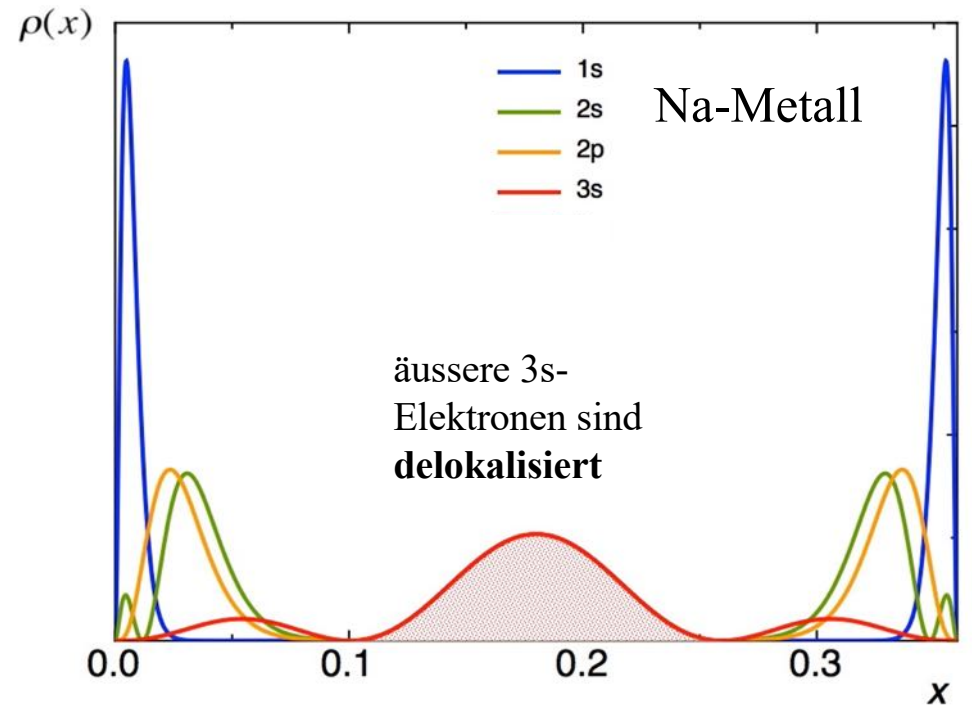
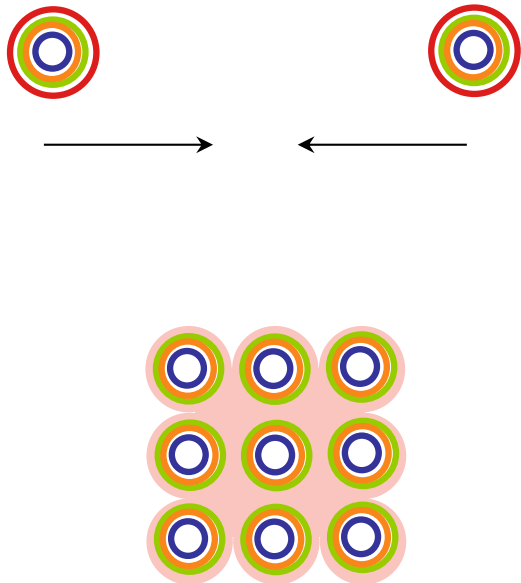
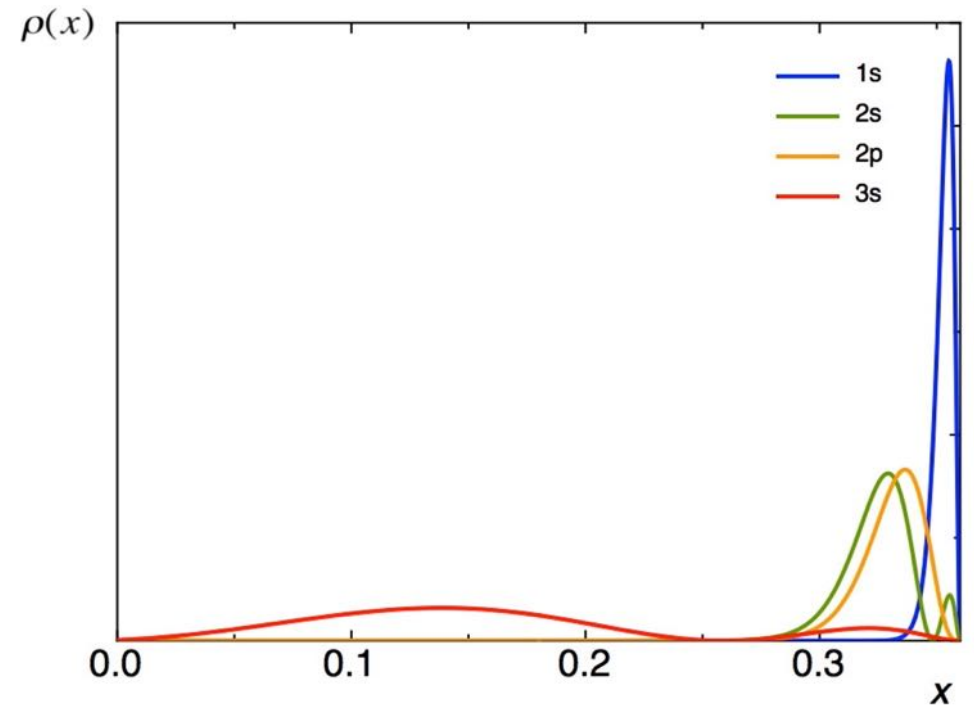
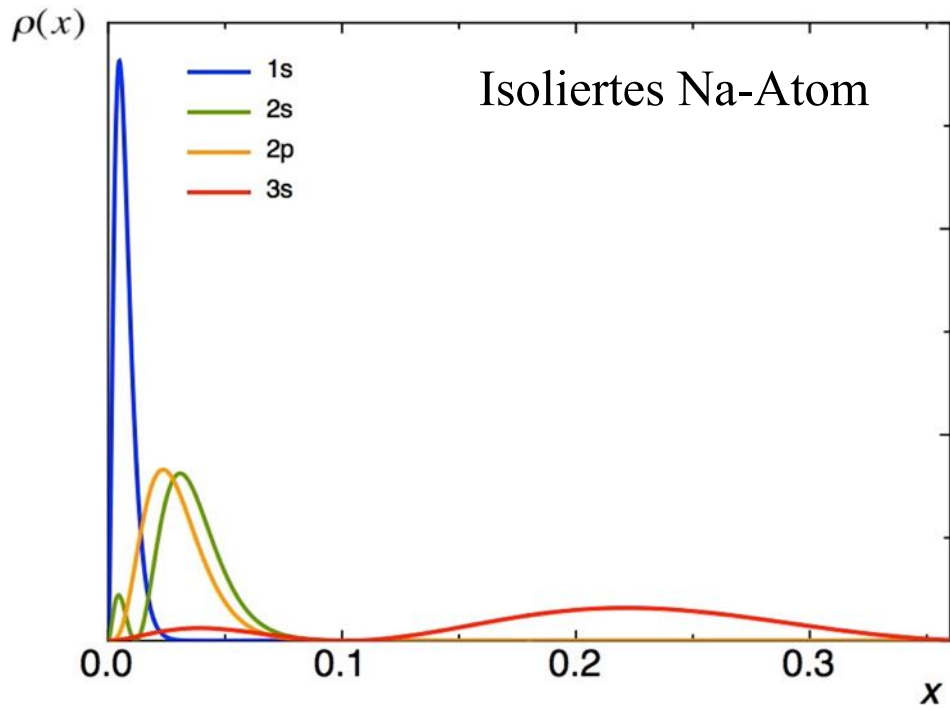
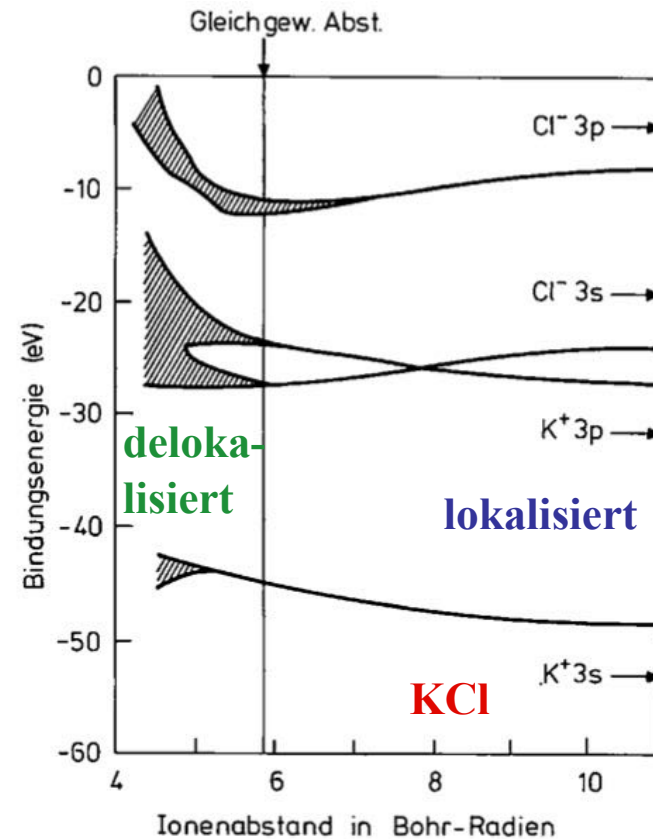
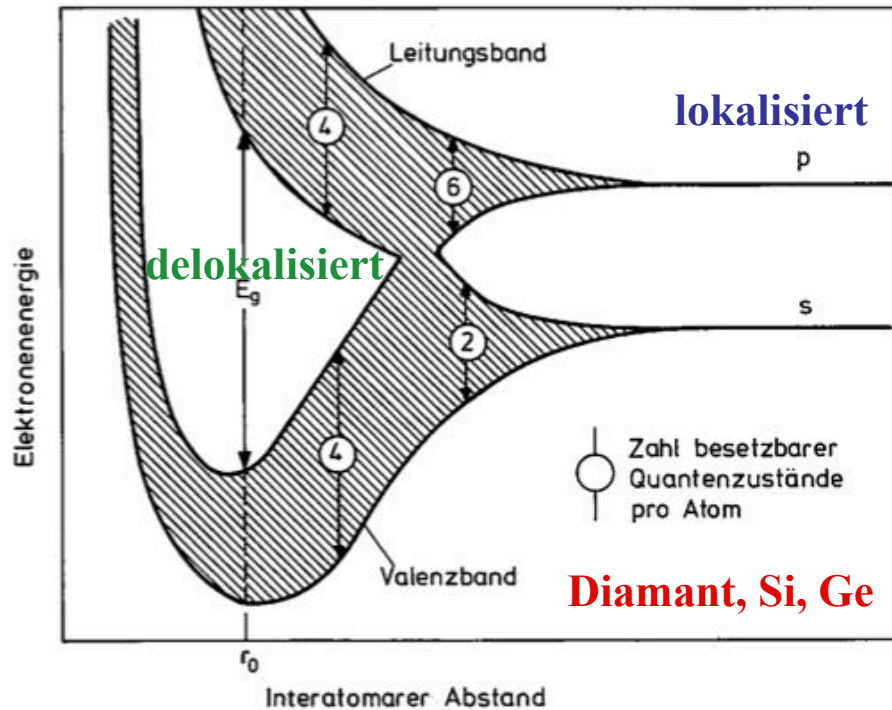




VII. Metalle, Halbleiter und Isolatoren



Übergang von vielen weit entfernten Atomen mit lokalisierten Elektronenzuständen zu einem Festkörper mit delokalisierten Elektronen in Energiebändern



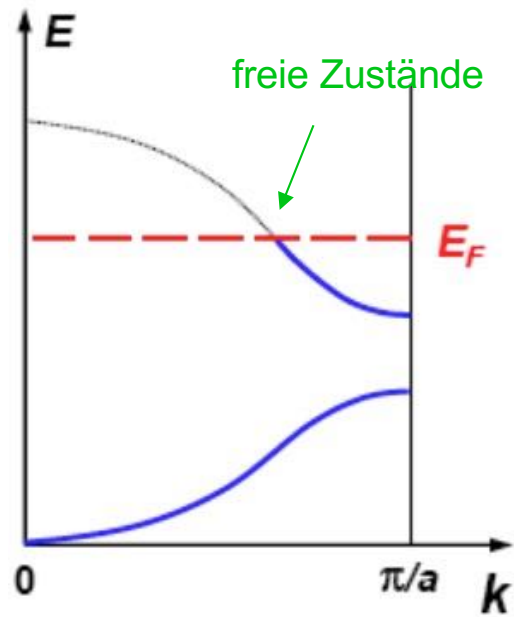
Metalle:

Beispiel: Wasserstoff-"Metall":

Übergang vom Isolator zum Metall erwartet, sobald Gitterkonstante $a \leq 4.5r_{Bohr}$,
 = Mott'scher Metall-Isolator Übergang.

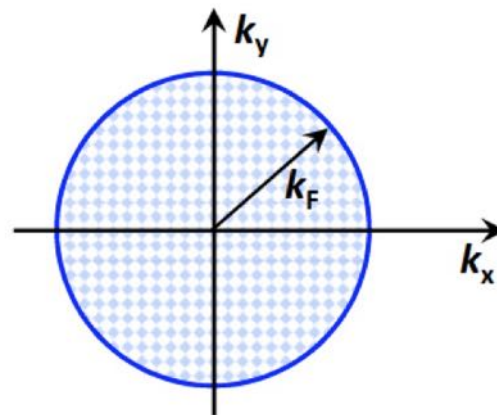
$T = 0$

Metall:

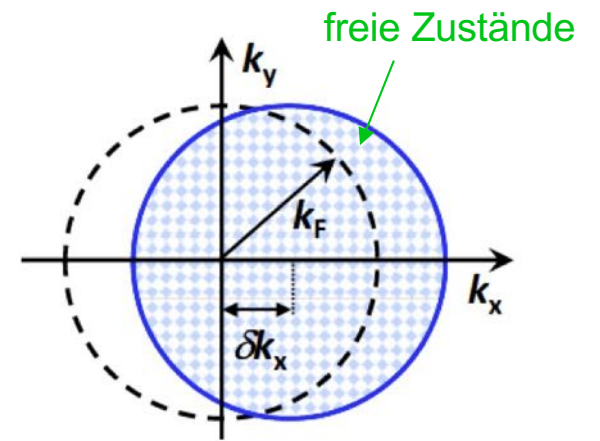


Fermi-Kugel im elektrischen Feld

$$\vec{E} = 0$$

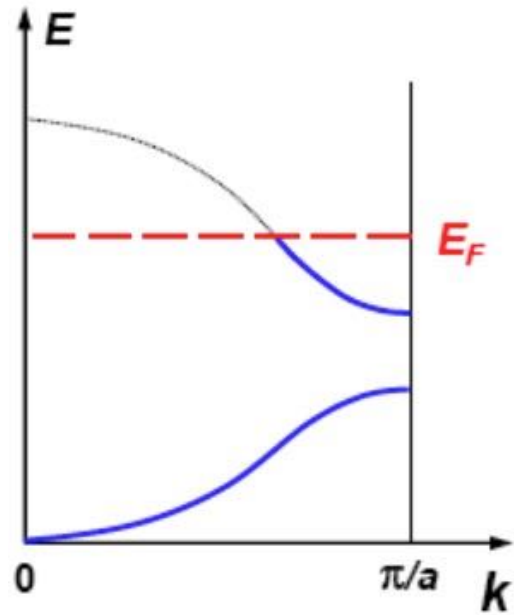


$$\vec{E} \neq 0$$

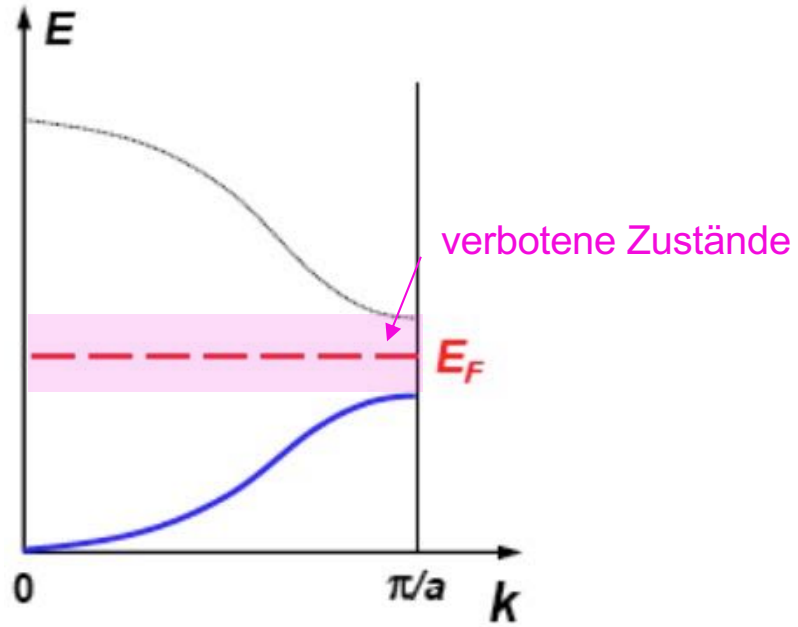


$T = 0$

Metall:



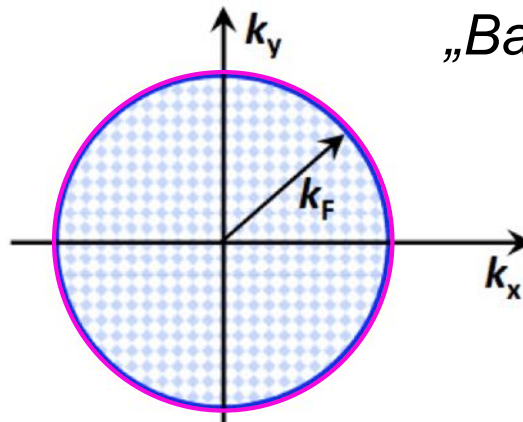
Isolator/Halbleiter:



Fermi-Kugel im elektrischen Feld

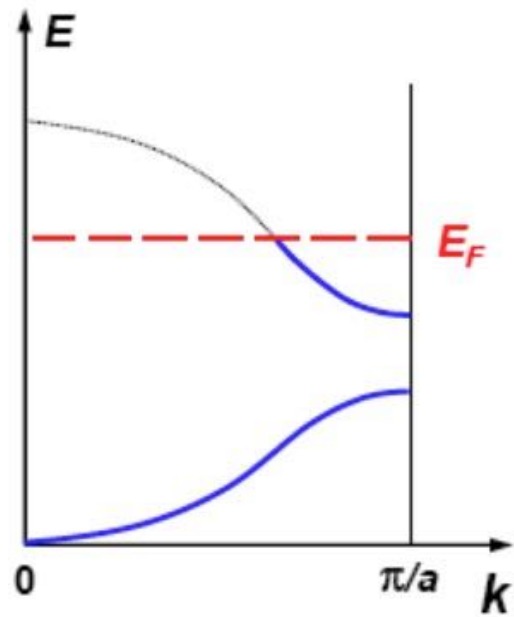
$$\vec{E} = 0 \quad \vec{E} \neq 0$$

„Bandisolator“

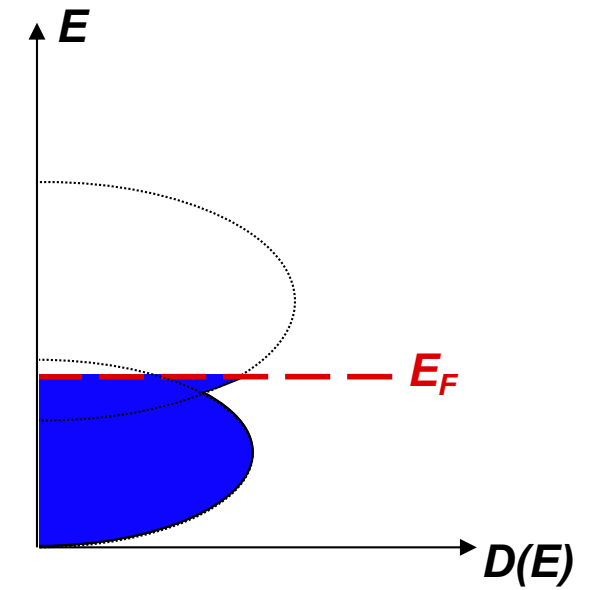
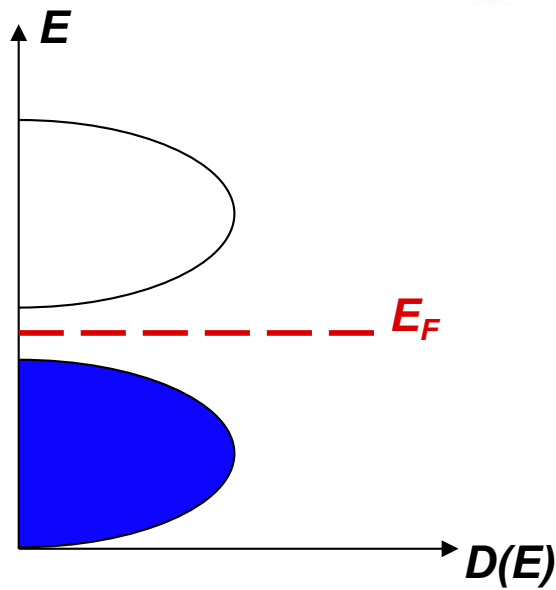
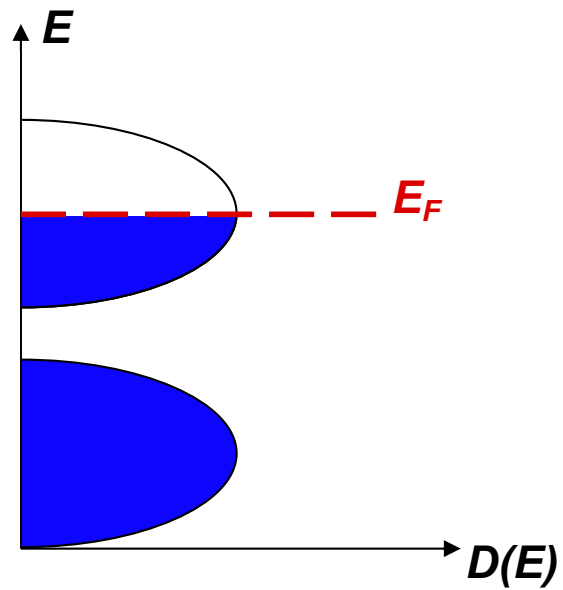
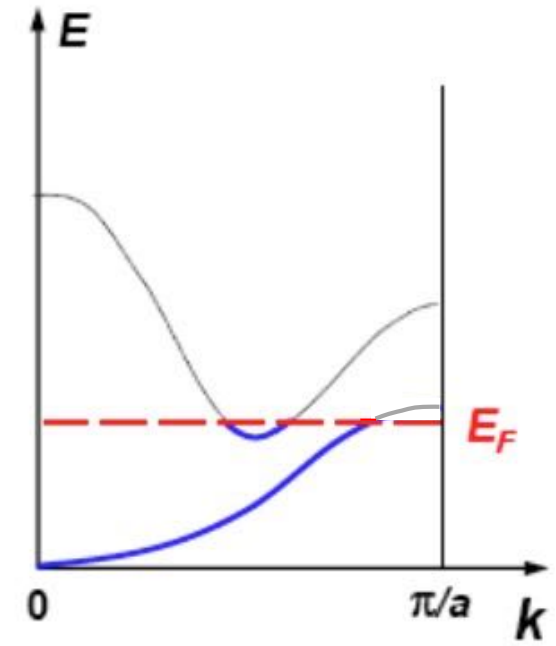
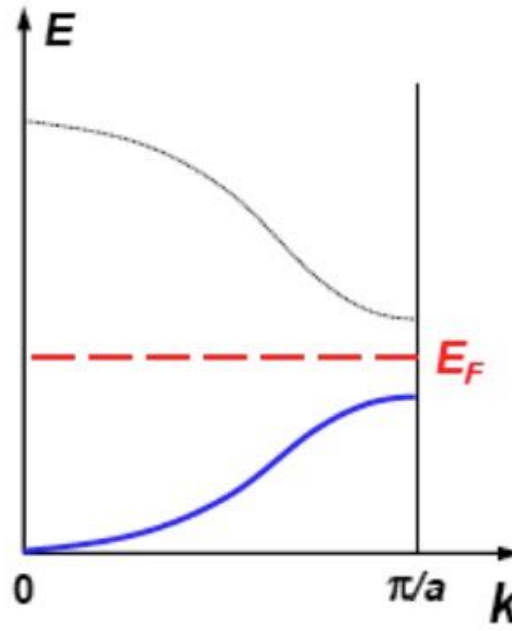


$T = 0$

Metall:

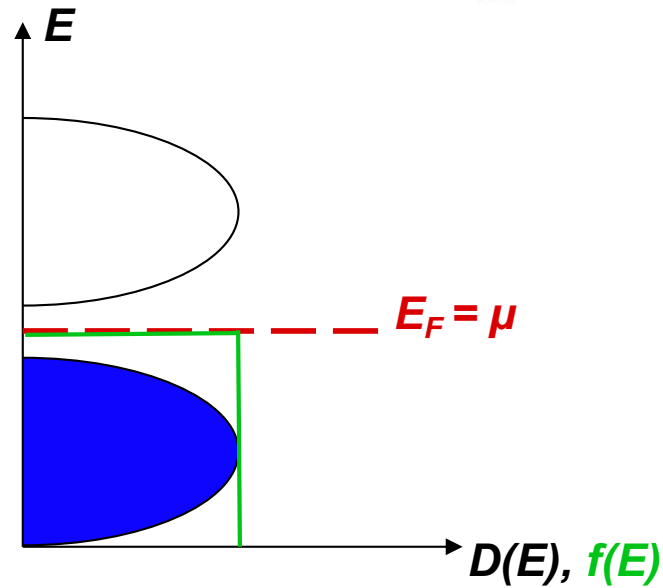
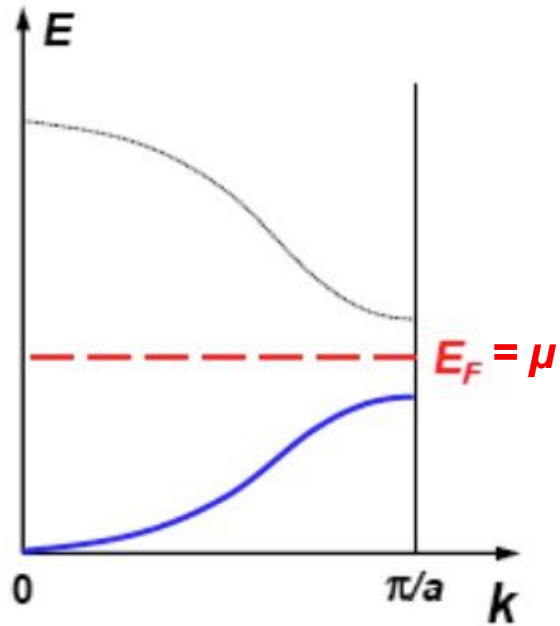


Isolator/Halbleiter:

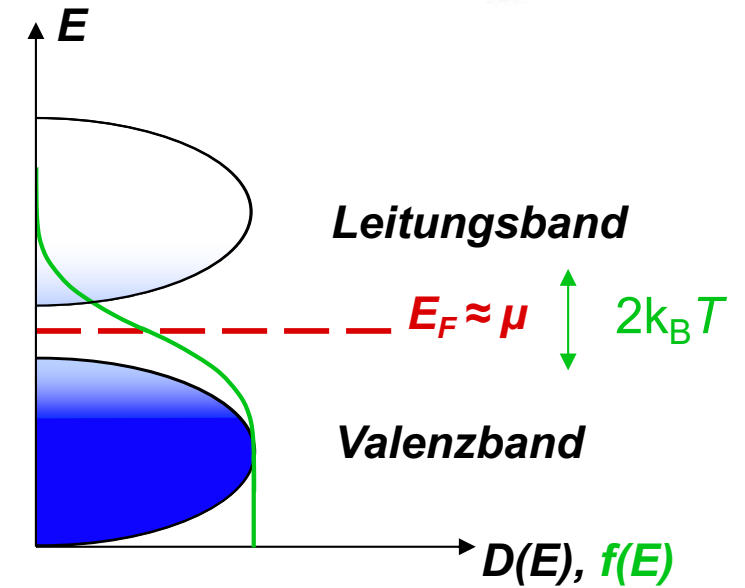
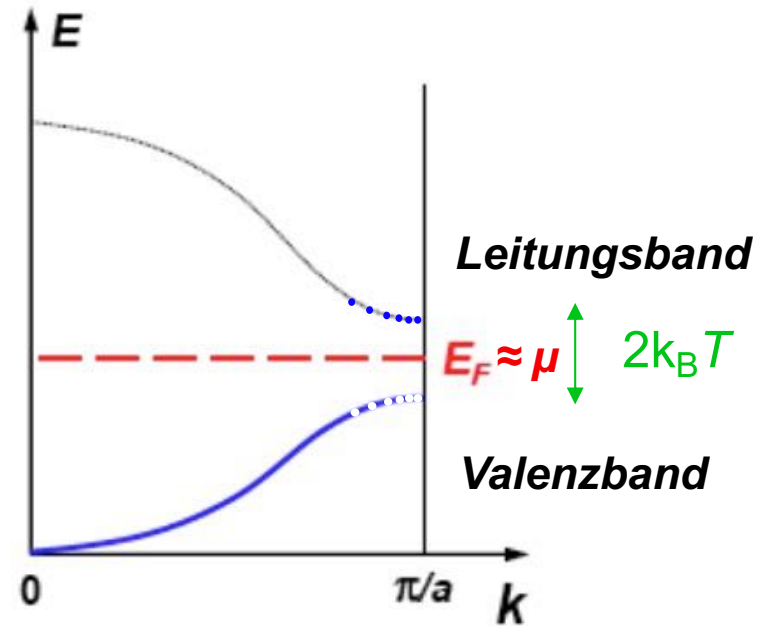


$$T = 0$$

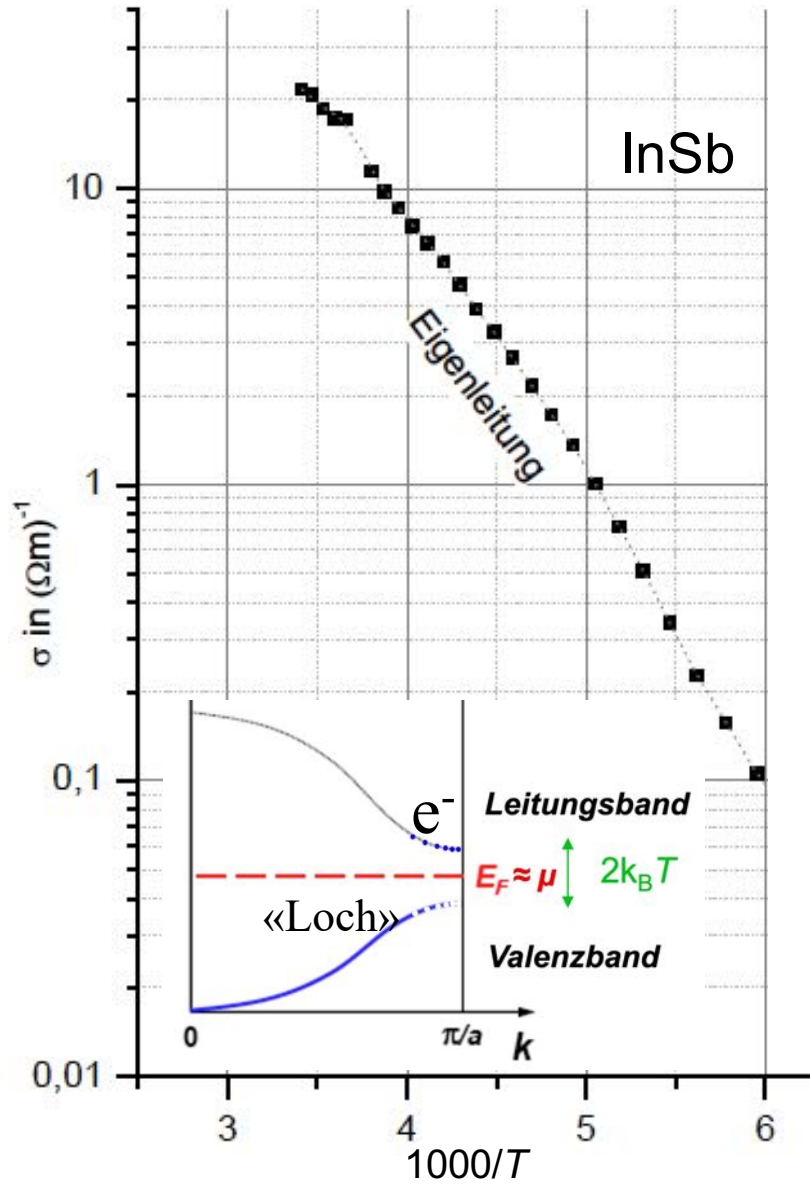
Isolator/Halbleiter:



$$T > 0$$



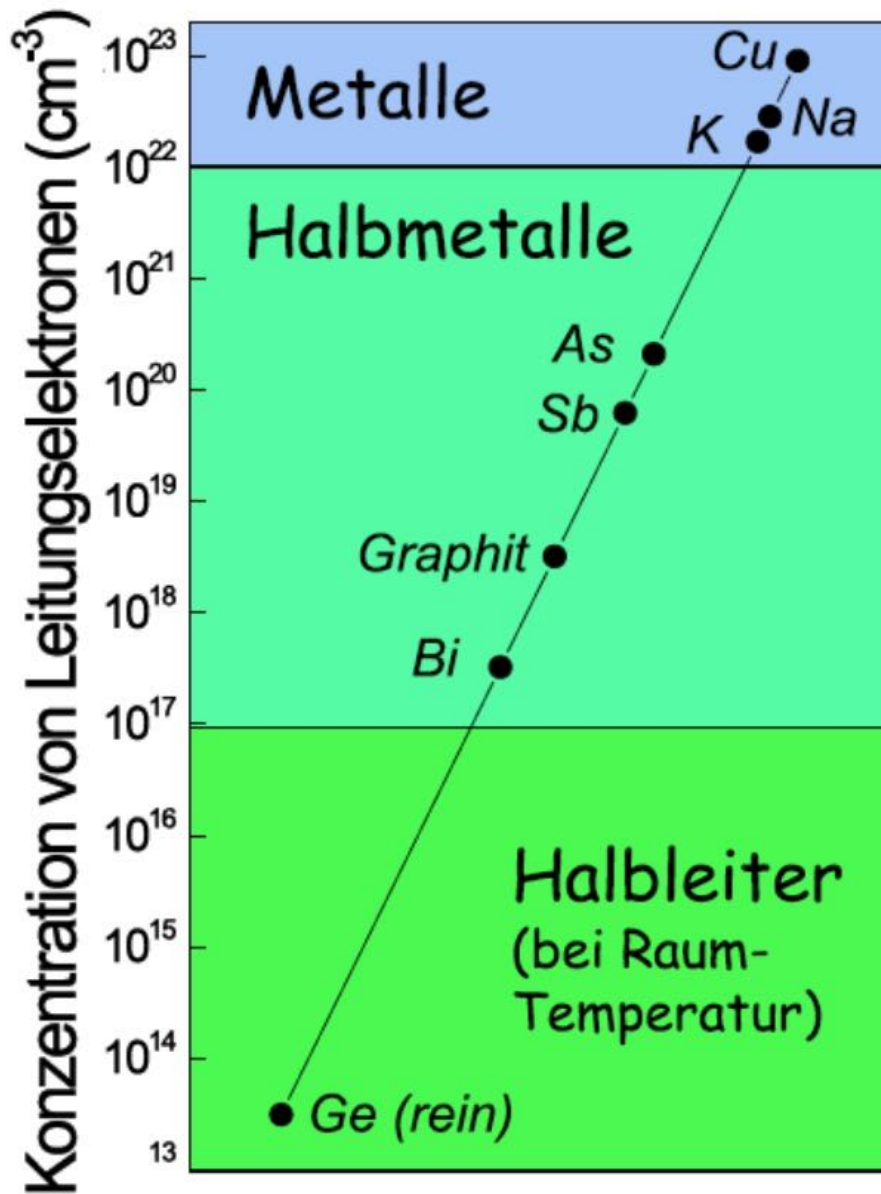
Mechanismus der Eigenleitung in Halbleitern:



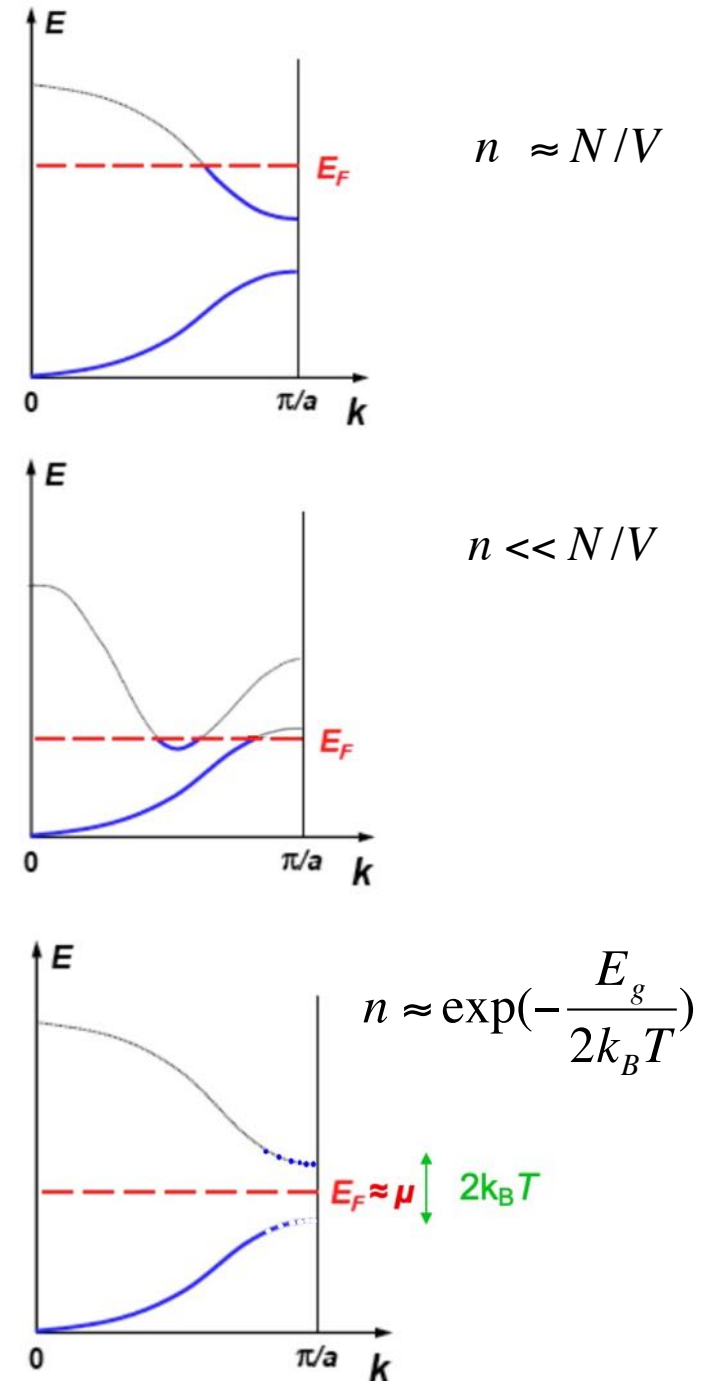
Halbleiter	$E_g(0\text{ K})$ (eV)	$E_g(300\text{ K})$ (eV)
Si	1.17	1.12
Ge	0.75	0.67
GaAs	1.52	1.43
InSb	0.24	0.18
InAs	0.43	0.35
InP	1.42	1.35
ZnO	3.44	3.2
ZnS	3.91	3.6
CdS	2.58	2.42
CdTe	1.61	1.45

$$\sigma = \frac{ne^2\tau_{e^-}}{m_c^*} + \frac{pe^2\tau_{Loch}}{m_v^*} \propto T^\alpha \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{2k_B T}\right)$$

Zwei Arten von Ladungsträgern



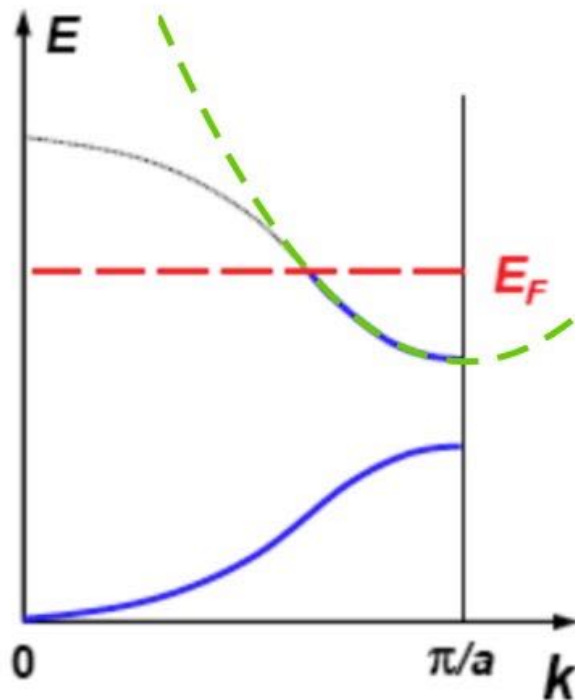
Ladungsträgerkonzentration:
Halbleiter, Halbmetalle, Metalle



Effektive Masse: $\vec{F} = m_e \dot{\vec{v}} = -e\vec{E} - \vec{\nabla}V(\vec{r})$

$$\vec{F} = m^* \dot{\vec{v}} = -e\vec{E} = q\vec{E}$$

Metall:



Angepasste Parabel mit gleicher Krümmung wie $E(k)$ bei E_F

$$E(k) = \frac{\hbar^2 (k - k_0)^2}{2m^*} + E_0$$

Effektive Masse:

$$\frac{1}{m^*} := \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2} \Big|_{E=E_F}$$

$$\left(\frac{1}{m_{uv}} \right)^* := \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E(\vec{k})}{\partial k_u \partial k_v} \Big|_{E=E_F}$$

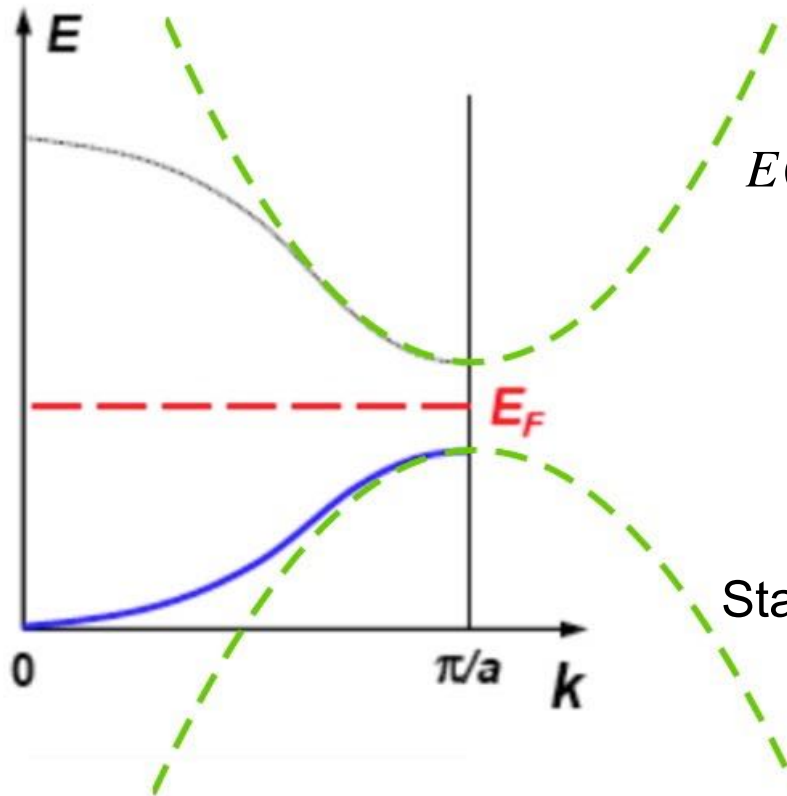
3D:
richtungsabhängiger
Tensor

Effektive Masse m^* : träge Masse! (schwere Masse bleibt unverändert!!)

Effektive Masse:

$$\vec{F} = m^* \dot{\vec{v}} = -e\vec{E} = q\vec{E}$$

Isolator/Halbleiter:



Angepasste Parabel mit gleicher Krümmung wie $E(k)$ bei E_F

$$E(k) = \frac{\hbar^2 (k - k_0)^2}{2m^*} + E_0$$

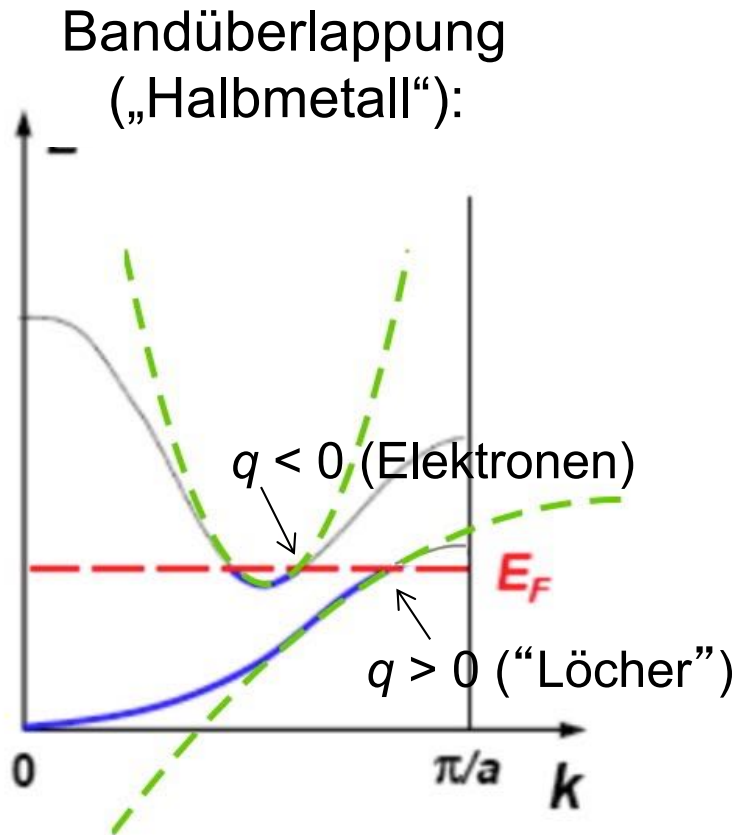
Effektive Masse:

$$\frac{1}{m^*} := \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2} \Big|_{E=E_F}$$

Statt $m^* < 0$: $q > 0$ ("Löcher")

Effektive Masse:

$$\vec{F} = m^* \dot{\vec{v}} = -e\vec{E} = q\vec{E}$$



Angepasste Parabel mit gleicher Krümmung wie $E(k)$ bei E_F

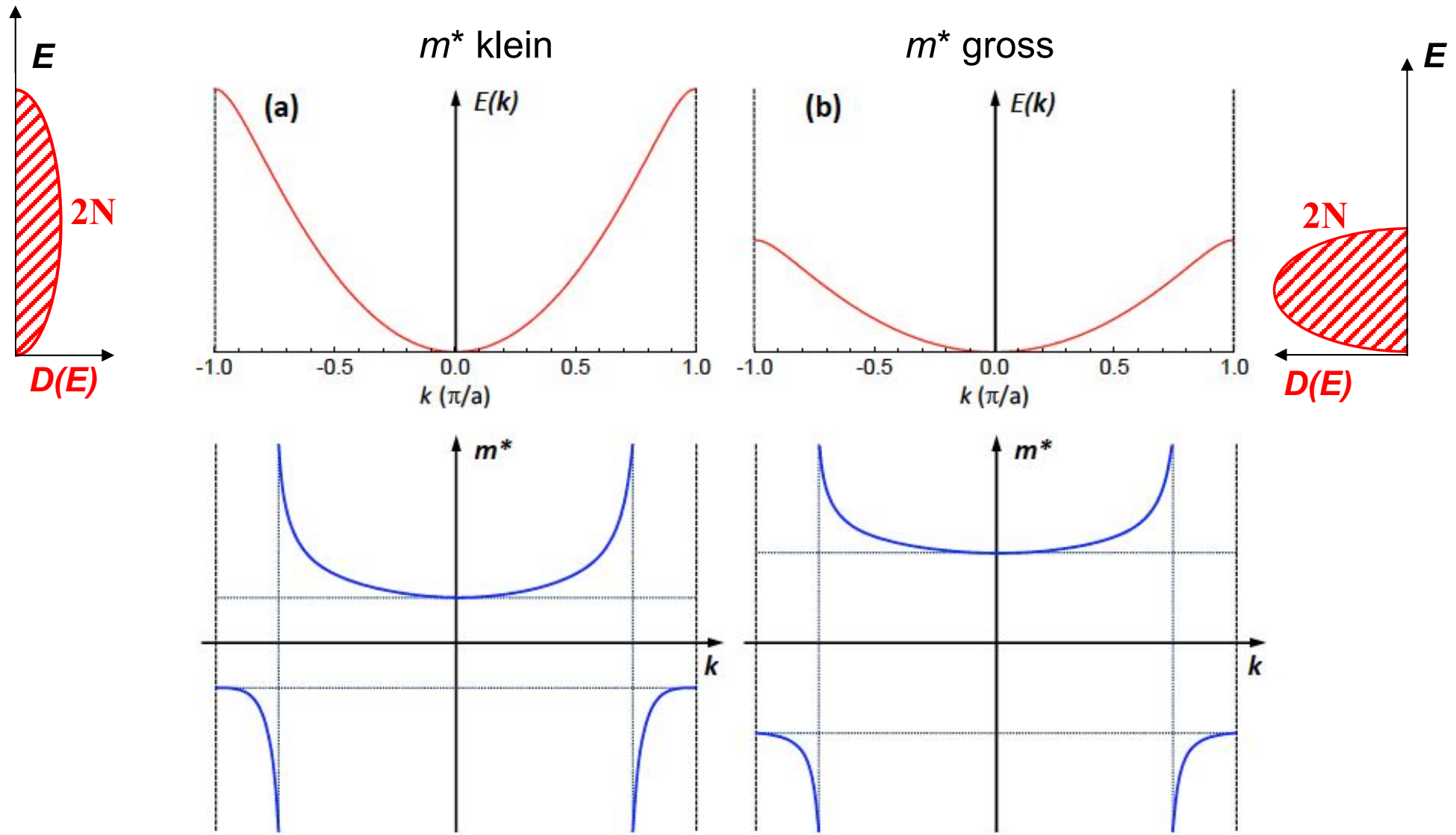
$$E(k) = \frac{\hbar^2 (k - k_0)^2}{2m^*} + E_0$$

Effektive Masse:

$$\frac{1}{m^*} := \frac{1}{\hbar^2} \left. \frac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2} \right|_{E=E_F}$$

Zwei Arten von Ladungsträgern mit verschiedenen effektiven Massen

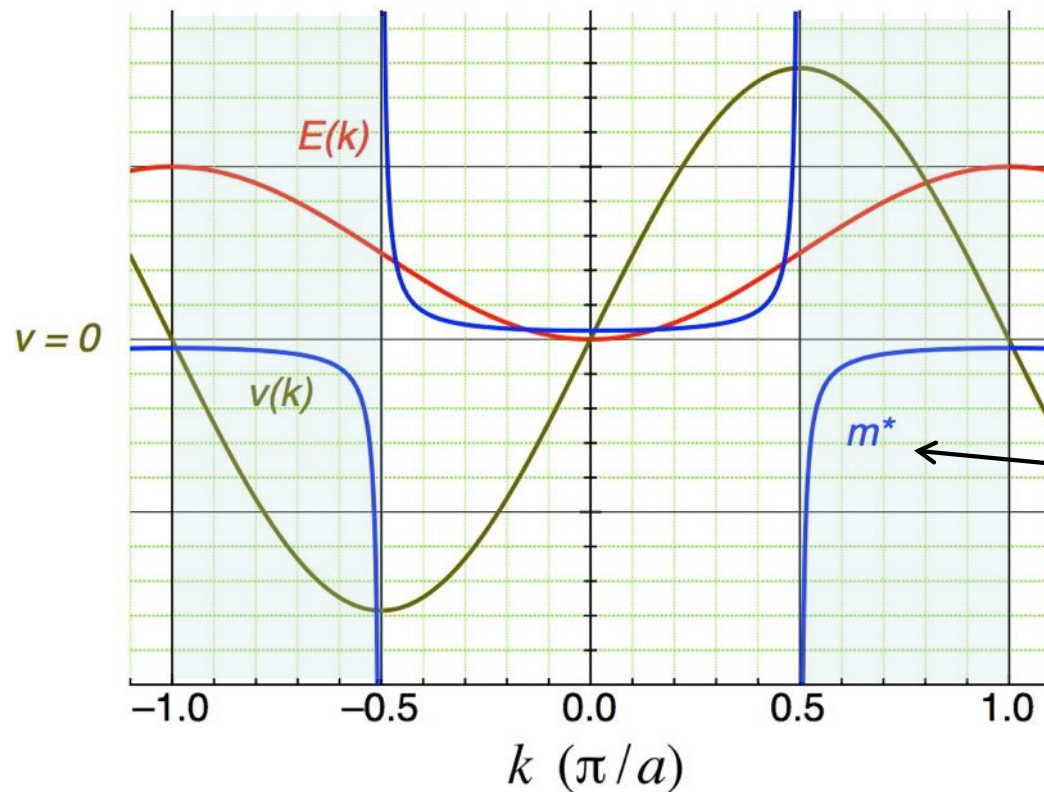
Effektive Masse:



Schematischer Verlauf der Bandstruktur (oben) und der effektiven Masse (unten): (a) eine starke Bandkrümmung resultiert in einer kleinen effektiven Masse. (b) eine schwache Bandkrümmung resultiert in einer großen effektiven Masse.

Effektive Masse und Löcher:

$$\vec{F} = m^* \dot{\vec{v}} = -e\vec{E} = q\vec{E}$$



Effektive Masse:

$$\frac{1}{m^*} := \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2}$$

$$v = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial k}$$

Im elektrischen Feld:

$$k(t) = k(0) + qEt/\hbar$$

führt bei $m^* < 0$ zu einer *Verlangsamung* der Elektronen, obwohl k und $E(k)$ zunehmen!

Wie Ladungen mit $q > 0$ und $m^* > 0$: „**Löcher**“

Effektive Masse und Löcher:

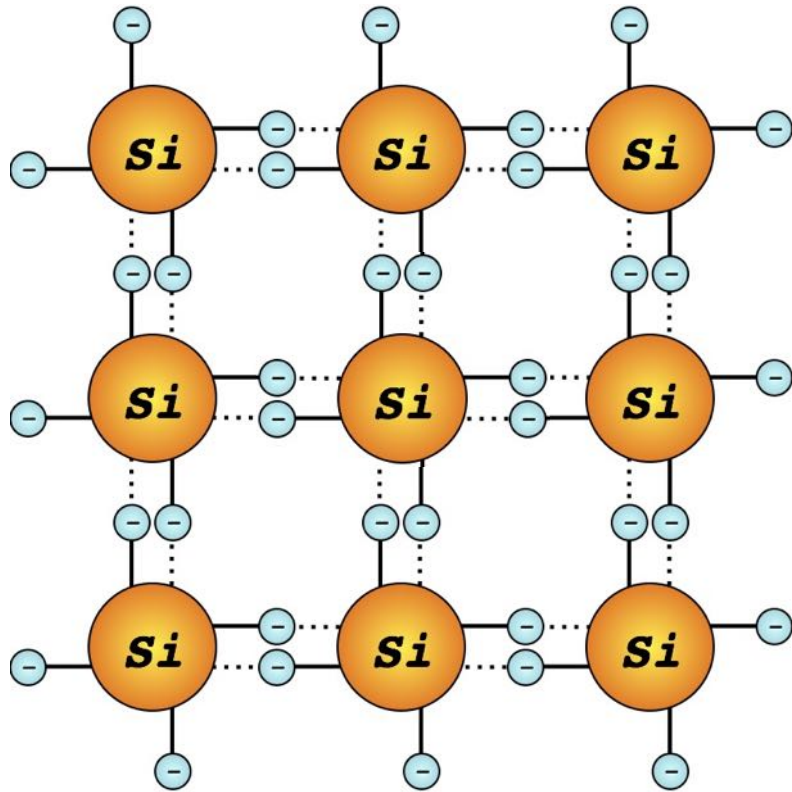
$$m^*/m_e$$

Metalle: meist ≈ 1 (je nach Messmethode und Richtung)
und meist Elektronartig

“Schwere Fermionen-Systeme”: bis zu 1000

Halbleiter: oft < 1 , Elektron- und Lochartig

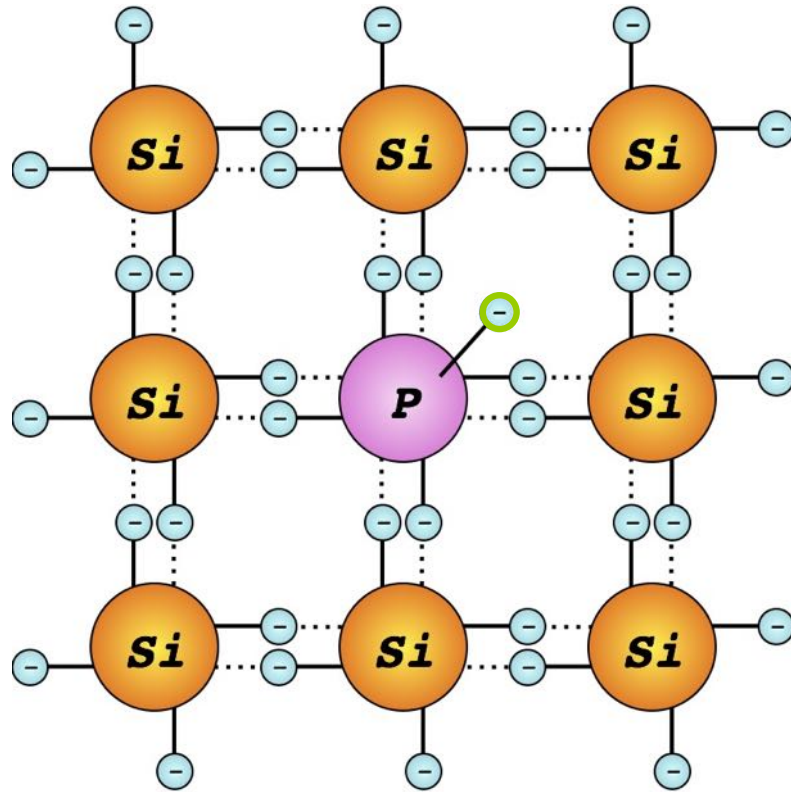
Störstellenleitung: Dotierung mit Fremdatomen



Störstellenleitung: Dotierung mit Fremdatomen

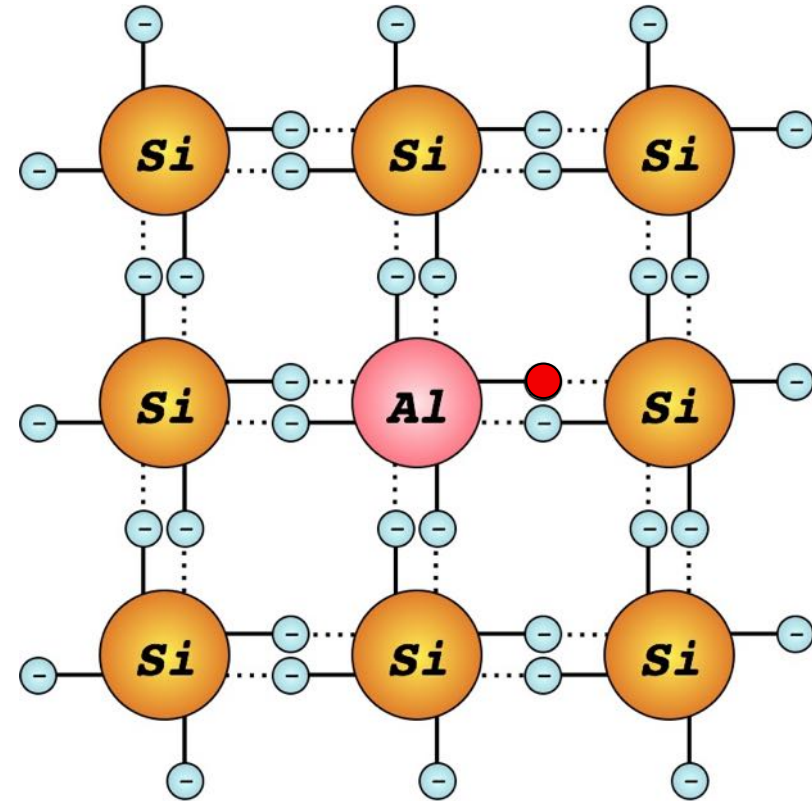
Si: [Ne] 3s²3p²

P: [Ne] 3s²3p³



Donatoren

Al: [Ne] 3s²3p¹

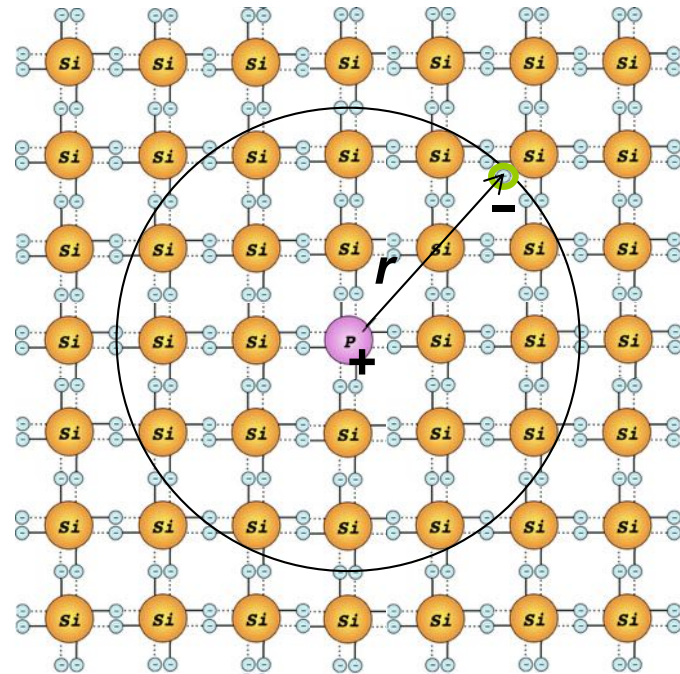
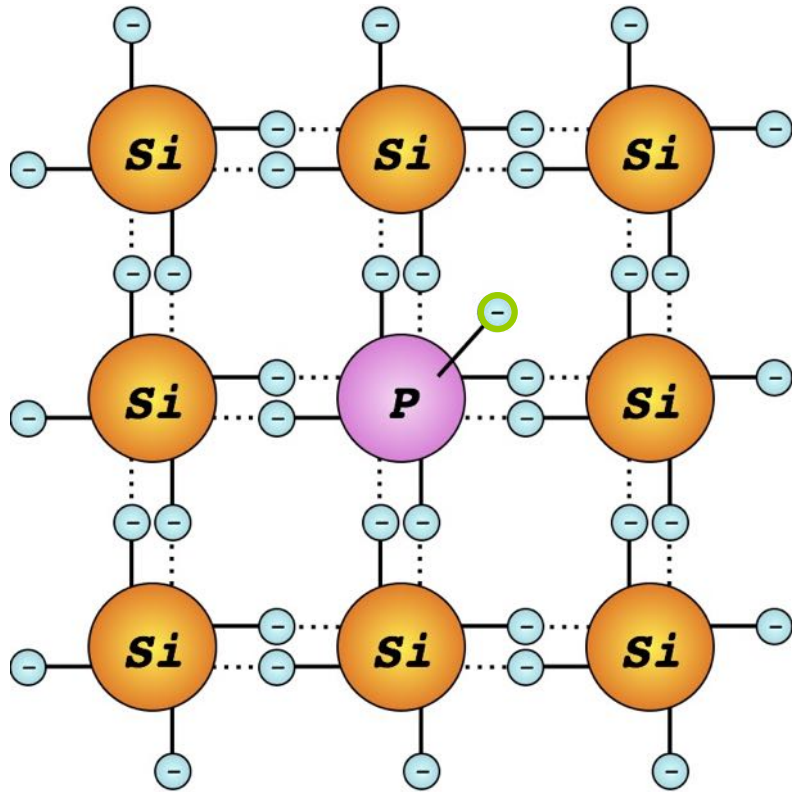


Akzeptoren

Störstellenleitung: Dotierung mit Fremdatomen

Si: [Ne] 3s²3p²

P: [Ne] 3s²3p³

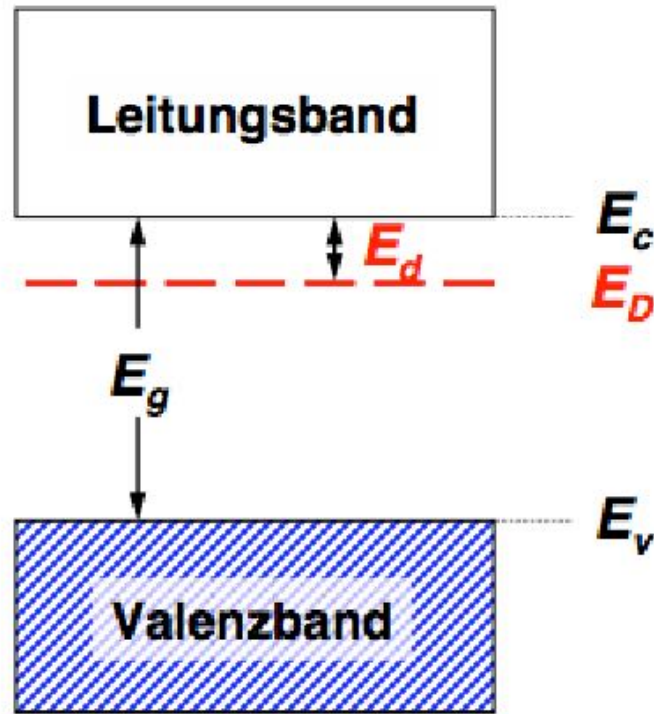


$$V(r) \approx -\frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{1}{r}$$

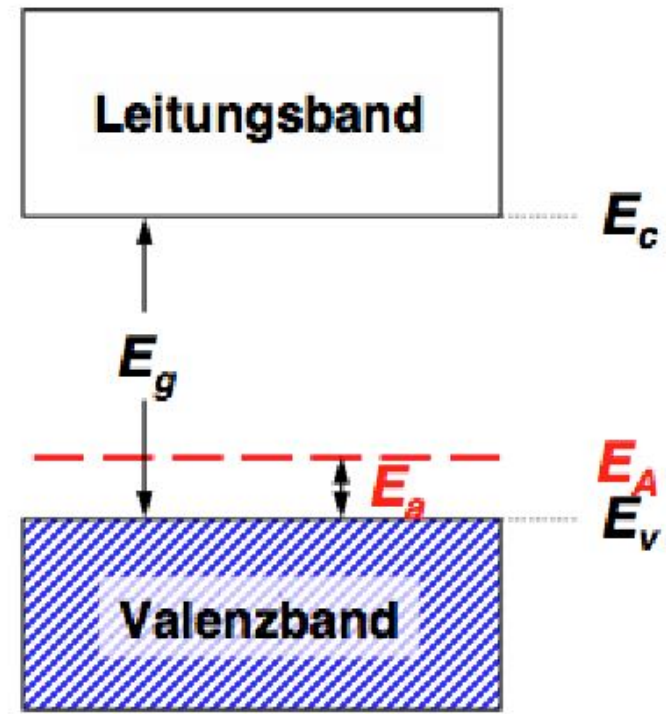
$$r \approx r_{Bohr} \epsilon \frac{m_e}{m^*}$$

$$E_{Ionis.} \approx 1Ry \frac{m^*}{m_e \epsilon^2}$$

Störstellenleitung: Dotierung mit Fremdatomen

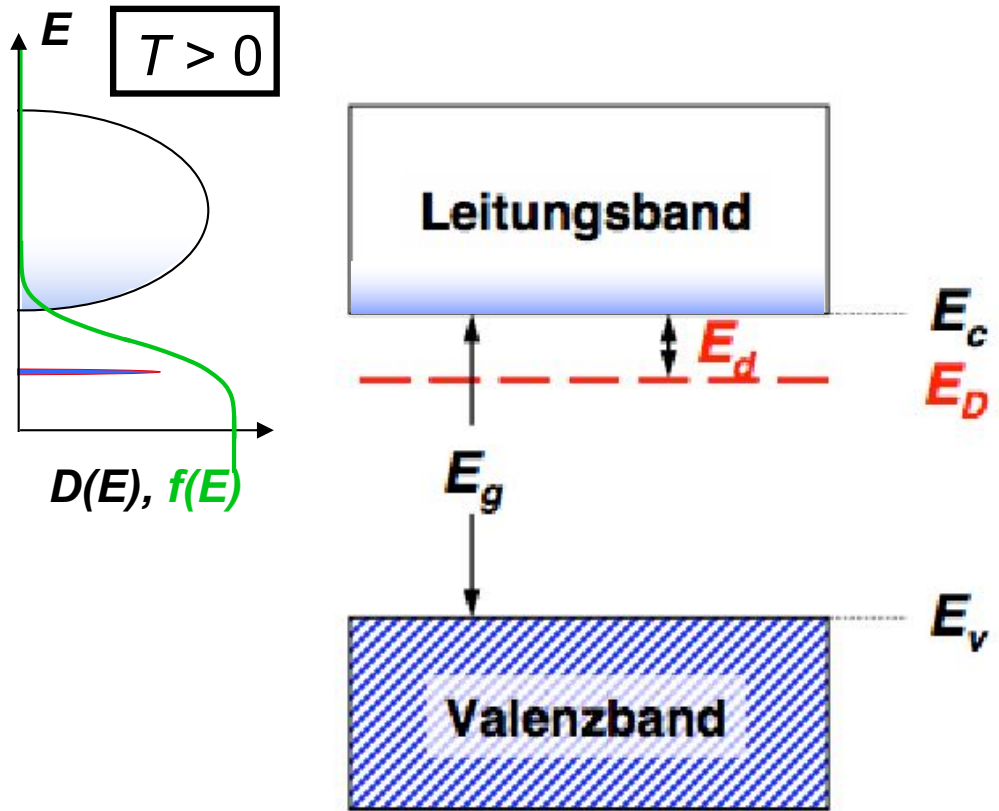


Donatoren



Akzeptoren

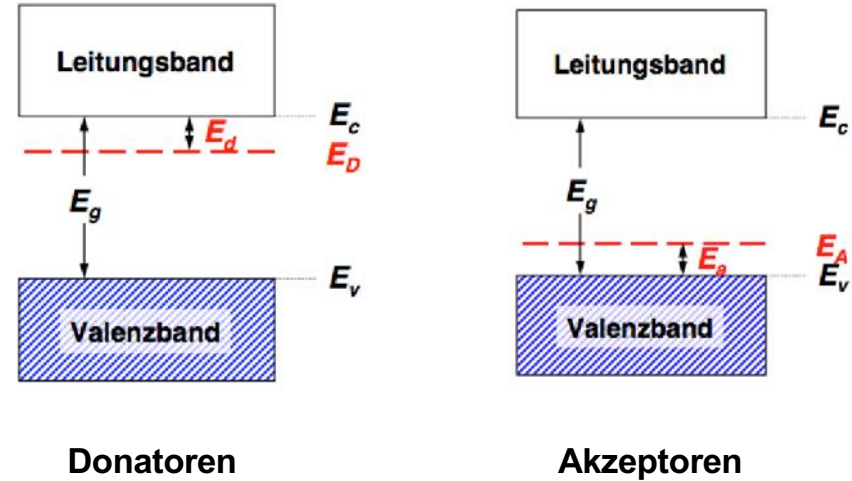
Störstellenleitung: Dotierung mit Fremdatomen



Donatoren

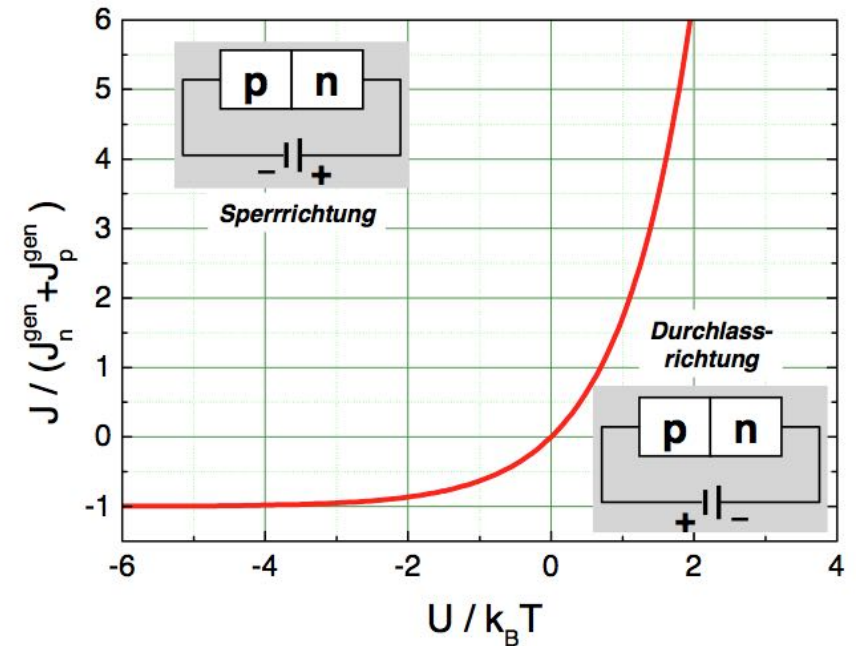
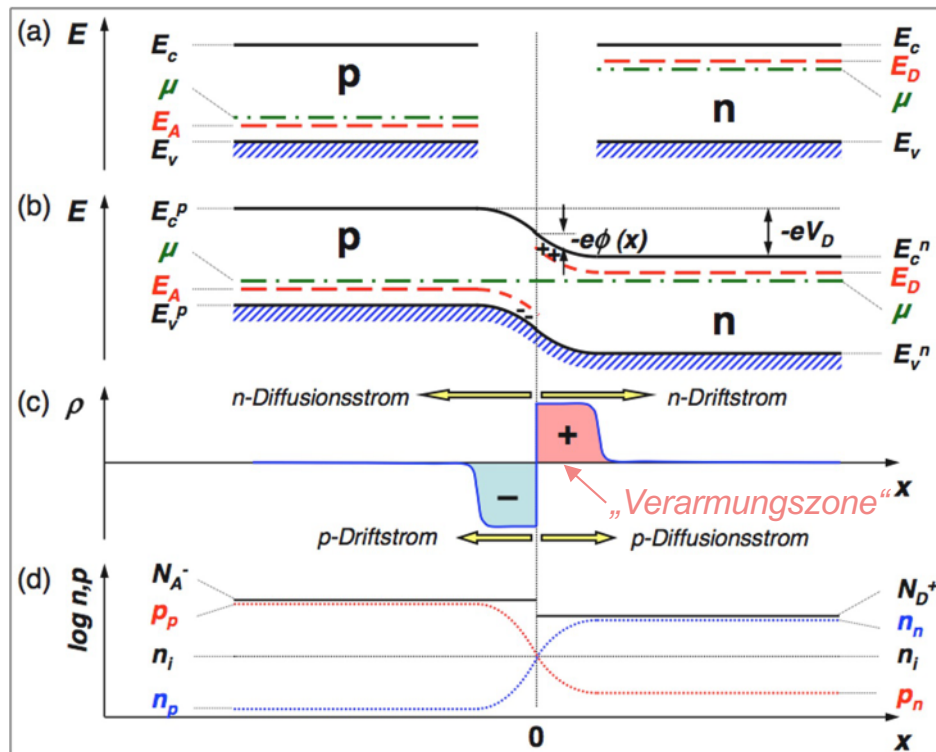
Störstellenleitung: Dotierung mit Fremdatomen

Symbol	Verhältnisse in Si	Verhältnisse in GaAs
n^-		
p^-		
n	1 Donator/ 10^7 Atome	
p	1 Akzeptor/ 10^6 Atome	
n^+	1 Donator/ 10^4 Atome	1 Donator/ 10^4 Atome
p^+	1 Akzeptor/ 10^4 Atome	
n^{++}		
p^{++}		1 Akzeptor/ 10^3 Atome



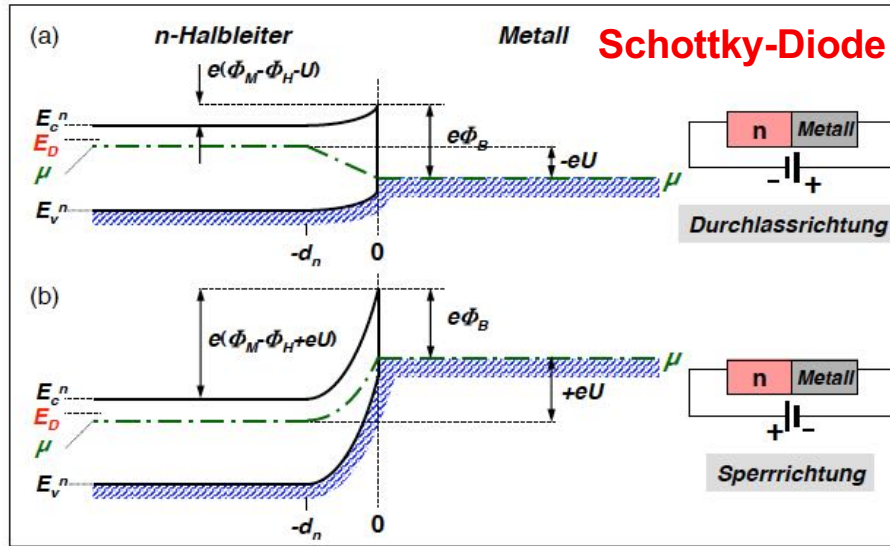
Halbleiter	Donatoren			Akzeptoren				
	P	As	Sb	B	Al	Ga	In	
	$E_C - E_D$ (meV)	$E_C - E_D$ (meV)	$E_C - E_D$ (meV)	$E_A - E_V$ (meV)	$E_A - E_V$ (meV)	$E_A - E_V$ (meV)	$E_A - E_V$ (meV)	
Si	45	49	39	45	57	65	16	$E_C - E_V \approx 1,1 \text{ eV}$
Ge	12	12.7	9.6	10.4	10.2	10.8	11.2	$E_C - E_V \approx 0.7 \text{ eV}$

pn-Übergang:

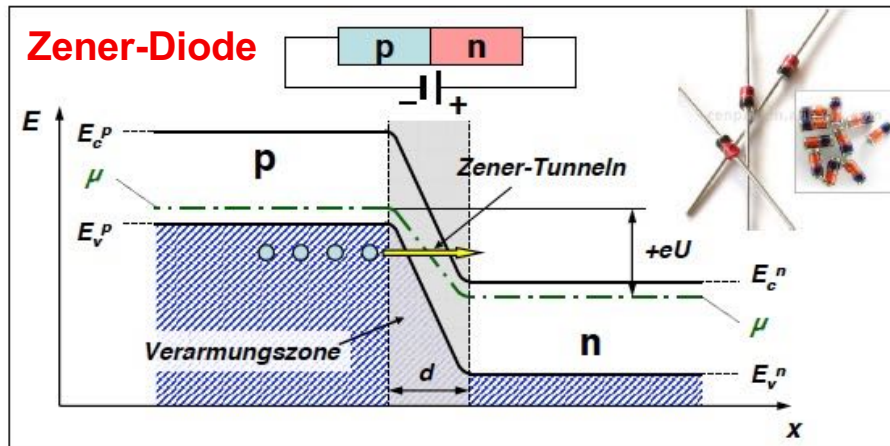


Schematische Darstellung eines p - n Übergangs im thermischen Gleichgewicht: (a) Bänderschema im p - und n -Halbleiter bei völliger Trennung, (b) Bandverlauf im p - n Übergang im thermischen Gleichgewicht nach Herstellung des Kontakts, (c) Verlauf der Raumladungszone $\rho(x)$ im Bereich des p - n Übergangs und (d) qualitativer Verlauf der Konzentration der Donatoren N_D^+ und Akzeptoren N_A^- sowie der Elektronen im Leitungsband und Löcher im Valenzband. Wir nehmen an, dass alle Donatoren und Akzeptoren ionisiert sind, so dass $N_D = N_D^+$ und $N_A = N_A^-$. Auf der n -Seite ist V_D positiv, so dass die potentielle Energie der Elektronen auf der n -Seite um $-eV_D$ abgesenkt ist.

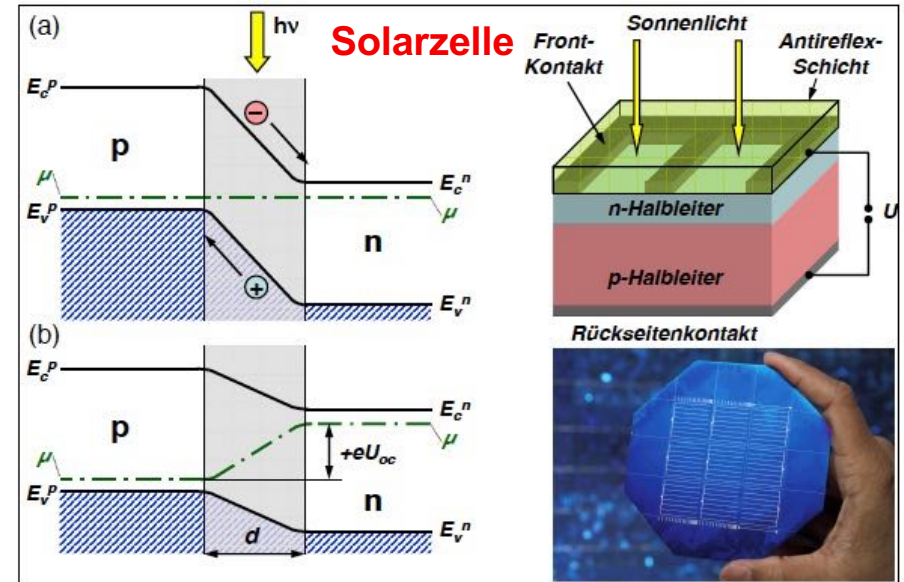
Beispiele für weitere Halbleiter-Bauteile:



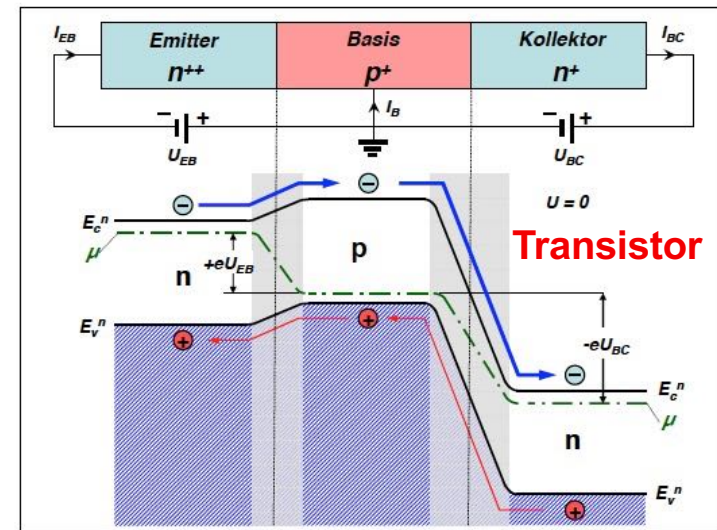
Schematische Darstellung eines Schottky-Kontakts mit angelegter Spannung. Links: Durchlassrichtung, rechts: Sperrichtung. In Durchlassrichtung ist die Spannung am Metall positiv, so dass die potentielle Energie $-eU$ der Elektronen auf der Seite des Metalls abgesenkt ist.



Schematischer Bandverlauf bei einer Zener-Diode. Bei genügend hoher Spannung in Sperrichtung können die Ladungsträger die Verarmungszone durchtunneln, was zu einem starken Anstieg des Sperrstroms führt. Oben links sind Si-Zener-Dioden abgebildet. In Sperrichtung liegt der Pluspol der Spannungsquelle am n -Gebiet, so dass dort die potentielle Energie der Elektronen um $(-e)U$ abgesenkt wird.

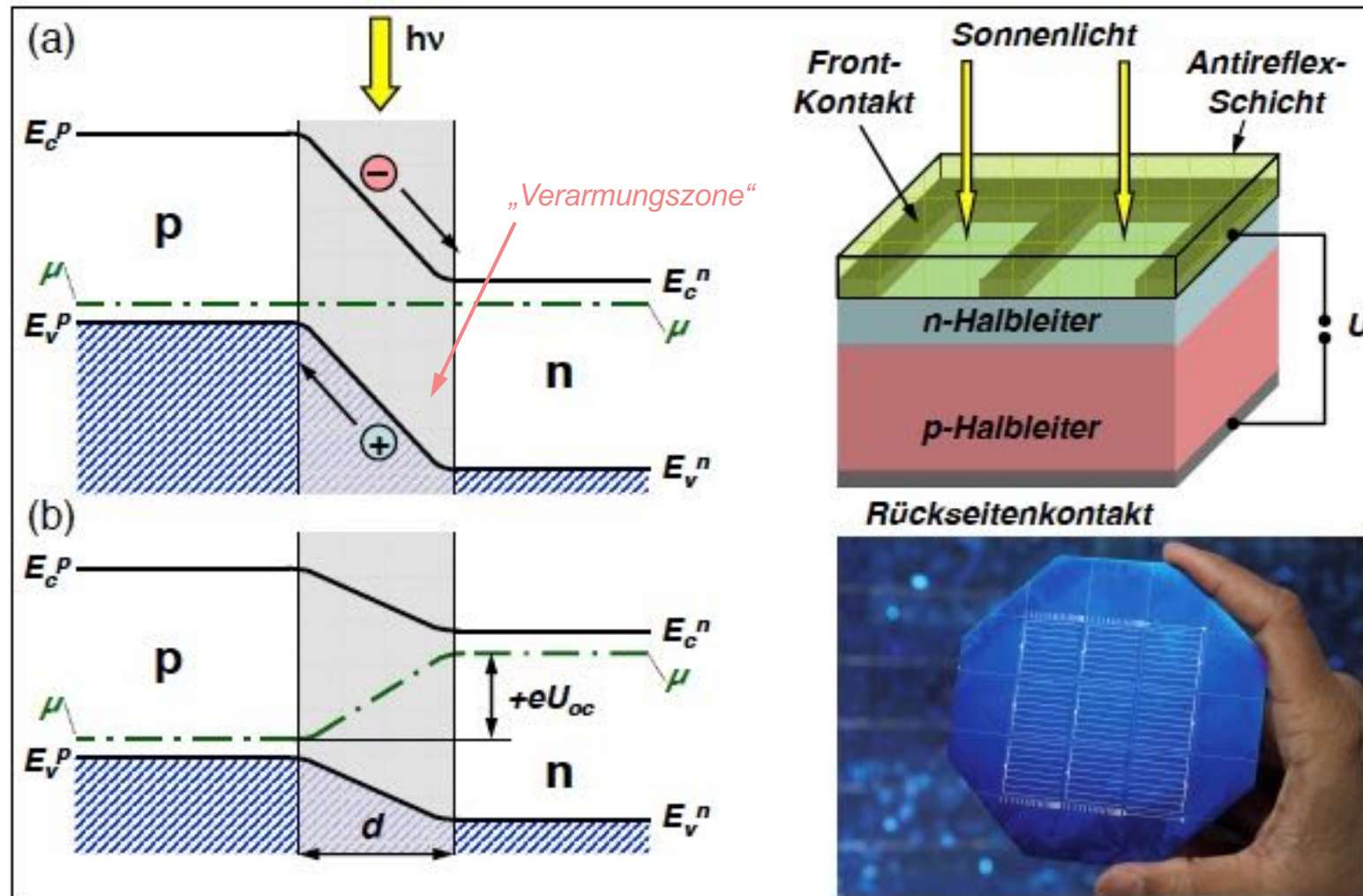


Zur Funktionsweise einer Solarzelle. In (a) ist der schematische Bandverlauf vor Einstrahlung von Licht gezeigt. Durch Lichteinstrahlung werden in der Verarmungszone des p - n -Übergangs Elektron-Loch-Paare erzeugt. Diese werden im elektrischen Feld der Verarmungszone getrennt, wobei die Löcher ins p - und die Elektronen ins n -Material driften. Dies führt zu einer positiven bzw. negativen Aufladung des p - bzw. n -Gebiets (b) und damit zu einer Spannung U_{oc} (open circuit), die von außen abgegriffen werden kann. Rechts ist schematische der Aufbau einer Solarzelle gezeigt.



Schematischer Aufbau eines npn -Transistors und (b) Bandverlauf für die Situation, dass der Emitter-Basis-Kontakt in Durchlass- und der Basis-Kollektor-Kontakt in Sperrichtung geschaltet ist. Die Breite der Basisschicht ist klein gegenüber der Diffusionslänge der Ladungsträger im Basismaterial, so dass die über die Emitter-Basis-Diode injizierten Ladungsträger fast alle zum Basis-Kollektor-Übergang diffundieren können und dort durch die anliegende Sperrspannung abgesaugt werden. Mit den dicken blauen Pfeilen bzw. dünnen roten Pfeilen wird der Majoritätsladungsträger- bzw. Minoritätsladungsträgerstrom angedeutet.

Solarzelle



Zur Funktionsweise einer Solarzelle. In (a) ist der schematische Bandverlauf vor Einstrahlung von Licht gezeigt. Durch Lichteinstrahlung werden in der Verarmungszone des p - n -Übergangs Elektron-Loch-Paare erzeugt. Diese werden im elektrischen Feld der Verarmungszone getrennt, wobei die Löcher ins p - und die Elektronen ins n -Material driften. Dies führt zu einer positiven bzw. negativen Aufladung des p - bzw. n -Gebiets (b) und damit zu einer Spannung U_{oc} (open circuit), die von außen abgegriffen werden kann. Rechts ist schematische der Aufbau einer Solarzelle gezeigt.