# 2.2. Eigenleitung

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

$$\rho = \frac{1}{e \cdot n_i (\mu_n + \mu_p)} \qquad [\rho] = \Omega m \qquad e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,As$$

Für die **elektrische Leitfähigkeit** gilt entsprechend:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = e\, n_i (\mu_n + \mu_p) \qquad [\kappa] = \frac{1}{\Omega m}$$

b.w.

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

$\mu \cdot E = v_D$ ← mit $\mu$ kann berechnet werden, wie schnell sich die Ladungsträger im el. Feld bewegen.

$[\mu] = \frac{m^2}{Vs}$

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



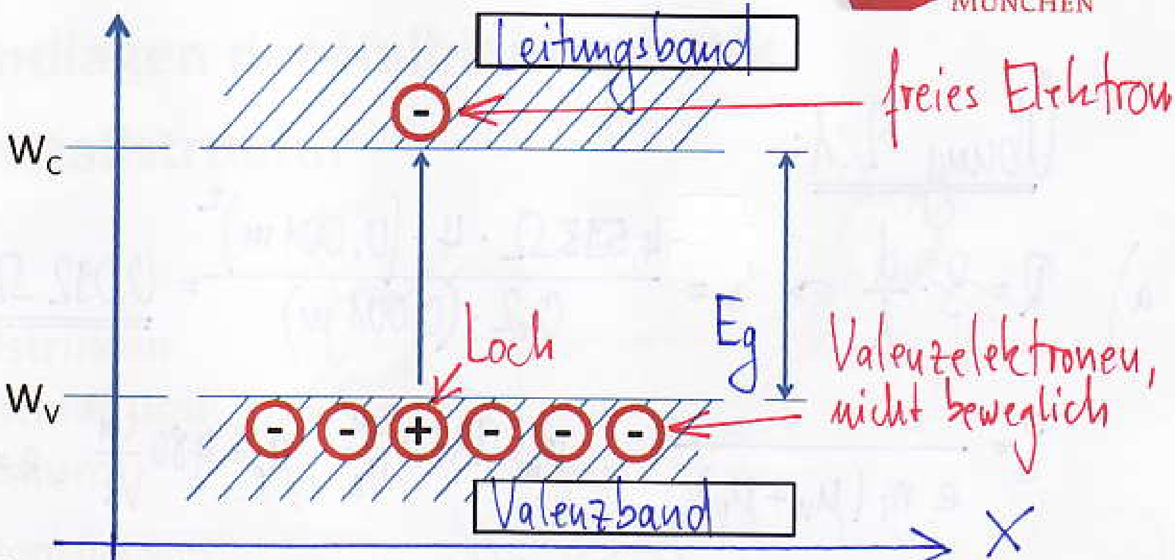


## Halbleiter-Eigenschaften bei Raumtemperatur

| | Formelzeichen | Einheit | Ge | Si | GaAs | $SiO_2$ (Isolatoren) | $Al_2O_3$ (Isolatoren) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bandabstand | $E_g$ | eV | 0,67 | 1,11 | 1,43 | 8,9 | 8,7 |
| Eigenleitungsdichte | $n_i$ | $cm^{-3}$ | $2{,}3 \cdot 10^{13}$ | $1{,}5 \cdot 10^{10}$ | $1{,}3 \cdot 10^{6}$ | | |
| Bewegl. der Elektronen | $\mu_n$ | $cm^2/Vs$ | 3900 | 1350 | 8500 | | |
| Bewegl. der Löcher | $\mu_p$ | $cm^2/Vs$ | 1900 | 480 | 400 | | |
| Durchbruch-Feldstärke | $E_{Br}$ | V/cm | $10^5$ | $3 \cdot 10^5$ | $4 \cdot 10^5$ | $6 \cdot 10^6$ | $10^7$ |

b.w.

## Bändermodell eines Halbleiters




Valenzelektronen, die an der Atombindung beteiligt sind, besitzen eine feste Bindungsenergie $W = W_V$. Durch Zufuhr der Energie $E_g$ können sie ins Leitungsband angehoben werden. Sie besitzen dann eine Energie $W \geq W_C$. Elektronen können keine Zustände in der „verbotenen Zone" zwischen Valenz- und Leitungsband annehmen.



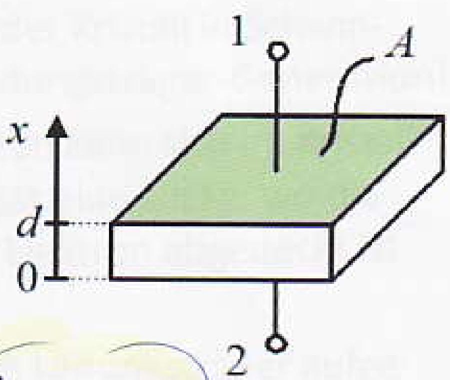
## Übungsaufgabe 2.1

**(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 $d = 0{,}2$ mm.

a) Wie groß muss die Eigenleitungsträgerdichte $n_i$ im Plättchen sein, damit es zwischen den Anschlussklemmen einen Widerstand von 4,593 Ω hat?

b) Geben Sie zwei Möglichkeiten an, die Eigenleitungsträgerdichte eines Halbleiters zu erhöhen.




b.w.

# 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.

*An dieser Stelle erst einmal die folgenden Folien zeigen...

- 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**.





## Periodensystem: Donatoren und Akzeptoren

Akzeptoren (3 Valenzelektronen)

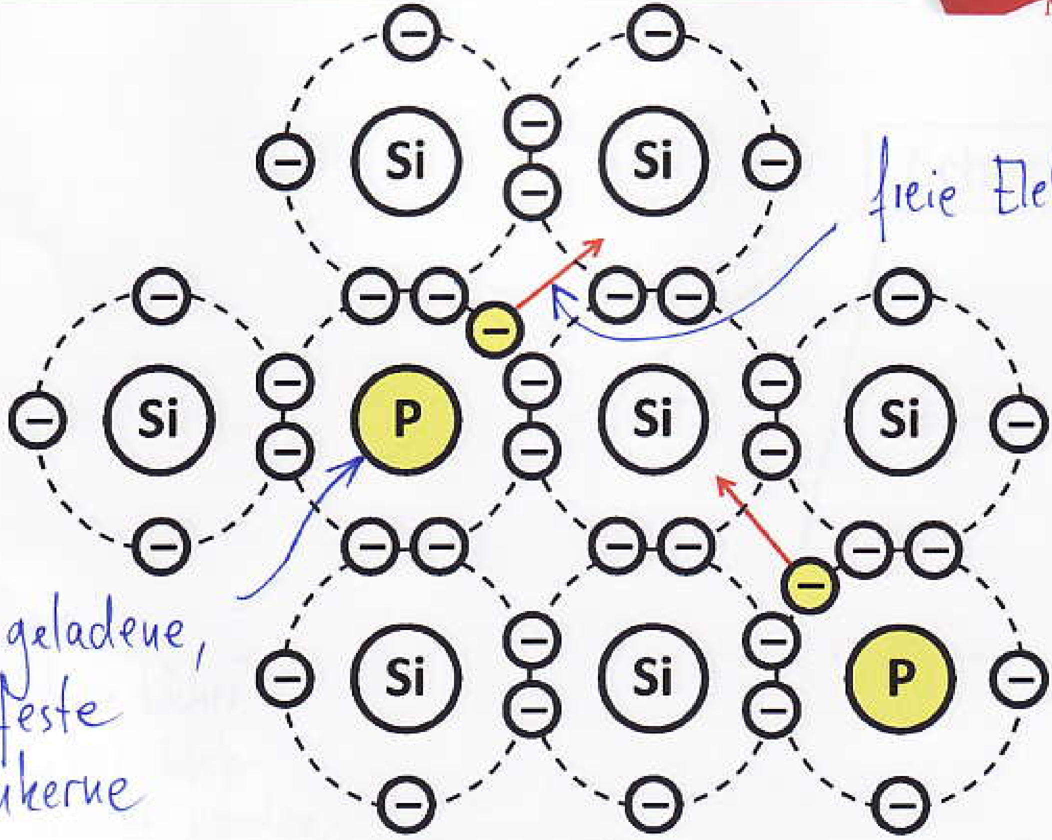
| I a | II a | III b | IV b | V b | VI b | VII b | VIII b | VIII b | VIII b | I b | II b | III a | IV a | V a | VI a | VII a | VIII a |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He 4 |
| 3 Li 7 | 4 Be 9 | | | | | | | | | | | 5 B 11 | 6 C 12 | 7 N 14 | 8 O 16 | 9 F 19 | 10 Ne 20 |
| 11 Na 23 | 12 Mg 24 | | | | | | | | | | | 13 Al 27 | 14 Si 28 | 15 P 31 | 16 S 32 | 17 Cl 36 | 18 Ar 40 |
| 19 K 39 | 20 Ca 40 | 21 Sc 45 | 22 Ti 48 | 23 V 51 | 24 Cr 52 | 25 Mn 55 | 26 Fe 56 | 27 Co 59 | 28 Ni 59 | 29 Cu 64 | 30 Zn 65 | 31 Ga 70 | 32 Ge 73 | 33 As 75 | 34 Se 79 | 35 Br 80 | 36 Kr 84 |
| 37 Rb 86 | 38 Sr 88 | 39 Y 89 | 40 Zr 91 | 41 Nb 93 | 42 Mo 95 | 43 Tc 97 | 44 Ru 101 | 45 Rh 103 | 46 Pd 106 | 47 Ag 108 | 48 Cd 112 | 49 In 115 | 50 Sn 119 | 51 Sb 122 | 52 Te 128 | 53 I 127 | 54 Xe 131 |
| 55 Cs 133 | 56 Ba 137 | 57 La 139 | 72 Hf 179 | 73 Ta 181 | 74 W 184 | 75 Re 186 | 76 Os 190 | 77 Ir 192 | 78 Pt 195 | 79 Au 197 | 80 Hg 201 | 81 Tl 204 | 82 Pb 207 | 83 Bi 209 | 84 Po 209 | 85 At 210 | 86 Rn 222 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 58 Ce 140 | 59 Pr 141 | 60 Nd 144 | 61 Pm 145 | 62 Sm 150 | 63 Eu 152 | 64 Gd 157 | 65 Tb 159 | 66 Dy 163 | 67 Ho 165 | 68 Er 167 | 69 Tm 169 | 70 Yb 173 | 71 Lu 175 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 87 Fr 223 | 88 Ra 226 | 89 Ac 227 | 90 Th 232 | 91 Pa 231 | 92 U 238 |

Donatoren (5 Valenzelektronen)

## Kristallaufbau eines n-Halbleiters

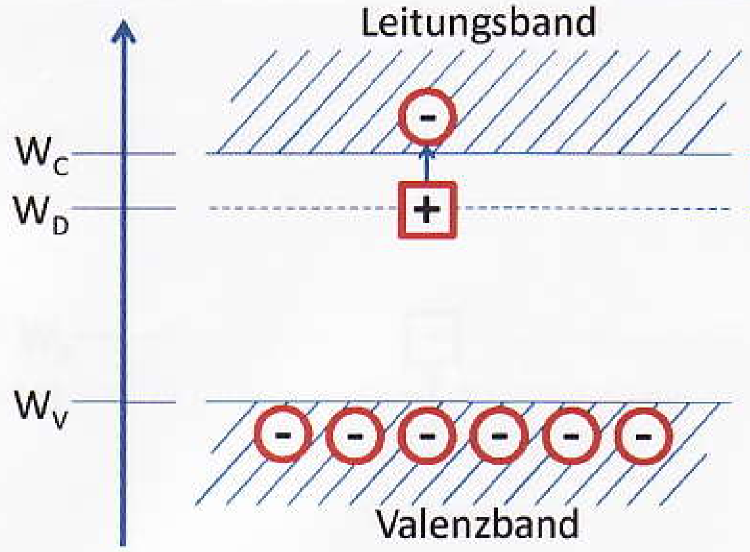



freie Elektronen

pos. geladene, ortsfeste Atomkerne



## Bändermodell eines n-Halbleiters

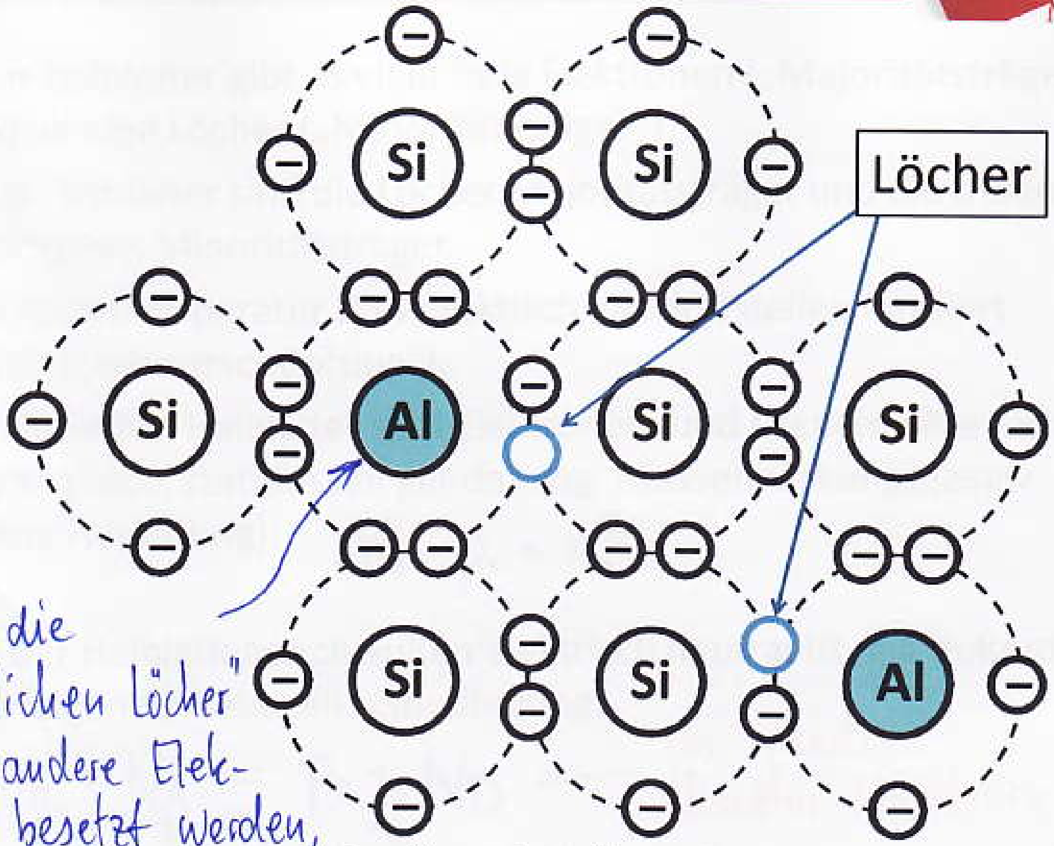



$\Delta W = W_C - W_D$

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

## Kristallaufbau eines p-Halbleiters



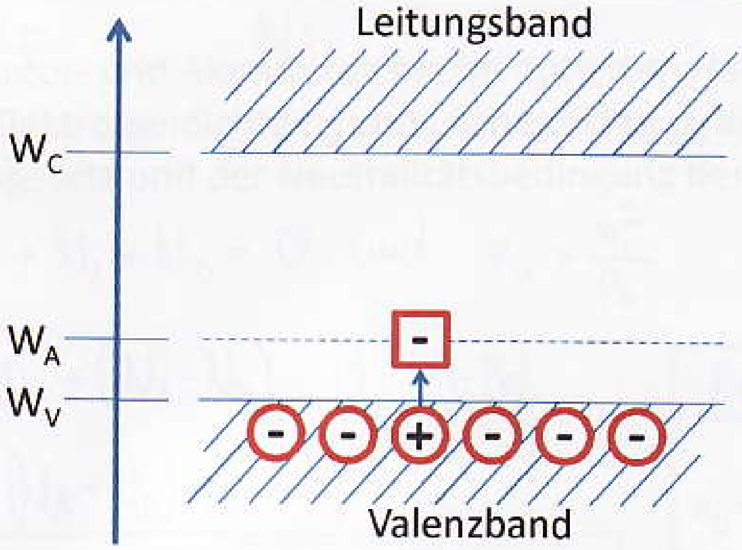



Wenn die „zusätzlichen Löcher" durch andere Elektronen besetzt werden, bleiben neg. geladene, ortsfeste Störstellen übrig!



## Bändermodell eines p-Halbleiters






$\Delta W = W_A - W_V$

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

Jetzt Zusammenfassung auf Folie 11 ...!!

## Massenwirkungsgesetz und Neutralitätsbedingung

HOCHSCHULE MÜNCHEN

- 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 („**Störstellenerschöpfung**").
- Im dotierten Halbleiter sind Elektronen- und Löcherdichte nicht mehr gleich, stattdessen gilt das sog. **Massenwirkungsgesetz** (ohne Herleitung): $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$
- Da der Halbleiter nach außen elektrisch neutral ist, gilt außerdem die folgende **Neutralitätsbedingung**:

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D$$

pos. geladene Donator-Störstellen

freie Elektronen

neg. geladene Akzeptor-Störstellen

Löcher (pos.)



## Ladungsträgerdichte im dotierten Halbleiter

HOCHSCHULE MÜNCHEN

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

$$n_0 - p_0 + N_A - N_D = 0 \quad \text{und} \quad n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}$$

$$\rightarrow \frac{n_i^2}{p_0} - p_0 + (N_A - N_D) = 0 \quad \Big| \cdot (-p_0)$$

$$\rightarrow p_0^2 - (N_A - N_D) \cdot p_0 - n_i^2 = 0$$

$$\boxed{\rightarrow p_0 = \frac{N_A - N_D}{2} + \sqrt{\frac{(N_A - N_D)^2}{4} + n_i^2}}$$

erklären, warum „–" nicht geht...!

Entsprechend gilt für $n_0$:

$$\boxed{n_0 = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\frac{(N_D - N_A)^2}{4} + n_i^2}}$$

b.w.

## Driftstrom im Halbleiter

**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.

$$\left.\begin{aligned} I_p &= p_0 \cdot e \cdot A \cdot \mu_p \cdot E \\ I_n &= n_0 \cdot e \cdot A \cdot \mu_n \cdot E \end{aligned}\right\} I_{ges} = I_p + I_n$$

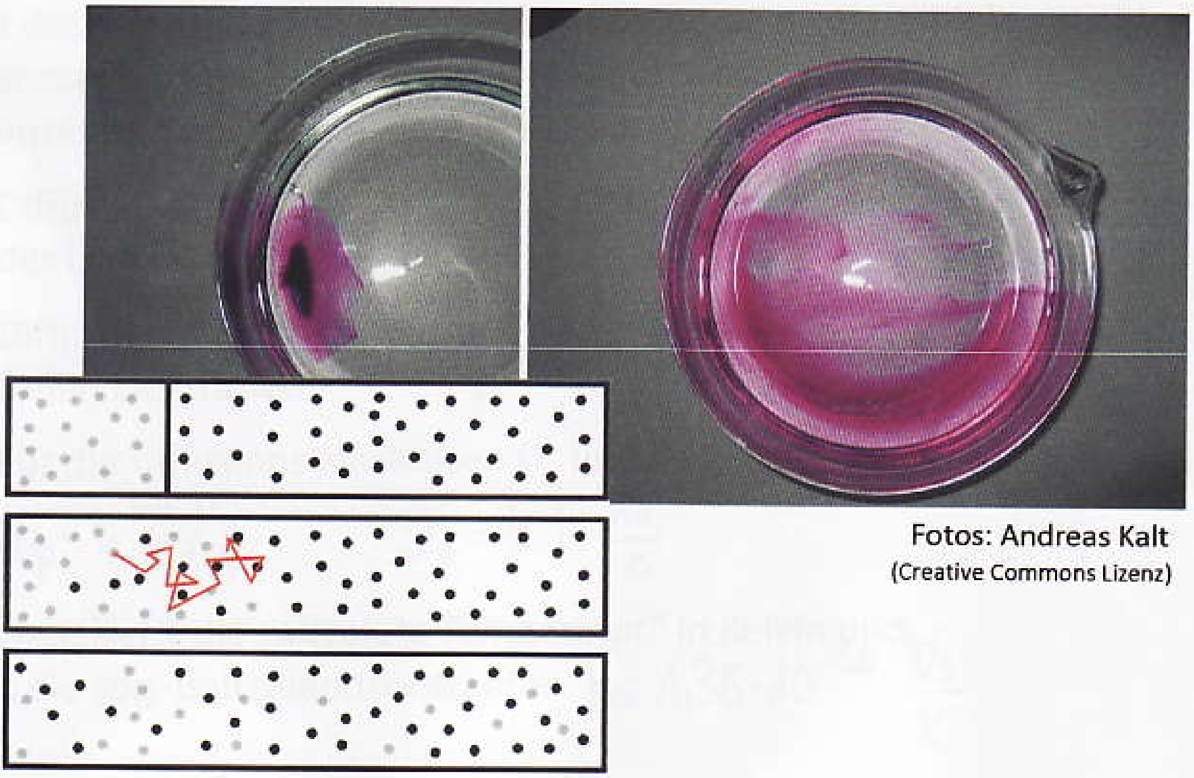
- Für den spezifischen Widerstand und die elektrische Leitfähigkeit gilt (sowohl für reine als auch für dotierte Halbleiter):

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} = \frac{U}{I_{Drift}} \cdot \frac{A}{l} = \frac{E \cdot A}{I_{Drift}} = \frac{\cancel{E \cdot A}\ 1}{e \cdot \cancel{A} \cdot \cancel{E}(p_0\mu_p + n_0\mu_n)} = \boxed{\frac{1}{e \cdot (p_0\mu_p + n_0\mu_n)} = \rho}$$

$$\rightarrow \boxed{\kappa = e \cdot (p_0\mu_p + n_0\mu_n)}$$



## Beispiel: Diffusion im Wasserglas



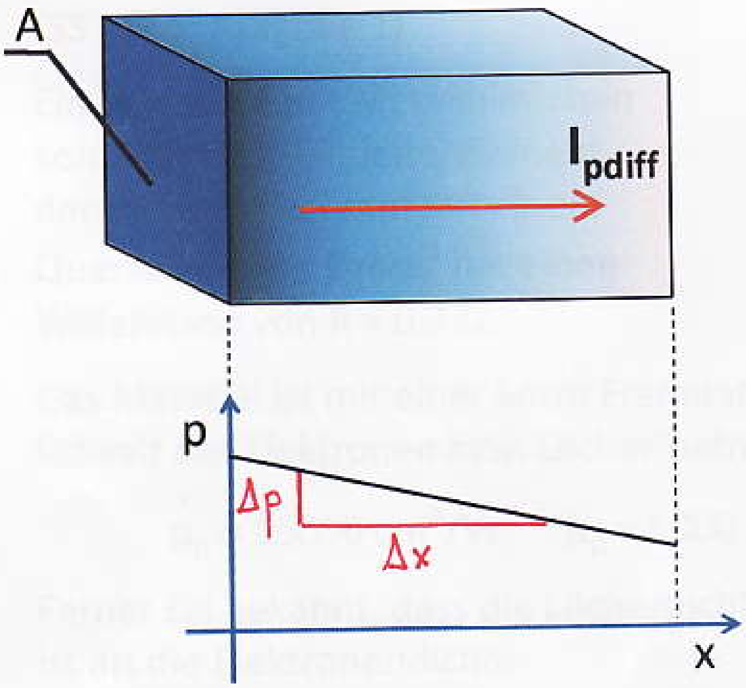
(1)

(2)

(3)

Fotos: Andreas Kalt
(Creative Commons Lizenz)

## Zur Berechnung des Diffusionsstroms im Halbleiter




A = Querschnitt des Halbleiters

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

$I_{pdiff}$ = Diffusionsstrom von Löchern

$\frac{\Delta p}{\Delta x} \neq 0$

$\Rightarrow$ Diffusionsstrom!



## Diffusionsstrom im Halbleiter

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

- Diffusionsstrom der Löcher: $I_{pdiff} = -A \cdot e \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$
- Diffusionsstrom der freien Elektronen: $I_{ndiff} = +A \cdot e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$
- Für die Diffusionskonstanten $D_n$ und $D_p$ gilt:

$D_p = k \cdot T \cdot \frac{\mu_p}{e}$ $\quad D_n = k \cdot T \cdot \frac{\mu_n}{e}$

- Dabei ist T die „absolute Temperatur“ in Kelvin und k die sog. Boltzmannkonstante: $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$