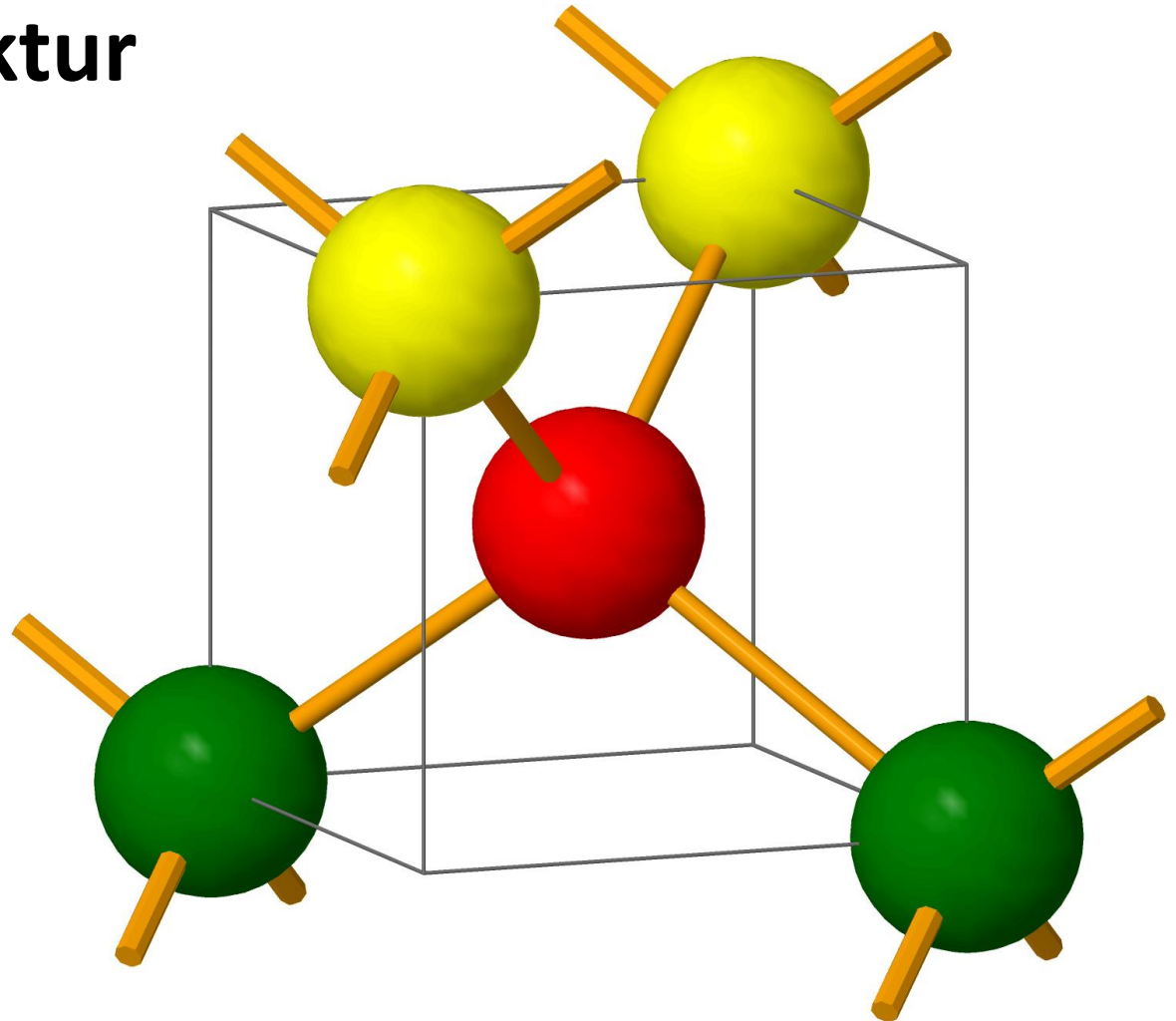


## 2. Grundlagen der Halbleiterphysik

### 2.1. Kristallstruktur

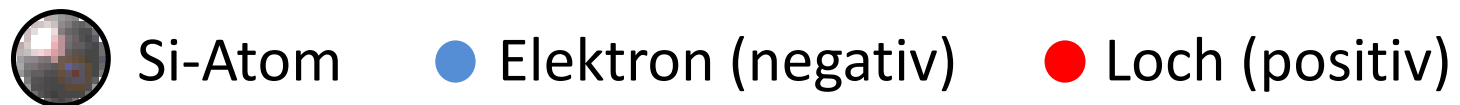
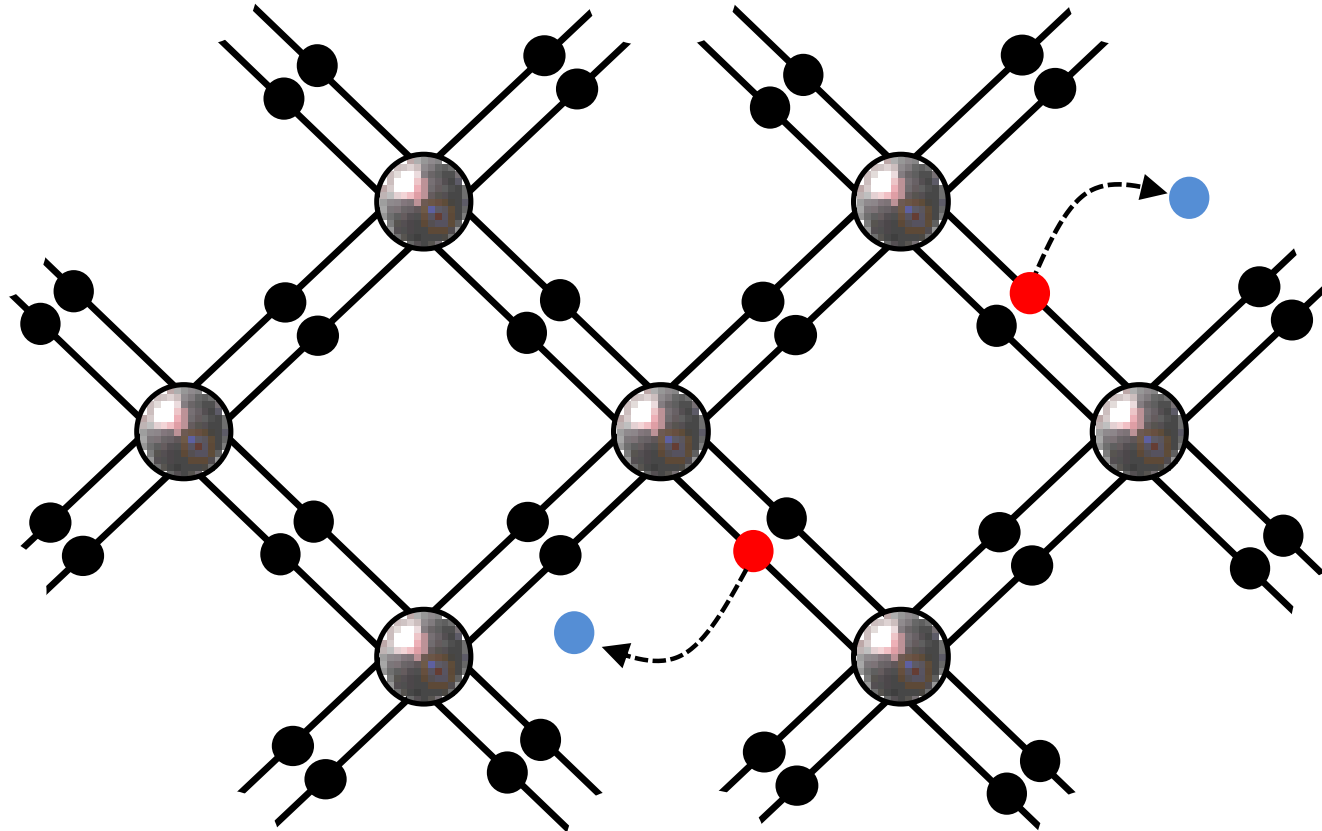
#### Kristallstruktur von Silizium und Germanium:

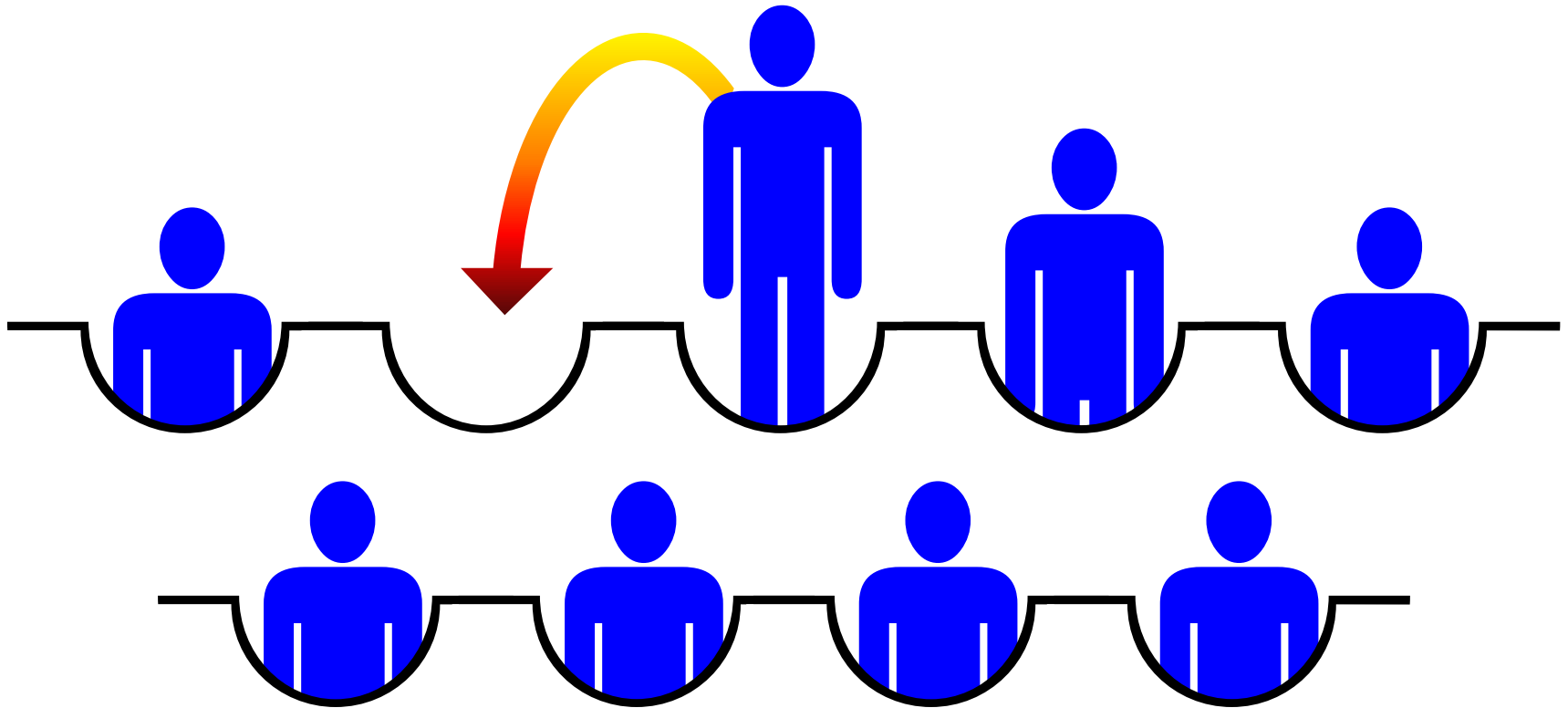
Jedes Atom hat vier  
gleich weit entfernte  
Nachbaratome  
(„Diamantstruktur“)



Si und Ge besitzen eine stabile Kristallstruktur (Diamantstruktur):

- Jedes Atom hat vier gleich weit entfernte Nachbaratome.
- Die Atome haben auf ihrer äußeren Elektronenschale vier **Valenzelektronen**, die mit den Nachbaratomen Elektronenpaarbindungen bilden (kovalente Bindung).
- Durch Energiezufuhr (Wärme, Licht) gerät der Kristall in Schwingung, einzelne Bindungen brechen auf (**Ladungsträger-Generation**).
- Ein aus der Atombindung gerissenes Elektron kann sich im Kristall frei bewegen (**freies Elektron**). Es hinterlässt eine Lücke, wo die positive Kernladung nicht mehr durch das Elektron abgedeckt ist (**Loch, Defektelektron**).
- Die **Löcher können als bewegliche positive Ladungsträger** aufgefasst werden. Wird elektrische Spannung angelegt, wandern freie Elektronen zum Pluspol und Löcher zum Minuspol.

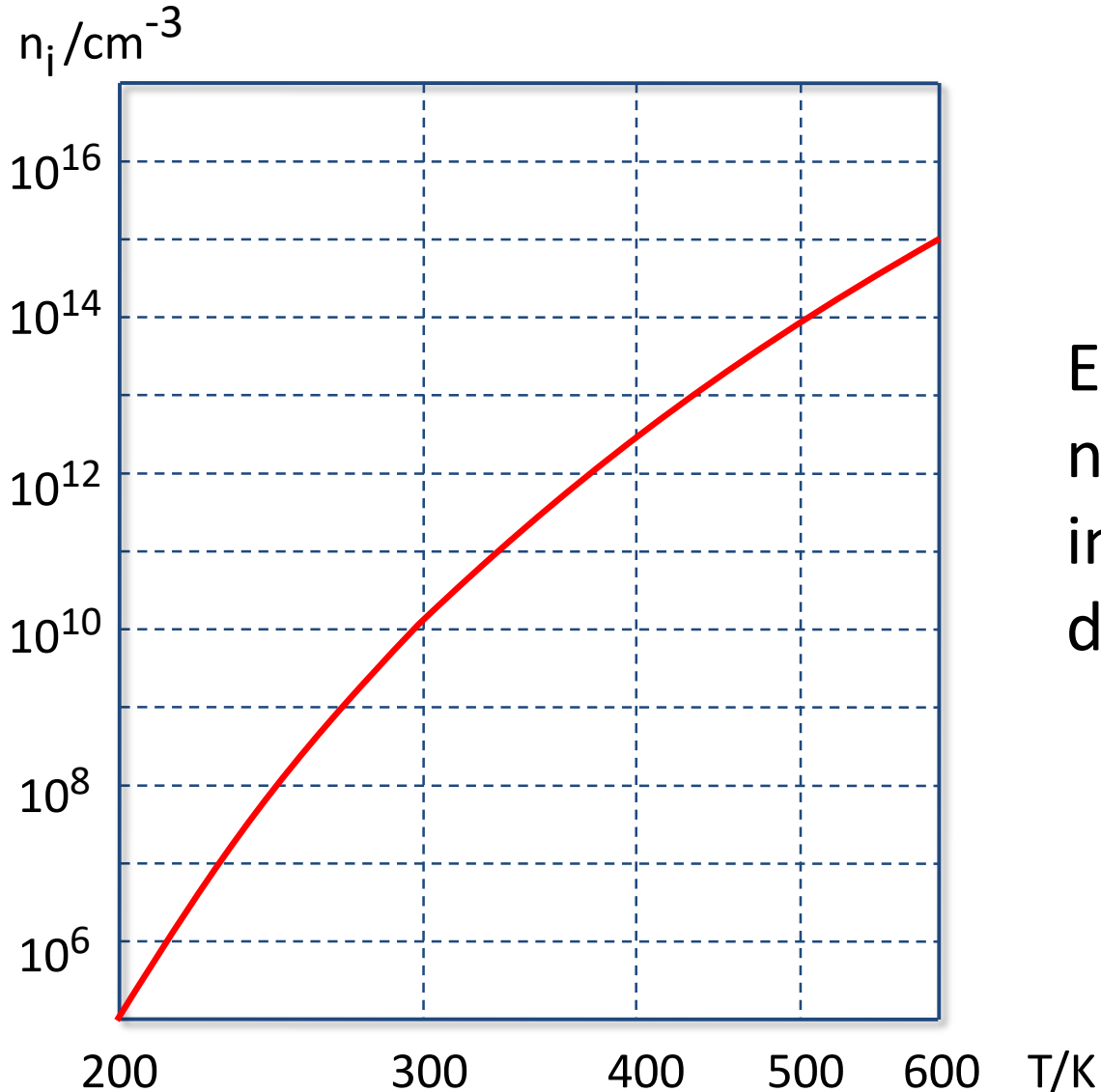




Das Wandern von Löchern im Halbleiter kann man mit leeren Sitzen im Kino vergleichen, wenn die Zuschauer aufrücken: Die Zuschauer wandern immer mehr nach links, die „Löcher“ wandern nach rechts.

Trifft ein freies Elektron auf ein Loch, verschmelzen beide wieder miteinander (**Rekombination**):

- Im Mittel stellt sich ein Gleichgewicht von thermischer Generation und Rekombination ein.
- Elektronendichte  $n_0$  und Löcherdichte  $p_0$  in einem reinen Halbleiter (**intrinsischer Halbleiter**) sind immer gleich groß.
- Man spricht auch von der **Eigenleitungsdichte**  $n_i$
- Im reinen (intrinsischen) Halbleiter gilt also:  $n_i = n_0 = p_0$
- Die Eigenleitungsdichte eines Halbleiters ist abhängig von Material und Temperatur.
- Ändert sich die Eigenleitungsdichte, so ändert sich auch der spezifische Widerstand bzw. die elektrische Leitfähigkeit.



Eigenleitungsdichte  $n_i$  von Silizium (Si) in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$

## 2.2. Eigenleitung

Aus der Eigenleitungsdichte kann der **spezifische Widerstand** des reinen (intrinsischen) Halbleiters berechnet werden:

Für die **elektrische Leitfähigkeit** gilt entsprechend:

$\mu_p$  und  $\mu_n$  sind die **Beweglichkeiten** der Elektronen und Löcher:

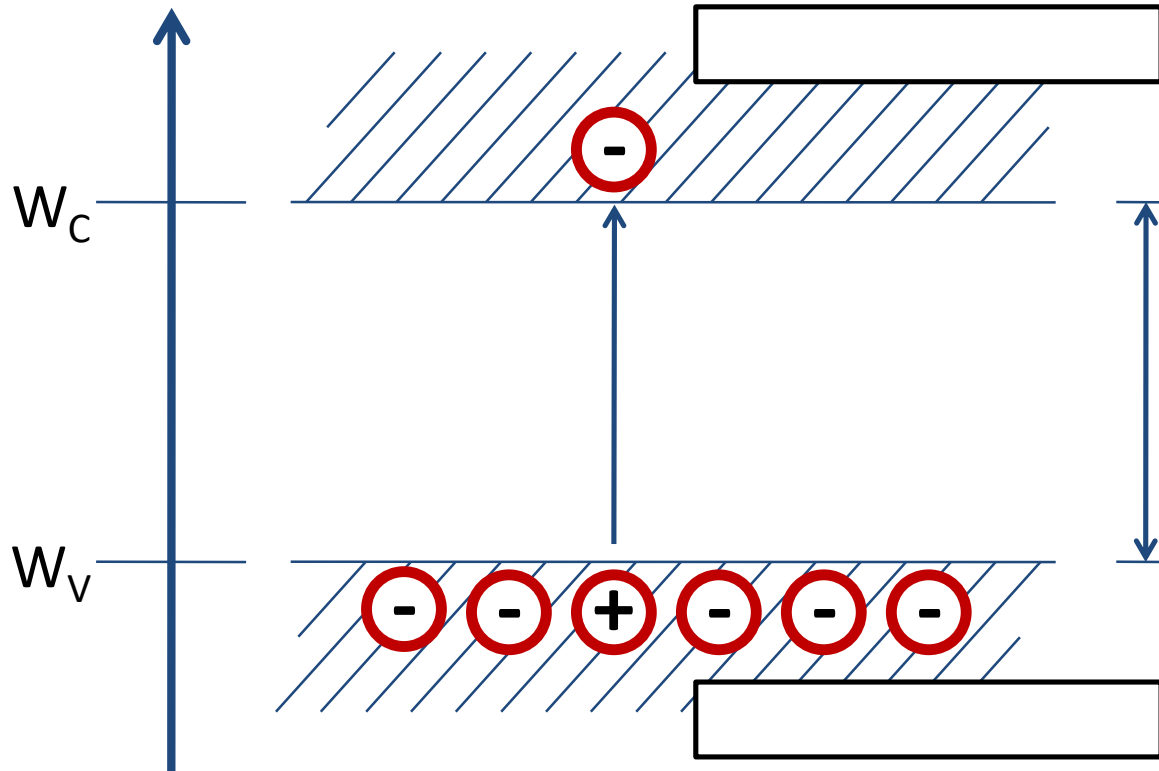
$v_D$  ist die **Driftgeschwindigkeit** und  $E$  die elektrische Feldstärke.

## Isolatoren

	Formelzeichen	Einheit	Ge	Si	GaAs	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Bandabstand	$W_g$	eV	0,66	1,12	1,43	8,9	8,7
Eigenleitungsdichte	$n_i$	cm <sup>-3</sup>	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^7$		
Elektronenbeweglichkt.	$\mu_n$	cm <sup>2</sup> /Vs	3900	1500	8500		
Löcherbeweglichkt.	$\mu_p$	cm <sup>2</sup> /Vs	1900	600	400		
Durchbruchfeldstärke	$E_{Br}$	V/cm	$10^5$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$



# Bändermodell eines reinen Halbleiters

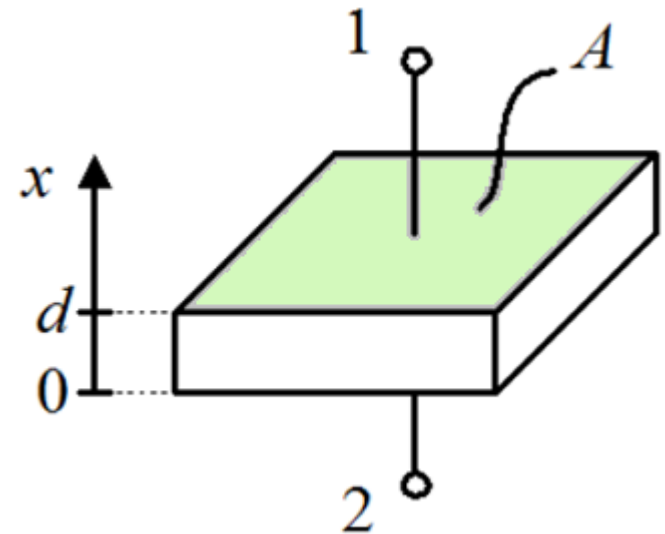


$W_V$  ist das Energieniveau der (gebundenen) Elektronen im Valenzband,  $W_C$  ist das Energieniveau der (freien) Elektronen im Leitungsband. Um Valenzelektronen ins Leitungsband anzuheben, ist der Bandabstand  $W_G = W_C - W_V$  zu überwinden. Zustände im „verbotenen Bereich“ zwischen Valenz- und Leitungsband sind nicht möglich.

## (WS 2008/09 – FA, Aufgabe 1)

Die nebenstehende Abbildung zeigt ein Halbleiterplättchen aus Silizium. Die Fläche beträgt  $A = 4 \text{ mm}^2$  und die Dicke  $d = 0,2 \text{ mm}$ .

- Wie groß muss die Eigenleitungsdichte  $n_i$  im Plättchen sein, damit es zwischen den Anschlussklemmen einen Widerstand von  $4,593 \Omega$  hat?
- Geben Sie zwei Möglichkeiten an, die Eigenleitungsdichte eines Halbleiters zu erhöhen.

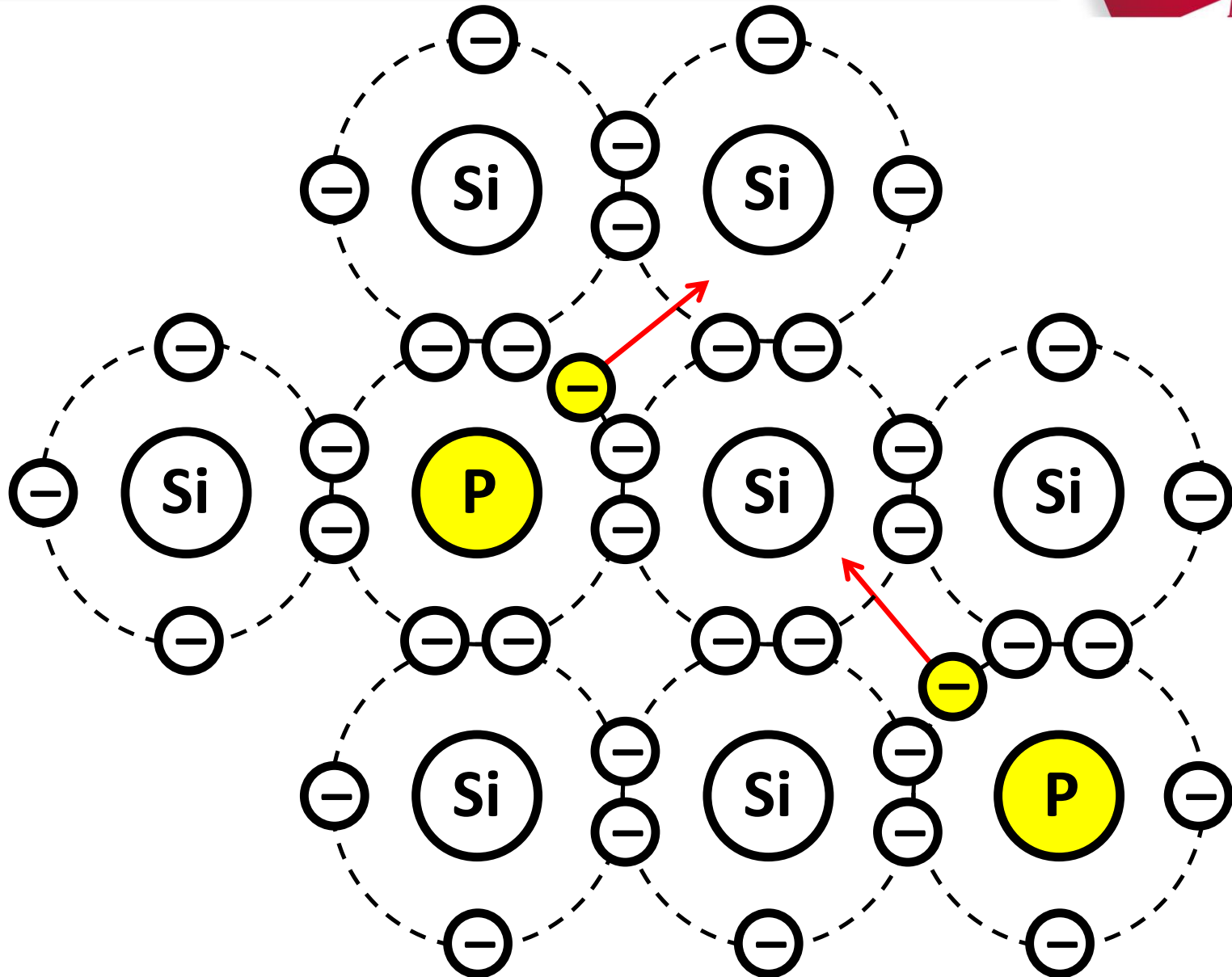


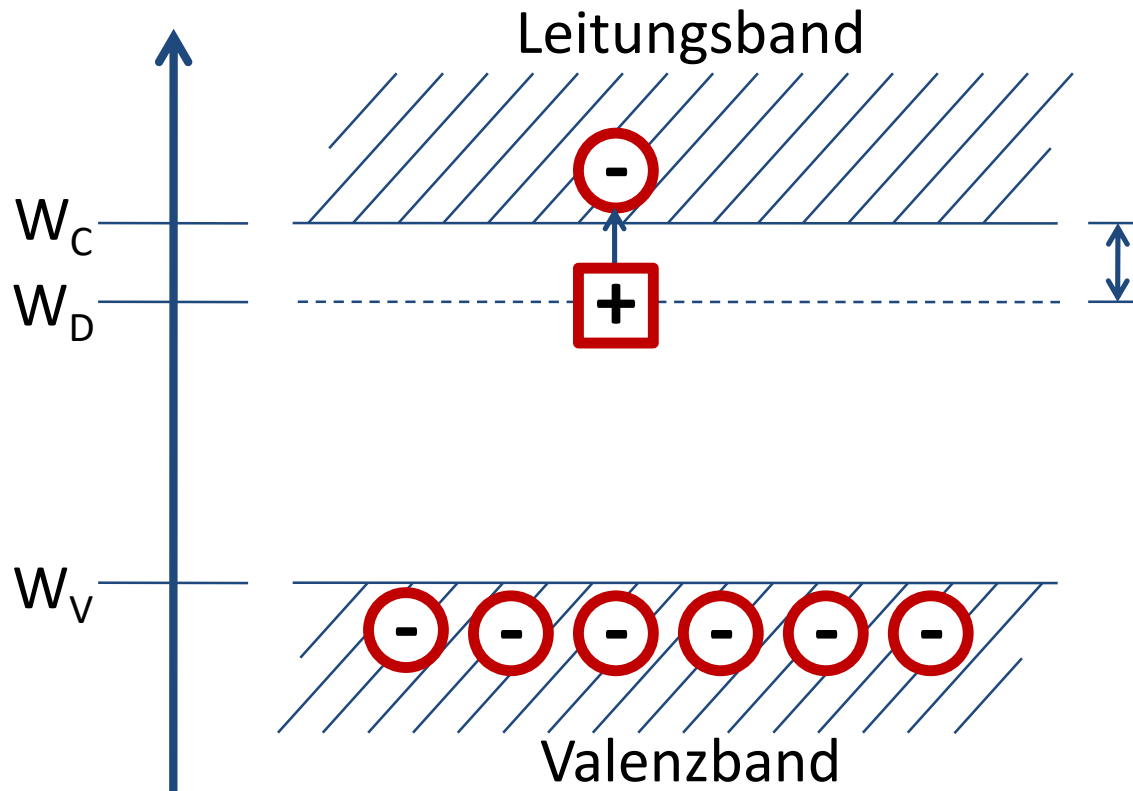
## 2.3. Dotierung, Störstellenleitung

Das **Einbringen von Fremdatomen (Dotieren)** in das Kristallgitter ermöglicht die **gezielte Erzeugung freier Elektronen und Löcher** und somit die Beeinflussung der Leitfähigkeit des Halbleiters.

- Dotiert man einen Halbleiter mit einem Stoff mit fünf Valenzelektronen („**Donator**“), zum Beispiel Arsen (As) oder Antimon (Sb), lässt sich das fünfte, „überzählige“ Elektron durch sehr geringe thermische Energie von seinem Atom abtrennen. Es herrscht **Elektronenüberschuss**, man spricht von einem **n-Halbleiter**.
- Dotiert man einen Halbleiter mit einem Stoff mit drei Valenzelektronen („**Akzeptor**“), z. B. Gallium (Ga) oder Indium (In), fehlt jeweils ein Elektron bei der Bindung an die Nachbaratome. Durch die Dotierung werden also zusätzliche Löcher eingebracht. Es herrscht **Löcherüberschuss**, man spricht von einem **p-Halbleiter**.

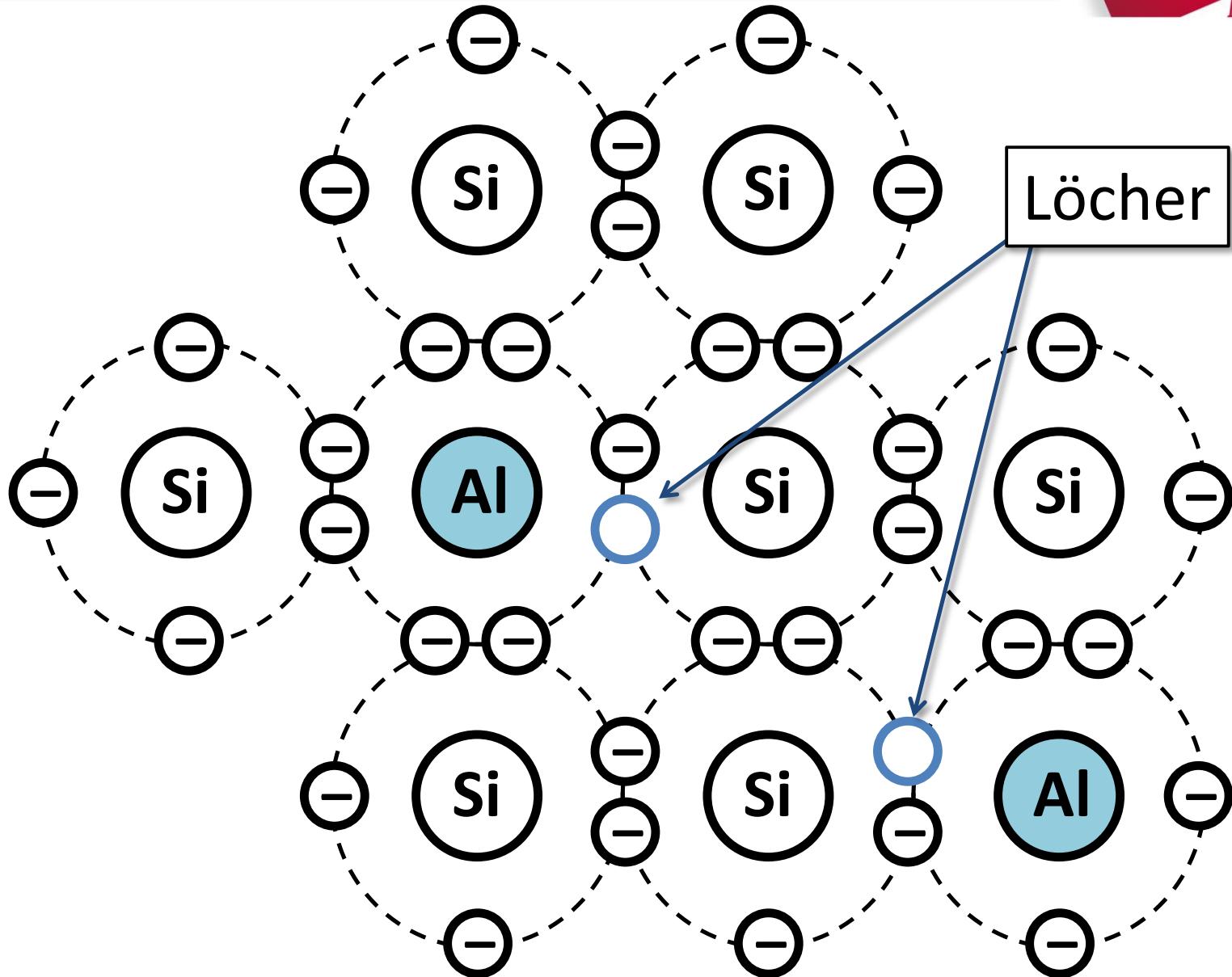


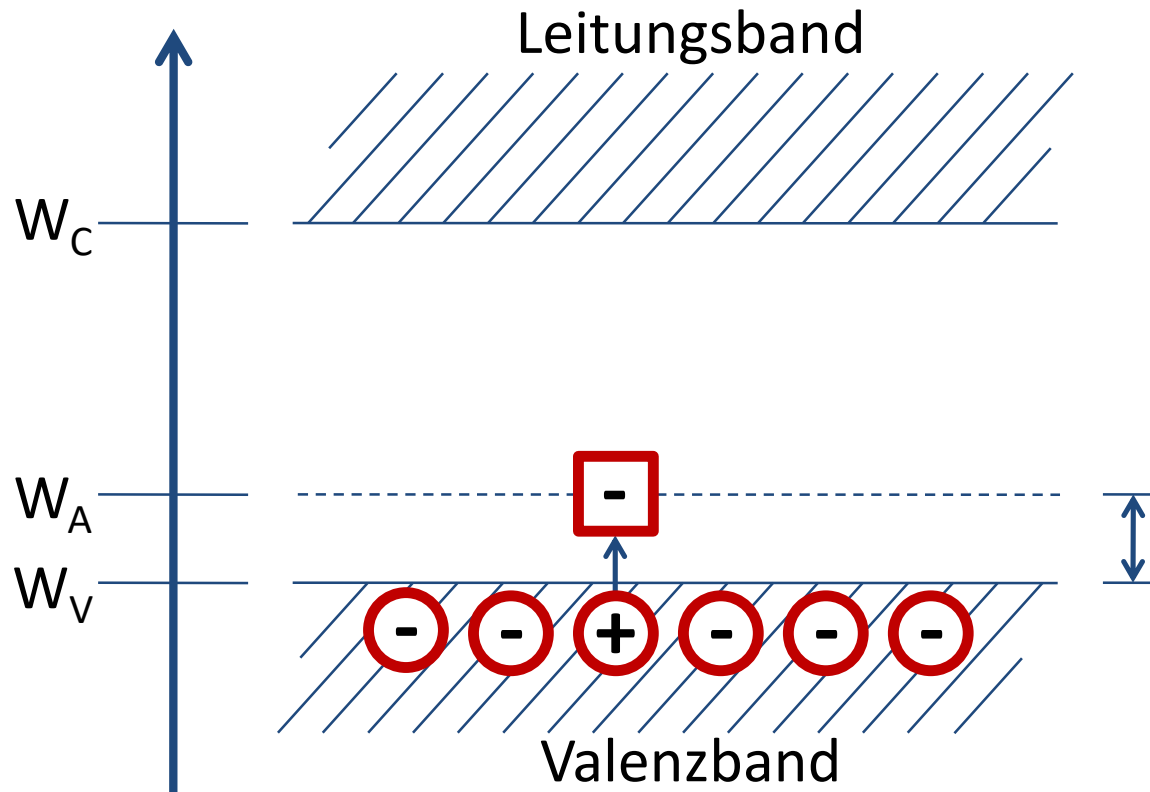




**Donatoren** bringen zusätzliche Elektronen mit einem Energieniveau  $W_D$  in die Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Es reicht eine sehr geringe Energiezufuhr  $\Delta W_D = W_C - W_D$  aus, um diese Elektronen ins Leitungsband anzuheben. Es entstehen freie Elektronen und ortsfeste positiv ionisierte Störstellen.

# Kristallaufbau eines p-Halbleiters





**Akzeptoren** bewirken ein Energieniveau  $W_A$  nahe der Valenzbandkante. Ein Elektron aus dem Valenzband braucht nur eine kleine Energiestufe  $\Delta W_A = W_A - W_V$  zu überwinden, um dieses Energieniveau zu besetzen. Es hinterlässt ein Loch im Valenzband und eine negativ ionisierte Störstelle.



- Im n-Halbleiter gibt es viele freie Elektronen („**Majoritätsträger**“) und wenige Löcher („**Minoritätsträger**“).
- Im p-Halbleiter sind die Löcher Majoritätsträger und die freien Elektronen Minoritätsträger.
- Bei Raumtemperatur sind praktisch alle Störstellen ionisiert („**Störstellenschöpfung**“).
- Im dotierten Halbleiter sind Elektronen- und Löcherdichte nicht mehr gleich, stattdessen gilt das sog. **Massenwirkungsgesetz** (ohne Herleitung):
- Da der Halbleiter nach außen elektrisch neutral ist, gilt außerdem die folgende **Neutralitätsbedingung**:

Sind Donator- und Akzeptordichte im dotierten Halbleiter bekannt, können Elektronendichte  $n_0$  und Löcherdichte  $p_0$  aus dem Massenwirkungsgesetz und der Neutralitätsbedingung berechnet werden:

## (WS 2002/03 – FA, Aufgabe 1)

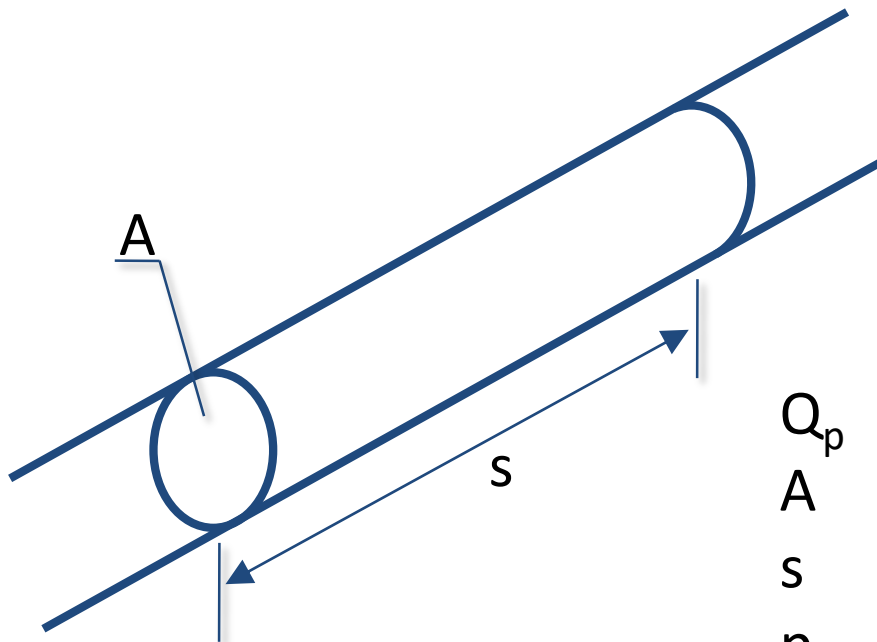
Ein homogener Halbleiter weist bei Zimmertemperatur folgende Ladungsträgerkonzentrationen auf:

$$p_0 = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad n_0 = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

- Welcher Halbleitertyp liegt vor (Begründung)?
- Berechnen Sie die Eigenleitungsichte  $n_i$  des Halbleiters.
- Der Halbleiter wurde mit einem Akzeptor der Dichte  $N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  dotiert. Wie hoch muss er zusätzlich mit einem Donator dotiert werden, um die oben genannten Eigenschaften zu erhalten?
- Handelt es sich bei dem Grundmaterial um Silizium, Germanium oder keines von beiden (Begründung)?

## 2.4. Stromfluss in Halbleitern

Gesamtladung der pos. Ladungsträger (z. B. Löcher) in einem Abschnitt der Länge  $s$  eines langen Leiters mit dem Querschnitt  $A$ :



Ladung pro Volumen

$$Q_p = \overbrace{p_0 e}^{\text{Ladung pro Volumen}} \cdot \underbrace{A s}_{\text{Volumen des Abschnitts}}$$

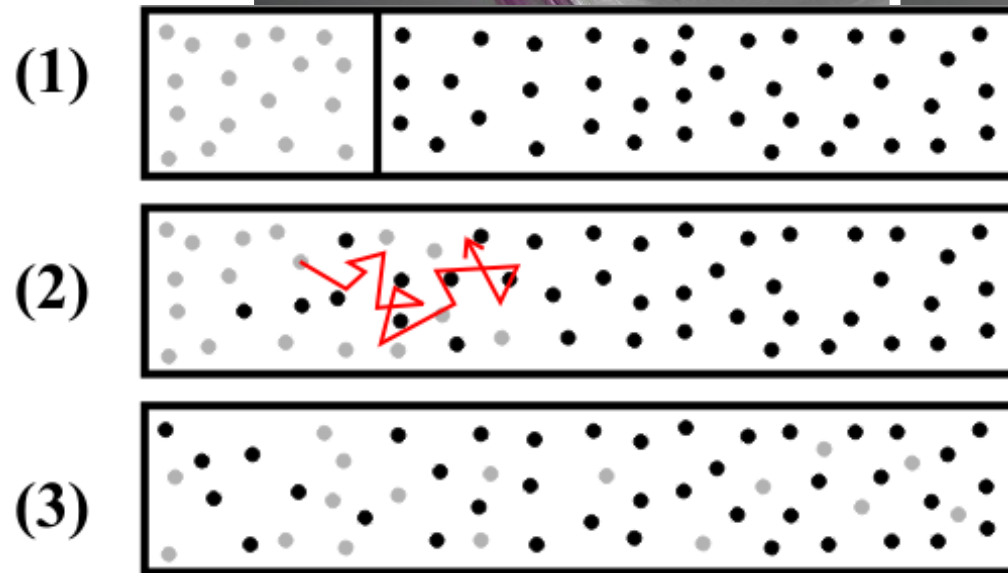
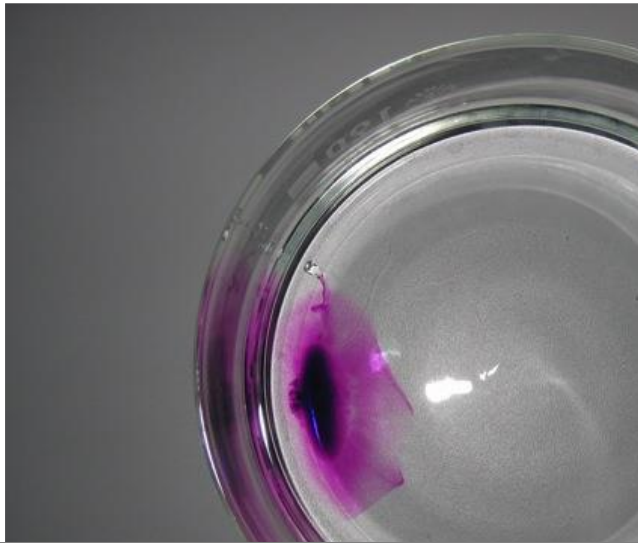
Volumen des Abschnitts

- $Q_p$  = positive Ladung (z. B. Löcher)
- $A$  = Querschnitt
- $s$  = Länge des Leiterabschnitts
- $p_0$  = Dichte der pos. Ladungsträger
- $e$  =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  As („Elementarladung“)

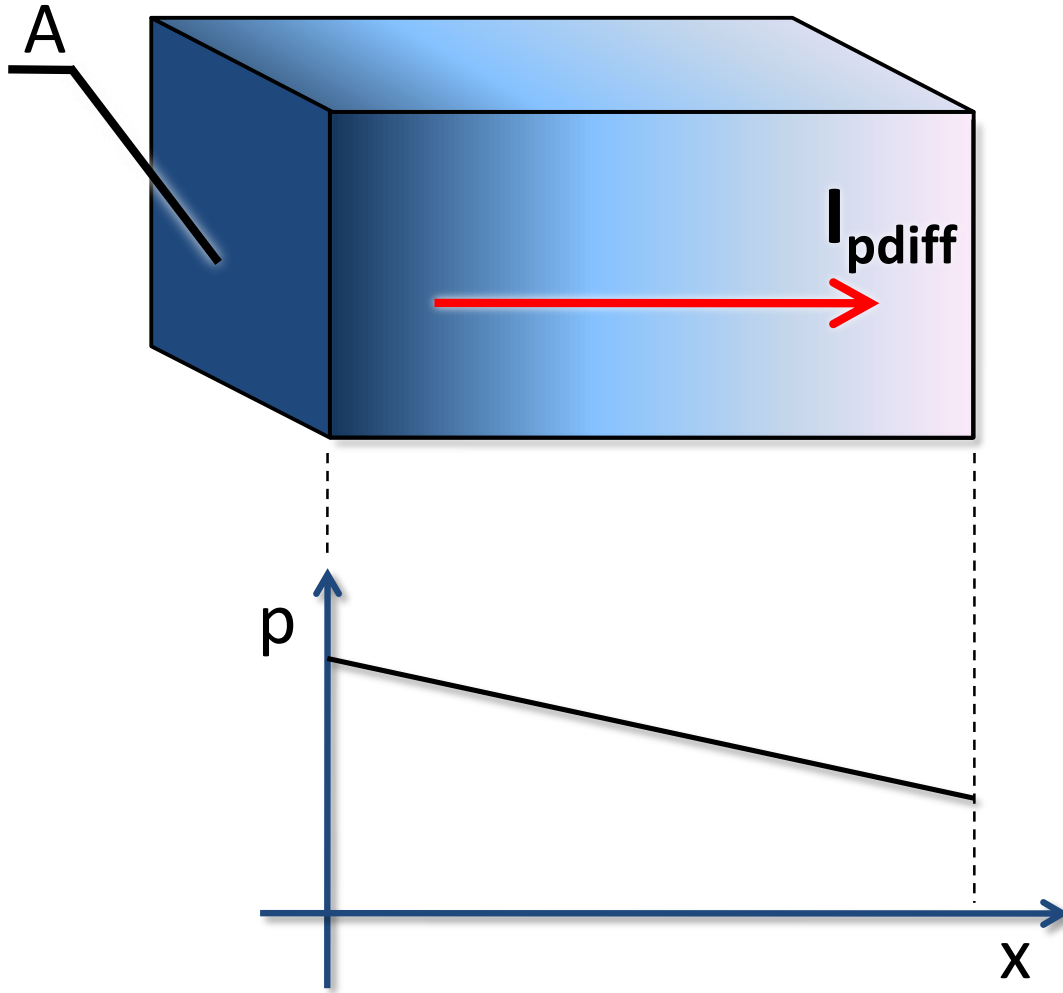
## Ein elektrisches Feld $E$ in einem Halbleiter bewirkt eine Bewegung der freien Ladungsträger (Driftstrom):

- Der Driftstrom in einem Halbleiter setzt sich zusammen aus dem Driftstrom der Löcher und dem Driftstrom der freien Elektronen.
  
- Für den spezifischen Widerstand und die elektrische Leitfähigkeit gilt (sowohl für reine als auch für dotierte Halbleiter):

# Beispiel: Diffusion im Wasserglas



Fotos: Andreas Kalt  
(Creative Commons Lizenz)



$A$  = Querschnitt des Halbleiters

$p$  = Ladungsträgerdichte der pos. Ladungsträger („Löcher pro Volumen“)

$I_{p,diff}$  = Diffusionsstrom von Löchern

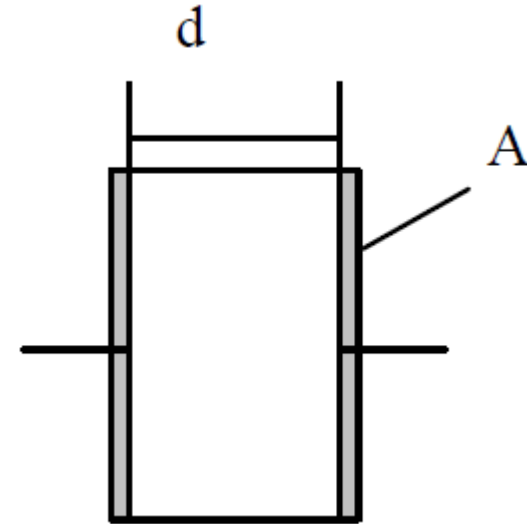
**Ist die Konzentration der freien Ladungsträger im Halbleiter nicht konstant, treten Diffusionsströme auf. Diese „versuchen“, das Konzentrationsgefälle auszugleichen:**

- Diffusionsstrom der Löcher:
- Diffusionsstrom der freien Elektronen:
- Für die Diffusionskonstanten  $D_n$  und  $D_p$  gilt:
- Dabei ist  $T$  die „absolute Temperatur“ in Kelvin und  $k$  die sog. Boltzmannkonstante:



## (SS 2006, Aufgabe 1)

Ein beidseitig mit Metallblättchen kontaktiertes Halbleiterelement der Dicke  $d = 0,5 \text{ mm}$  mit einem Querschnitt  $A = 5 \text{ mm}^2$  hat einen Widerstand von  $R = 0,3 \ \Omega$ .



Das Material ist mit einer Sorte Fremdatomen dotiert. Die Beweglichkeit der Elektronen bzw. Löcher beträgt bei Raumtemperatur:

$$\mu_n = 15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}, \quad \mu_p = 5000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

Ferner sei bekannt, dass die Löcherdichte um den Faktor  $10^6$  höher ist als die Elektronendichte.

- a) Berechnen Sie die Elektronendichte  $n_0$ , Löcherdichte  $p_0$  und Eigenleitungsdichte  $n_i$ .
- b) Ist das Material mit einem Akzeptor oder Donator dotiert? Geben Sie dessen Dichte an.
- c) Nun wird obiges Grundmaterial ( $\mu_n, \mu_p, n_i$ ) mit einem Akzeptor und mit einem Donator dotiert.

Die Donatordichte beträgt  $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ 1/cm}^3$ . Diesmal soll die Elektronendichte um den Faktor  $10^6$  höher sein als die Löcherdichte.

Berechnen Sie die Akzeptordichte.

## (WS 2006/07, Aufgabe 1)

- Ein Si-Halbleiter ist mit einer Phosphordichte von  $1 \cdot 10^{15}$  Atomen pro  $\text{cm}^3$  dotiert. Berechnen Sie die Elektronendichte  $n_0$  und die Löcherdichte  $p_0$  bei Raumtemperatur.
- Dieser Halbleiter wird erwärmt, wodurch die Eigenleitungsichte auf  $n_i = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  steigt. Berechnen Sie die Elektronendichte  $n_0$  und die Löcherdichte  $p_0$  für diesen Fall.
- Nun wird obiger Halbleiter neben Phosphor auch noch mit Bor der gleichen Dichte ( $1 \cdot 10^{15}$  Atomen pro  $\text{cm}^3$ ) dotiert. Wie groß sind nun die Elektronendichte  $n_0$  und die Löcherdichte  $p_0$  im erwärmten Zustand ( $n_i = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )?

- d) Die nachstehende Abbildung zeigt die Minoritätsträgerdichte in der Basis eines npn-Bipolartransistors im Arbeitspunkt. Die aktive Fläche der Basis sei  $A = 25 \mu\text{m}^2$ .

Wie groß ist der Diffusionsstrom bei Raumtemperatur ( $T = 300 \text{ K}$ ) aufgrund des Elektronengradienten in der Basis?

