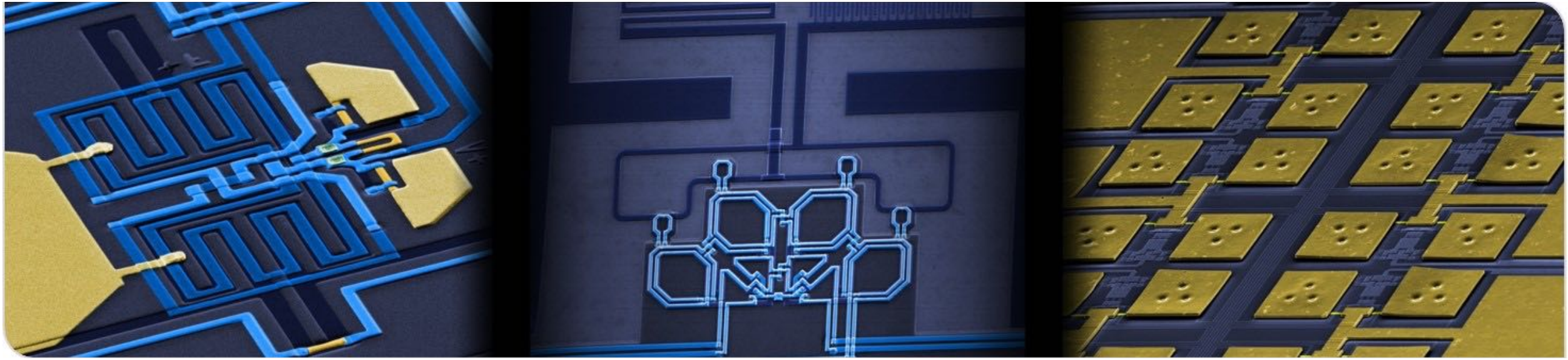
Bauelemente der Elektrotechnik

Prof. Dr. rer. nat. Sebastian Kempf

Wintersemester 2021/22

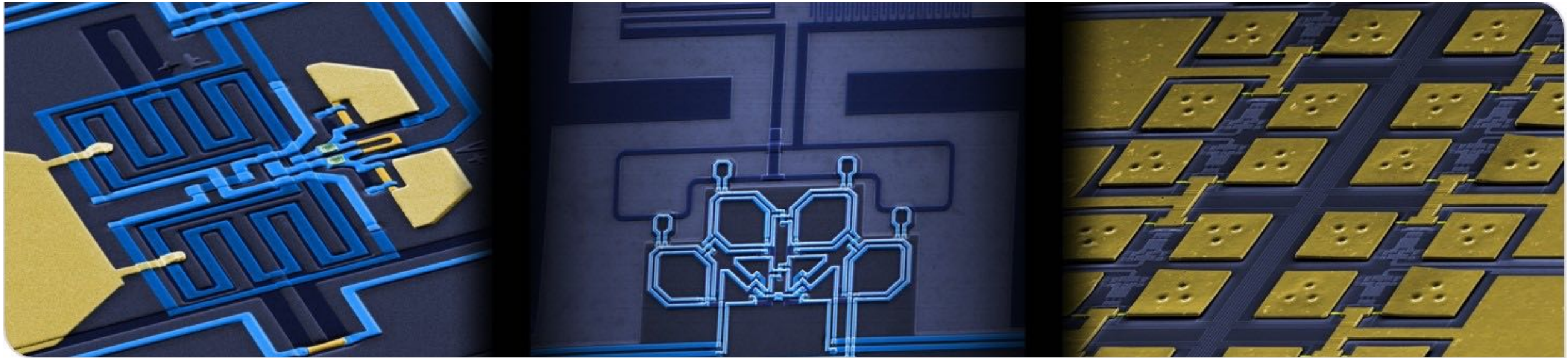


Karlsruhe Institute of Technology

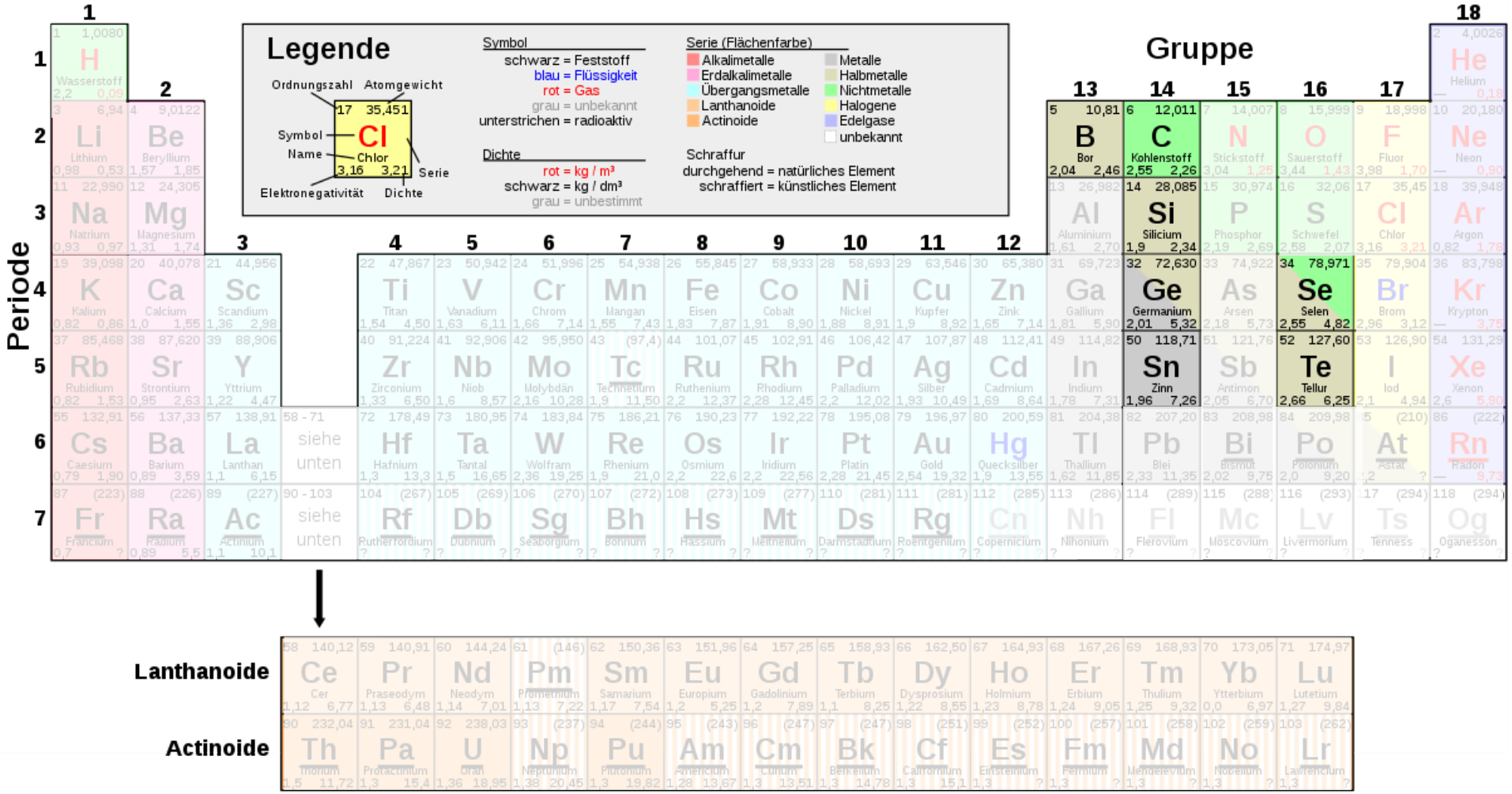
Bauelemente der Elektrotechnik

Halbleiterphysik

Wintersemester 2021/22



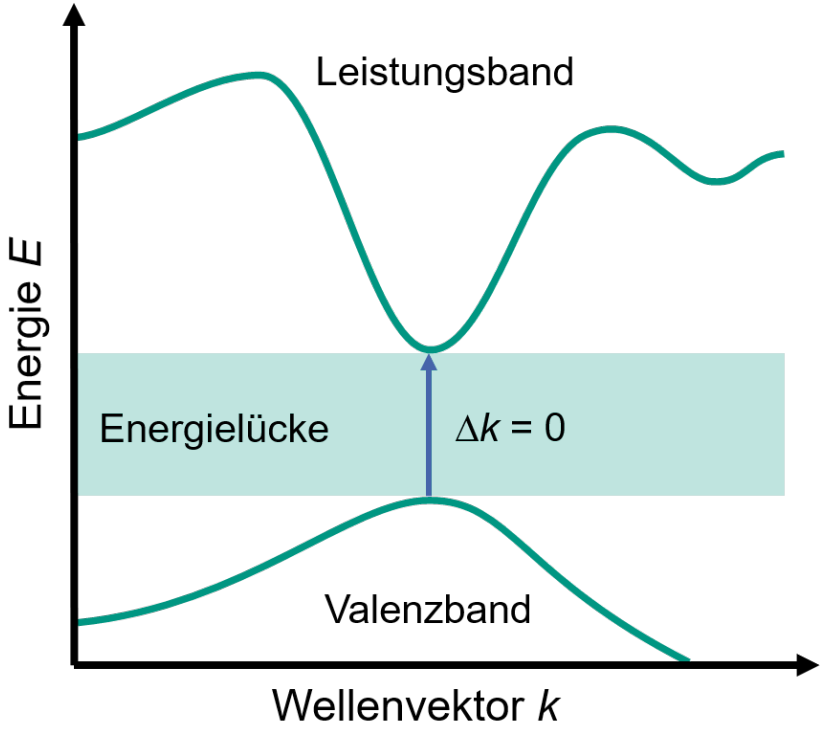
Elementhalbleiter

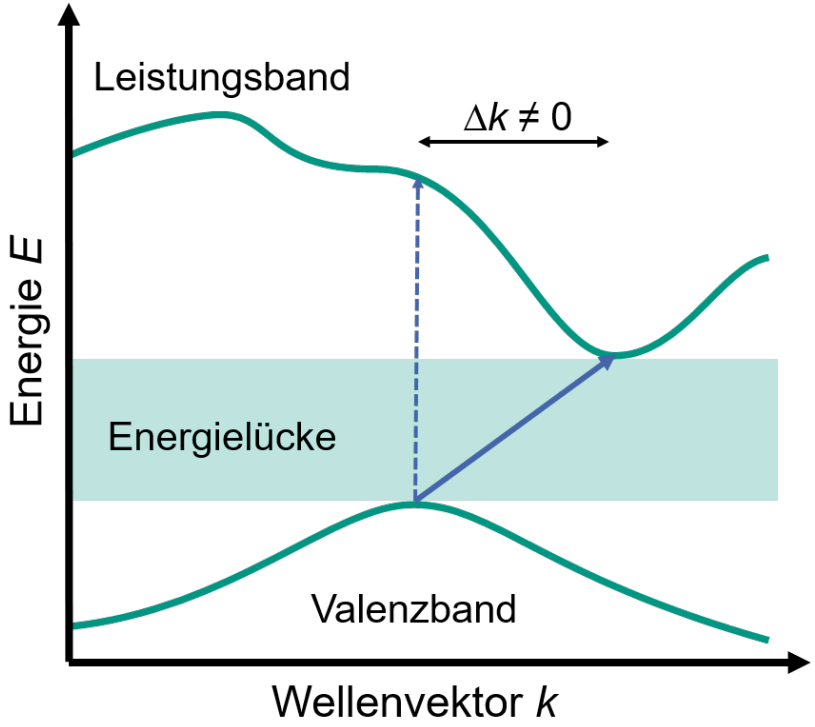


Verbindungshalbleiter

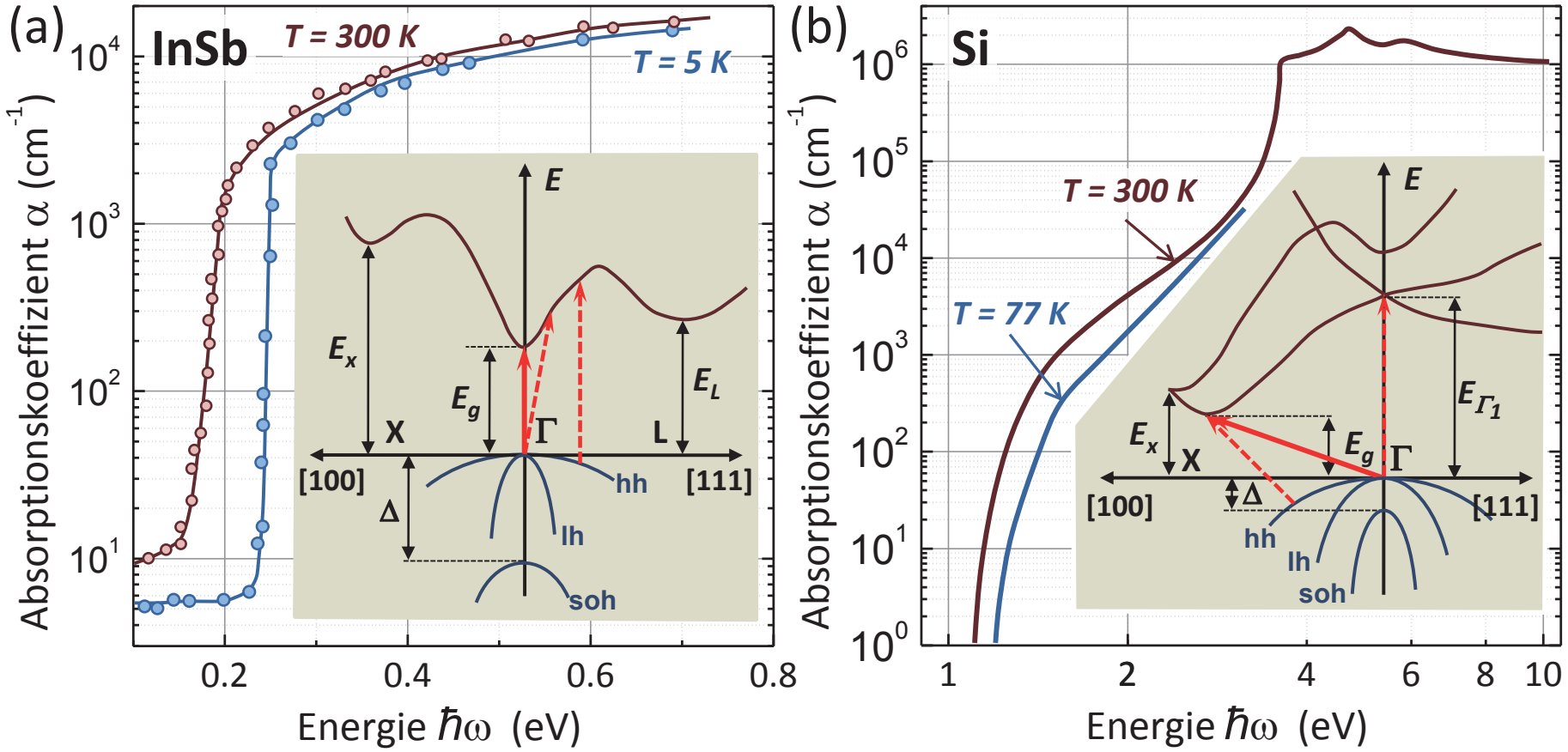
- IV-IV-Verbindungshalbleiter: Hochfrequenzelektronik
  - SiC, SiGe
- III-V-Verbindungshalbleiter: Laserdioden bzw. LEDs im UV-Bereich, Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad
  - Nitride: GaN, AlN, InN, BN
  - Phosphide: GaP, AlP, InP,
  - Arsenide: GaAs, AlAs, InAs, BAs
  - Antimonide: GaSb, AlSb, InSb
  - Ternäre/Quaternäre Verbindungen: AlGaAs, AlInAs, GaAsP, GaInN, GaInP, AlGaAsSb, GaInAsP
- II-VI-Verbindungshalbleiter: Halbleiterlaser im kurzwelligen Spektralbereich, Solarzellen
  - Sulfide: ZnS, CdS, HgS
  - Telluride: CdTe
  - Selenide: ZnS, CdSe
  - Ternäre Verbindungen: (Zn,Cd)Se, Zn(S,Se), (Be,Zn)Se, (Be,Cd)Se
- IV-VI-Verbindungshalbleiter: Infrarot-Detektoren, Wärmebildkameras
  - PbS, PbSe, PbTe

Direkte und indirekte Halbleiter

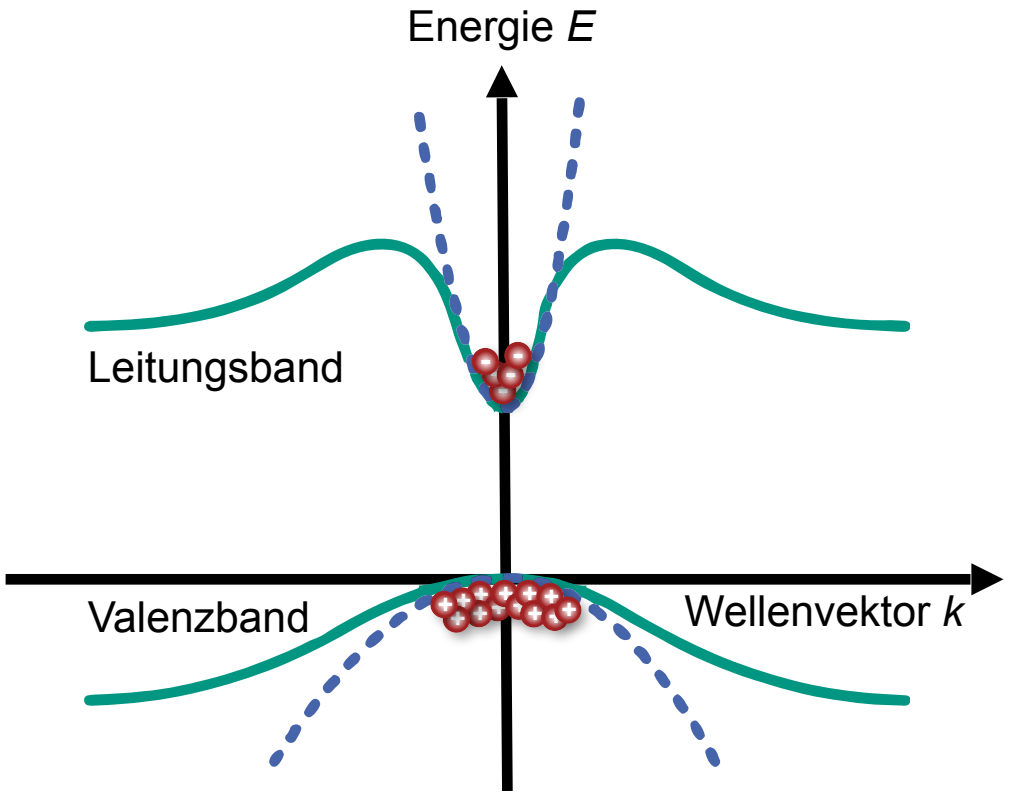


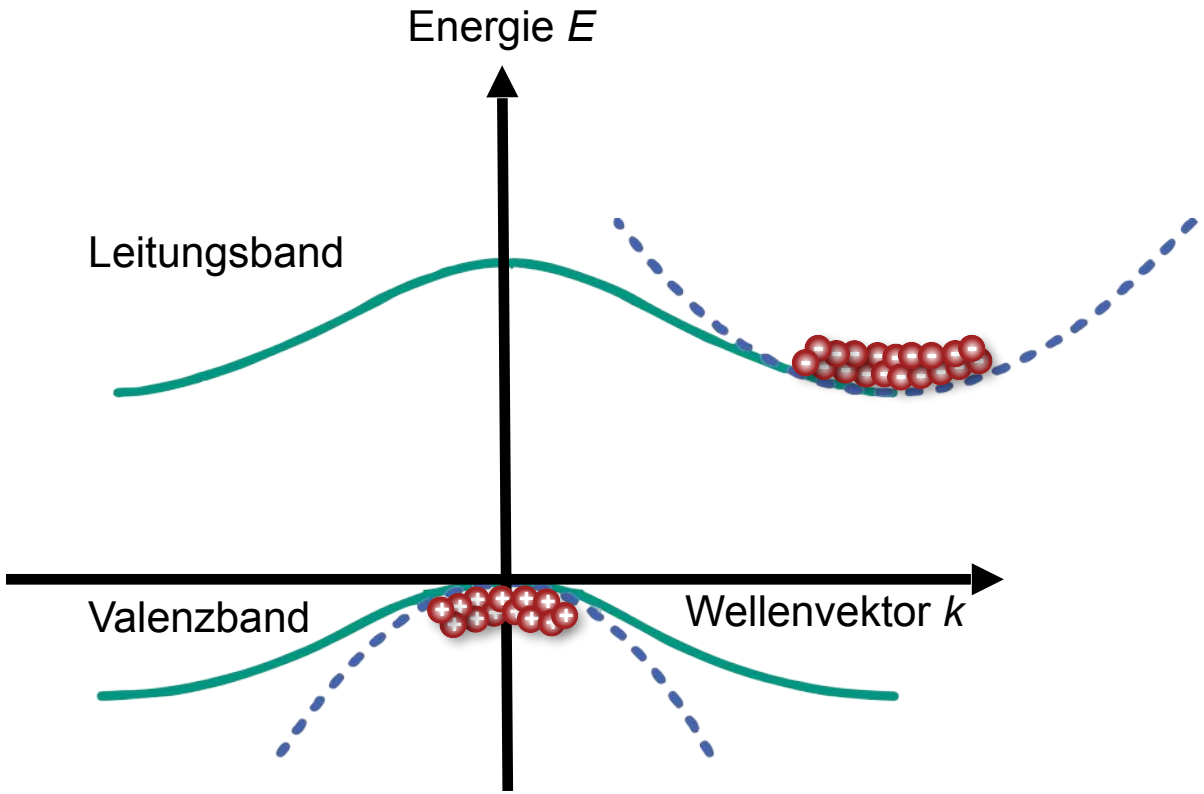


Optische Absorption bei direkten und indirekten Halbleitern

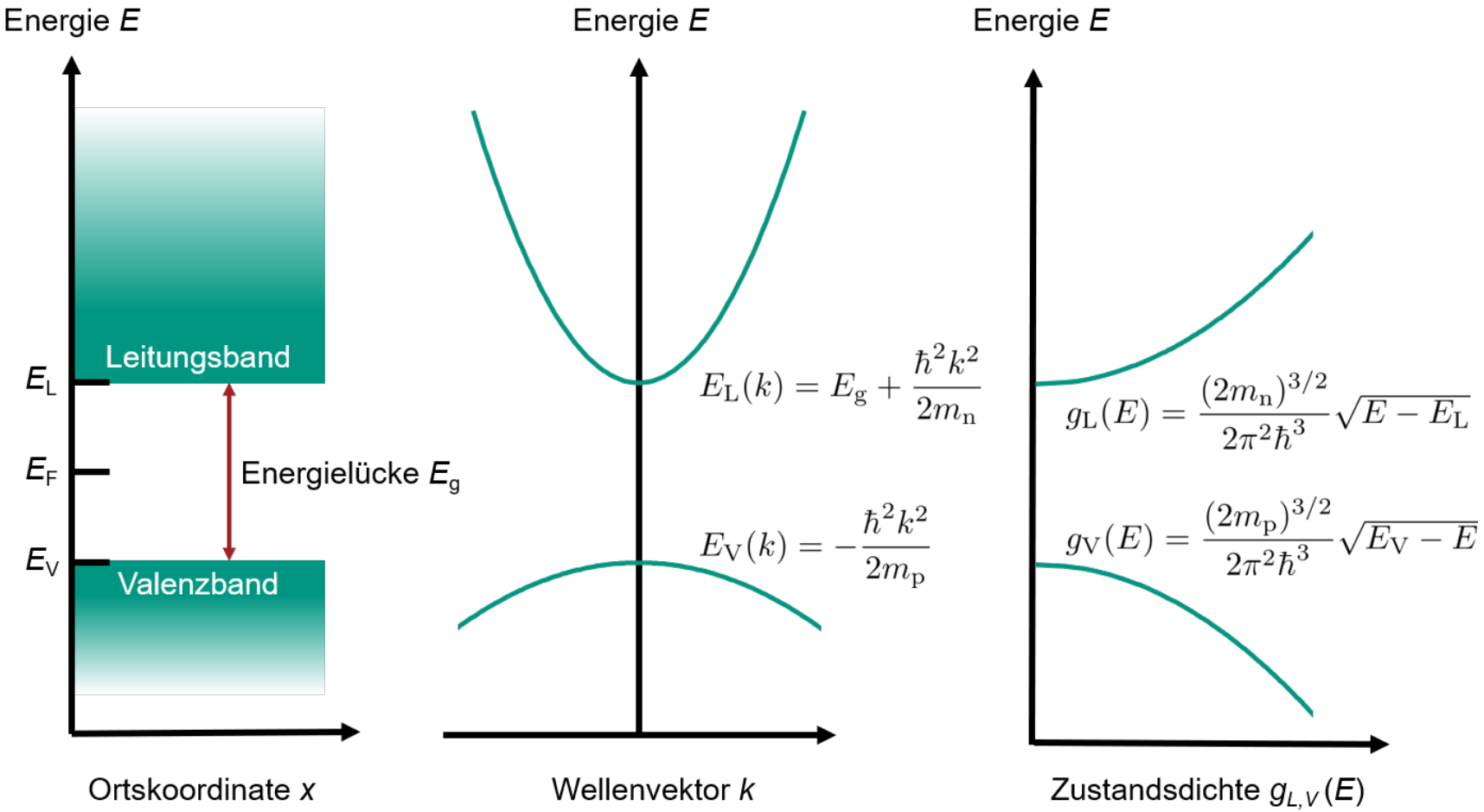


Quadratische Näherung der Bandstruktur



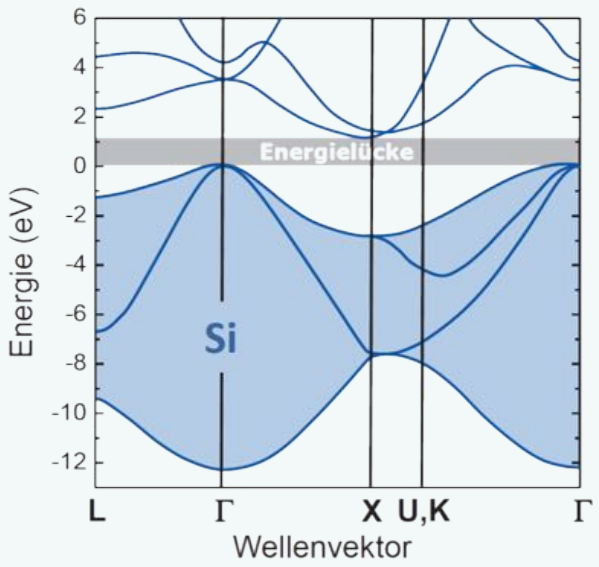


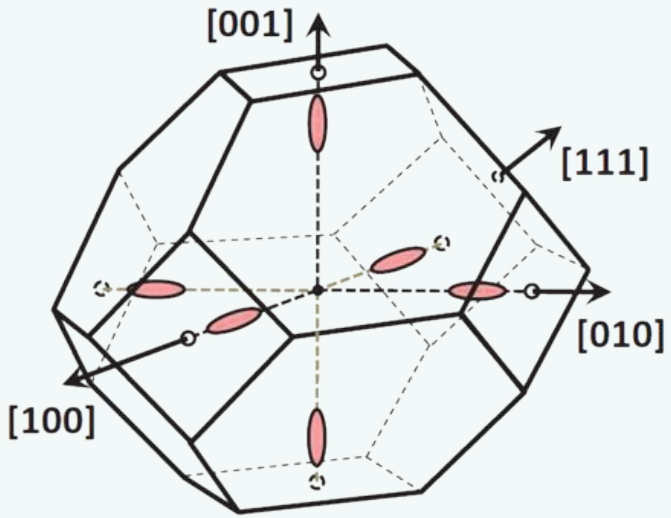
Quadratische Näherung der Bandstruktur

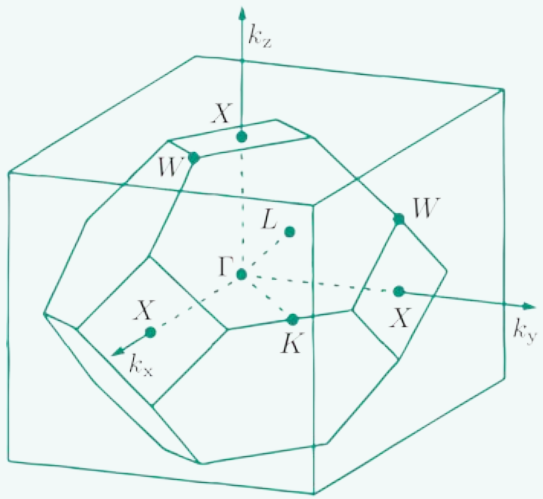


Bandstruktur und effektive Masse von Si

Silizium



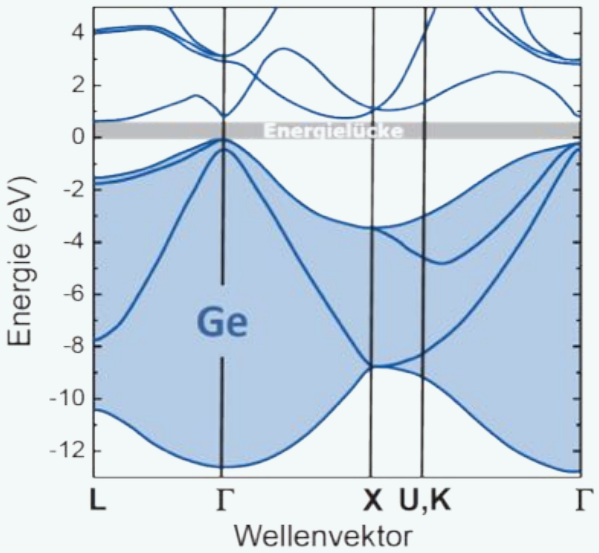


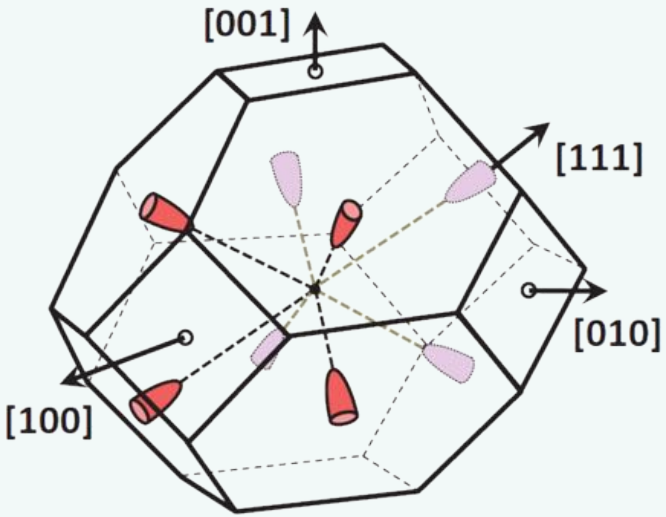


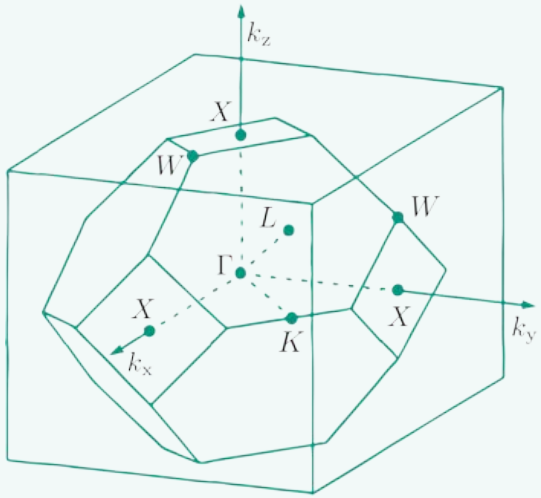
$z = 6$ äquivalente Flächen konstanter Energie an der Bandlücke entlang der *X*-Richtung, die vollständig in der 1. Brillouin-Zone liegen

Bandstruktur und effektive Masse von Si

Germanium

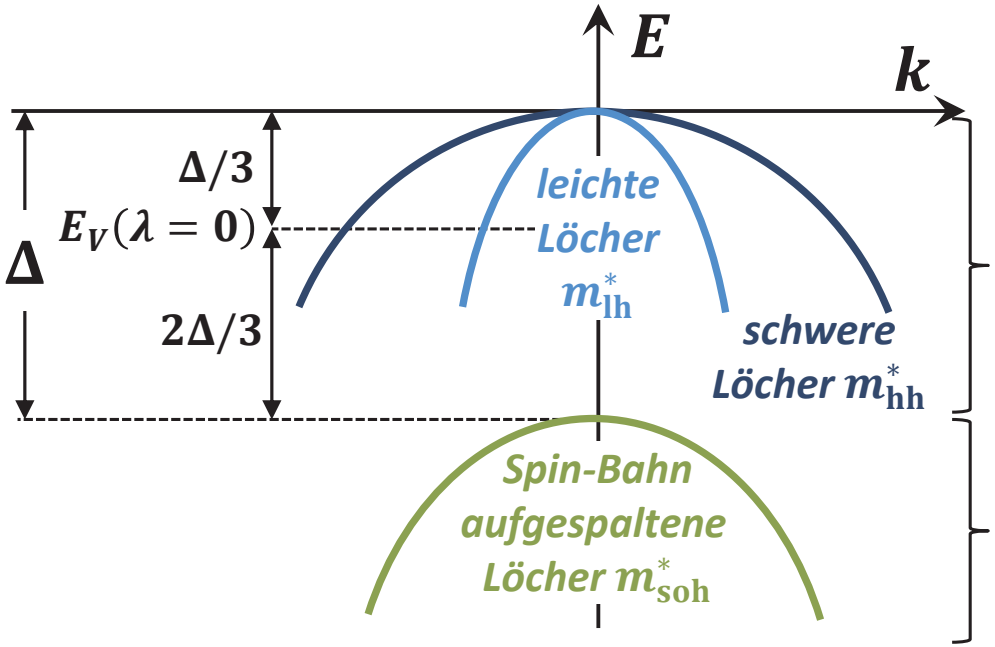






$z = 8$ äquivalente Flächen konstanter Energie an der Bandlücke entlang der *L*-Richtung, die zur Hälfte in der 1. Brillouin-Zone liegen

Bandstruktur am Valenzbandmaximum



$$J = L + S = \frac{3}{2}$$

$$m_J = -\frac{3}{2}, \underbrace{-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}}_{lh}, +\frac{3}{2}$$

hh lh hh

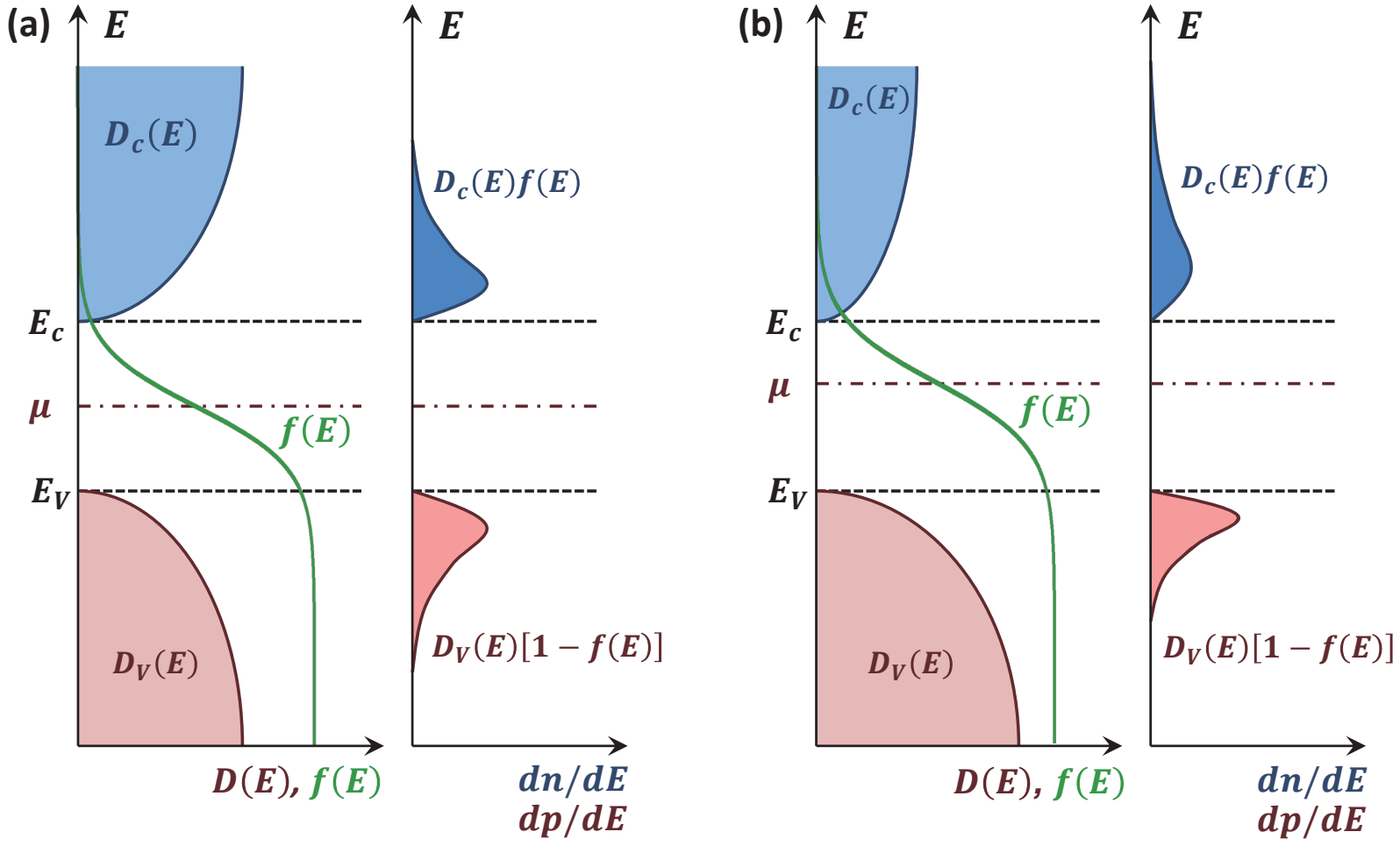
$$J = L - S = \frac{1}{2}$$

$$m_J = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$$

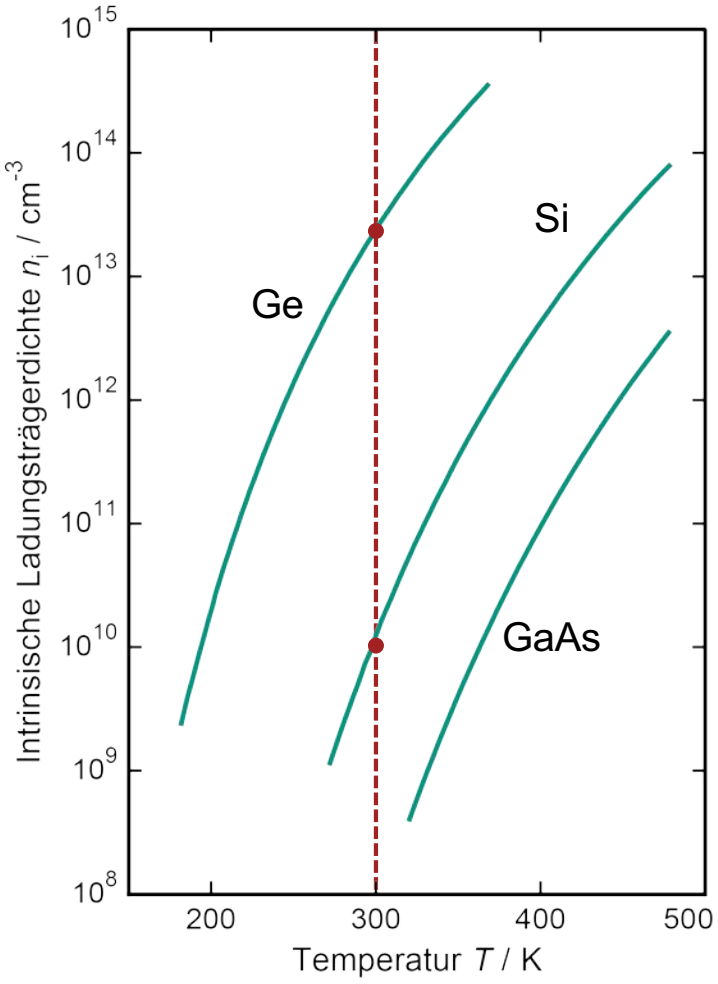
Effektive Massen von Elektronen und Löchern

Halbleiter	m_e^*/m	m_{et}^*/m	m_{el}^*/m	m_{lh}^*/m	m_{hh}^*/m	m_{soh}^*/m	Δ (eV)
Si		0.19	0.98	0.16	0.49	0.24	0.044
Ge		0.081	1.59	0.043	0.33	0.084	0.295
GaAs	0.063			0.082	0.51	0.14	0.341
GaSb	0.041			0.04	0.4	0.15	0.80
GaP		1.12	0.22	0.14	0.79	0.25	0.08
InAs	0.023			0.026	0.41	0.16	0.41
InP	0.073			0.089	0.58	0.17	0.11
InSb	0.014			0.015	0.43	0.19	0.81

Zustandsdichten, Fermi-Funktion und chemisches Potential im intrinsischen Halbleiter



Intrinsische Ladungsträgerkonzentration



Eigenschaften bei T = 300 K

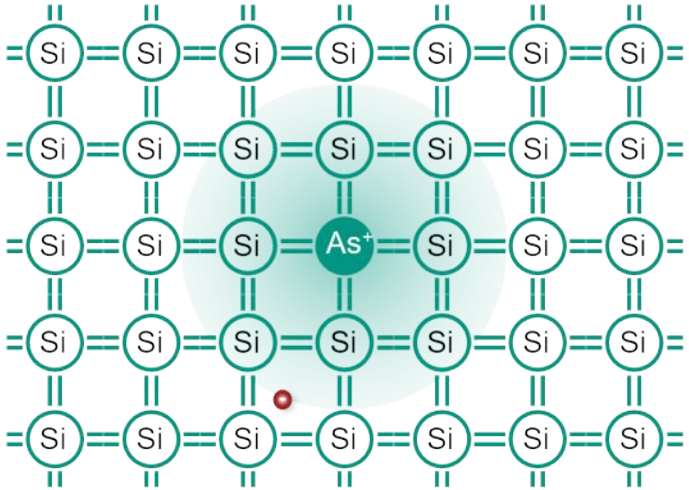
	N_L / cm^{-3}	N_V / cm^{-3}	n_i / cm^{-3}
Si	2.8×10^{19}	1.0×10^{19}	1.5×10^{10}
Ge	1.0×10^{19}	6×10^{18}	2.3×10^{13}
GaAs	4.3×10^{17}	7×10^{18}	1.3×10^{6}

Donatoren und Akzeptoren

Donatoren

Donatoren = Atome, die ein Bindungselektron mehr besitzen als das Wirtsgitteratom, welches sie ersetzen.

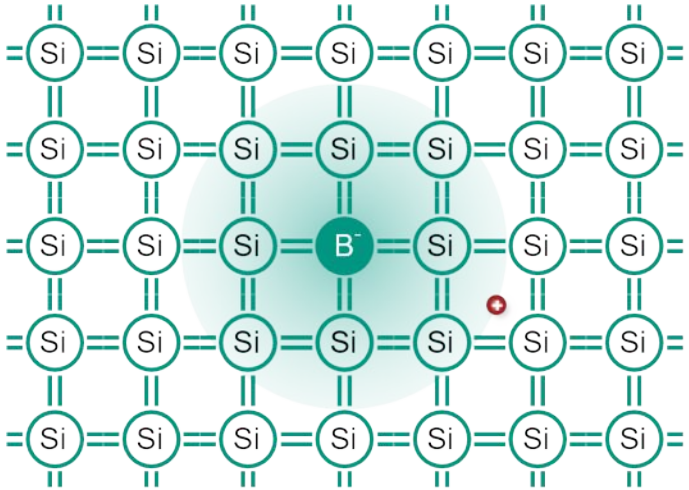
➡ Überschüssiges Elektron wird nicht zur chemischen Bindung benötigt und kann sich daher frei durch den Kristall bewegen.



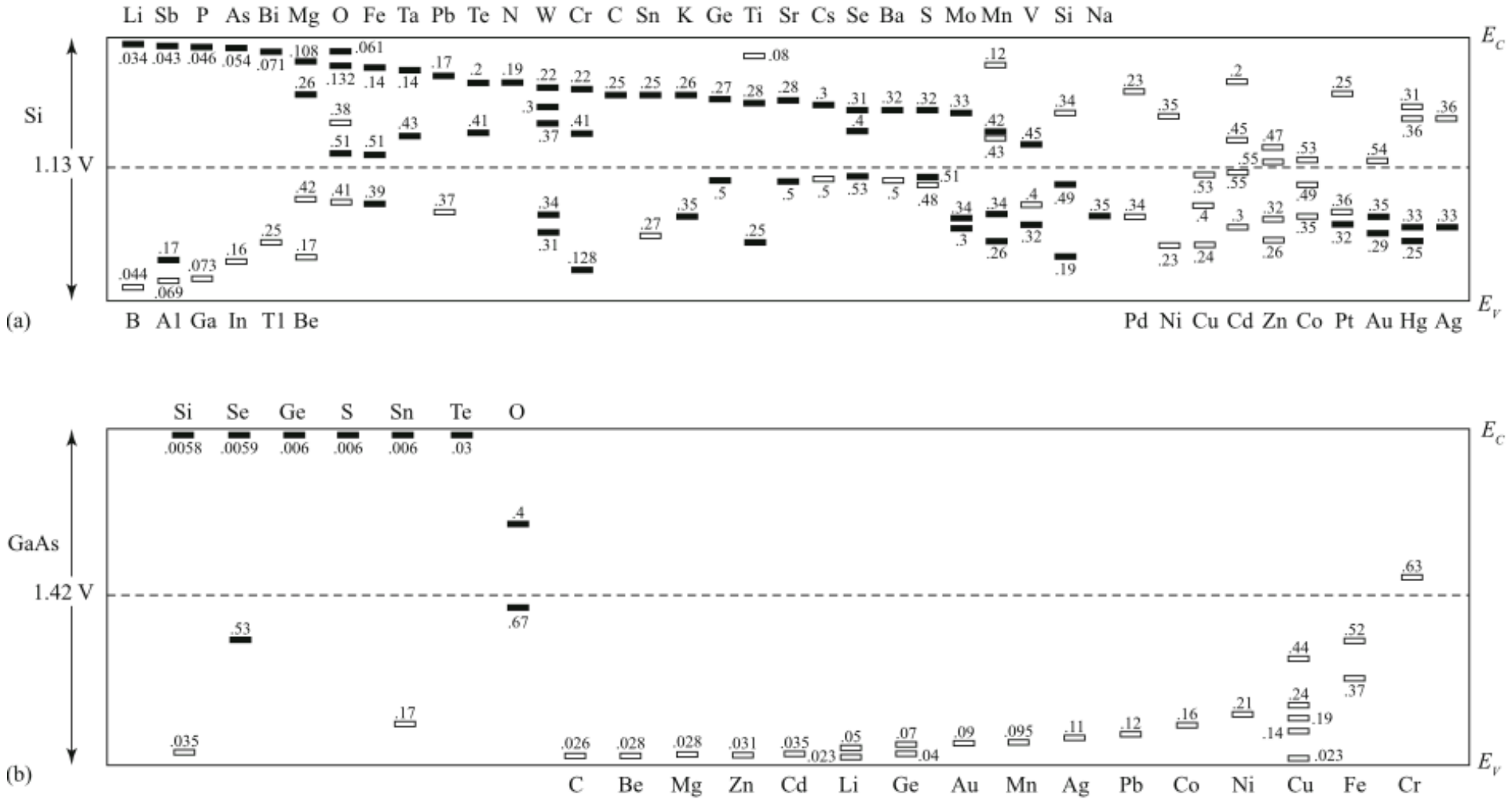
Akzeptoren

Akzeptoren = Atome, die ein Bindungselektron weniger besitzen als das Wirtsgitteratom, welches sie ersetzen.

➡ Das zur Bindung fehlende Elektron wird simultan mit einem Loch erschaffen, das sich frei im Kristall bewegen kann.

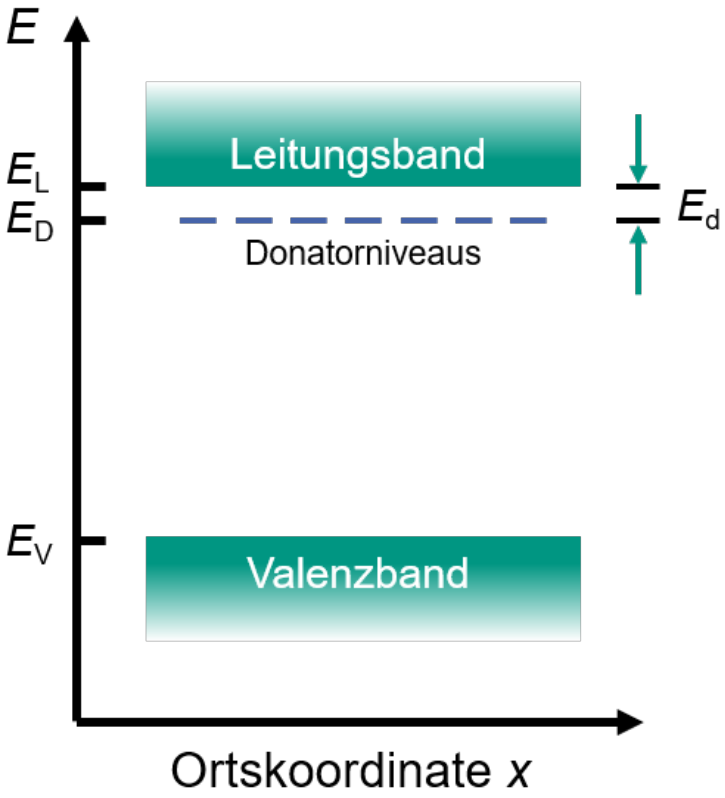


Ionisationsenergien

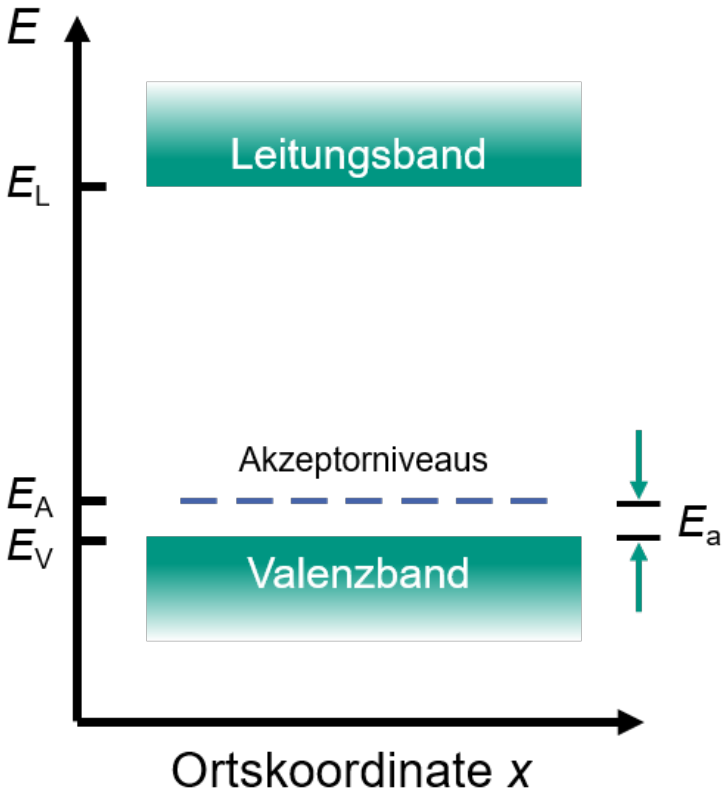


Vereinfachte Darstellung der Energieniveaus bei Dotierung

***n*-dotierter Halbleiter**
(*n*-Halbleiter)



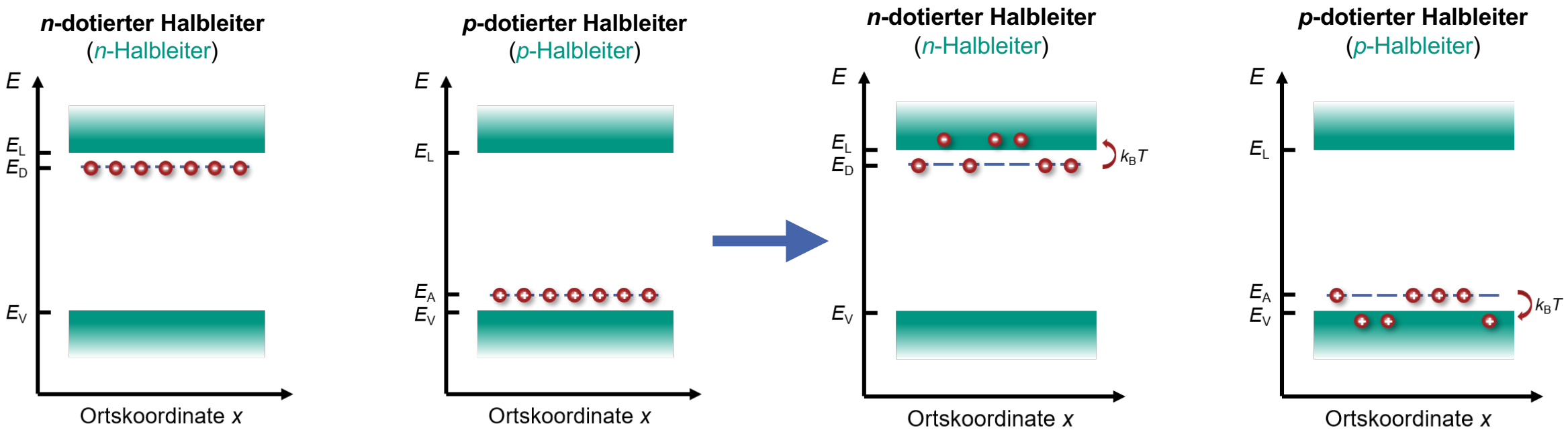
***p*-dotierter Halbleiter**
(*p*-Halbleiter)



Ideale dotierte Halbleiter

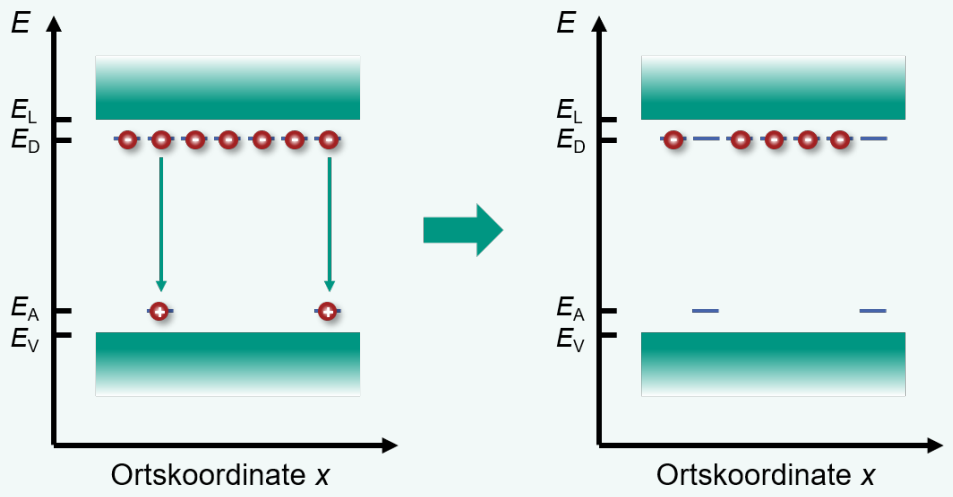
$T = 0\,\mathrm{K}$

$T \neq 0\,\mathrm{K}$



Reale dotierte Halbleiter und Kompensation

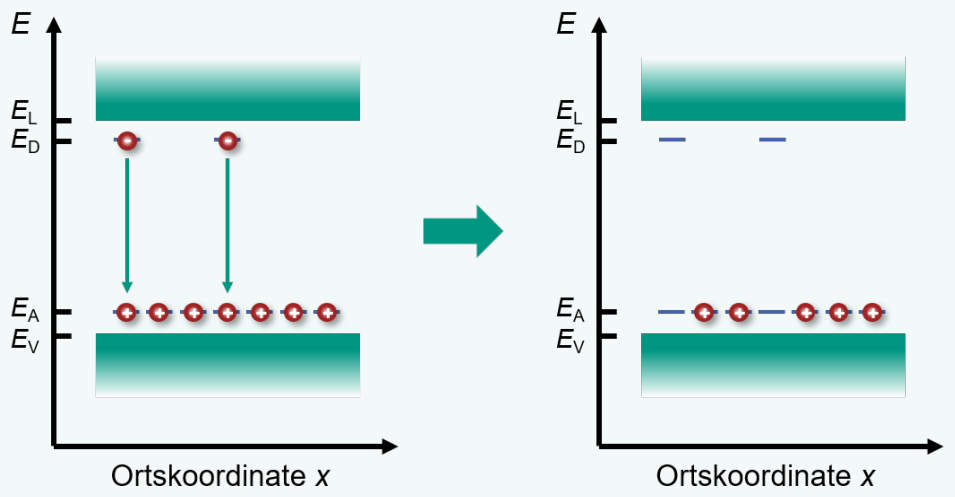
n-Halbleiter



Donatoren: n_D
Akzeptoren: n_A

$$n_A \ll n_D$$

p-Halbleiter



Donatoren: n_D
Akzeptoren: n_A

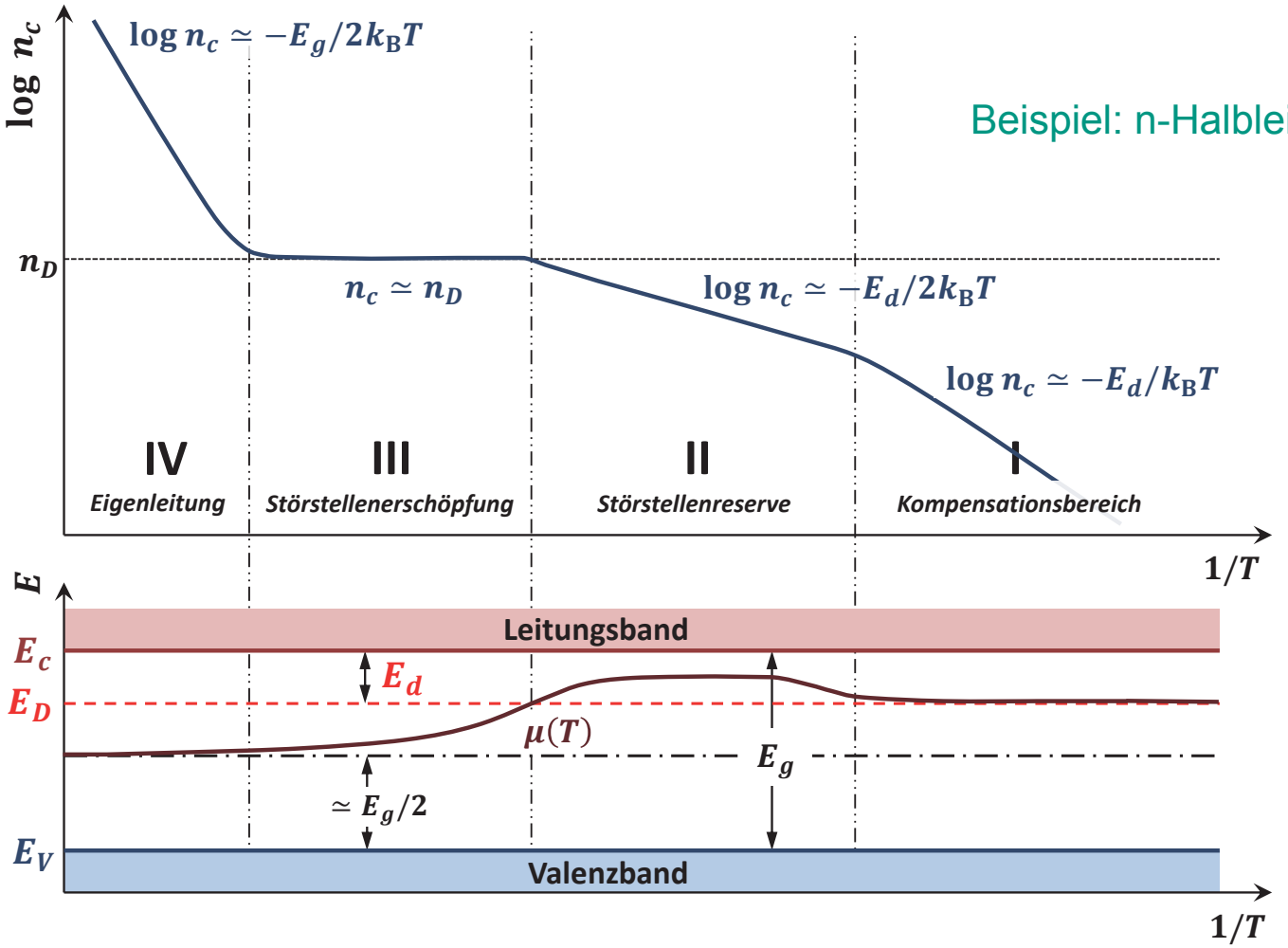
$$n_A \gg n_D$$

Ladungsträgerdichte und chemisches Potential

Beispiel: n-Halbleiter

Ladungsträgerdichte

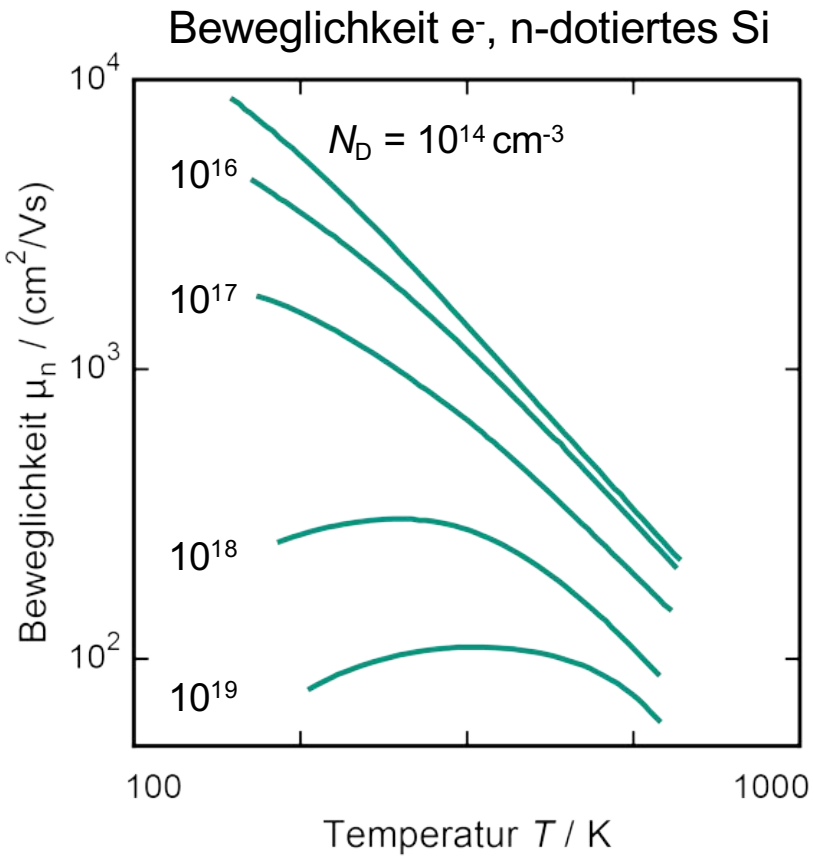
Chemisches Potential

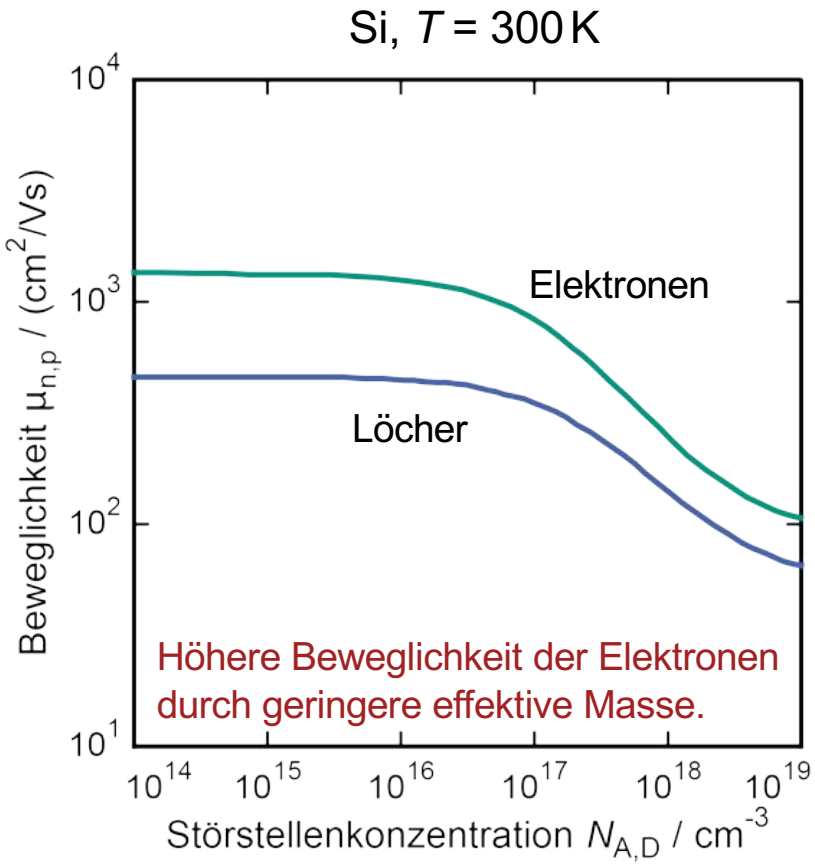


Ladungsträgerdichte und chemisches Potential

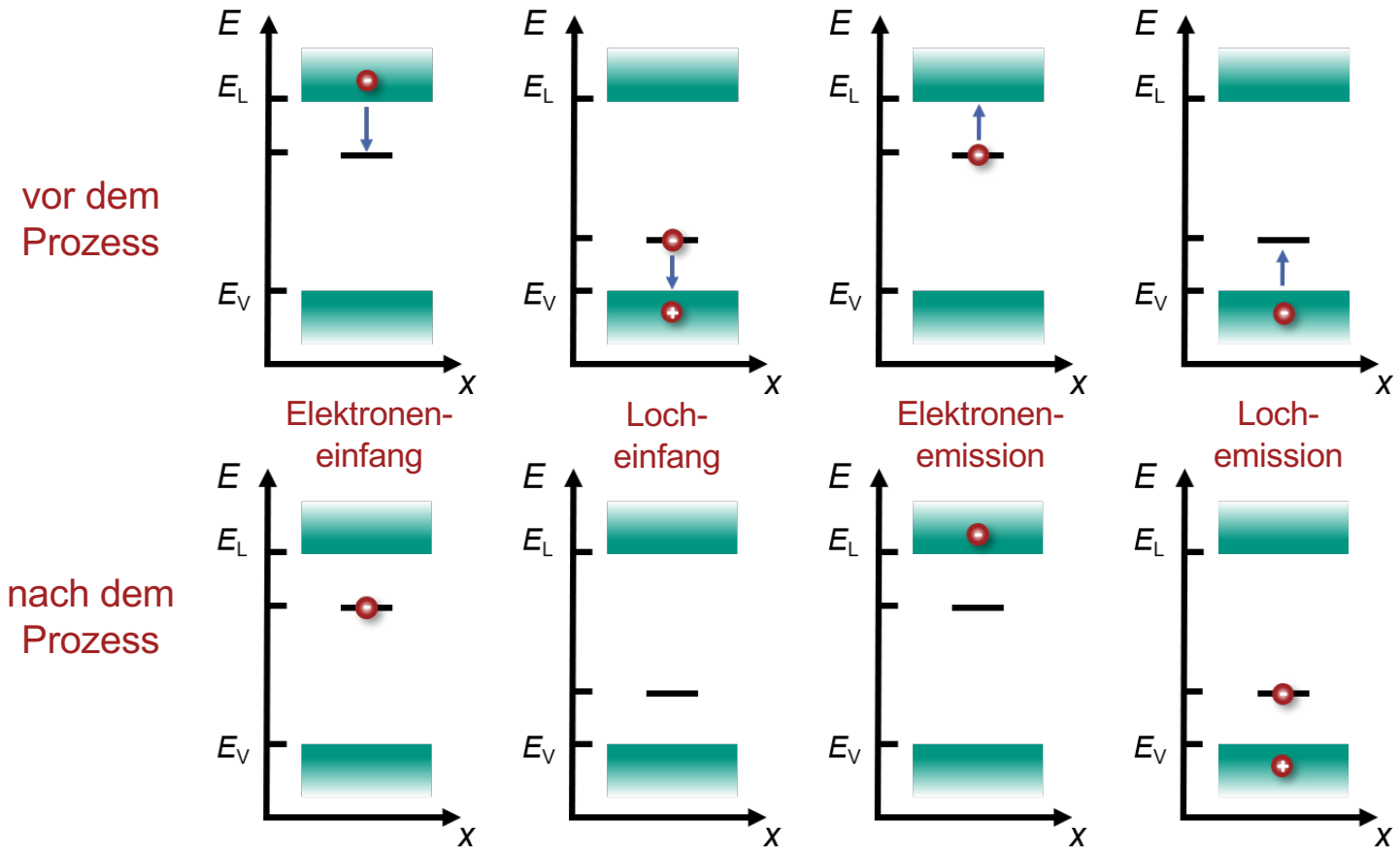
n-Halbleiter	Ladungsträgerdichte	Chemisches Potential
Kompensationsbereich	$n \simeq \frac{n_\mathrm{D}\mathcal{N}_\mathrm{L}}{n_\mathrm{A}} \exp\left(-\frac{E_\mathrm{d}}{k_\mathrm{B}T}\right)$	$\mu \simeq E_\mathrm{L} - E_\mathrm{d} + k_\mathrm{B}T \ln\left(\frac{n_\mathrm{D}}{n_\mathrm{A}}\right)$
Störstellenreserve	$n \simeq \sqrt{n_\mathrm{D}\mathcal{N}_\mathrm{L}} \exp\left(-\frac{E_\mathrm{d}}{2k_\mathrm{B}T}\right)$	$\mu \simeq E_\mathrm{L} - \frac{E_\mathrm{d}}{2} - \frac{k_\mathrm{B}T}{2} \ln\left(\frac{\mathcal{N}_\mathrm{L}}{n_\mathrm{D}}\right)$
Störstellenerschöpfung	$n \simeq n_\mathrm{D}$	$\mu \simeq E_\mathrm{L} - k_\mathrm{B}T \ln\left(\frac{\mathcal{N}_\mathrm{L}}{n_\mathrm{D}}\right)$
Eigenleitung	$n \simeq \sqrt{\mathcal{N}_\mathrm{L}\mathcal{N}_\mathrm{V}} \exp\left(-\frac{E_\mathrm{g}}{2k_\mathrm{B}T}\right)$	$\mu \simeq E_\mathrm{V} + \frac{1}{2}E_\mathrm{g} + \frac{3}{4}k_\mathrm{B}T \ln\left(\frac{m_\mathrm{p}}{m_\mathrm{n}}\right)$

Beweglichkeit von Elektronen und Löchern

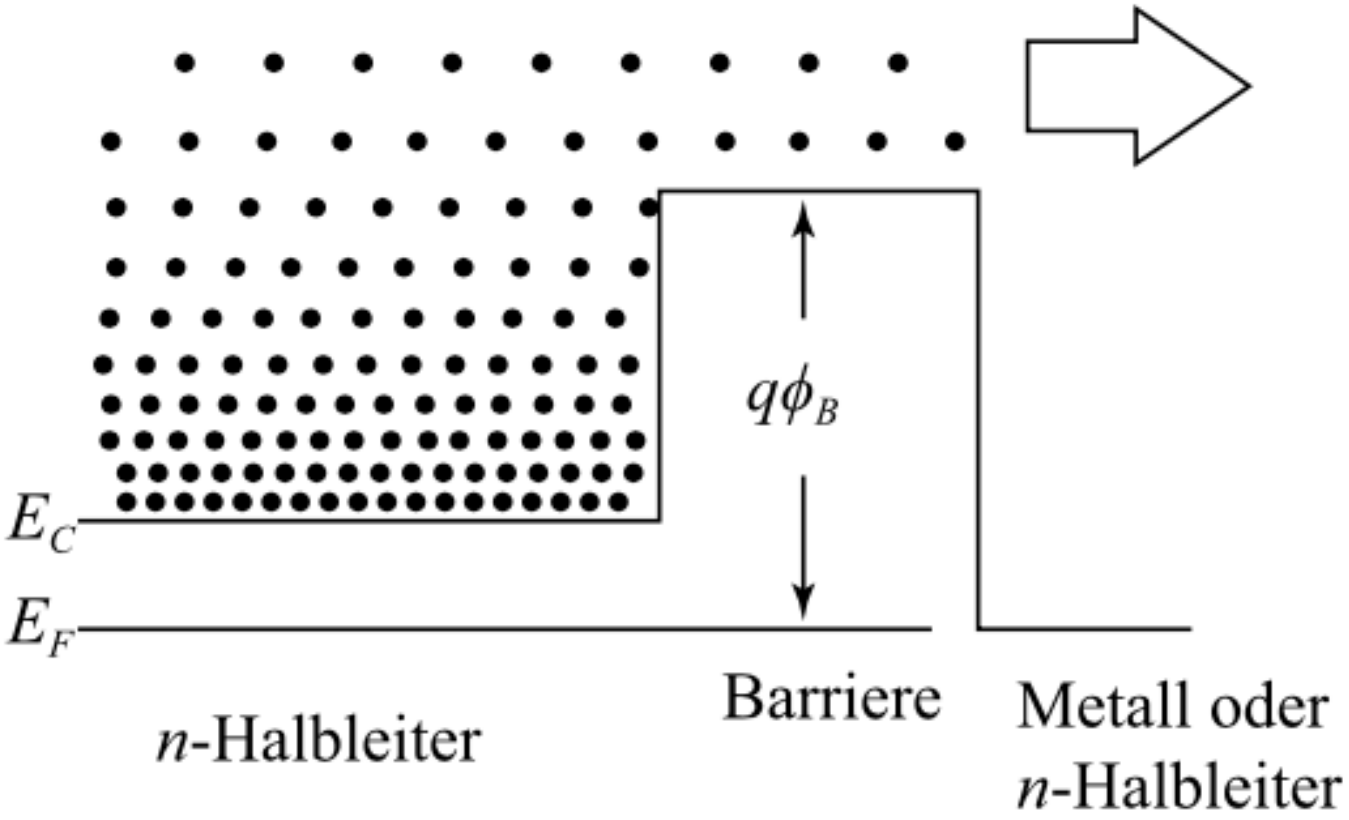




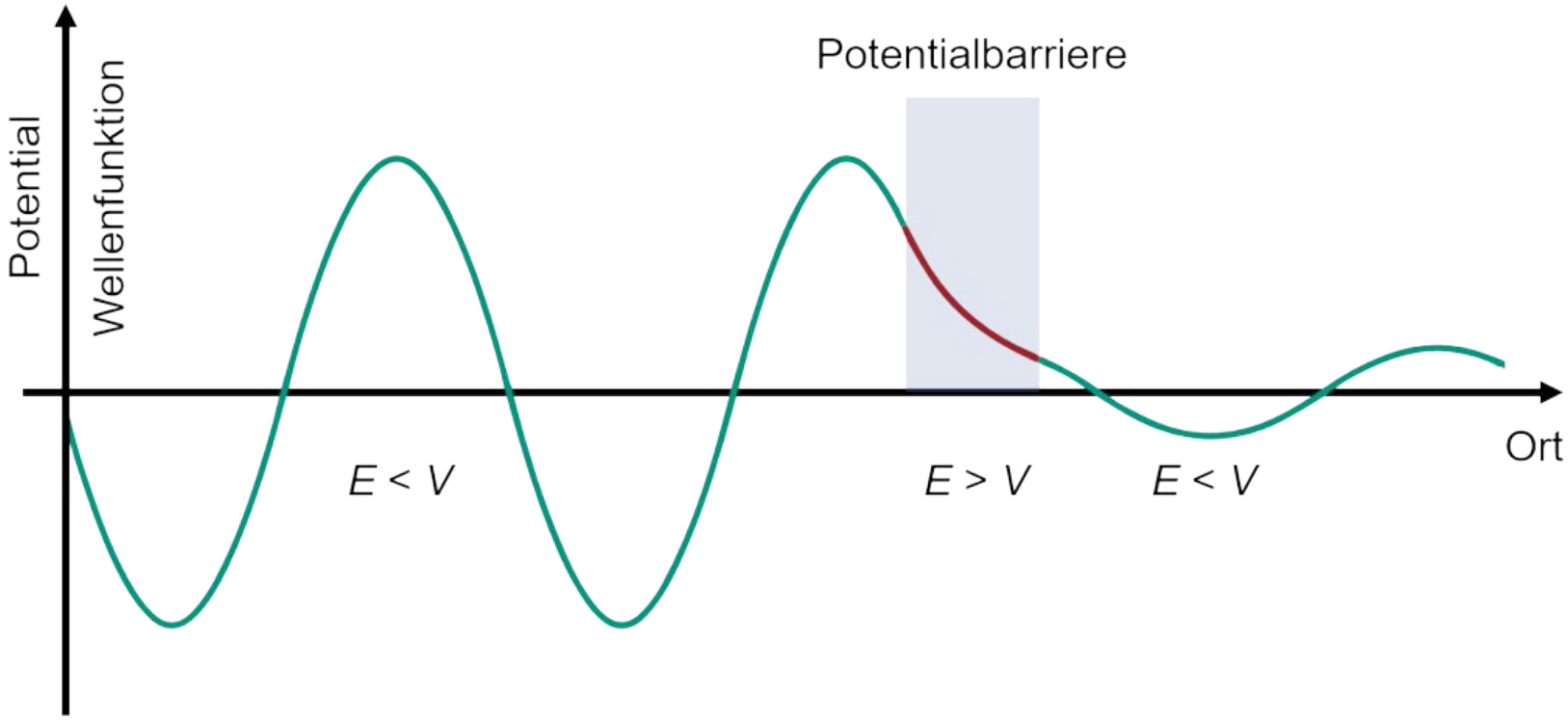
Verschiedene Prozesse bei der Generation bzw. Rekombination über Störstellenniveaus



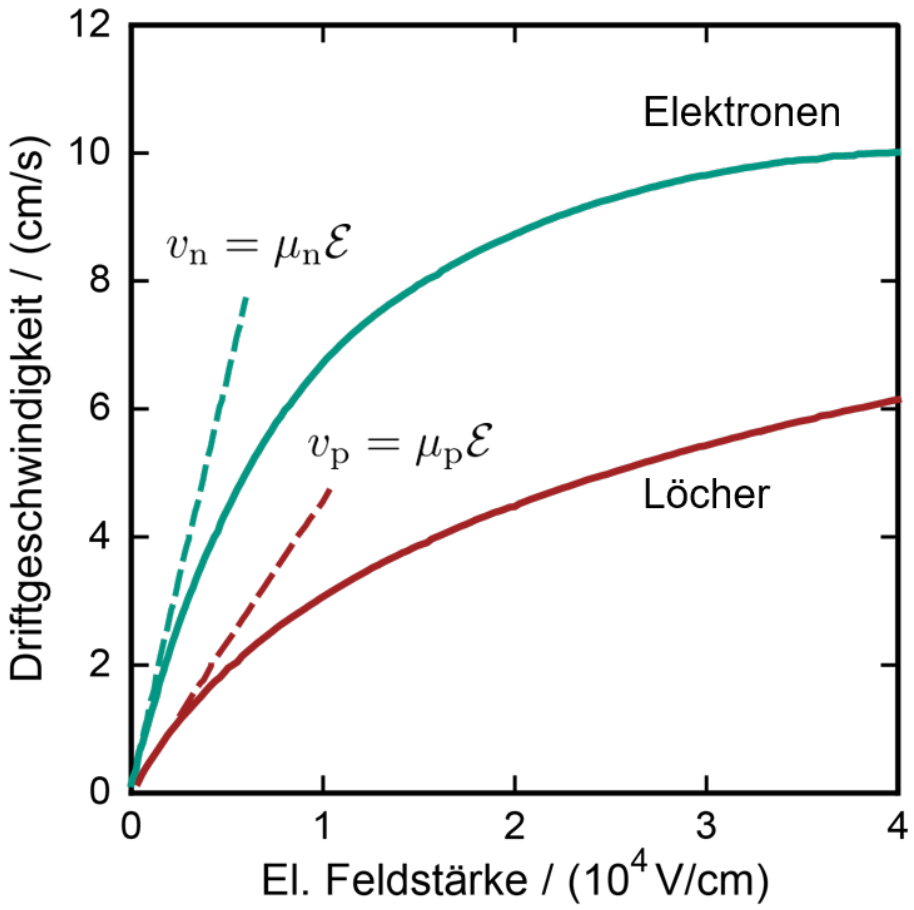
Thermionische Emission



Quantenmechanischer Tunneleffekt

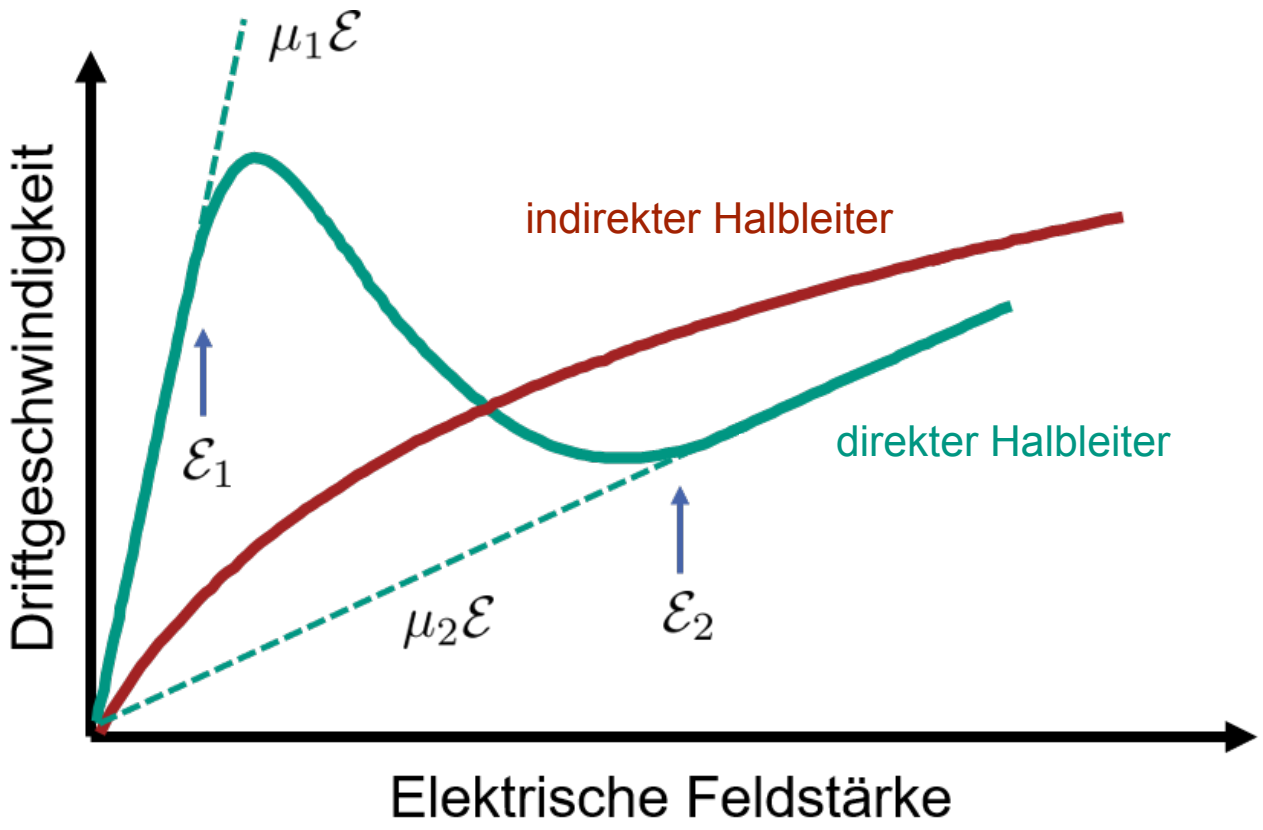


Driftgeschwindigkeit für Silizium



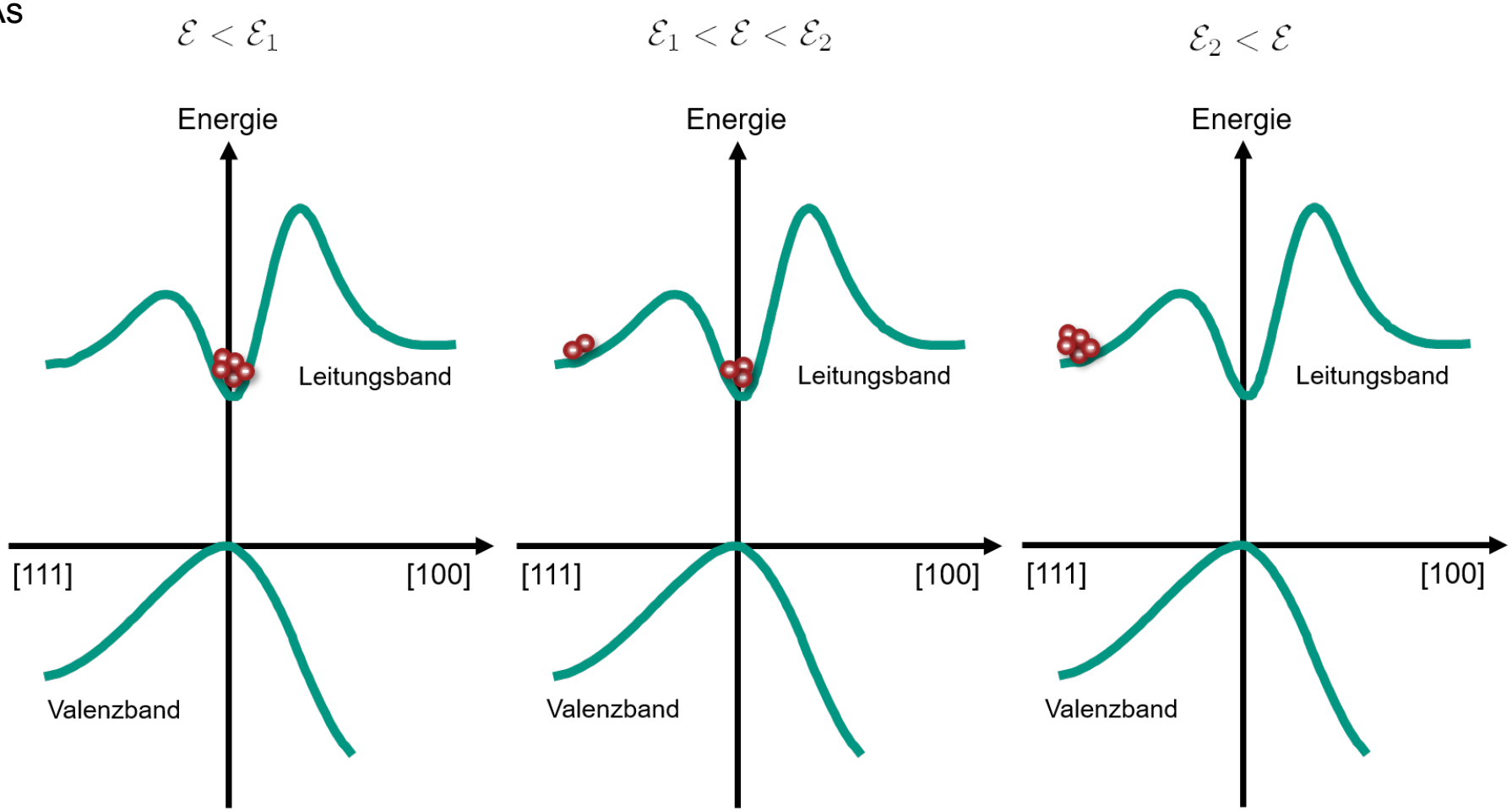
	Elektronen	Löcher
v_s	10^7 cm/s	
E_0	7×10^3 V/cm	2×10^4 V/cm
γ	2	1

Driftgeschwindigkeit für direkte und indirekte Halbleiter

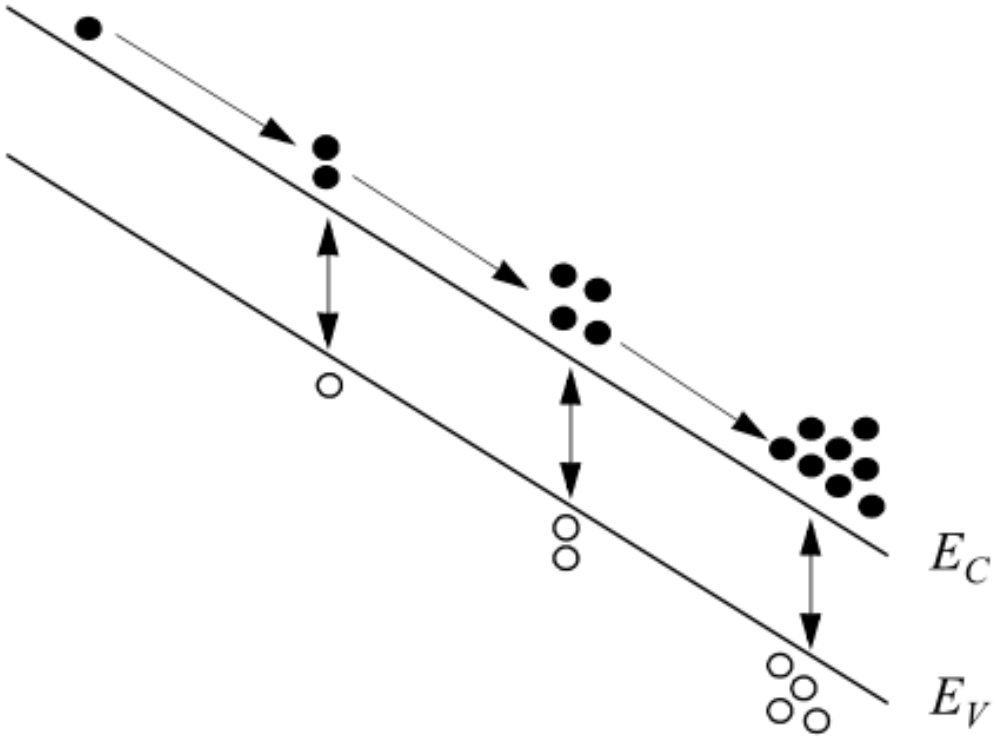


Driftgeschwindigkeit bei direkten Halbleitern

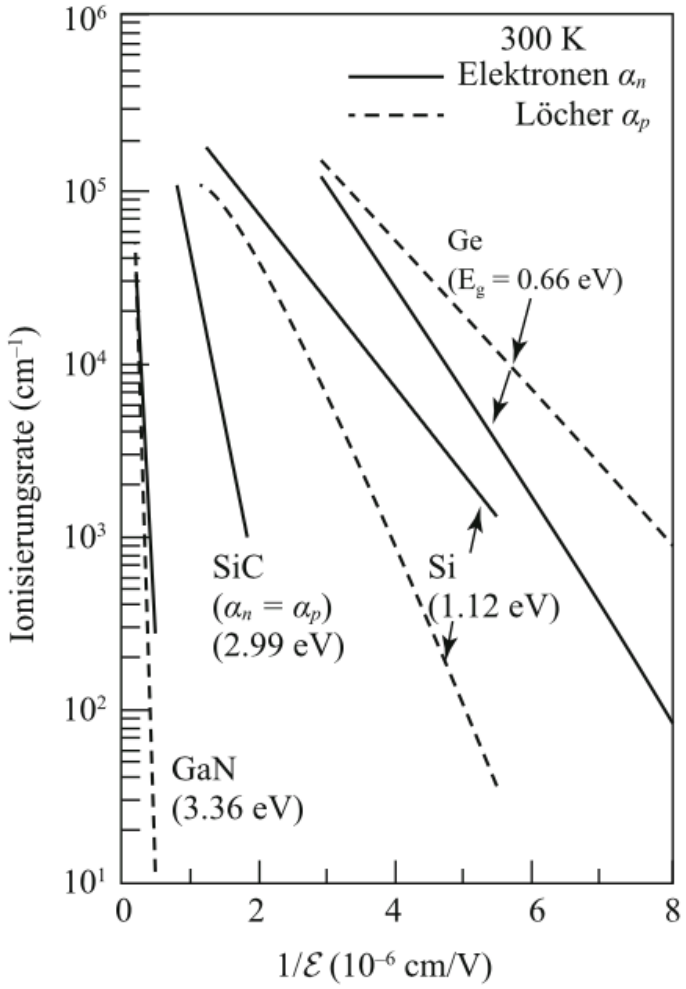
Beispiel: GaAs

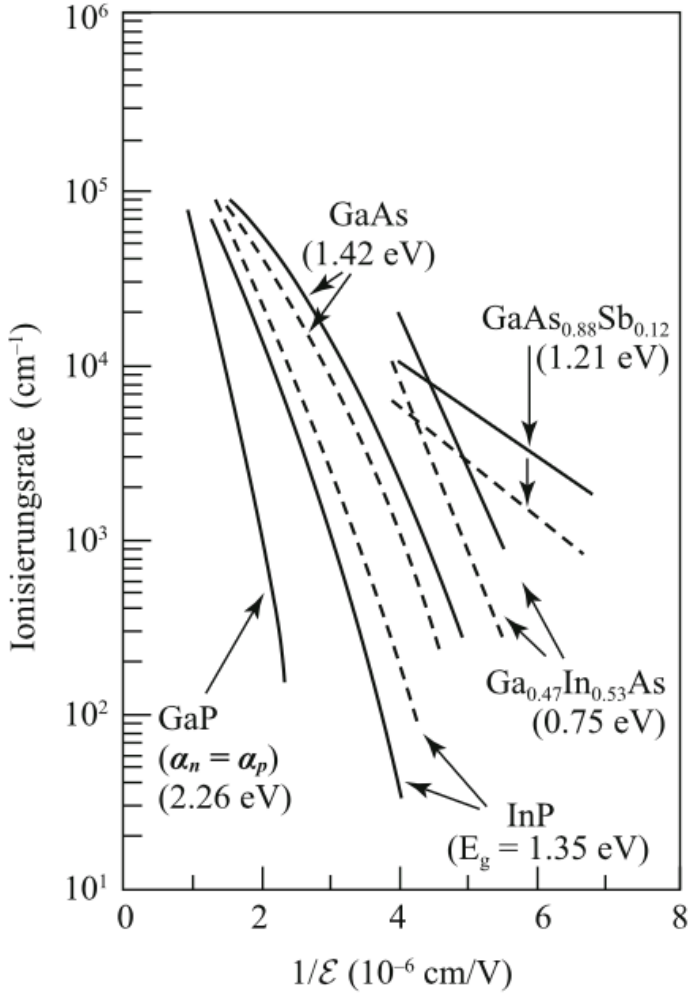


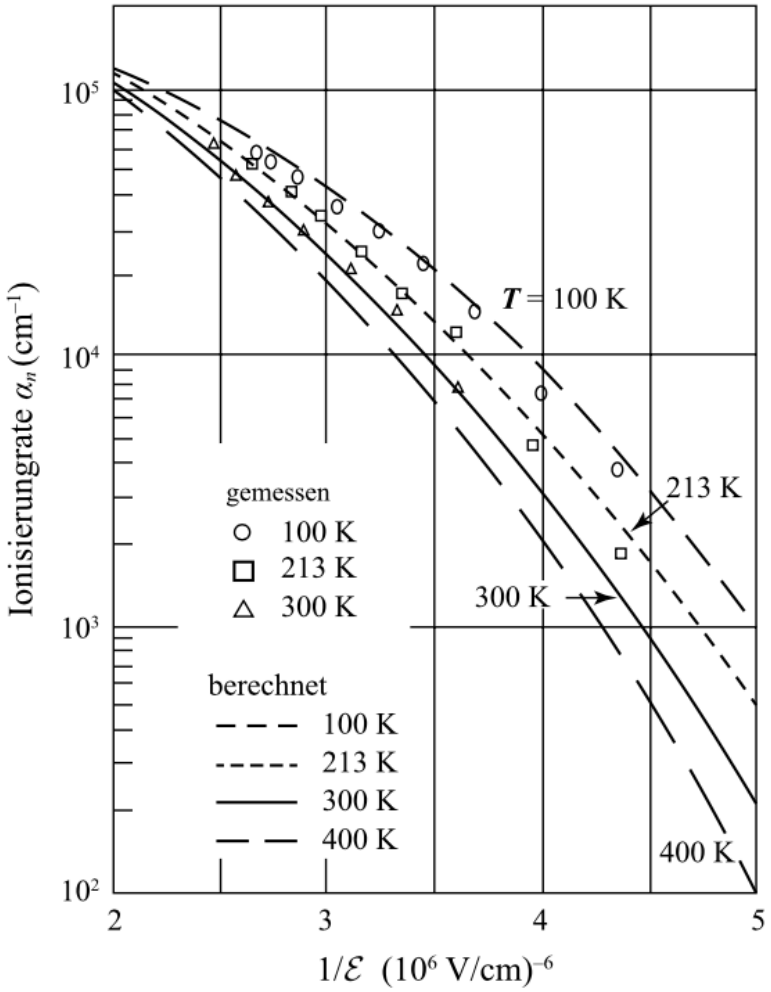
Stoßionisation und Lawineneffekt



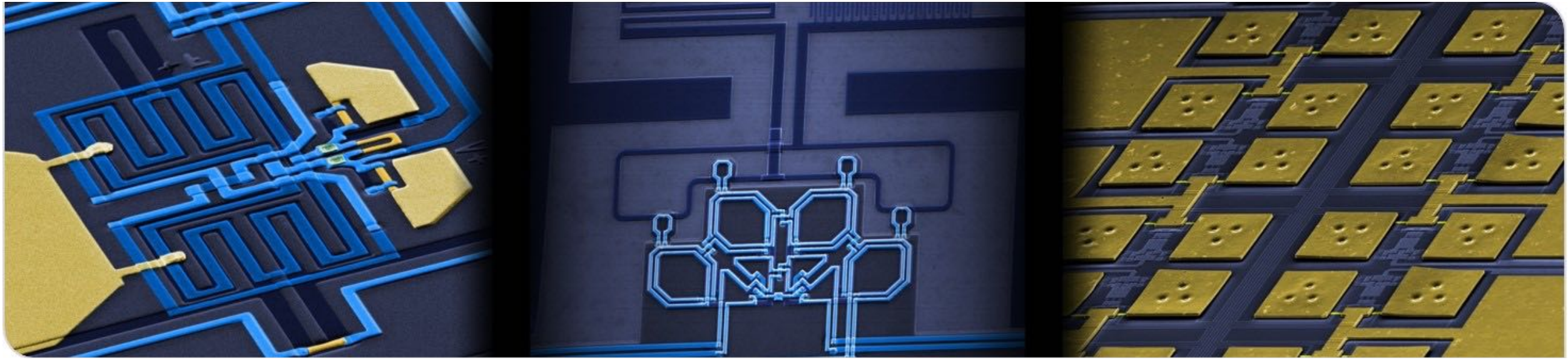
Ionisationsraten







Bauelemente der Elektrotechnik

Prof. Dr. rer. nat. Sebastian Kempf

Wintersemester 2021/22