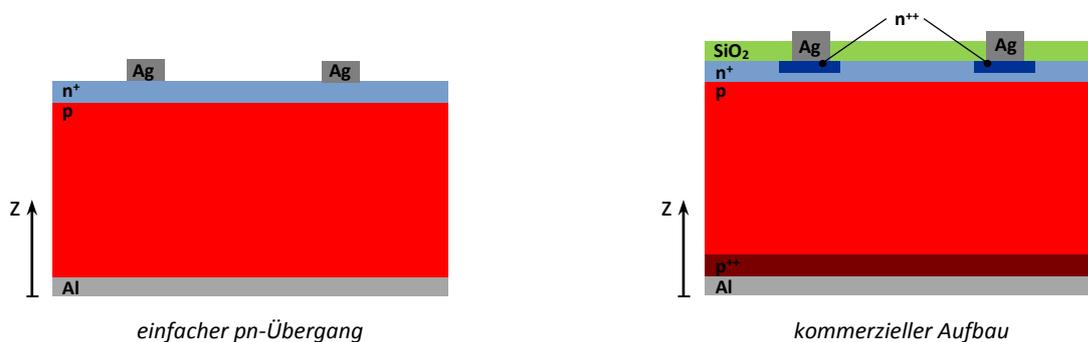


## Übungsblatt 3 – Siliziumsolarzellen und Solarzellenkenngrößen

### Aufgabe 1: Siliziumsolarzellen

Siliziumsolarzellen haben sich seit der ersten Realisierung in den Bell Laboratories durch Chapin *et al.* im Jahr 1953 von einem reinen pn-Übergang zu Systemen mit mehreren funktionalen Schichten weiterentwickelt, die heute Wirkungsgrade bis 25,6 % erreichen. Im Folgenden sind die Schichtfolgen eines einfachen pn-Übergangs sowie einer kommerziell erhältlichen Solarzelle dargestellt.



- Beschriften Sie für beide Technologien die einzelnen Schichten und zeichnen Sie das Banddiagramm entlang der z-Richtung im Gleichgewichtszustand ohne äußere Bestrahlung.
- Wie erklären Sie die unterschiedlichen Dotierungsgrade ( $p$  und  $n^+$ ) der beiden halbleitenden Schichten im einfachen pn-Übergang? Warum befindet sich in aller Regel die n- und nicht die p-Schicht auf der Licht zugewandten Seite der Solarzelle?
- Diskutieren Sie wie die zusätzlichen Schichten im kommerziellen Aufbau die Energiewandlung in der Solarzelle gegenüber dem einfachen pn-Übergang optimieren.
- Zur Reduzierung der Reflexion an der Oberfläche der Solarzelle werden in kommerziellen Zellen Antireflexschichten auf der Zelle abgeschieden. Hierbei kommen prinzipiell verschiedene Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes in Frage:

- Magnesiumfluorid ( $MgF_2$ ):  $n(\lambda = 500 \text{ nm}) = 1,39$
- Siliziumdioxid ( $SiO_2$ ):  $n(\lambda = 500 \text{ nm}) = 1,64$
- Siliziumnitrid ( $Si_3N_4$ ):  $n(\lambda = 500 \text{ nm}) = 2,04$
- Titandioxid ( $TiO_2$ ):  $n(\lambda = 500 \text{ nm}) = 2,59$

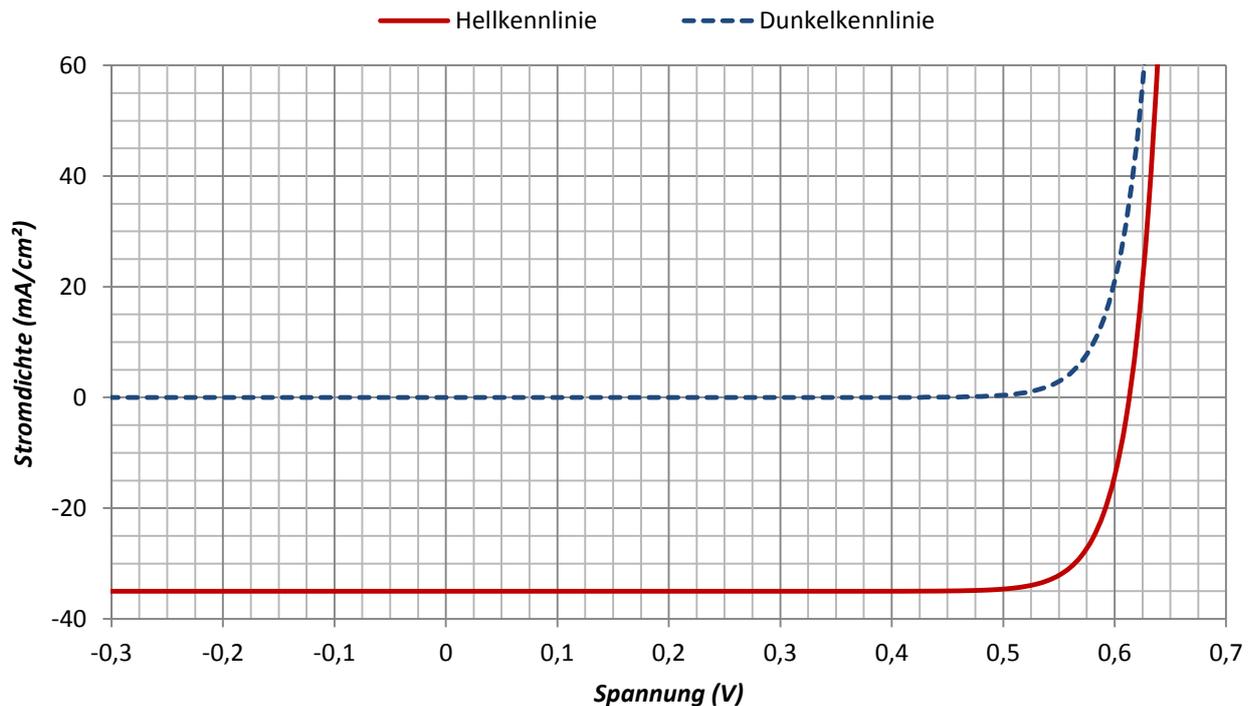
Welches Material eignet sich für den Einsatz auf einer Siliziumsolarzelle am besten? Gehen Sie von einem senkrechten Lichteinfall aus der Luft und von einem Brechungsindex für Silizium von  $n(\lambda = 500 \text{ nm}) = 4,30$  aus. Wie dick sollte die Antireflexbeschichtung sein, um die Reflexion mit dem gewählten Material bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 500 \text{ nm}$  maximal zu reduzieren?

- Nennen Sie weitere Verlustmechanismen in der Solarzelle, die mit den obigen Schichten noch nicht reduziert werden. Wie können Sie auch diese Verluste minimieren?

## Aufgabe 2: Solarzellenkennlinie

In einer klassischen Solarzelle ist das Vorhandensein eines pn-Übergangs eine elementare Grundlage für die Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie. Aus den theoretischen Betrachtungen zum pn-Übergang lässt sich letztlich auch ein Ausdruck für die theoretische Beschreibung der Solarzellenkennlinie, wie sie untenstehend dargestellt ist, ableiten:

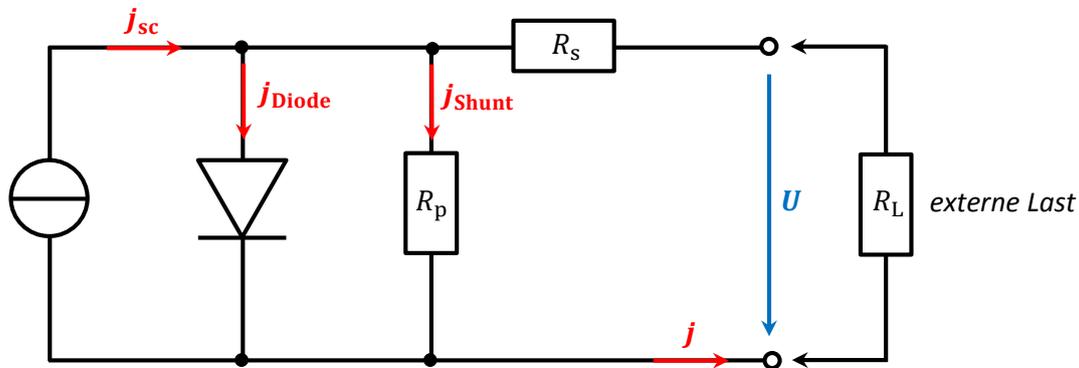
$$j(U) = j_{sp} \cdot \left( e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) + j_{sc}$$



- Für die oben abgebildete Kennlinie einer Siliziumsolarzelle wurde eine Sperrsättigungsstromdichte  $j_{sp}$  von  $10^{-9}$  mA/cm<sup>2</sup> und eine Kurzschlussstromdichte  $j_{sc}$  von -35 mA/cm<sup>2</sup> vorausgesetzt. Berechnen Sie die Spannung bei der Sie die Solarzelle als Generator betreiben würden. Leiten Sie hierzu eine allgemeingültige Formel basierend auf der Kennliniengleichung der idealen Solarzelle ab.
- Berechnen Sie nun die Leerlaufspannung  $U_{oc}$ , den Füllfaktor  $FF$  und schließlich auch den Wirkungsgrad  $\eta$  der dargestellten Solarzelle.
- Wie ändern sich die Kenngrößen wenn sich die Einstrahlung von den üblichen 100 mW/cm<sup>2</sup> - durch z.B. Bewölkung - auf die Hälfte reduziert? Zeichnen Sie die neue Kennlinie in obiges Diagramm ein.
- An die Solarzelle ( $A = 10$  cm<sup>2</sup>) wird nun ein Last mit einem Widerstand von entweder  $R_1 = 2$   $\Omega$  oder  $R_2 = 200$  m $\Omega$  angeschlossen. Bestimmen Sie die Arbeitspunkte der genannten Lasten für die beiden unterschiedlichen Bestrahlungsstärken und zeichnen Sie diese in obiges Diagramm ein.
- Diskutieren Sie ausgehend vom vorausgegangenen Aufgabenteil wie Sie eine Solarzelle als linearen Lichtsensor zur Messung der Bestrahlungsstärke verwenden können.

### Aufgabe 3: Elektrische Beschreibung einer Solarzelle

Das Modell der idealen Solarzelle ist für reale Beschreibungen von Solarzelle häufig weniger gut geeignet, da Verluste (abgesehen von der strahlenden Rekombination) nicht berücksichtigt werden. Zur Simulation der realen Kennlinien kommen deshalb gewisse elektrische Ersatzschaltbilder zum Einsatz, wie das im Folgenden abgebildete Standardmodell einer Solarzelle:



- Identifizieren Sie in obigem Ersatzschaltbild das Modell der idealen Solarzelle. Wie und warum wurde das ideale Modell zur verbesserten Beschreibung ergänzt?
- Leiten Sie mit Hilfe der Kirchhoff'schen Regeln und der Beziehung für eine ideale Solarzelle die Kennliniengleichung  $j(U)$  für das Standardmodell ab.
- Wie beeinflussen die Werte für die beiden Widerstände  $R_s$  und  $R_p$  die Form der Kennlinie? Zeichnen Sie schematisch einige Kennlinien mit verschiedenen Werten für  $R_s$  und  $R_p$ .
- Ein wichtiger Verlustmechanismus wird auch in obigem Modell noch nicht ausreichend korrekt beschrieben. Um welchen Mechanismus handelt es sich hierbei und wie lässt sich auch dieser elektrisch zufriedenstellend beschreiben?

### Aufgabe 4: Diskussion zu den bisherigen Themen der Vorlesung

Im Rahmen dieser Übung haben Sie die Gelegenheit über Probleme und Unklarheiten zu diskutieren. Überlegen Sie sich vorab Fragen zu Themen aus Vorlesung und Übung, die Ihnen bisher noch nicht vollständig klar sind.

---

#### 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/>
- 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 und Campus Management wird in den kommenden Tagen freigeschaltet.