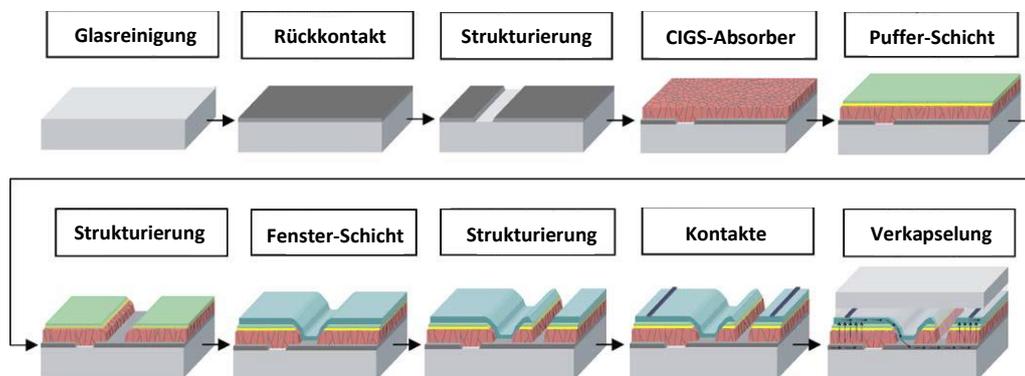


## Übungsblatt 5 – Dünnschicht-, Konzentrator- und Tandemtechnologien

### Aufgabe 1: Dünnschichttechnologien – CIGS-Solarzellen

Neben den klassischen Silizium-Technologien, die auch als erste Solarzellengeneration bezeichnet werden, wurden in den vergangenen Jahren neue Technologien mit deutlich dünneren Absorbern entwickelt (Solarzellen der zweiten Generation). Ein typischer Vertreter mit besonders vielversprechenden Aussichten ist das Absorbermaterial Chalkopyrit ( $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ), das im Folgenden diskutiert werden soll.



- Diskutieren Sie am Beispiel einer solchen Chalkopyrit-Solarzelle den Aufbau und das Banddiagramm einer typischen Dünnschichtsolarzelle. Welche Aufgaben haben die einzelnen Schichten?
- Als großer Nachteil der Chalkopyrit-Dünnschichttechnologie wird häufig der Einsatz seltener Erden angegeben. Berechnen Sie für den Fall  $x = 0,3$  die Menge an Indium und Gallium in einer Solarzelle mit einer Zellfläche von  $A = 1 \text{ m}^2$  und einer Absorberdicke von  $d = 1 \text{ }\mu\text{m}$ . Berechnen Sie dabei die Molmasse der CIGS-Verbindung über die Betrachtung der Einzelmolmassen der beteiligten Elemente und gehen Sie von einer Dichte des Absorbers von  $\rho = 5,7 \text{ g/cm}^3$  aus. Durch welche Modifikation könnte man den Einsatz seltener Erden verhindern?
- Ausgehend von empirischen Untersuchungen ergibt sich für die Bandlückenenergie  $E_g^{\text{CIGS}}$  des Absorbers in Abhängigkeit vom Galliumgehalt  $x$ :

$$E_g^{\text{CIGS}} = E_g^{\text{CIS}}(1 - x) + xE_g^{\text{CGS}} - bx(1 - x)$$

darin ist  $E_g^{\text{CIS}} = 1,01 \text{ eV}$  die Bandlückenenergie der galliumfreien Verbindung,  $E_g^{\text{CGS}} = 1,64 \text{ eV}$  die der indiumfreien Verbindung und  $b = 0,167 \text{ eV}$  ein empirischer Biegeparameter. Stellen Sie obigen Zusammenhang grafisch dar und bestimmen Sie dann die Bandlückenenergie für einen Galliumgehalt von  $x = 0,3$ . Diskutieren Sie warum das Gallium-zu-Indium-Verhältnis die Bandlücke des Absorbers beeinflusst und warum der exakte Galliumgehalt letztlich einen fundamentalen Einfluss auf den Wirkungsgrad  $\eta$  der Solarzelle hat.

- Warum zeigt das Materialsystem Chalkopyrit auch ohne ein äußeres Dotieren die für eine Solarzelle nötigen Eigenschaften?

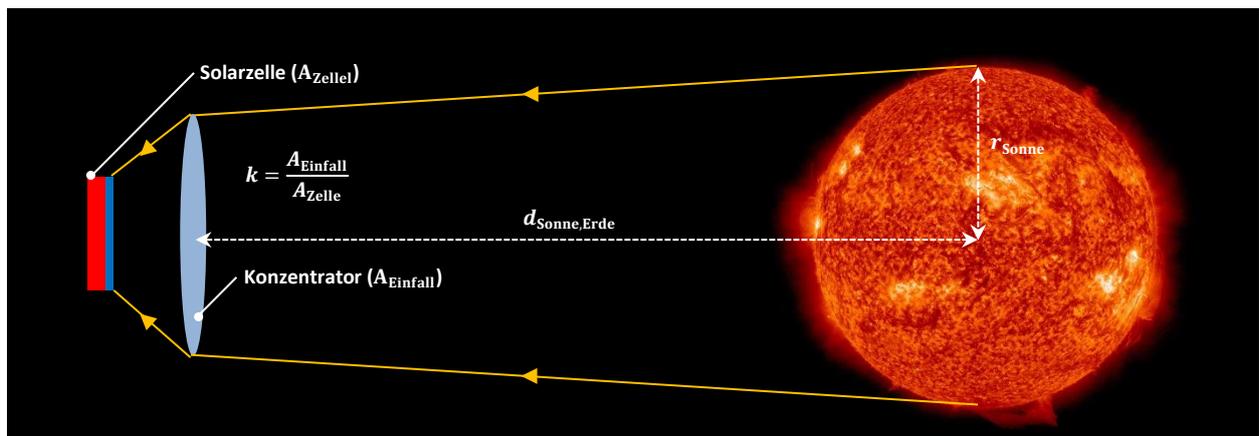
## Aufgabe 2: Dünnschichttechnologien – Amorphes Silizium

Trotz ihres in kristalliner Form vorliegenden indirekten Absorptionsverhaltens finden auch siliziumbasierte Solarzellen ihren Einsatz als Dünnschichttechnologie. Hauptgrund hierfür ist die direkte Bandlücke die beim Übergang von der kristallinen in die amorphe Form beobachtet wird.

- Wie ist der Übergang von der indirekten Bandlücke im kristallinen Silizium zur direkten Bandlücke im amorphen Silizium zu erklären.
- Die Verwendung von amorphem Silizium als Absorbermaterial stellt ganz besondere Ansprüche an die Schichtfolge der Solarzelle. Wie sieht der typische Aufbau einer Dünnschichtsiliziumsolarzelle aus und warum unterscheidet er sich von dem einer Standardsiliziumsolarzelle?
- Amorphe Siliziumsolarzellen zeigen in den ersten Betriebsmonaten häufig einen signifikanten Verlust im Wirkungsgrad  $\eta$ . Wie ist diese Degradation zu erklären und wie kann sie reduziert werden?

## Aufgabe 3: Konzentratorzellen

Ein beliebter Ansatz um bei gleichbleibender Solarzellenfläche die maximal zu entnehmende Leistung einer Solarzelle zu erhöhen, stellt die Verwendung von Konzentratorzellen dar. Dabei wird die Einstrahlung einer großen Einfallsfläche  $A_{\text{Einfall}}$  mit beispielsweise Linsen oder Spiegeln auf eine kleinere Zellfläche  $A_{\text{Zelle}}$  konzentriert und so der Wirkungsgrad effektiv erhöht.



- Leiten Sie aus dem Strahlungsgleichgewicht einen Ausdruck für den maximal zu erreichenden Konzentrationsfaktor  $k_{\text{max}}$  eines zweidimensional konzentrierenden Systems ab. Gehen Sie dabei jeweils von schwarzen Körpern aus. Wie groß wäre der Faktor  $k_{\text{max}}$  bei eindimensionaler Konzentration.
- Diskutieren Sie qualitativ wie sich die Solarzellenparameter in Abhängigkeit vom Konzentrationsfaktor  $k$  verändern. Vernachlässigen Sie dabei die Einflüsse durch ein Aufheizen der Solarzelle.
- Was versteht man unter dem Burstein-Moss-Effekt und weshalb kommt er auch bei konzentrierenden System unter Umständen zum Tragen?
- Welche weiteren Probleme sind mit der Verwendung von Konzentratorsystemen verbunden?

#### Aufgabe 4: Tandem- und Mehrfachsolarsysteme

Aufgrund der definierten Bandlücke eines Halbleiters und den damit verbundenen energetischen Verlusten für Photonen mit Energien ober- und unterhalb der Bandlückenenergie, wird seit mehreren Jahren intensiv auch an Schichtsystemen mit mehreren Halbleitern unterschiedlicher Bandlücke geforscht. Diese effektivere Nutzung des einfallenden Lichtes führt aktuell auf Wirkungsgrade bis zu 38 % für nicht-konzentrierende und 46 % für konzentrierende Mehrfachsysteme.

AllInP	Fenster
InGaP	Emitter
InGaP	Absorber
$E_g = 1,86 \text{ eV}$	
AlGaInP	BSF

$$U_{oc} = 1.360 \text{ mV} \quad j_{sc} = 13 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$$

InGaP	Fenster
InGaAs	Emitter
InGaAs	Absorber
$E_g = 1,40 \text{ eV}$	
InGaP	BSF

$$U_{oc} = 1.010 \text{ mV} \quad j_{sc} = 15 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$$

GaAs	Puffer
Ge	Emitter
Ge	Absorber
$E_g = 0,65 \text{ eV}$	
Ge	BSF

$$U_{oc} = 260 \text{ mV} \quad j_{sc} = 20 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$$

- Obige Abbildung zeigt drei Halbleitersysteme mit unterschiedlich großen Bandlücken  $E_g$ . Wie sollten die drei Systeme übereinander angeordnet werden, um das einfallende Licht am effektivsten nutzen zu können. Was passiert wenn Sie die gewählte Schichtfolge invertieren?
- Was versteht man unter einer Zwei- und einer Vier-Terminal-Verschaltung und welche Vor- und Nachteile weisen die beiden Schaltungstypen jeweils auf?
- Welchen Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  und welche Leerlaufspannung  $U_{oc}$  erwarten Sie für das obige Mehrfachsystem ausgehend von den aufgeführten Kenngrößen der Einzelsysteme. Gehen Sie hierbei von einer Zwei-Terminal-Verschaltung aus.
- Zeichnen Sie schematisch die Bandverläufe für eine typische Tandem-Solarzelle mit monolithischer Verschaltung zwischen den Einzelschichten. Nehmen Sie dabei insbesondere Stellung zur Grenzregio zwischen den beiden Teilsystemen.

---

#### 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/infoportal/vorlesungen.html](http://www.zsw-bw.de/infoportal/vorlesungen.html)  
 → Link: <https://ilias.studium.kit.edu/>
- Die schriftliche Abschlussklausur findet am 14. September 2016 zwischen 11:00 Uhr und 13:00 Uhr im Hörsaal am Fasanengarten (Gebäude 50.35) statt. Die Prüfungsanmeldung im QUISPOS bzw. Campus Management ist erforderlich und sollte mittlerweile freigeschaltet sein.