



Abb. 1 Solarzellen

# PHOTOVOLTAIK

Stefan Hartmann

1

## Gliederung

- Einführung
- Grundlegendes zu Halbleitern
- Generation und Rekombination
- pn-Übergang
- Zusammenfassung: “Was läuft ab?”
- Technisches

# PHOTOVOLTAIK

Einführung • Halbleiter • Generation/Rekombin. • pn-Übergang • Zusammenfassung • Technisches

## Einführung

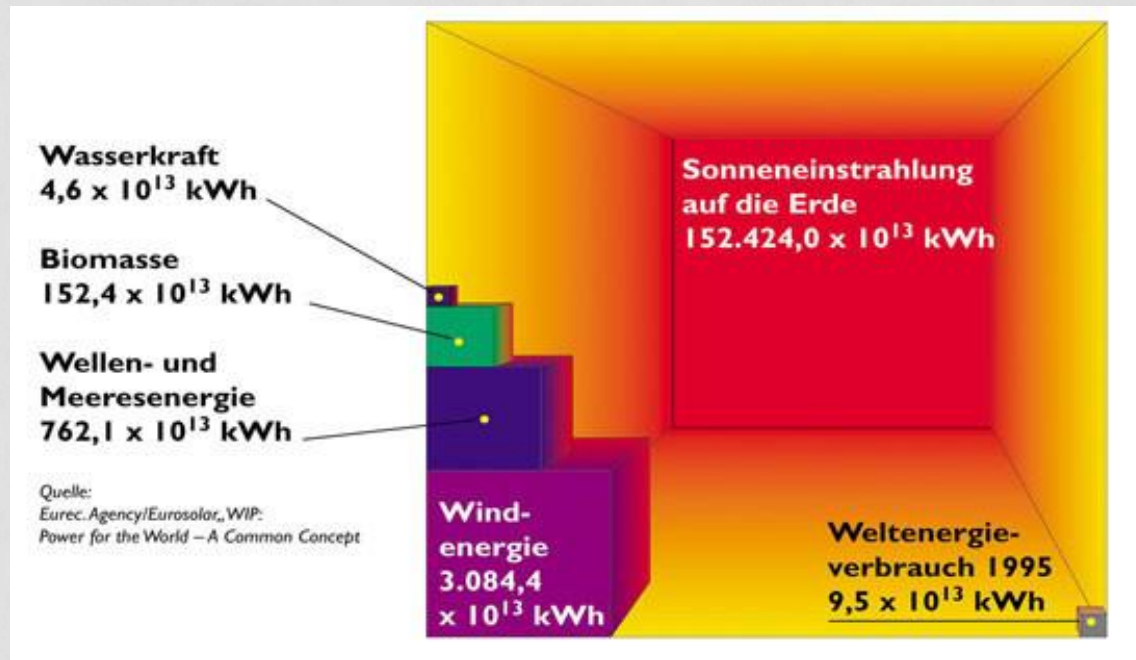


Abb. 2

Angebot erneuerbarer  
Energien weltweit

- Photovoltaik = Energiegewinnung durch Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie
- Solarkollektoren ↔ Photovoltaik ↔ Photochemie

## Einführung

Grobes Funktionsprinzip:

(Nötig ist ein Halbleiter: Bandlücke und Dotierung entscheidend)

- Lichtabsorption
- Generation eines Elektron-Loch-Paares
- Ladungstrennung
- Verhinderung der Rekombination
- Ladungsansammlung an den Kontakten

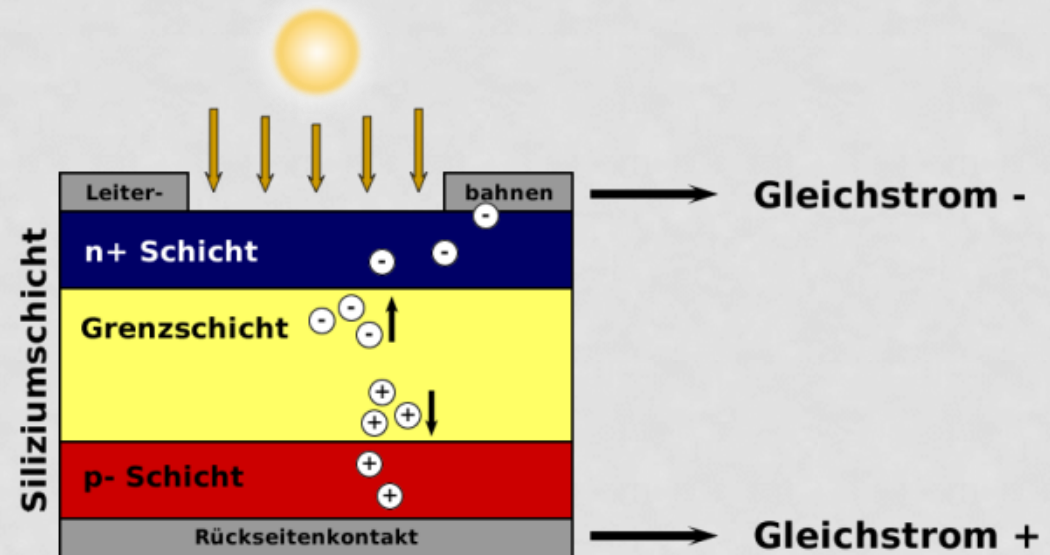


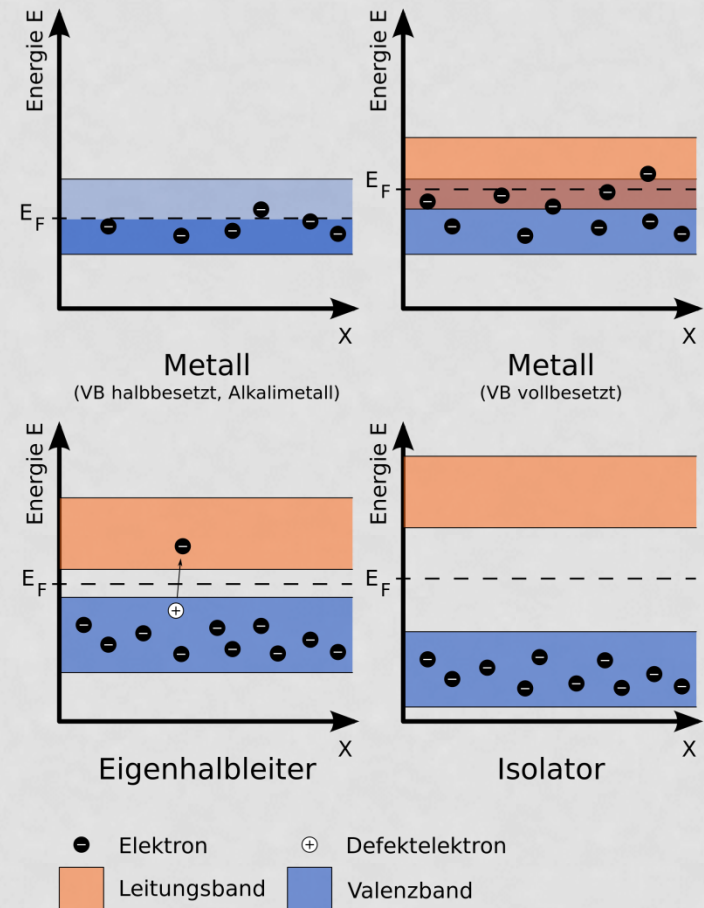
Abb. 3 Prinzip Solarzelle

## Halbleiter

- Valenzband vollständig gefüllt, Bandlücke aber klein
- Elektronen und Löcher (Defektelektronen) können als unabhängige Teilchen behandelt werden
- Im thermodyn. GG können Elektronendichte und Lochdichte (pro Kristallvolumen) mit der Fermiverteilung berechnet werden:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \rho_C(E) f_0(E) dE$$

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} \rho_V(E) (1 - f_0(E)) dE$$



## Halbleiter

- direkte und indirekte Halbleitern
  - Direkt: ohne Impulsübertrag
  - Indirekt: Impulsübertrag durch Phonon
- intrinsische und extrinsische Halbleiter
  - Einbringung von Fremdatomen führt zu Erhöhung der Elektronendichte (n-Dotierung) oder Lochdichte (p-Dotierung)

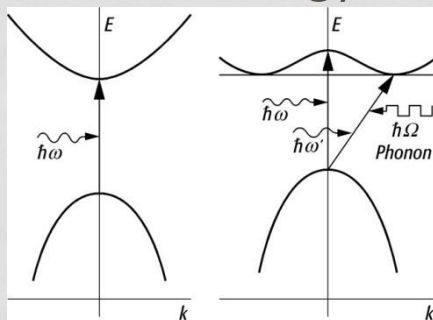


Abb. 5 Unterschied direkter/indirekter Halbleiter

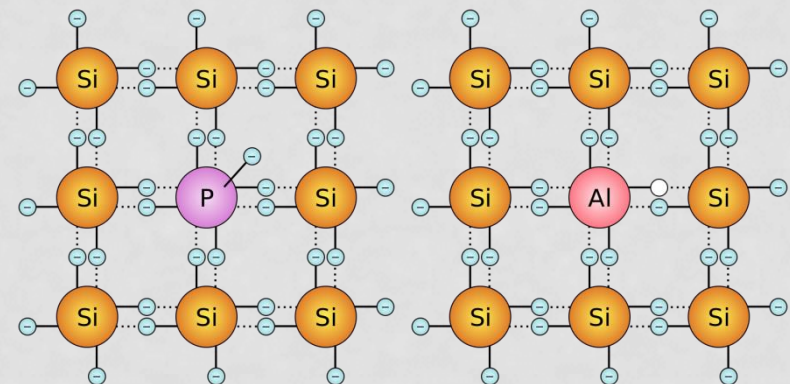


Abb. 6 n- und p-Dotierung im Siliciumkristall

## Generation und Rekombination

- Generation → Erzeugung freier Ladungsträger durch Absorption von Photonen mit Energie  $E > E_g$ 

$$g(E) = \frac{2\pi}{\hbar} \int |H_{if}|^2 (f(E_i) - f(E_i + E)) \rho_i(E_i) \rho_f(E_i + E) dE_i$$
 (Fermis goldene Regel)
- Rekombination → Umkehrprozess:
  - Strahlende Rekombination (direkt)
  - Shockley-Read-Hall-Rekombination
  - Auger-Rekombination

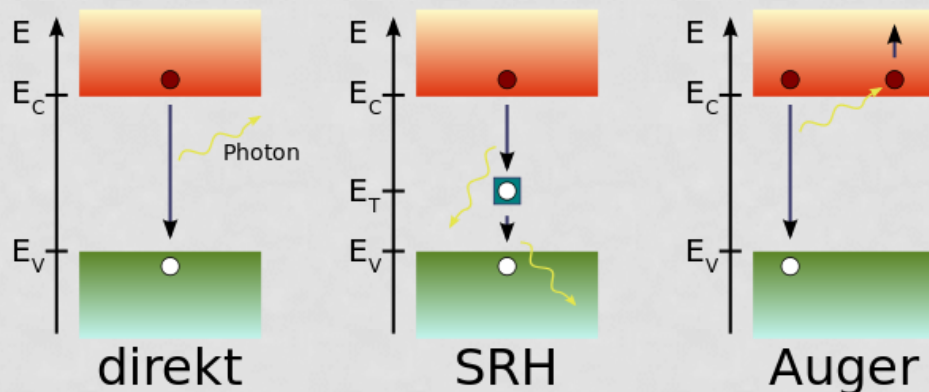


Abb. 7 Rekombinationsarten

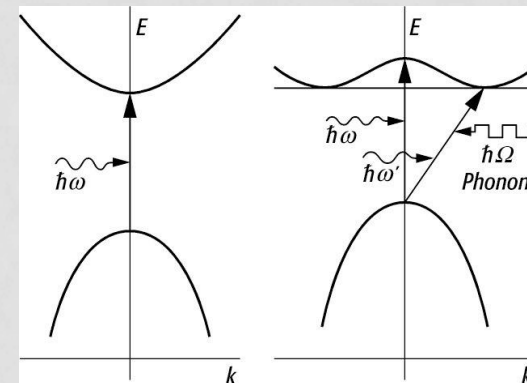


Abb. 8 Unterschied direkter/indirekter Halbleiter

## pn-Übergang

- Zur Ladungstrennung wird eine gewisse Asymmetrie benötigt  
→ z.B. entgegengesetzte Dotierung
- Konzentrationsgradient führt zu Diffusionsströmen
- Es bildet sich ein elektr. Feld
- Resultierender Driftstrom fließt Diffusionsstrom entgegen
- Bildung einer Raumladungszone (Sperrschicht) ohne Majoritätsladungsträger

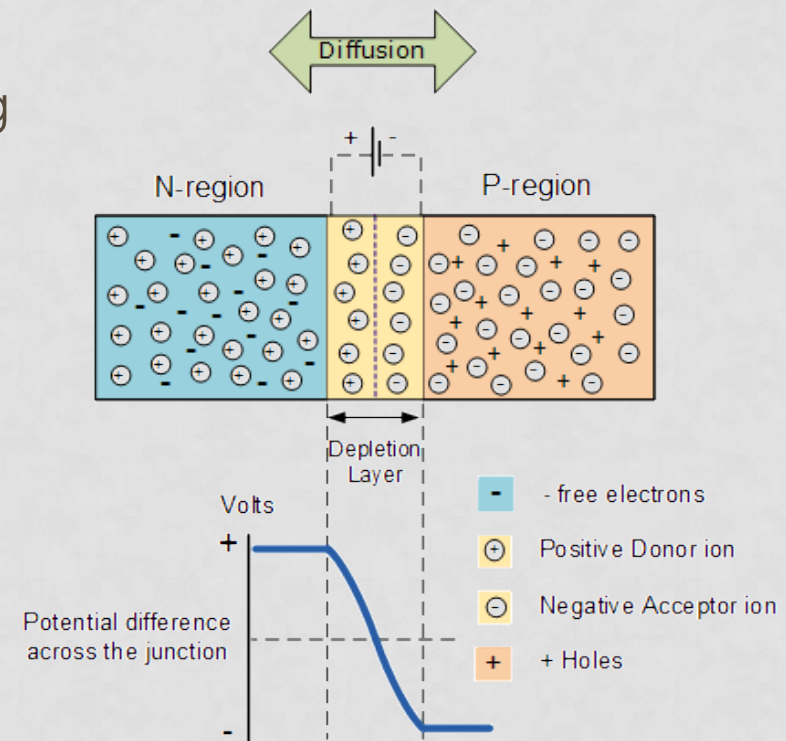


Abb. 9 pn-Übergang



## pn-Übergang

Im Banddiagramm entspricht dies einer Krümmung der Energiebänder

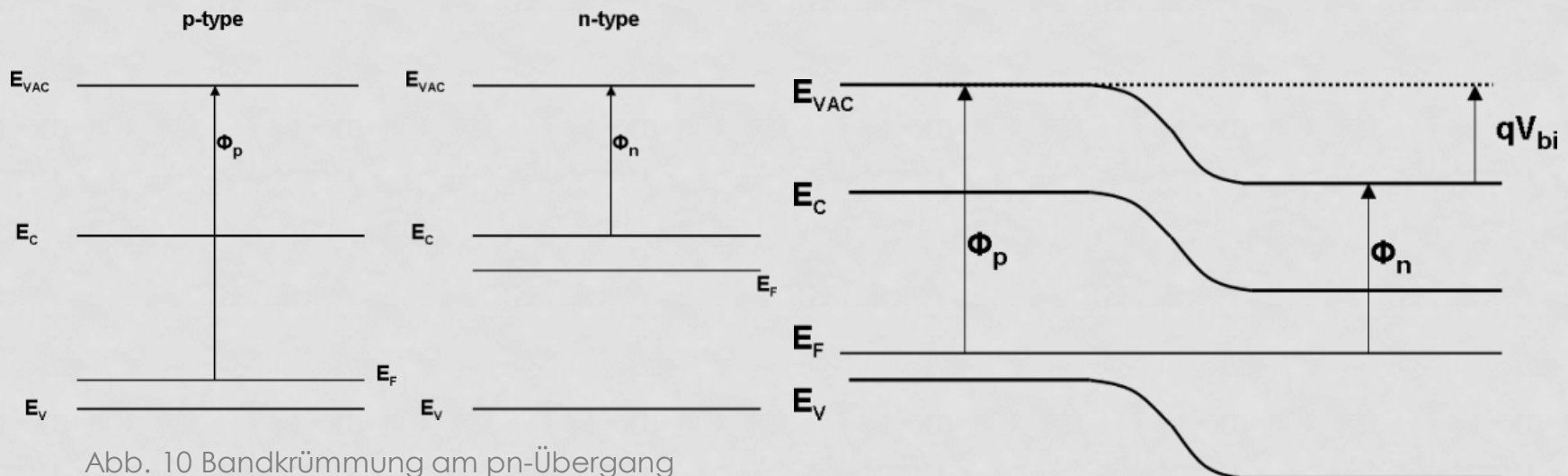


Abb. 10 Bandkrümmung am pn-Übergang

→ Es bildet sich also eine Asymmetrie, mit der sich Ladungsträger separieren lassen können

## pn-Übergang

Parabelförmige Bandnäherung zur Berechnung der Stromdichte J:

Effektive Masse:  $\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E(\vec{k})}{\partial k^2}$  und Gruppengeschw.  $\vec{v}(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E(\vec{k})}{\partial \vec{k}}$

$$\rightarrow v(\vec{k}) = \frac{\hbar \vec{k}}{m^*}$$

$$\rightarrow J_n(\vec{r}) = \frac{q\hbar}{m_c^*} \int_{\text{conduction band}} \vec{k} \rho_c(\vec{k}) f(\vec{k}, \vec{r}) d^3k$$

$$J_p(\vec{r}) = \frac{q\hbar}{m_v^*} \int_{\text{valence band}} \vec{k} \rho_v(\vec{k}) (1 - f(\vec{k}, \vec{r})) d^3k$$

→  $f(\vec{k}, \vec{r})$  entspricht im thermodyn. GG der Fermiverteilung und ist eine gerade Funktion wie die Zustandsdichte

→ **Strom J=0 im GG**

→ Licht oder angelegte Spannung führen zu Ungleichgewicht

→ Asymmetrischer Term  $f_A$  notwendig:  $f_c(\vec{k}, \vec{r}) = f_0 + f_A$

## pn-Übergang

Weitere Näherung für Berechnung von  $J$  im Ungleichgewicht:

→ im Ungleichgewicht werden Elektronen und Löcher durch separate Fermiverteilungen mit unterschiedlichen Fermienergieaus  $E_{F_n}$  und  $E_{F_p}$  beschrieben

→ Mit der Boltzmann-Transport-Gleichung kann für  $f_A$  hergeleitet werden:

$$f_A = -f_0 \frac{\tau \vec{v}}{k_B T} \nabla_r E_{F_n}$$

→  $J_n(\vec{r}) = \mu_n n \nabla_r E_{F_n}$  mit  $\mu_n = \frac{q}{k_B T} \int_{\text{conduction band}} \tau \left( \frac{\hbar \vec{k}}{m_c^*} \right)^2 \rho_c(\vec{k}) f_0(\vec{k}, \vec{r}) d^3 k$

→ Bei angelegter Spannung oder Beleuchtung führt ein Gradient des Quasi-Fermi-Niveaus zu  $J \neq 0$

→ Der Strom setzt sich dann zusammen aus Drift- und/oder Diffusionsstrom:  $J_n(\vec{r}) = q D_n \nabla n + q \mu_n F n$  mit  $D_n = \frac{k_B T \mu_n}{q}$

## Zusammenfassung

- Lichtabsorption → Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren
- Ladungstrennung (→ Verhinderung der Rekombination)
- Ladungsansammlung an Polen

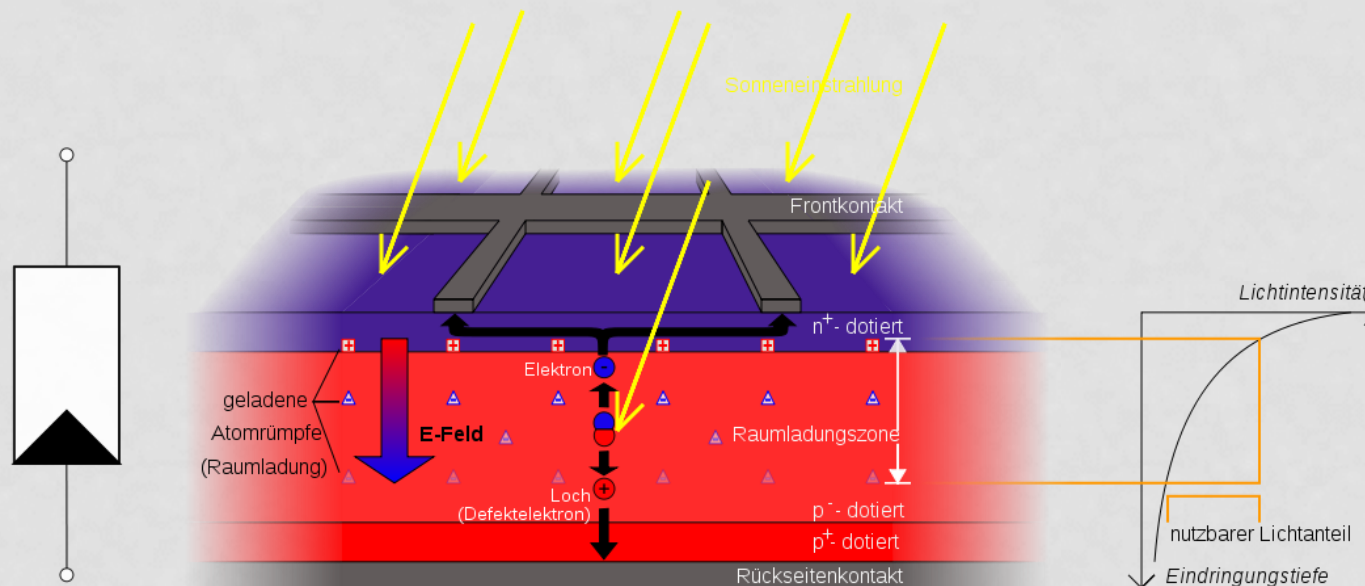


Abb. 11: Funktionsprinzip Solarzelle

## Technisches

- Wichtigstes Halbleitermaterial: Silizium  
Bandlücke von 1,1 eV (1,4eV ideal)
- Häufig monokristalline Solarzellen
- Zur Reduzierung der Reflektion: Antireflexschicht
- Meist dünne hoch n-dotierte Schicht oben (Emitter)  
und dicke schwach p-dotierte Schichte unten (Basis)
- Reihenschaltung von 28 bis 36 Zellen zu Solarmodulen
- Wirkungsgrad: < 25 Prozent (Verluste durch Reflektion,  
Widerstand, Thermalisierung, Rekombination, ...)

## Quellen

### Literatur

- The Physics of Solar Cells, J. Nelson, Imperial College Press, London, 2004
- Skript Theoretische Festkörperphysik I, R. Valentí , Kapitel 5

### Bildquellen

- [ae-tec.solar](http://ae-tec.solar)
- [ae-invest.com](http://ae-invest.com)
- [spektrum.de](http://spektrum.de)
- Wikipedia
- [energieverbraucher.de](http://energieverbraucher.de)