Übungsgruppenleiter und Praktikumsbetreuer

gesucht für

Physik für Naturwissenschaftler

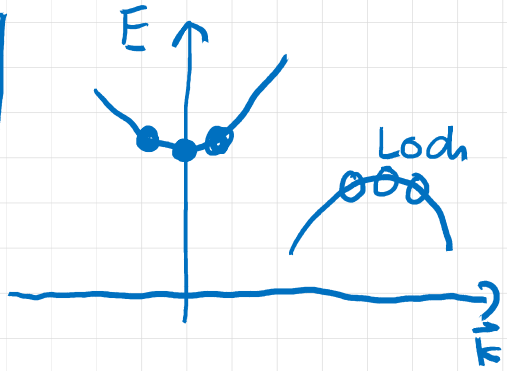
im Sommersemester 2024

Übungen: alle 2 Wochen während der Vorlesungszeit – 3 Monate SHK 31 h (ca. 450,-)

Praktikum: 8 Termine während der Vorlesungszeit oder 2 Wochen Blockpraktikum zu Beginn der Semesterferien – 4 Monate SHK 35 h (ca. 510,-)

Kontakt: T. Koethe, koethe@ph2.uni-koeln.de T: -3659

Kraft auf e^- $\quad m^* \cdot \vec{a} = \vec{F} = \hbar \dot{\vec{k}} = -e\left[\vec{E} + \frac{1}{\hbar}\left(\nabla_{\vec{k}} E(\vec{k}) \times \vec{B}\right)\right]$

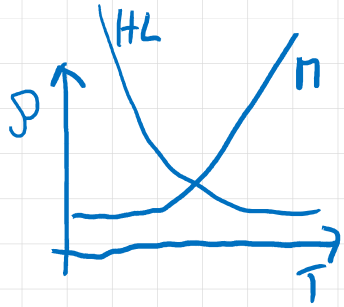


effektive Masse $\quad \frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2}\frac{d^2E}{dk^2}$; $\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2}\left(\frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j}\right)$

Loch $\quad e_h = -e_e$; $k_h = -k_e$; $E_h = -E_e$; $v_h = v_e$; $m_h^* = -m_e^*$

Kraft auf Loch $\quad m_h^* \cdot \vec{a} = \vec{F} = \hbar \dot{\vec{k}}_h = e\left[-\vec{E} + \frac{1}{\hbar}\left(\nabla_{\vec{k}_h} E_h(\vec{k}_h) \times \vec{B}\right)\right]$

spezifischer Widerstand $\quad \boxed{\rho = \frac{m^*}{n e^2 \tau}}$



Massenwirkungsgesetz $\quad n_L \cdot p_V = N_L \cdot P_V \cdot e^{-E_g/k_B T}$

$$n_i(T) = (N_L \cdot P_V)^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-E_g/2k_B T}$$

9.3 Dotierte Halbleiter

Für technische Anwendungen ist die intrinsische Ladungsträgerkonzentration von Halbleitern zu klein.

⇒ absichtlicher Einbau von Verunreinigungen = Dotierstoffen

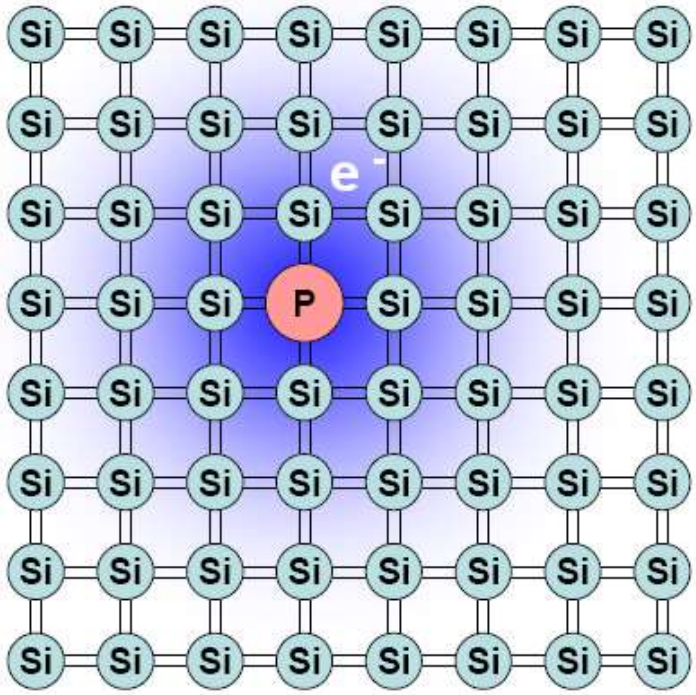
Donoren ≙ Element aus Gruppe 5 mit extra e^- wie P, As, Sb

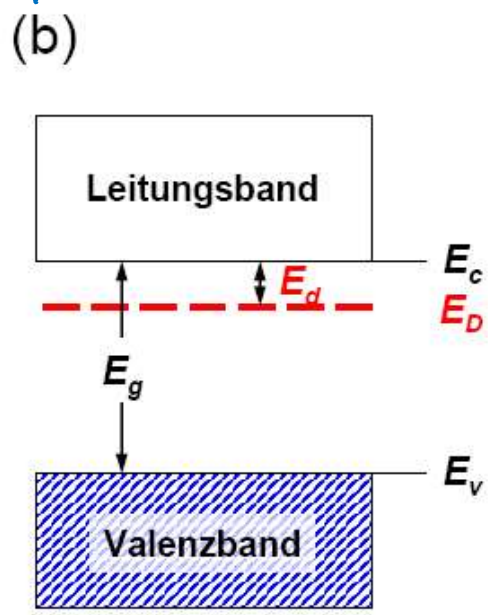
Akzeptor ≙ " " " 3 mit fehlendem e^- wie B, Al, Ga, In

Donorbild: Zusätzliches e^- ist an positive Überschussladung des Donorkerns gebunden

⇒

Abschätzung von E_b mit Bohrschem H-Atom Modell.





$$E_n = \frac{m_e^* \, e^4}{2\,(4\pi\varepsilon_0\varepsilon\,\hbar^2)^2}\,\frac{1}{n^2}$$

ε ist in Halbleitern sehr groß

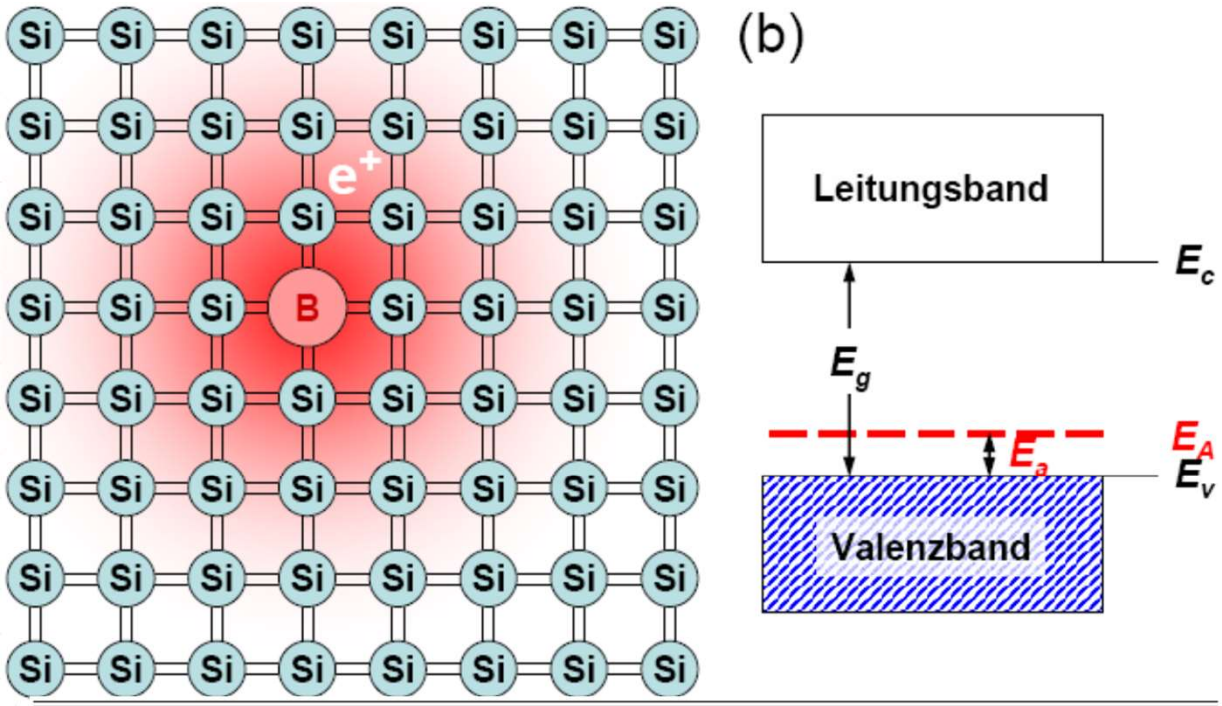
z. B $\varepsilon_{Si} = 11{,}7$

m_e^* ist oft kleiner als m_e

z. B $m_{e,Si}^* \approx 0{,}3\, m_e$

Statt 13,6 eV ist Ionisierungsenergie

also $13{,}6\,\text{eV}\,\frac{0{,}3}{11{,}7^2} \approx 50\,\text{meV}$



	Donatoren			Akzeptoren			
	P	As	Sb	B	Al	Ga	In
		E_d			E_a		
Halbleiter	(meV)	(meV)	(meV)	(meV)	(meV)	(meV)	(meV)
Si	45	49	39	45	57	65	16
Ge	12	12.7	9.6	10.4	10.2	10.8	11.2

⇒ viele Donatoren sind bei 300 K ionisiert!

Der Bohr-Radius von Donatoren ist typisch 20 – 100 Å.

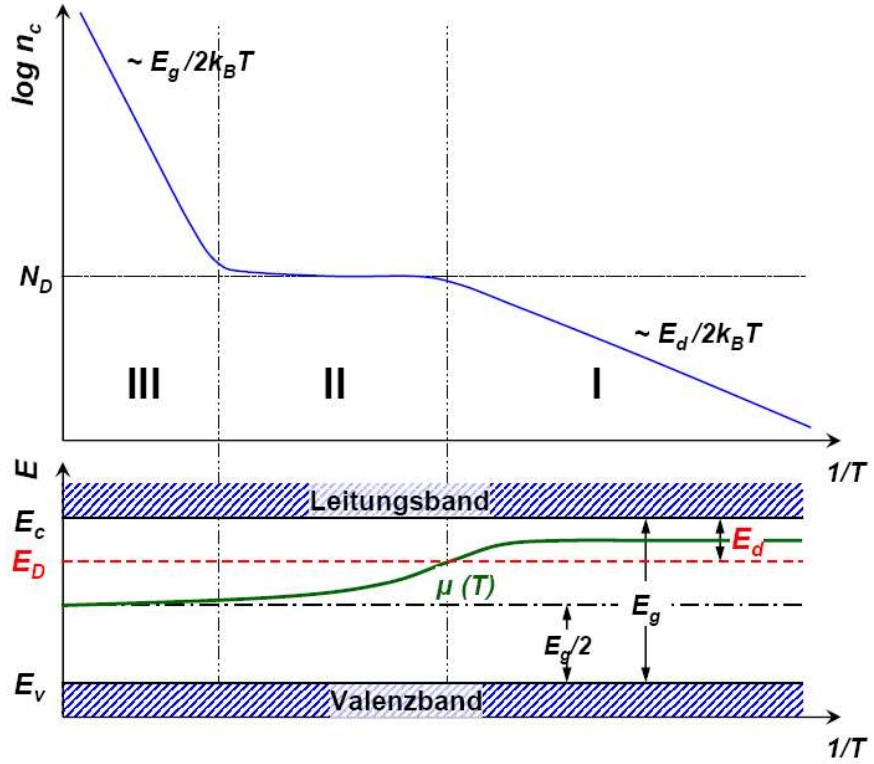
Analog für Akzeptoren: Ortsfeste negative Ladung (ein e^- wird benötigt um die 4 Bindungen herzustellen), dass von einem fehlenden e^- (= Loch) umkreist wird. Ähnlich kleine Ionisationsenergien für das Loch, wie für e^- bei Akzeptor.

Die quantitative Bestimmung der Ladungsträgerkonzentration ist i.A. nur numerisch möglich. Für kleine T und wenn nur Donatoren vorhanden sind ist

$$n_L \approx \sqrt{N_D \cdot N_L}\; e^{-E_d/2k_BT}$$

wo N_D ≙ Konzentration von Donatoren

T-Abhängigkeit von μ und n_L stellt die Abbildung sehr schön dar.



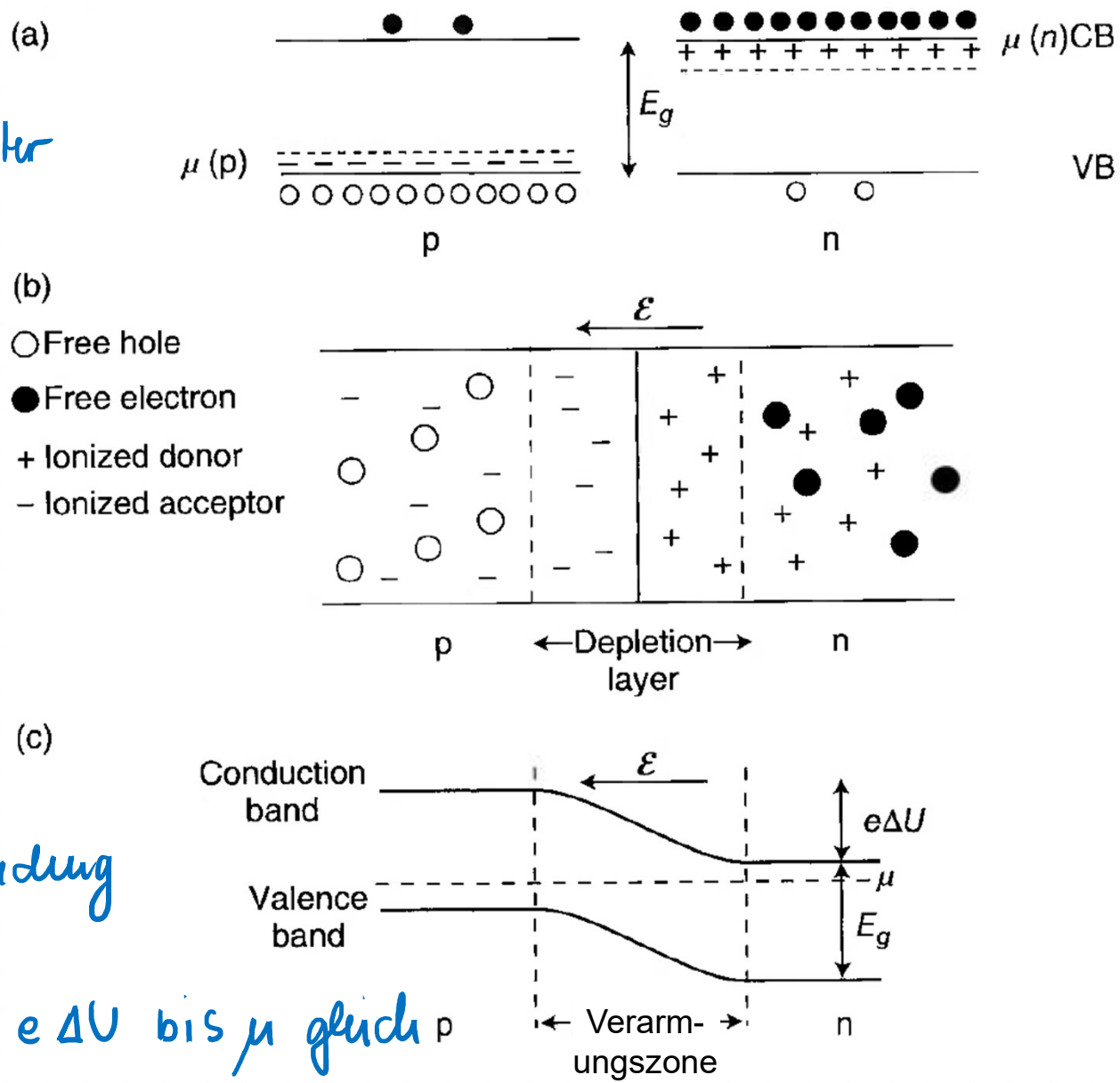
9.4 Der pn-Kontakt

① Ein p und ein n dotierter Halbleiter besitzen sehr unterschiedliches μ.

② Fügt man sie zusammen diffundieren e^- von n nach p und Löcher von p nach n.

③ Diffusion führt zur Verarmung von mobilen Ladungsträgern an der Grenzfläche ⇒ neg. Raumladung in p und positive Raumladung in n.

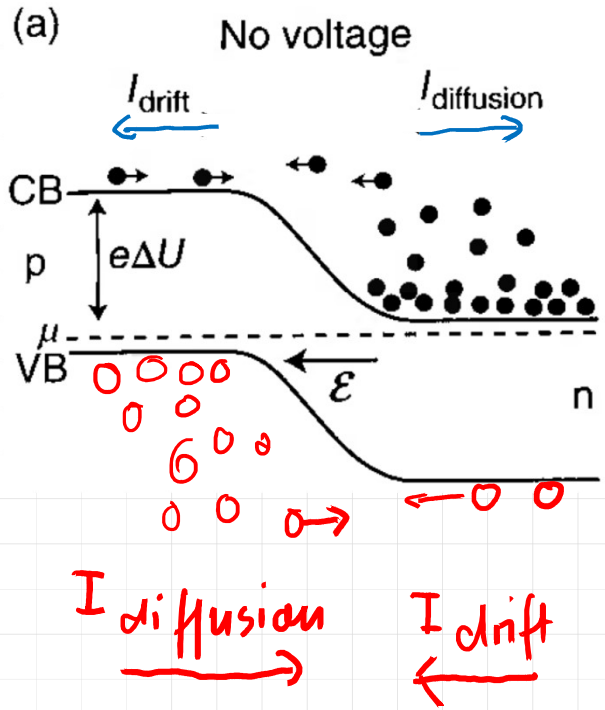
④ ⇒ Aufbau einer Potentialstufe $e\Delta U$ bis μ gleich



(5) Im Gleichgewicht gibt es zwei sich kompensierende e^--Ströme

- Den Driftstrom I_{drift} durch thermische in p erzeugte e^- die durch die Potentialstufe in den n-Bereich getrieben werden, und
- und den Diffusionsstrom $I_{Diffusion}$ der e^- in n, von denen einige genug Energie haben um die Potentialstufe zu überwinden und in den gelangen.

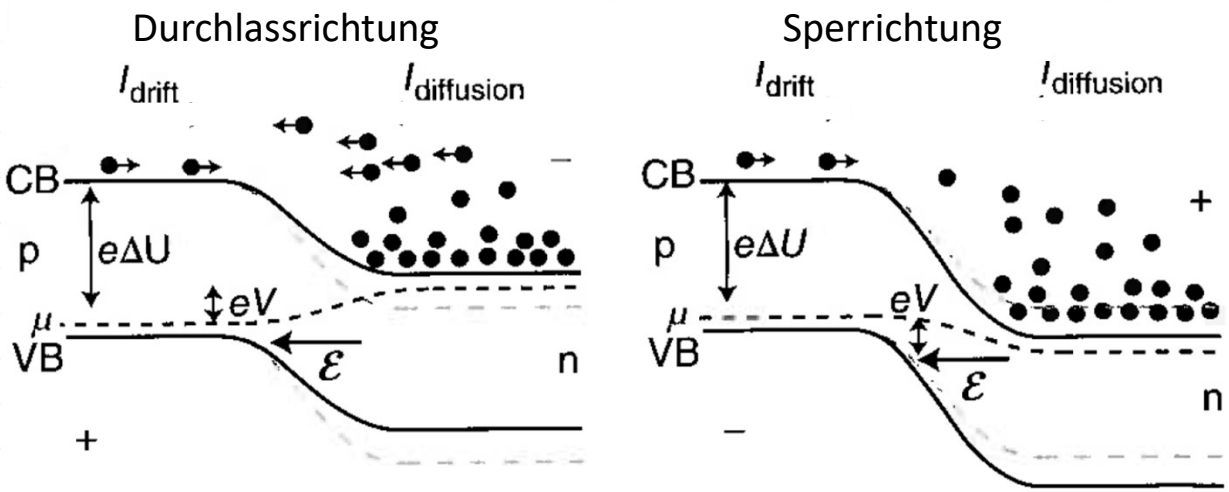
Es ist $I_{diffusion} = -I_{drift} = I_0$



(6) Analog gibt es entsprechende Löcherströme $I_{diffusion}$ und I_{drift}, die jeweils die gleichen Richtungen wie die e^- Ströme haben.

Insgesamt ist $I_{diffusion} + I_{diffusion} = -(I_{drift} + I_{drift})$

7 Legt man eine positive Spannung V an p an, so verkleinert sich die Potentialstufe und der Diffusionsstrom vergrößert sich. Es wird



$$I_{diffusion} = I_0 \, e^{eV}$$

Der Driftstrom I_{drift} bleibt unverändert. Also entsteht ein Nettostrom

$$I = I_0 e^{eV} - I_0 = I_0 \left(e^{eV} - 1\right)$$

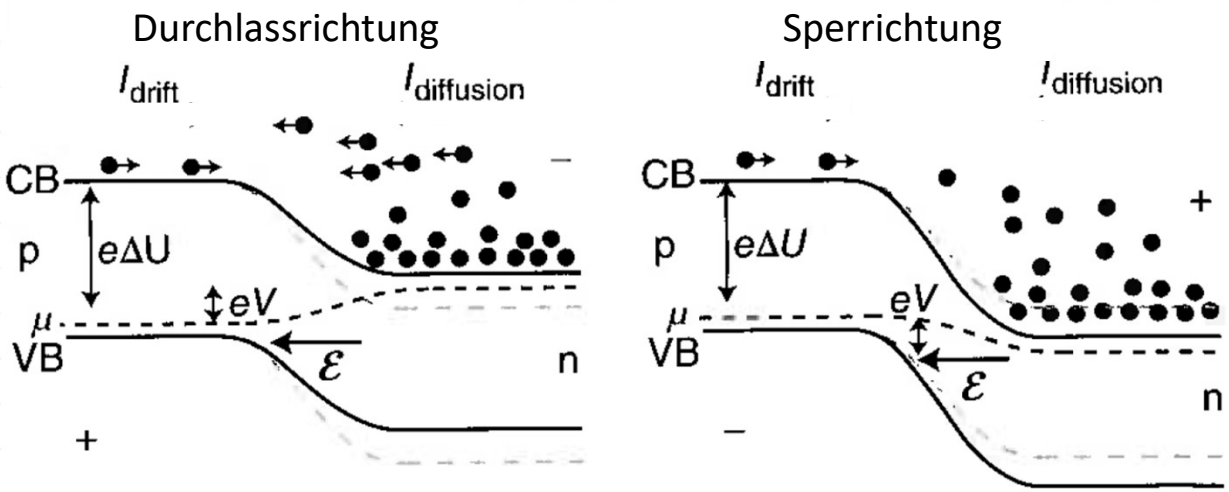
Analog gilt dies für den Löcherstrom

$$I = I_0 e^{eV} - I_0 = I_0 \left(e^{eV} - 1\right)$$

$$\frac{p_B}{p_A} = e^{\Delta E / k_B T}$$

Insgesamt erhalten wir also für die Summe aus e^- und Löcherstrom

$$I_{ges} = I_{0ges}\left(e^{eV} - 1\right)$$



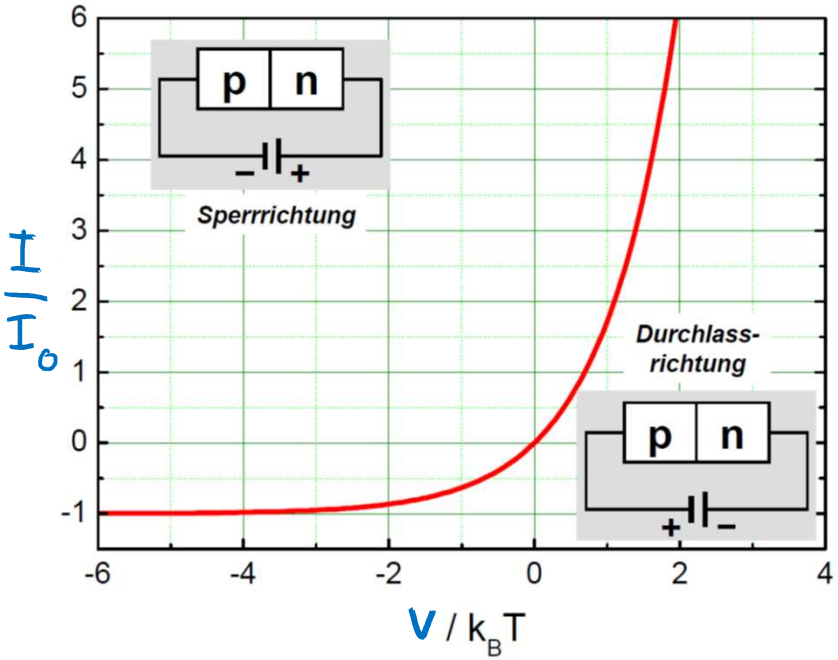
(8) Legt man eine negative Spannung an p, so vergrößert sich die Potentialstufe und man erhält

$$I_{ges} = I_{0ges}\left(e^{-e|V|} - 1\right) \; ; \; V < 0$$

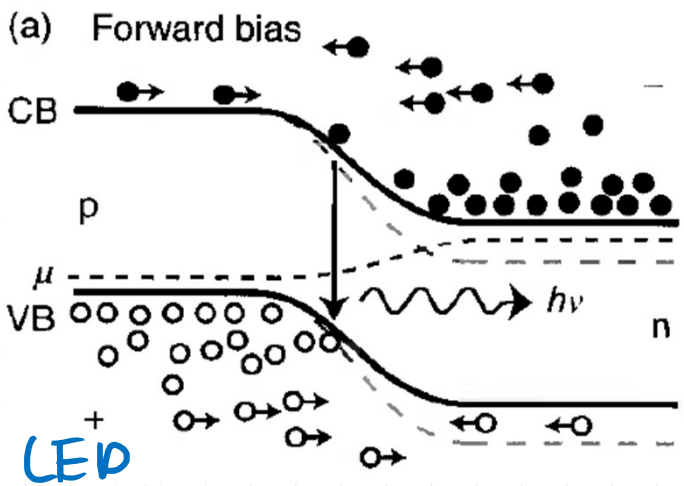
(9) Insgesamt gilt also sowohl für Durchlass- als auch für Sperrichtung

$$\boxed{I_{ges} = I_{0ges}\left(e^{eV} - 1\right)}$$

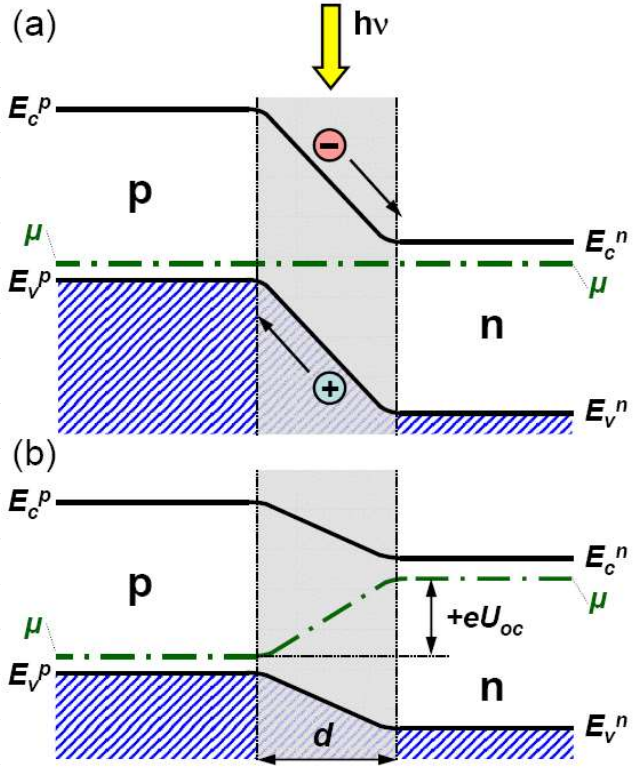
(10) Ein solches pn-Bauelement heißt <u>Diode</u>. Die Diodenkennlinie → zeigt, dass man mit Dioden aus Wechselspannung Gleichspannung erzeugen kann.

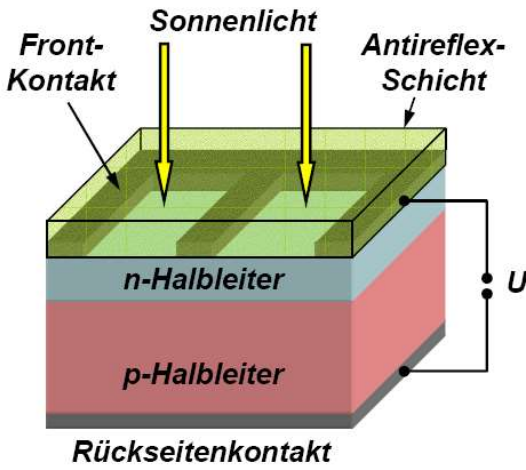


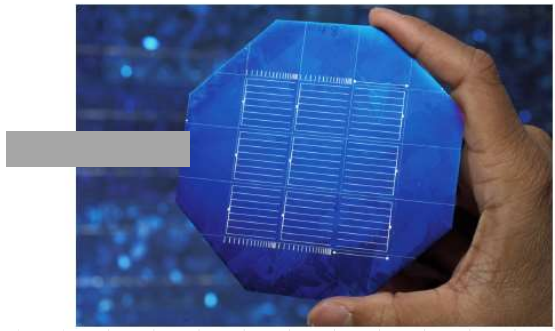
(11) Eine <u>LED</u> (light emitting diode) ist eine in Durchlassrichtung betriebene Diode aus Halbleitern mit direkter Bandlücke. Die LED ist so ausgelegt, dass die durch Diffusion in den anderen Halbleiterteil gelangten Ladungsträger mit hoher Wahrscheinlichkeit rekombinieren. Die Größe der Bandlücke bestimmt die Farbe der LED.



(12) Eine Solarzelle ist eine Diode in die Licht eingestrahlt wird.



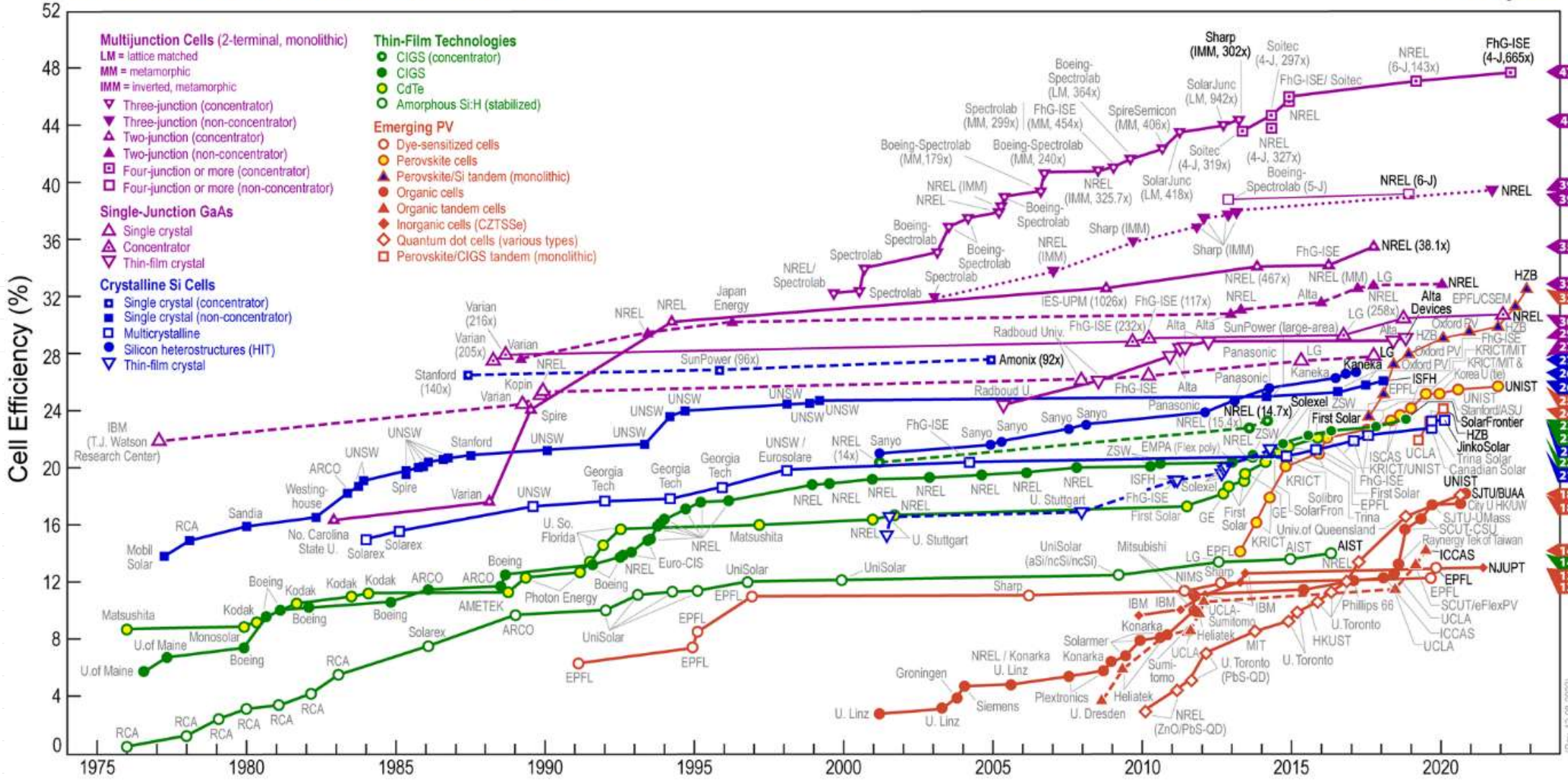




- Licht erhöht den Driftstrom
- Ladungsträger werden in der Verarmungszone getrennt. Löcher wandern nach p, e^- wandern nach n
- Wichtig ist eine große Diffusionslänge damit die Ladungsträger die Kontakte erreichen.
- Wird der Stromkreis geschlossen, so sinkt die Leerlaufspannung V_{oc} (open circuit voltage). Optimaler Betrieb bei $I \cdot V_{oc} = max$.

Best Research-Cell Efficiencies

NREL
Transforming ENERGY



Lara Pätzold: Wärmekapazität und Widerstand in Magnetfeldern

Lara Kiefer: Röntgenbeugung

Daniel Rosenbach: Phononen, Bandstrukturen, Leitfähigkeit und Halbleiter

Philipp Warzanowski: Optiklabor: Anregungen in Festkörpern

Daniel Jansen: Tunnelspektroskopie und 2D Materialien

Jakob Schluck: Transporteigenschaften

Ende der 1.Führung: 11:10 im Foyer
Start der 2. Führung: 11:15 im Foyer
Ende der 2. Führung: 11:35 im Foyer