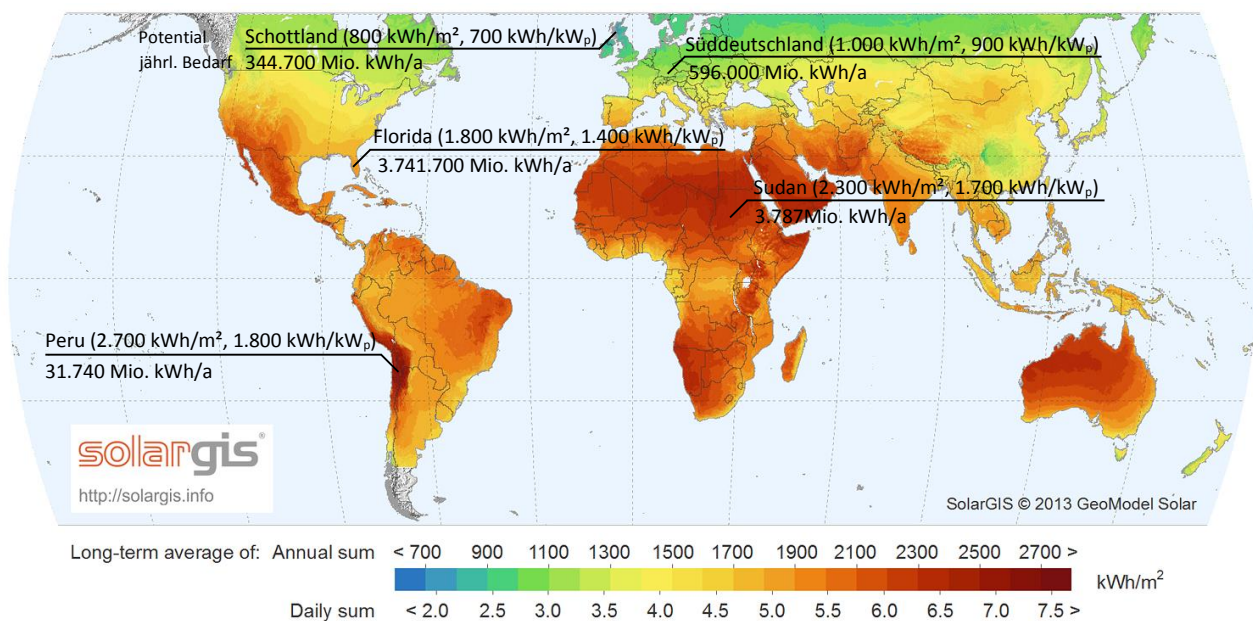


## Übungsblatt 2 – Potential der Photovoltaik und Bändermodell

### Aufgabe 1: Potential und Strompreis der Photovoltaik

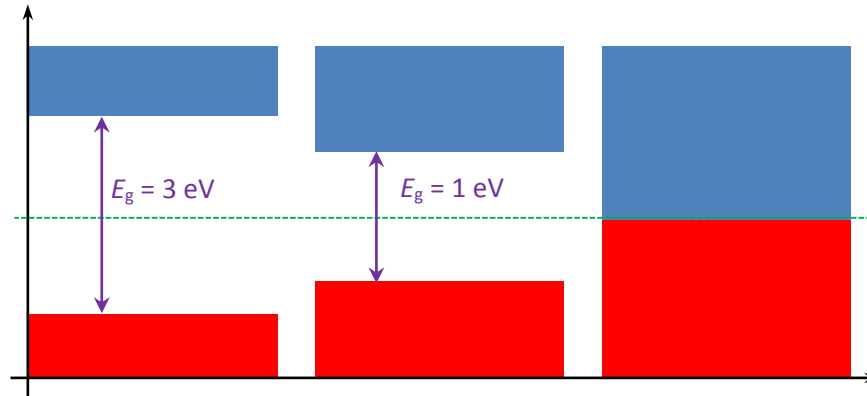
Potential und Strompreiskosten der Photovoltaik hängen stark von der jährlichen Einstrahlung und damit insbesondere auch vom Standort der Photovoltaikanlage ab. Im Folgenden soll das Potential der Photovoltaik in verschiedenen Regionen der Erde diskutiert werden. Aufschluss über die potentielle jährliche Energieproduktion gibt folgendes Schaubild:



- Berechnen Sie zunächst für die fünf hervorgehobenen Länder wie viel Fläche nötig wäre, um den gesamten elektrischen Energiebedarf der Länder allein über die Photovoltaik bereitzustellen. Wie viel Prozent der jeweiligen Staatsfläche entspricht das? Gehen Sie von einem Wirkungsgrad von 15 % aus.
- Berechnen Sie nun analog wie in der Vorlesung die Kosten für die Strompreisproduktion in den verschiedenen Ländern. Gehen Sie jeweils von einer Investitionssumme von 1.400 €/kW<sub>p</sub> und einer Lebensdauer der Anlagen von 20 Jahren aus. Diskutieren Sie warum der berechnete Produktionspreis letztlich nicht der Preis ist, den der Versorger an den Stromkunde weitergibt.
- Was versteht man unter „Grid Parity“ und wie beeinflusst der „Merit-Order-Effekt“ den Strompreis?
- Eine vierköpfige Familie weist in Deutschland im Mittel einen Stromverbrauch von 4.400 kWh auf. Als langfristige Investition soll eine 10 kW<sub>p</sub> Solaranlage installiert werden, wobei zunächst der Eigenbedarf gedeckt und der Rest ins öffentliche Netz eingespeist werden soll. Berechnen Sie den Gewinn, den die Familie mit dieser Anlage nach 20 Jahren erwirtschaften kann. Gehen Sie dabei von einer Einspeisevergütung von 12,31 Cent/kWh und einem Strompreis von 25 Cent/kWh aus. Die Investitionssumme wird dabei zu 50 % über einen KfW-Kredit mit einer 20-jährigen Laufzeit und einem Zinssatz von 1,25 % finanziert. Den Rest kann die Familie aus eigenen Mitteln aufbringen. Die jährlichen Unterhaltskosten liegen bei 300 €.

## Aufgabe 2: Bändermodell

In der Vorlesung haben Sie die Einteilung der verschiedenen Festkörperarten anhand der Verteilung der elektrischen Zustände kennengelernt. Diese Betrachtung führt auf das sogenannte Bändermodell. Im Folgenden sollen Sie sich mit diesem Modell näher vertraut machen.



- Beschriften Sie das obige Banddiagramm mit allen nötigen Informationen und ordnen Sie die Diagramme den drei fundamentalen Festkörperarten zu. Begründen Sie dabei ausführlich und nehmen Sie Stellung zu den unterschiedlich großen Leitfähigkeiten in den Festkörpern.
- Die Leitfähigkeit  $\sigma$  eines Festkörpers ist eine Funktion der freien Ladungsträgerdichte  $n$  und der Ladungsträgerbeweglichkeit  $\mu$ . Wie und warum ändern sich die Ladungsträgerdichte, der Ladungsträgerbeweglichkeit und die Leitfähigkeit im intrinsischen Halbleiter mit steigender Temperatur?
- Für praktische Anwendungen ist es in aller Regel nötig gewisse Fremdatome in den Halbleiter einzubauen, d.h. den Halbleiter zu dotieren. Diskutieren Sie am Beispiel von Silizium was beim Einbringen von Fremdatomen in geringen Mengen mit dem Halbleiter und seinen Eigenschaften passiert. Wie wird die Dotierung im Banddiagramm berücksichtigt?

## Aufgabe 3: Elektronenstatistik im Halbleiter

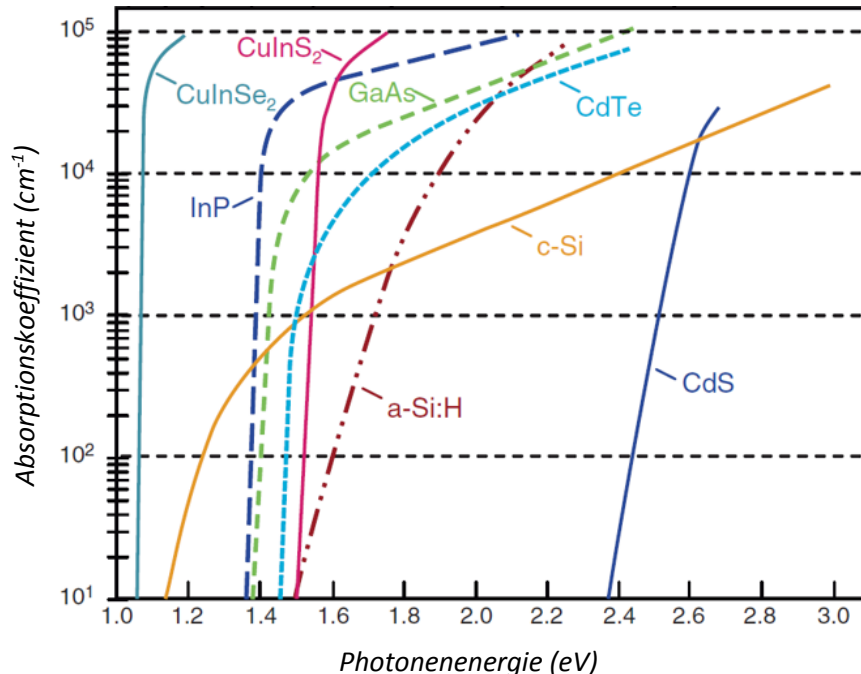
Die Dichte der Ladungsträger in einem Band bestimmt sich aus der Verteilung der Elektronen und Löcher auf die vorhandenen energetischen Zustände. Formell lässt sich die Teilchendichte dabei über das Produkt der Zustandsdichte  $D(E)$  und der Verteilungsfunktion  $f(E)$  beschreiben. Dabei folgt für die Ladungsträgerdichten von Elektronen und Löcher:

$$n_e \approx N_{LB} \cdot e^{-\frac{E_{LB} - E_F}{k_B T}} \quad \text{und} \quad n_h \approx N_{VB} \cdot e^{-\frac{E_F - E_{VB}}{k_B T}} \quad \text{mit: } N_{LB/VB} = 2 \left( \frac{2\pi m_{e/h}^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

- Leiten Sie ausgehend von den obigen Gleichungen die Lage des Fermi-Niveaus für einen intrinsischen Halbleiter in Abhängigkeit von der Temperatur ab. Wie ändert sich das Temperaturverhalten bei unterschiedlichen Verhältnissen von effektiver Elektronen- und effektiver Lochmasse?
- Bestimmen Sie die Elektronendichte im Leitungsband für einen intrinsischen Siliziumhalbleiter bei  $T = 20^\circ\text{C}$ . Nehmen Sie eine Bandlückenenergie von  $E_g = 1,1 \text{ eV}$  und ein Verhältnis der effektiven Massen von  $m_e^*/m_h^* = 0,95$  an (mit  $m_e^* = 1,09 \cdot m_e$ ). Die Valenzbandoberkante liegt bei  $E_{VB} = 0 \text{ eV}$ .

#### Aufgabe 4: Absorption und Rekombination in Halbleitern

Der erste Schritt der photovoltaischen Energiewandlung ist die Absorption von Licht im Halbleiter. Eine effiziente Solarzelle sollte das Licht dabei möglichst gut im Bereich des Sonnenspektrums absorbieren. Folgendes Diagramm zeigt das Absorptionsvermögen einiger Halbleiter in Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes:



- Erklären Sie ausführlich wie es zu den Unterschieden im Absorptionsverhalten von kristallinem Silizium (c-Si) im Vergleich zu den anderen hier abgebildeten Halbleitern kommt. Was folgt daraus für die Verwendbarkeit von c-Si als Dünnschichtmaterial?
- Berechnen Sie wie dick ein kristalliner Silizium- und ein GaAs-Absorber mindestens sein müssten um Licht mit einer Wellenlänge von 550 nm und 850 nm zu 90 % zu absorbieren. Entnehmen Sie die Werte für den Absorptionskoeffizienten dabei dem obigen Diagramm und vernachlässigen Sie Reflexionsverluste an der Oberfläche des Absorbers.
- Um auch Licht mit kleinerer Wellenlänge vollständig absorbieren zu können, wäre es prinzipiell wünschenswert den Absorber möglichst dick zu machen. Auf welches prinzipielle Problem stößt man allerdings bei dieser Überlegung?
- Diskutieren Sie die verschiedenen Arten der Ladungsträgerrekombination in Halbleitern und nehmen Sie insbesondere Stellung zur Bedeutung der Rekombination in Solarzellen.

---

#### Bemerkungen:

- Die Übungsblätter werden jeweils eine Woche vor der Übung in der Vorlesung verteilt. Alternativ können die Aufgaben auch von der Internetseite des ZSW oder im ILIAS-Portal bezogen werden.  
→ Link: [www.zsw-bw.de/infportal/vorlesungen.html](http://www.zsw-bw.de/infportal/vorlesungen.html)  
→ Link: <https://ilias.studium.kit.edu/>
- Zur Organisation der Vorlesungsteilnehmer ist ein Anmelden im ILIAS-Portal erforderlich. Loggen Sie sich hierzu bitte bis spätestens zum 13.05.16 im ILIAS-Kurs „Photovoltaik“ ein.  
→ Link: <https://ilias.studium.kit.edu/>