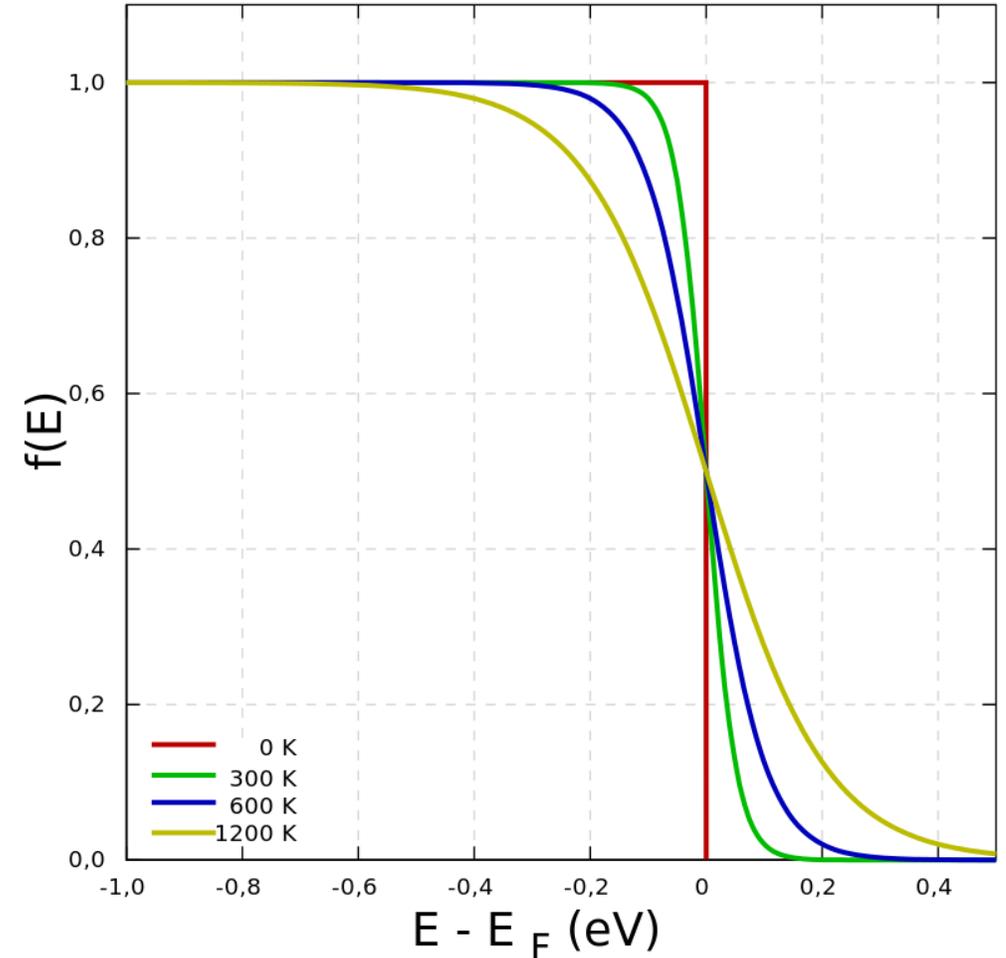
\equiv Probability to find electron at Energy E

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}}$$

E_F = Fermienergie, Energie bei der die
Besetzungswahrscheinlichkeit genau $\frac{1}{2}$ ist
 k_B = Boltzmann-Konstante
 T = Absolute Temperatur in K

Boltzmann-Approximation:

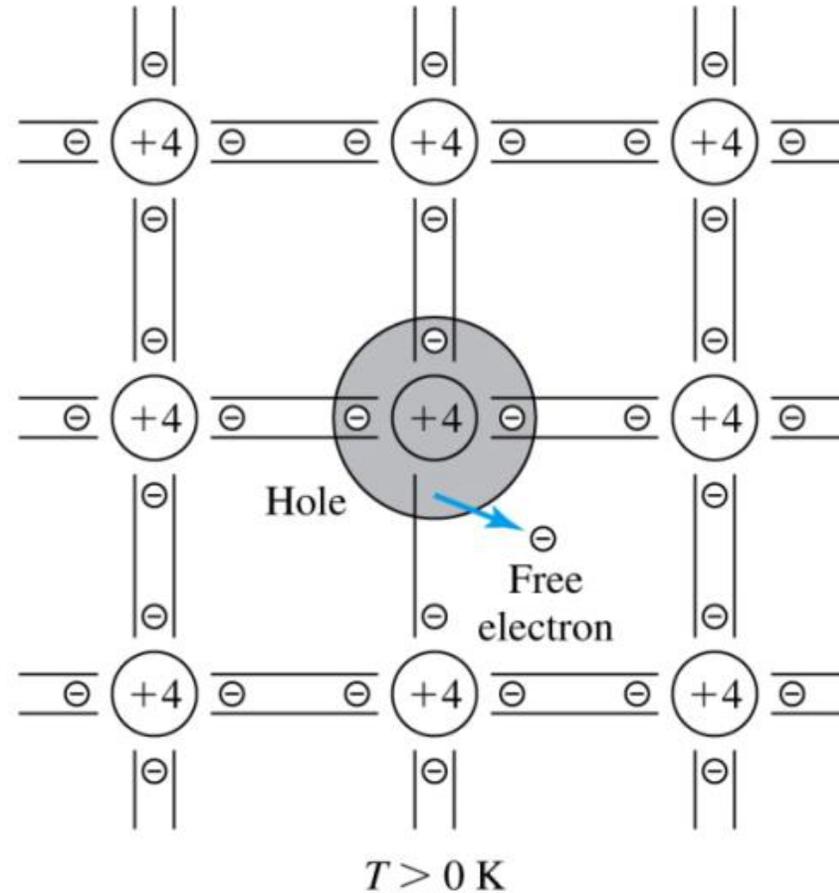
$$E \gg E_F : f_c \approx e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}}$$



Grundlage

Silizium

Gitterstruktur



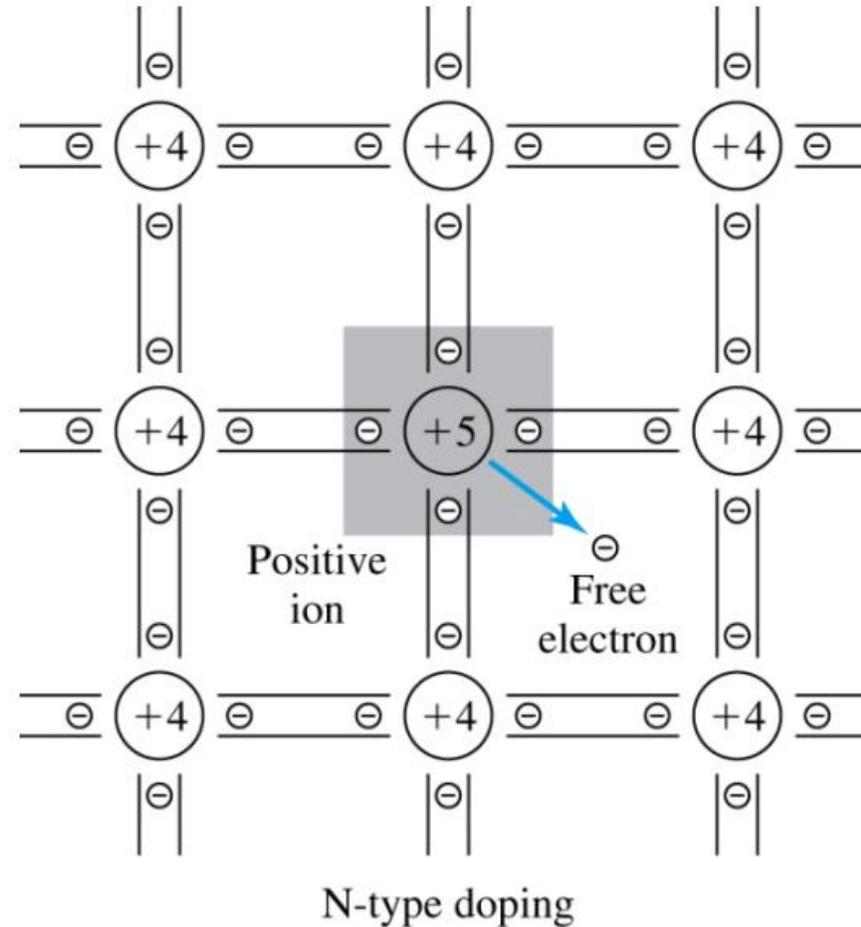
Erhitzen führt zu freien Elektronen

Doping

Silizium

N-type

Einfügen von
zB. **Phosphor**



Donatoren

(Phosphor, Arsen...)

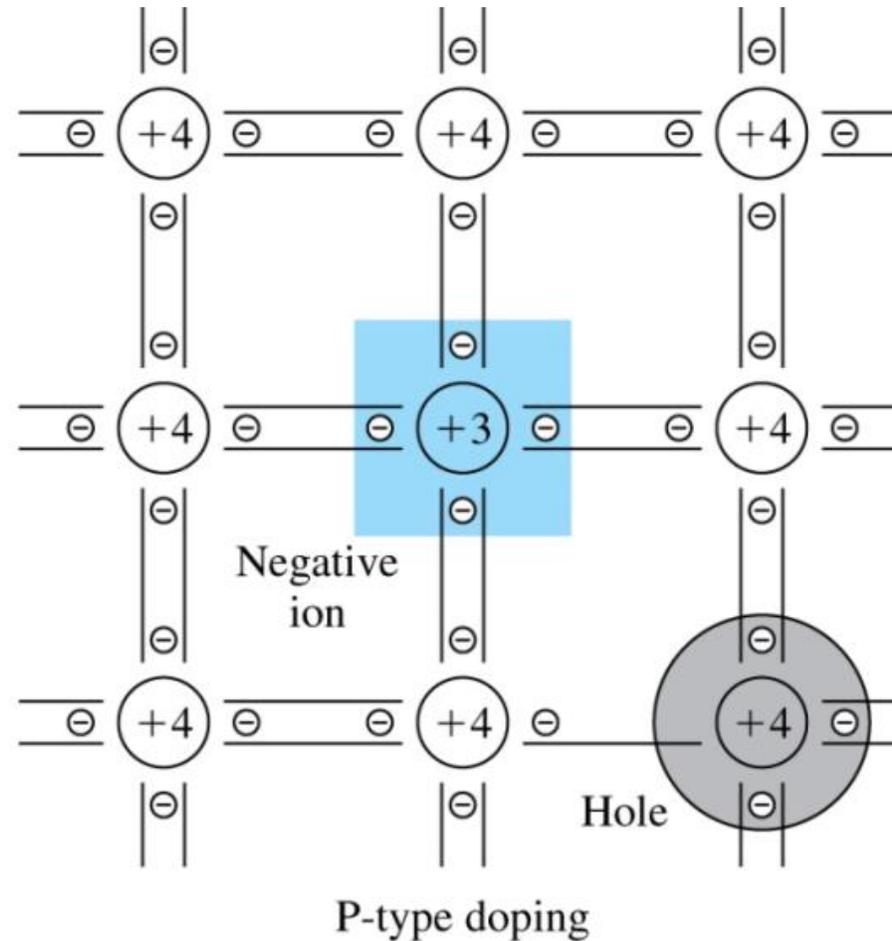
WICHTIG! Über alles ist das Material **neutral** geladen! (gleich viele Protonen wie Elektronen) aber es hat „impurities“

Doping

Silizium

P-type

Einfügen von
zB. **Bor**

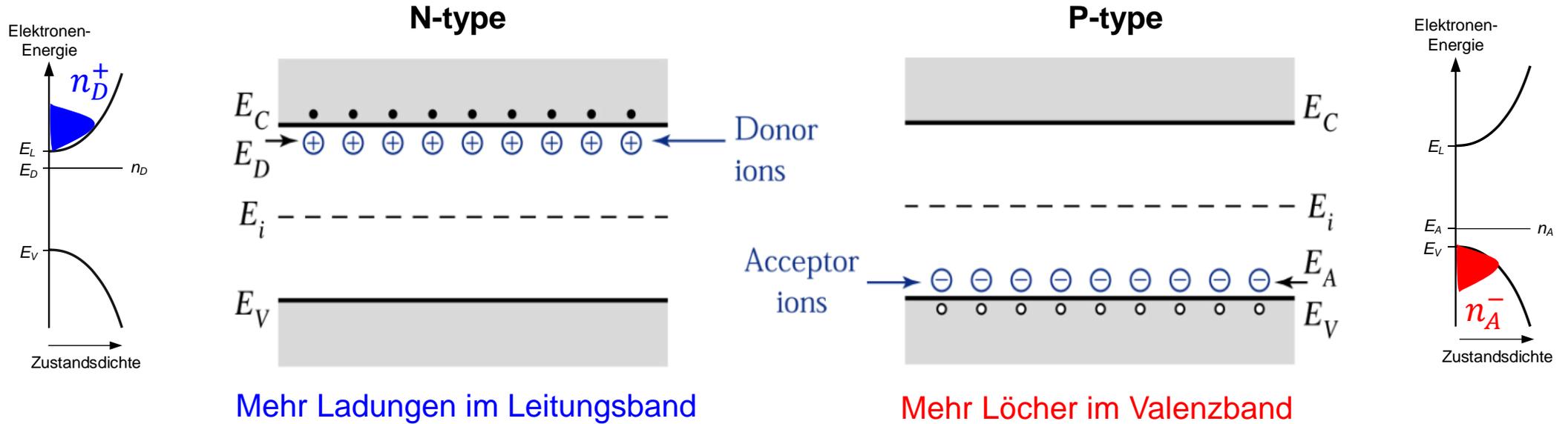


Akzeptoren

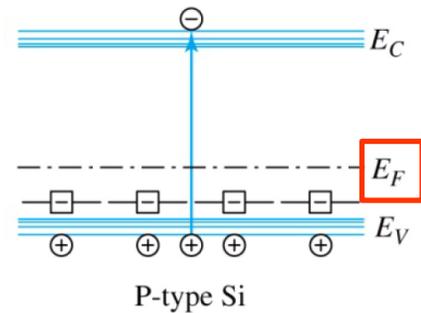
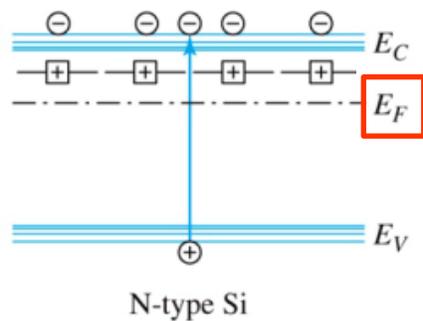
(Bor, Aluminium, Gallium...)

WICHTIG! Über alles ist das Material **neutral** geladen! (gleich viele Protonen wie Elektronen) aber es hat „impurities“

Doping, Fermi-Niveau



$$E_F = E_L - k_B T \ln \frac{N_L}{n_D}$$



$$E_F = E_V + k_B T \ln \frac{N_V}{n_A}$$

Theorie: Massenwirkungsgesetz

$$n_i^2(T) = n_{th} p_{th} = N_L N_V \exp\left(-\frac{E_G}{k_B T}\right)$$

E_G = Bandlücke zwischen E_L und E_V
 n_i = Eigenleitungsträgerdichte

Elektronendichte $n_{th} = N_L \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{k_B T}\right)$

$$N_L = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_n \cdot k_B T}{h^2}\right)^{3/2}$$

Löcherdichte $p_{th} = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi \cdot m_p \cdot k_B T}{h^2}\right)^{3/2}$$

Spezialfall Eigenhalbleiter:
 (keine Verunreinigung, nicht dotiert)

$$n_{th} = p_{th} = n_i$$

Drift und Diffusion

Drift Strom

Drift Strom entsteht durch ein **E-Feld**.

Die Richtung des Drift Stroms ist immer in Richtung des E-Feldes.

$$\vec{J}_F = \kappa \vec{E}$$

$\kappa = [en\mu_n + ep\mu_p]$ Leitfähigkeit

Diffusionsstrom

Diffusionsstrom entsteht aufgrund von Konzentrationsunterschieden.

Die Richtung des Diffusionsstroms ist **entgegengesetzt** zum Konzentrationsgradienten

$$\vec{J}_D = \vec{J}_{n,D} + \vec{J}_{p,D}$$

$\vec{J}_{n,D}$: Elektronen-Diffusionsstrom

$\vec{J}_{p,D}$: Löcher-Diffusionsstrom

Drift

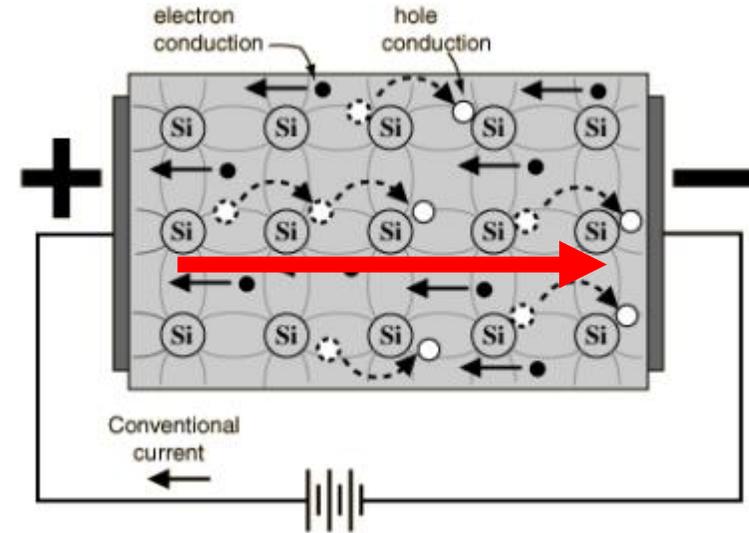
Drift Strom

Drift Strom entsteht durch ein **E-Feld**.

Beiträge von Elektronen und Löchern. Abhängig von Ladungsträgerkonzentration und mittleren Driftgeschwindigkeiten v_n, v_p .

$$\vec{J}_F = \kappa \vec{E}$$

$\kappa = [en\mu_n + ep\mu_p]$ Leitfähigkeit
 μ_n, μ_p Beweglichkeit (mobility), abhängig von Material, Temp, Dotierung

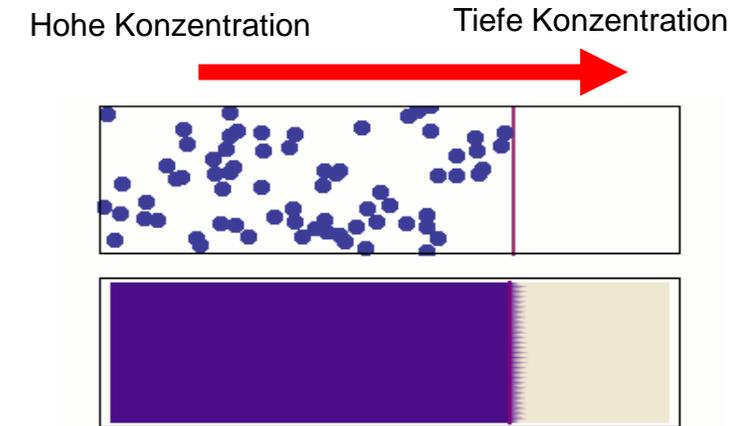
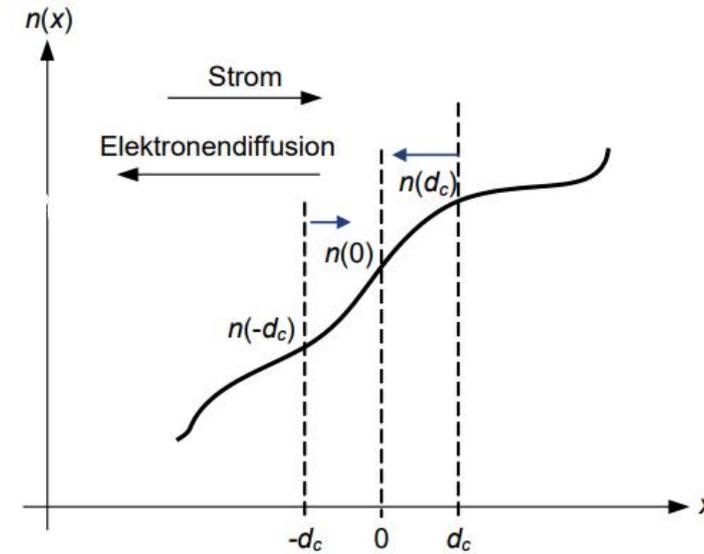


$$\begin{aligned} \vec{J}_F &= \vec{J}_{n,F} + \vec{J}_{p,F} \\ &= -en\vec{v}_n + ep\vec{v}_p \\ &= [en\mu_n + ep\mu_p]\vec{E} \\ &= \kappa\vec{E} \end{aligned}$$

Diffusion

Diffusions Strom

Diffusions Strom entsteht aufgrund von Konzentrationsunterschieden.



$$\vec{J}_D = \vec{J}_{n,D} + \vec{J}_{p,D}$$

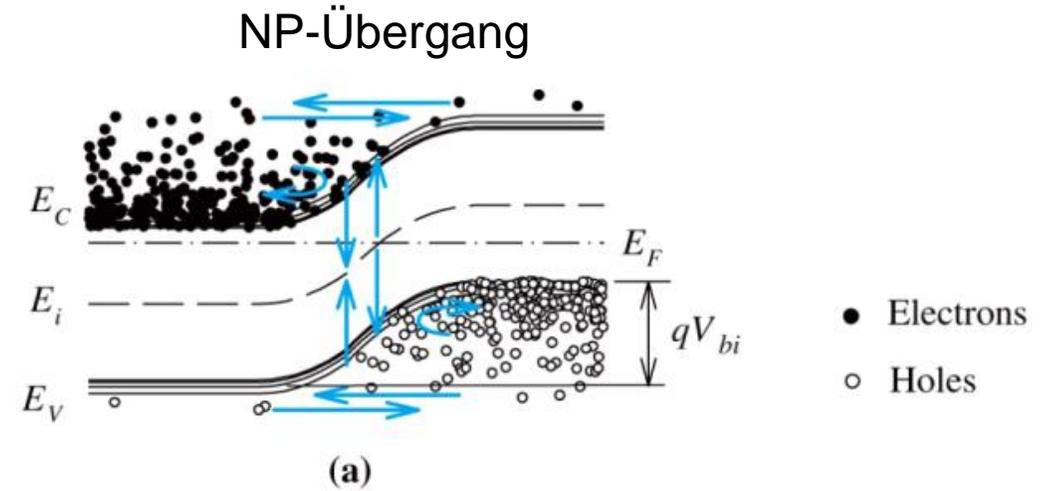
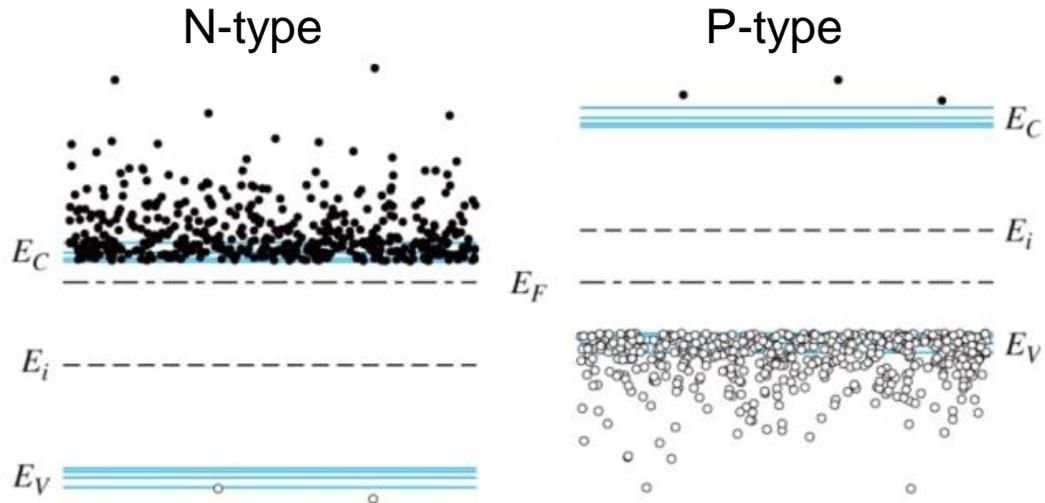
$\vec{J}_{n,D}$: Elektronen-Diffusionsstrom

$\vec{J}_{p,D}$: Löcher-Diffusionsstrom

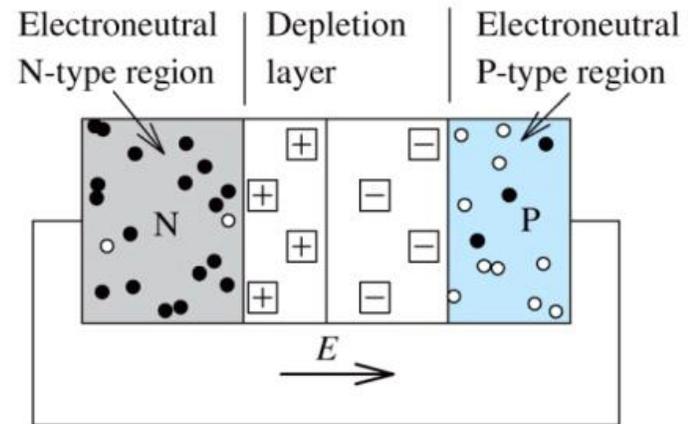
$$\begin{aligned}\vec{J}_D &= \vec{J}_{n,D} + \vec{J}_{p,D} \\ \vec{J}_{n,D} &= +eD_n \text{ grad } n \\ \vec{J}_{p,D} &= -eD_p \text{ grad } p\end{aligned}$$

Diffusionskonstanten
 D_n , D_p der Elektronen
und Löcher

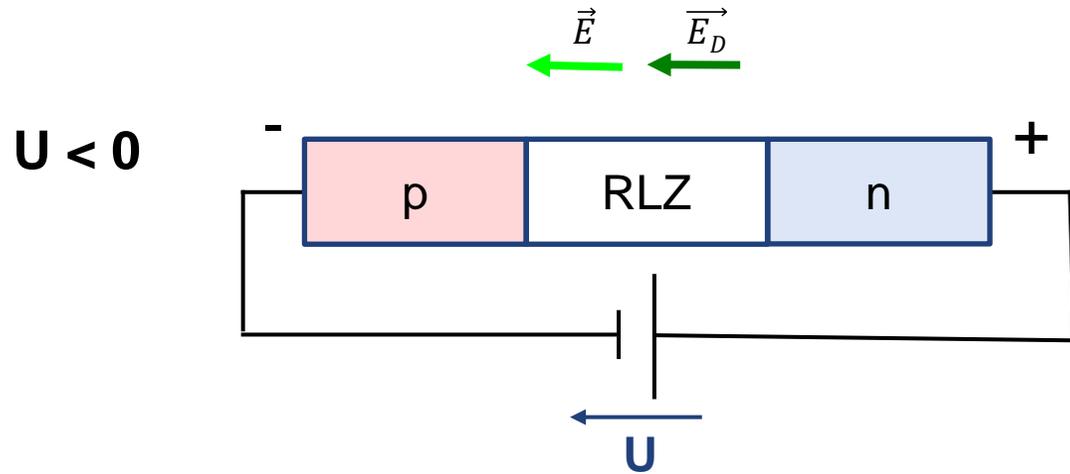
PN-Übergang



Depletion-Layer = Raumladungszone (RLZ)

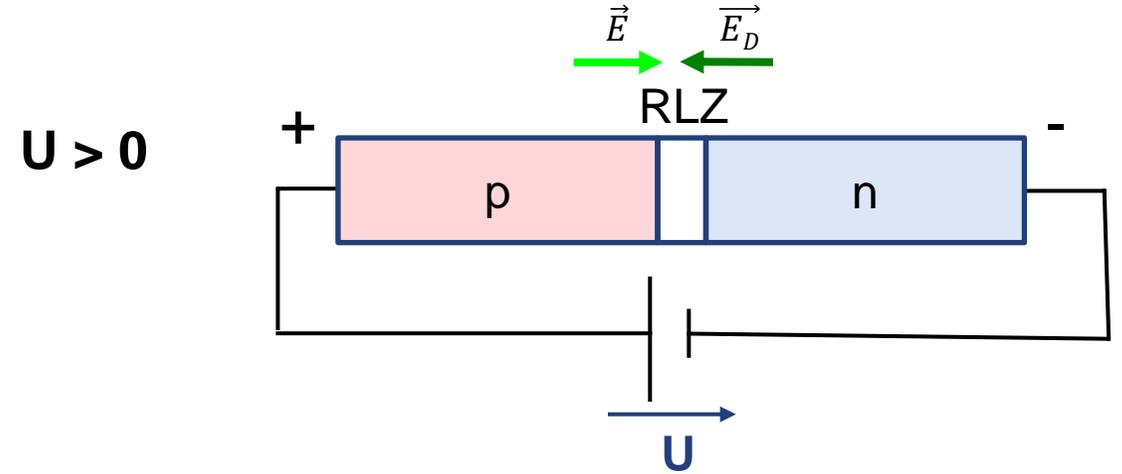


PN-Übergang



- Angelegtes El. Feld (\vec{E}) wirkt in gleiche Richtung wie \vec{E}_D
- Dadurch wird die RLZ grösser
- **Es fließt kein Strom**, oder höchstens ein sehr kleiner Strom (Sperrstrom)

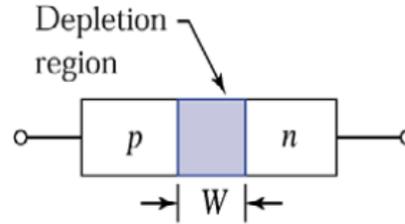
RLZ=Raumladungszone: Zone ohne beweglichen Ladungsträger, es kann keine Ladung durch diese Zone transportiert werden.



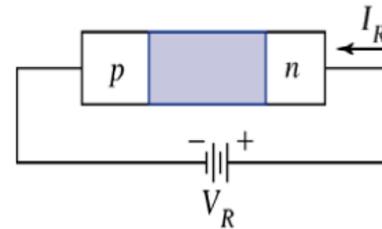
- Angelegtes El. Feld (\vec{E}) wirkt entgegen \vec{E}_D
- Dadurch wird RLZ kleiner
- **Es fließt Strom**

PN-Übergang

Thermisches Gleichgewicht

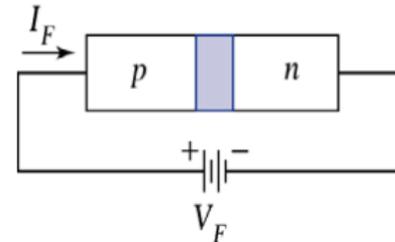


Rückwärtsspannung



Es fließt kein Strom

Vorwärtsspannung



Es fließt Strom

Bemerkung Serie 13 und Prüfung

- **Wir möchten die Elektrotechnik prüfen, nicht die Mathematik**
- Komplette Rechnungsaufgaben sollten vom Typ her aus den Übungen bekannt sein.
- Dinge, die in der Vorlesung besprochen wurden aber nicht in den Übungen thematisiert wurden, kann es aber **Verständnisaufgaben** geben. (z.B. Multiple-Choice, siehe z.B. Aufgaben 6 a, b, e aus der Prüfung vom Sommer 2020).
- Die publizierte Formelsammlung wird ausgedruckt zur Verfügung gestellt. **Man darf** eigene Exemplare ausdrucken und darauf z.B. **Markierungen** vornehmen. **Nicht erlaubt** sind zusätzliche Infos auf der Formelsammlung und eigene Zusammenfassungen.
- Manche Verfahren (z.B. Magnetischer Kreis & Ersatzquellen) kommen zu 99% und sind auf Formelsammlung.

Tipps Serie 13

1. Kondensator $\oiint_{\partial V} \vec{\mathbf{D}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = Q_{\text{int}} \quad \varphi(y) = - \int_{-\infty}^y E_y(y') dy' \quad C = \frac{Q}{U} \quad U_{\text{ab}} = \int_a^b \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}}$

2. Elektrisches Netzwerk – Strom- / Spannungsteiler (auswendig)

3. Magnetkreis $R_{\text{m},i} = \frac{l_i}{\mu_0 \mu_{\text{r},i} A_i} \quad L = \frac{N^2}{R_{\text{m,tot}}} \quad \phi(t) = \frac{\Theta(t)}{R_{\text{m,tot}}}$

4. Wechselstrom – Effektiv- / Mittelwert (Formelsammlung) $\frac{\hat{u}_2}{\hat{u}_0} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$

