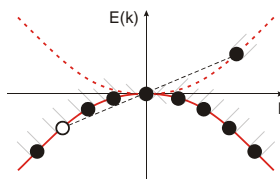


**Elektronenzustände in einem fast vollen Band werden als Löcher im Band beschrieben.**

**Eigenschaften von Löchern:**

1. Wellenvektor:  $\vec{k}_h = -\vec{k}_e$
2. Energie:  $\varepsilon_h(\vec{k}_h) = -\varepsilon_e(\vec{k}_e)$
3. Geschwindigkeit:  $\vec{v}_h = \vec{v}_e$
4. Masse:  $m_h = m_e$
5. Bewegungsgleichung ist die eines positiv geladenen Teilchens:

$$\hbar \frac{d\vec{k}_h}{dt} = +e(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B})$$



### 8 / 3

### Ladungsträger in Halbleitern

Für Eigen- wie auch Störstellenleitung gilt:

**Ladungsträgerkonzentrationen:**

Elektronen (Leitungsband):

$$n = n_{eff}^L \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_g}{k_B T}\right); \quad n_{eff}^L \equiv 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$

Löcher (Valenzband):

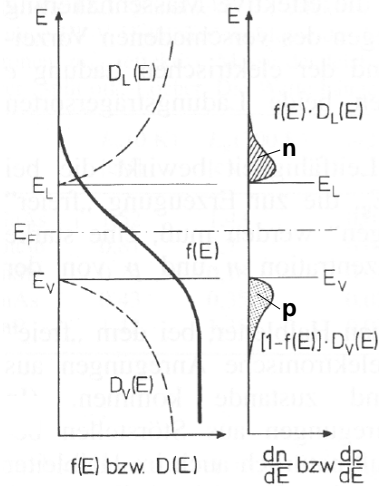
$$p = p_{eff}^V \cdot \exp\left(\frac{-\varepsilon_F}{k_B T}\right); \quad p_{eff}^V \equiv 2 \left(\frac{m_h k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$

**Massenwirkungsgesetz:**

Das Produkt der Konzentrationen von Elektronen ( $n$ ) und Löchern ( $p$ ) ist bei gegebener Temperatur konstant:

$$n \cdot p = n_{eff}^L p_{eff}^V \cdot \exp\left(\frac{-\varepsilon_g}{k_B T}\right)$$

Eigenleitung ( $p = n$ ):



### 8 / 4

### Ladungsträgerbeweglichkeit

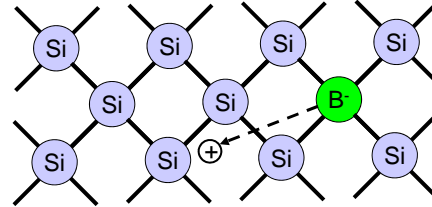
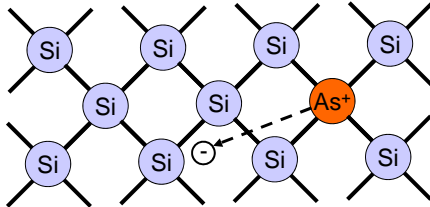
Beweglichkeit bei 300 K	$\mu_e$ [ $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]	$\mu_h$ [ $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]
Diamant	1800	1200
Si	1300	500
Ge	4500	3500
InSb	77000	750
InAs	33000	460
GaAs	8800	400
PbS	550	600
AgCl	50	--

8 / 5

Dotierte Halbleiter

Donatoren:  
5-wertig (P, As, Sb)

Akzeptoren:  
3-wertig (B, Al, Ga, In)



8 / 6

Donator- und Akzeptorenergien

Abschätzung	Si	Ge	H
$\epsilon_r$	11.7	15.8	1
$\langle m^* \rangle / m_e$	0.2	0.1	1
$E_d$ (bzw. $E_{ion}$ )	20 meV	6 meV	13.6 eV
Bohrradius $r$	30 Å	80 Å	0.53 Å

Exp. Werte		Si	Ge
$E_d$ [meV]	P	45	12.0
	As	49	12.7
	Sb	39	9.6
$E_a$ [meV]	B	45	10.4
	Al	57	10.2
	Ga	65	10.8
	In	157	11.2

8 / 7

Ladungsträger in dotierten Halbleitern

**Eigenleitung:**

Fermi-niveau liegt in Bandmitte:

$$\epsilon_F \approx \epsilon_g / 2$$

**Störstellenleitung:**

I) Störstellenreserve

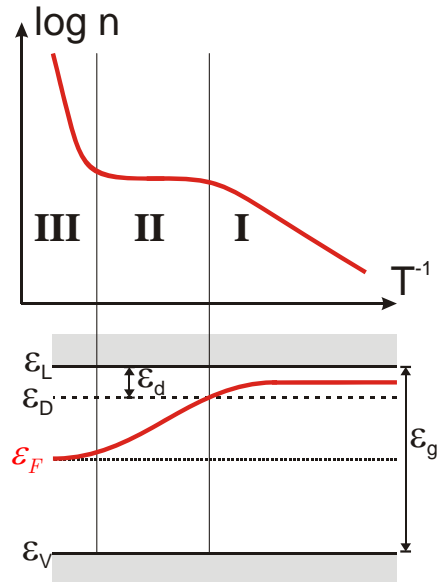
$$\log n \propto -\epsilon_d / 2k_B T$$

II) Erschöpfungszustand

$$n = \text{konst.}$$

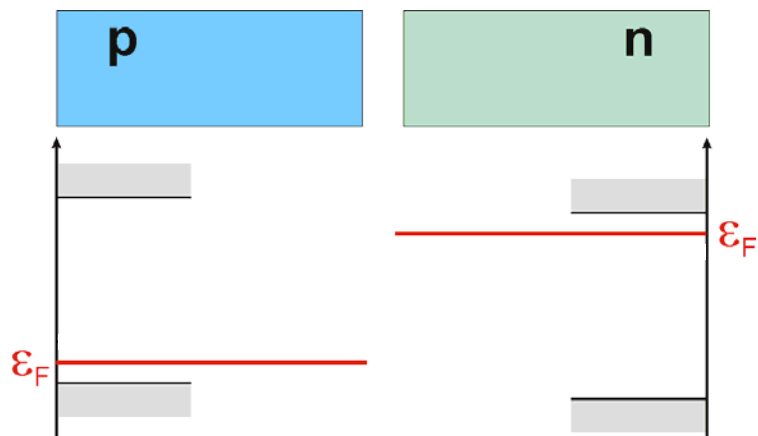
III) intrinsischer Bereich

$$\log n \propto -\epsilon_g / 2k_B T$$



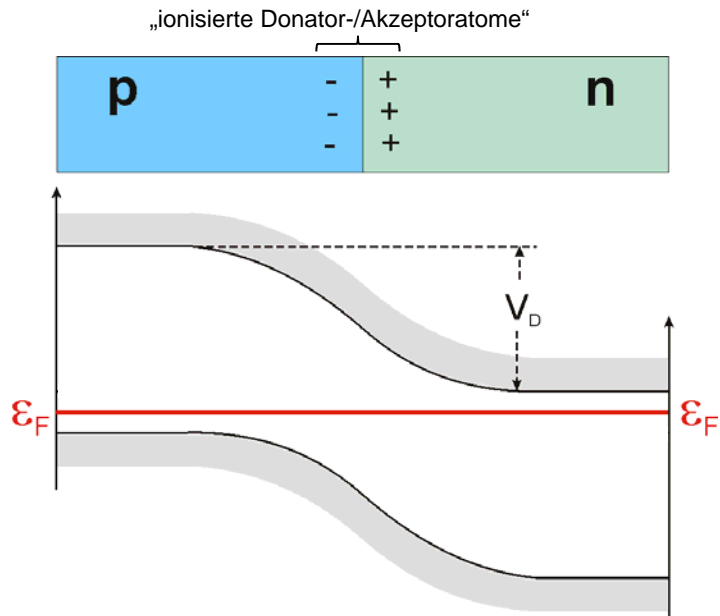
8 / 8

pn-Übergang



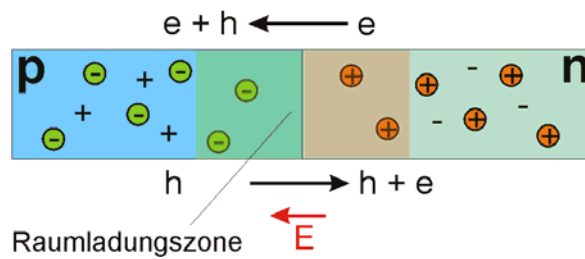
8 / 9

pn-Übergang



8 / 10

pn-Übergang



Majoritätsladungsträger:  $h^+ \xrightarrow{j_{diff}(n)} e^-$   
 $\xleftarrow{j_{diff}(p)}$

Minoritätsladungsträger:  $e^- \xleftarrow{j_{Feld}(n)} h^+$   
 $\xrightarrow{j_{Feld}(p)}$