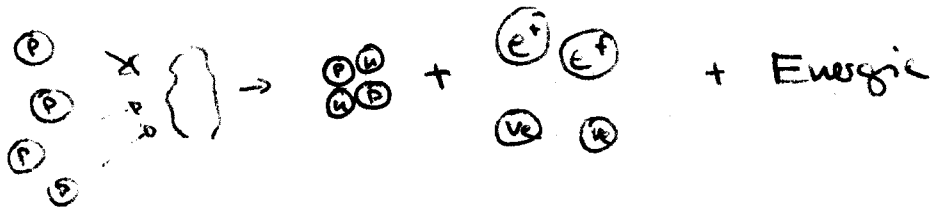
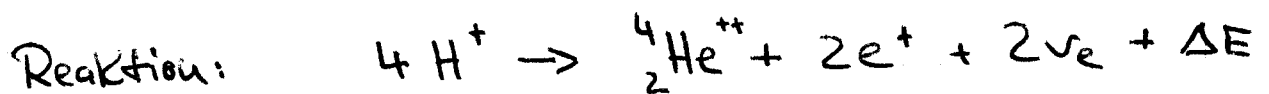


2. Sonne, Sonnenstand u. Spektrum

2.1 Die Fusionsreaktion der Sonne

In der Sonne wird Wasserstoff zu Helium verschmolzen. Der Wasserstoff ist mit Abstand das häufigste Element im Kosmos, ca. 70% der Materie im Universum entfallen auf ihn.



Die dabei erzeugte Energie folgt aus der Massendifferenz vor und nach der Reaktion:

$$m_p = 938.2 \text{ MeV}/c^2$$

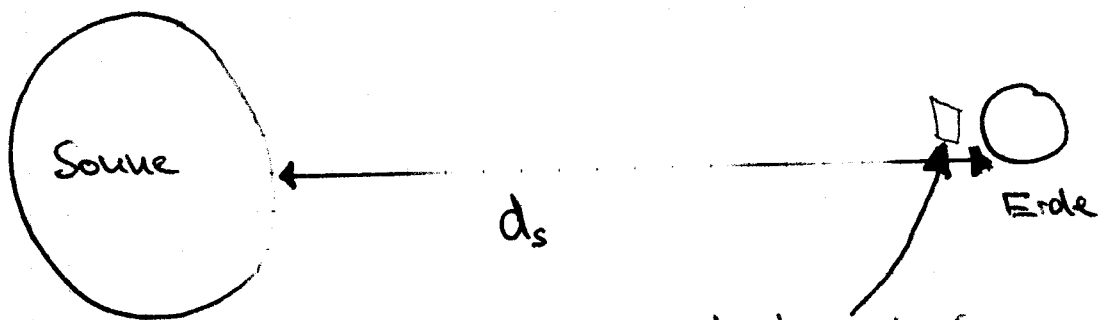
$$m_{e^+} = 0.51 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_{{}^4_2\text{He}^{++}} = 3727.4 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_{\nu_e} \approx 0$$

$$\Rightarrow \Delta m = 4m_p - m_{{}^4_2\text{He}^{++}} - 2m_{e^+} = 24.4 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

Die Gesamtleistung der Sonne kann man berechnen, wenn man die gemessene Leistung im Weltraum direkt über der Erdatmosphäre, die sogenannte Solarkonstante E_0 kennt:



Leistung der Sonne pro m^2
 bei senkrechtem Einfall im
 mittleren Abstand d_s ist
 $E_0 = 1367 \pm 2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Die Strahlungsleistung der Sonne ist die abgestrahlte Leistung durch die Kugelfläche $A = 4\pi d_s^2$ multipliziert mit E_0 :

$$P = 4\pi d_s^2 E_0 = 4\pi (1.5 \cdot 10^{11} \text{ m})^2 \cdot 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 3.9 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Die Energie pro Sekunde ist also trivialerweise $3.9 \cdot 10^{26} \text{ J}$.
 Somit verliert die Sonne pro Sekunde

$$\Delta M = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{3.9 \cdot 10^{26} \text{ J}}{(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} = 4.3 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

an Gewicht.

2.2. Das Sonnenspektrum

Die Oberfläche der Sonne kann in erster Näherung als schwarzer Körper betrachtet werden. Gemäß des Stefan-Boltzmann-Gesetzes folgt

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$$\text{Wobei } \sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15 h^3 c^2} = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Und die Fläche die Oberfläche der Sonne ist:

$$A_{\text{Sonne}} = 4\pi r_s^2 = 4\pi \cdot (7 \cdot 10^8 \text{ m})^2 = 6.2 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$

Daher:

$$T_{\text{Sonne}} = \left[\frac{3.9 \cdot 10^{26} \text{ W m}^2 \text{K}^4}{5.7 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot 6.2 \cdot 10^{18} \text{ m}^2} \right]^{1/4} = \underline{\underline{5764 \text{ K}}}$$

2.2.1 Air Mass

Das Sonnenspektrum wird beim durchlaufen der Atmosphäre verändert. Hauptbächliche Mechanismen sind:

- Reflexion an der Atmosphäre
- Absorption (O_3 , H_2O , O_2 , CO_2)
- Rayleigh-Streuung: $\sigma \sim \omega^4 \Rightarrow$ blauer Himmel
- Mie-Streuung

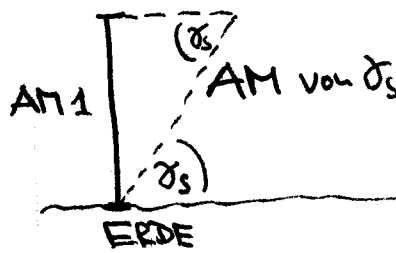
Die Laufstrecke, welches das Licht zurücklegen muß wird dabei als Air Mass bezeichnet und als $\text{AM}0$; $\text{AM}1.5$ etc. angegeben.

$\text{AM}0$: Spektrum im Weltall gerade außerhalb der Atmosph.

$\text{AM}1$: Spektrum auf der Erdoberfläche bei senkrechtem Einfall

Analog folgen andere $\text{AM}'s$ aus der geometrischen Betrachtung:

/// Weltraum ///



$$AM = \frac{1}{\sin \delta_s}$$

(Tabelle siehe Powerpoint
Spektrum siehe Powerpoint)

2.2.2 Die Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von geografischer Lage

Die geografische Lage bestimmt zunächst die Air Mass, aber auch das Wetter hat entscheidenden Einfluss. Wolken reflektieren die Sonnenstrahlung zurück ins All. (Siehe Powerpoint Bild)

In Deutschland beträgt die jährliche Globalstrahlung ca. $1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. In Südeuropa liegt sie bei ca. $1700 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, in der Sahara bei $\approx 2300 \text{ kWh}/\text{m}^2$

Man teilt die Globalstrahlung auf in direkten und diffusen Anteil. Die Anteile sind wiederum stark von der geografischen Lage abhängig. Der diffuse Anteil lässt sich zwar für die Photovoltaik nutzen, für die Solarthermie ist es allerdings nur begrenzt nutzbar.

(Siehe Powerpoint Tabellen)

3. Photovoltaik

Wir wollen zunächst einen kurzen Überblick über das Funktionsprinzip von Solarzellen geben. Danach werden wir detailliertere Betrachtungen anstellen und zum Abschluss auch die Herstellung einer modernen Solarzelle behandeln.

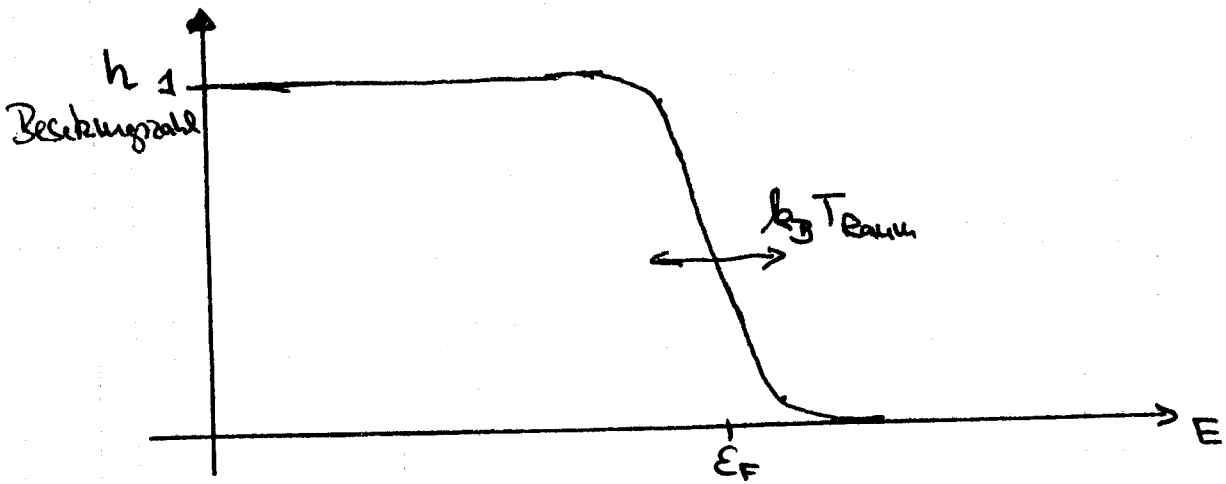
3.1 Funktionsprinzip einer Solarzelle

Eine Solarzelle ist im Grunde nichts weiter als eine Diode, d.h. ein Bauelement, das aus einem p- und n-Halbleiter besteht.

3.1.1 Halbleiter

In Materialien mit regelmäßiger Struktur gibt es grundsätzlich sehr viele Energieniveaus, in denen sich die Elektronen des Festkörpers aufhalten dürfen. Da die e^- Fermionen sind, kann natürlich immer nur 1 e^- denselben Zustand besetzen.

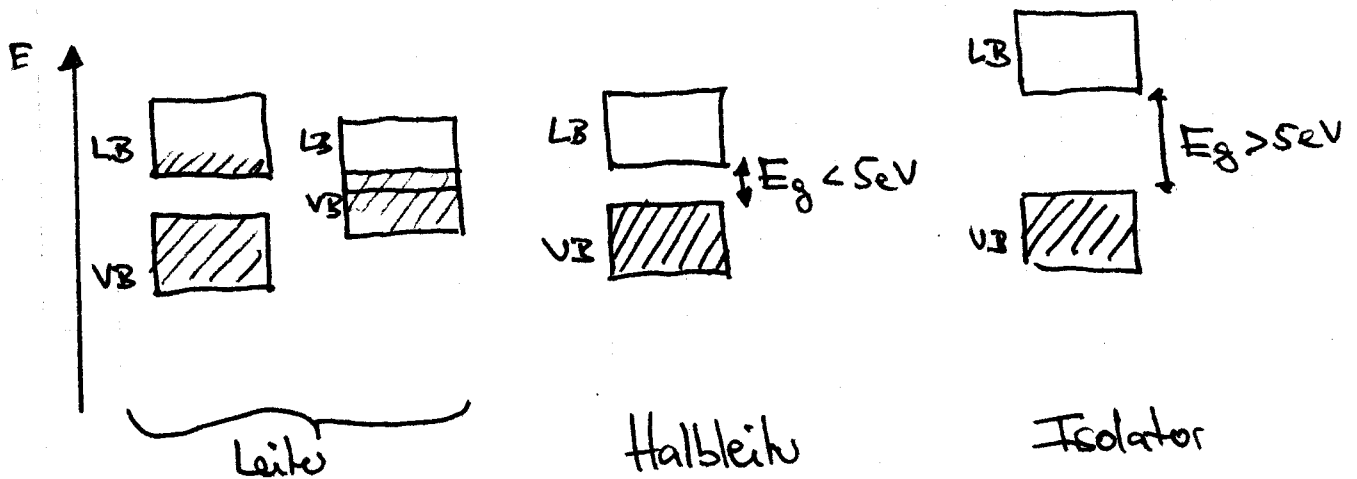
Im Festkörper werden daher alle Niveaus bis zur sogenannten Fermikante aufgefüllt. Das Fermienergielevel E_F ist das ^{höchste} Energieniveau, das bei $T=0$ besetzt wird. Für die meisten Materialien ist $E_F \gg k_B T_{\text{raum}}$, d.h. thermische Anregungen der e^- sind gering gegenüber E_F und die Kante somit recht steil:



Die Niveaus treten typischerweise als Bänder auf.
 Das oberste vollständig gefüllte Band heißt Valenzband.

Das nächst höhere Band (leer oder teilgefüllt) heißt Leitungsband.

Festkörper werden nun in Leiter, Halbleiter und Isolator eingeteilt. Die Einteilung lässt sich mittels der Bänder erklären:



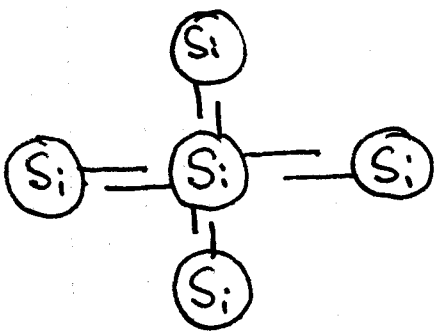
- In einem Leiter ist entweder das Leitungsband (LB) nicht vollständig gefüllt, oder aber Valenzband (VB) und Leitungsband überlappen.

- In einem Isolator sind Valenz- und Leitungsband durch einen verbotenen Energiebereich mit $E_g > 5 \text{ eV}$ getrennt.
- In einem Halbleiter ist die verbotene Zone $E_g < 5 \text{ eV}$, für Silizium beispielsweise 1.1 eV

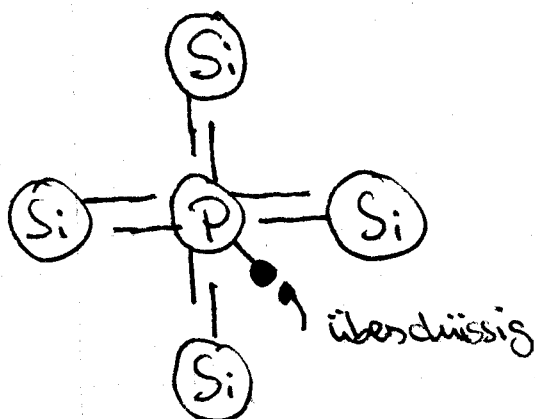
Typische Temperaturen für 1.1 eV sind $T = \frac{E}{k_B}$
 mit $k_B \approx \frac{1}{11000} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \Rightarrow T \approx 12000 \text{ K}$

3.1.2. Dotiertes Silizium

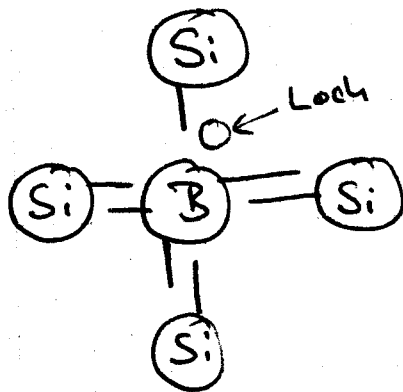
Silizium besitzt 4 Valenzelektronen:



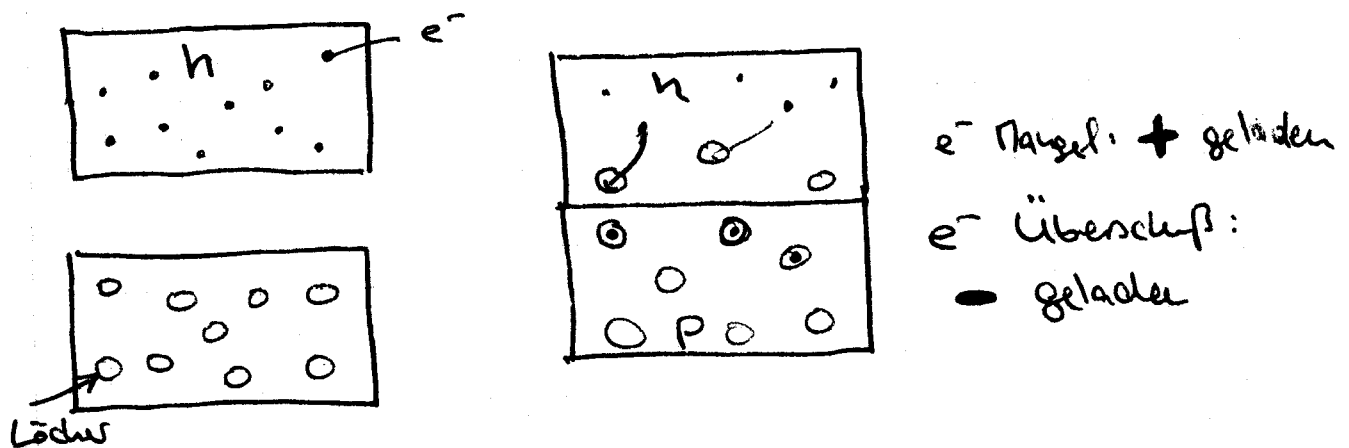
Dotiert man nun mit Atome aus Gruppe V wie z. B. Phosphor, gibt es überschüssige, nur sehr leicht gebundene e^- :



Durch Dotierung mit Atomen aus Gruppe III, wie Aluminium oder Bor erhält man nun überschüssige "Löcher":

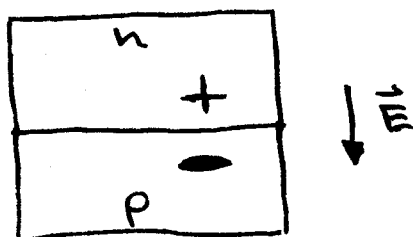


Bringt man nun ein n- und p-Gebiet in Kontakt, ergibt sich eine Raumladungszone:



e^- wandern vom n-Halbleiter in den p-Halbleiter, bis das sich aufbauende elektrische Feld die weitere Wanderung beendet.

Elektrisch betrachtet gibt es also ein Feld im Raumladungsgebiet:



Wird nun ein e^- im Valenzband der Zelle durch ein Photon in das Leitungsband gehoben, und gelangt in die Raumladungszone, so wird es im \vec{E} Feld in die n-Zone gezogen. Das entstandene Loch wandert in die p-Zone. Durch diese Ladungstrennung entsteht ein Strom, der genutzt werden kann.