

# Fortgeschrittenenpraktikum 2

## Die Solarzelle

### Inhalt

1	Angestrebte Lernziele .....	2
2	Aufgabenstellung .....	2
2.1	Teil 1: Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung .....	2
2.2	Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle .....	3
3	Vorgangsweise .....	3
3.1	Teil 1: Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung .....	3
3.2	Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle .....	4
3.3	Verwendete Formeln .....	5
4	Verwendete Geräte.....	6
4.1	Quellenmessgerät (Sourcemeter).....	6
4.2	Sonnensimulator .....	8
4.3	Leistungsmessgerät.....	9
5	Hinweise zum sicheren Umgang mit den Geräten.....	9
6	Grundlagen.....	10
6.1	Funktionsweise .....	10
6.2	Strom-Spannungs-Kennlinie der Fotodiode .....	11
7	Kontrollfragen .....	16
8	Weiterführende Literatur.....	17
9	Kontakt.....	17

# 1 Angestrebte Lernziele

An Solarzellenmodulen verschiedener Größe sollen diverse Messungen durchgeführt werden mit dem Ziel, einerseits die Diodencharakteristik der Zellen, andererseits ihre Eigenschaften im Zusammenhang mit der Energieumwandlung zu untersuchen.

Die Module werden dafür entweder an eine externe Spannungsquelle angeschlossen oder im beleuchteten Fall mit einem Verbraucher verbunden.

Im ersten Teil geht es darum, das Verhalten der bestrahlten Solarzelle bei verschiedenen elektrischen Lasten zu untersuchen und dabei die einzelnen Elemente des Moduls korrekt untereinander und mit den Volt- und Amperemetern zu verschalten.

Im zweiten Teil der Aufgabe übernimmt ein sogenanntes Quellenmessgerät (engl. Sourcemeter) die Eigenschaften von Quelle und Last und nimmt automatisiert die Strom-Spannungs-Kennlinien des Moduls auf. Der Schwerpunkt in diesem Teil der Aufgabe liegt in der Analyse der Diodenkennlinie mit und ohne Bestrahlung. Eine wichtige Kenngröße im Zusammenhang mit der Energieumwandlung ist der Wirkungsgrad eines Solarzellenmoduls, der durch Messung der eingestrahlten Lichtleistung und der abgegebenen elektrischen Leistung bestimmt werden soll.

## 2 Aufgabenstellung

### 2.1 Teil 1: Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Gegeben ist ein Solarzellenmodul bestehend aus 2 Solarzellen. Das Modul wird mit einer Lampe gleichmäßig ausgeleuchtet (Abstand ca. 30 cm). Die Kennlinie und die Kenndaten sind jeweils für Parallel- und Serienschaltung der 2 Solarzellen zu ermitteln.

Die Kennlinie des Solarzellenmoduls  $I(U)$  ist bei konstanter Temperatur aufzunehmen. Es sind ein  $I(U)$ - und ein  $P(U)$ -Diagramm zu erstellen. Ermitteln Sie weiters die Kenndaten Leerlaufspannung ( $U_L$ ), Kurzschlussstrom ( $I_K$ ), sowie am Betriebspunkt maximaler Leistung (MPP) die Spannung ( $U_{MPP}$ ), den Strom ( $I_{MPP}$ ), die Leistung ( $P_{MPP}$ ) und schließlich den Füllfaktor.

**Aufgabe 1:** Die beiden Solarzellen des Solarzellenmoduls werden in Serie geschaltet.

**Aufgabe 2:** Die beiden Solarzellen des Solarzellenmoduls werden parallel geschaltet.

**Aufgabe 3:** Die beiden Solarzellen des Solarzellenmoduls werden in Serie geschaltet. Der Effekt der teilweisen Abschattung einer Solarzelle ist zu untersuchen.

## **2.2 Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle**

Gegeben sind eine einzelne Solarzelle, ein Sonnensimulator als Lichtquelle, ein Leistungsmessgerät, sowie ein Quellenmessgerät (Sourcemeter) zur automatisierten Messung der Kennlinie.

### **Aufgabe 4:** Messung der Dunkelkennlinie

An der einzelnen, abgedeckten Solarzelle wird mit Hilfe des Sourcemeters automatisiert die Kennlinie aufgenommen. Fitten Sie den  $I(U)$ -Verlauf mit der gegebenen Formel und bestimmen Sie die Parameter der Diode.

### **Aufgabe 5:** Messung der Hellkennlinie und Bestimmung des Wirkungsgrades.

Die einzelne Solarzelle wird mit Hilfe des Sonnensimulators mit zwei verschiedenen Intensitäten ( $1000 \text{ W/m}^2$  und  $400 \text{ W/m}^2$ ) bestrahlt. Aus den aufgenommenen Kennlinien werden die Diodenparameter, sowie im Punkt der maximalen Leistung (MPP) die Wirkungsgrade ermittelt.

## **3 Vorgangsweise**

### **3.1 Teil 1: Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung**

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Lichtquelle und einem Solarzellenmodul, sowie aus einem schaltbaren Widerstand und zwei Multimetern. Bei der Messung sollte der Abstand zwischen Lampe und Modul ca. 30 cm betragen. Nach der in Abb.1 gezeigten Schaltskizze wird die Messung der Hellkennlinie vorgenommen. Der Widerstand wird dabei so variiert, dass die gesamte Kennlinie gut mit Messpunkten abgedeckt wird. Im Bereich der maximalen Leistung (Knickbereich der  $I(U)$  – Kennlinie) sollten die Messpunkte dichter gesetzt werden.

Aus den erhaltenen Daten werden dann die geforderten Diagramme erstellt und ausgewertet.

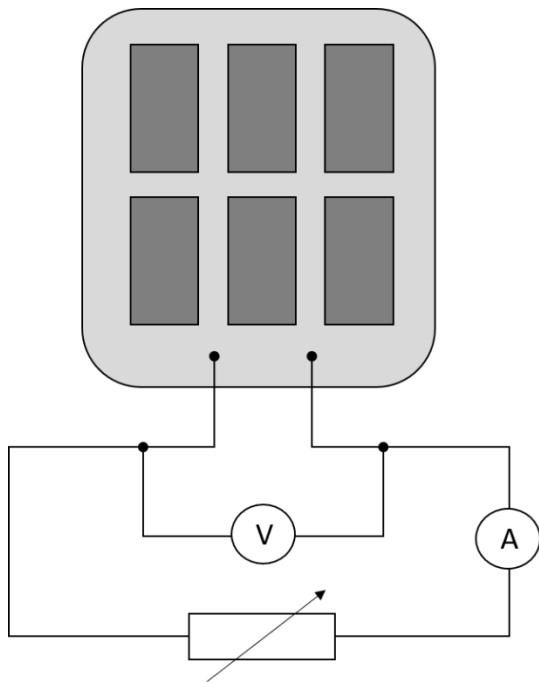


Abb.1 Schalskizze zur Messung der  
Hellkennlinie des Solarzellenmoduls.

Zur Abschattung (Aufg.3) wird eine der Zellen mit einem Papierstreifen teilweise abgedeckt.

### 3.2 Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Die Solarzelle wird in ihrem Halter (Kupferblock zur Kühlung) unter den Sonnensimulator gegeben. Durch Schließen des Schiebers wird die Solarzelle abgedunkelt. Durch Öffnen des Schiebers wird die Solarzelle bestrahlt. Anstelle der Solarzelle kann auch das Leistungsmessgerät in den Strahlengang des Sonnensimulators gebracht werden. Der Anschluss des Sourcemeters an die Diode erfolgt in 4-Pol-Technik mit zusätzlichen Sense-Leitungen zur Spannungsmessung, wie in der Abbildung 2 schematisch gezeigt. Das Sourcemeter („Quellenmessgerät“) übernimmt die Rollen als Quelle und als Last. Es kann daher Kennlinien in allen vier Quadranten des Strom-Spannungsdiagramms aufnehmen. In den Quadranten I und III (Strom und Spannung haben jeweils selbes Vorzeichen) dient es als Quelle, um einen Strom entsprechender Richtung durch die entsprechende Schaltung zu treiben. In den Quadranten II und IV dient es als Last. So wird z.B. die Solarzelle bei Bestrahlung im vierten Quadranten betrieben. Bei variablen, an der Zelle angelegten Spannungen zwischen  $U = 0$  (Kurzschluss) und  $U = U_L$  (Leerlaufspannung) fließt dann ein Strom in negative Richtung, wird also der Solarzelle entnommen. Dieser Bereich wurde schon im Teil 1 durch variable Lastwiderstände abgedeckt. Mit dem Sourcemeter können in einer einzigen Messung allerdings auch die Quadranten I und III durchlaufen werden.

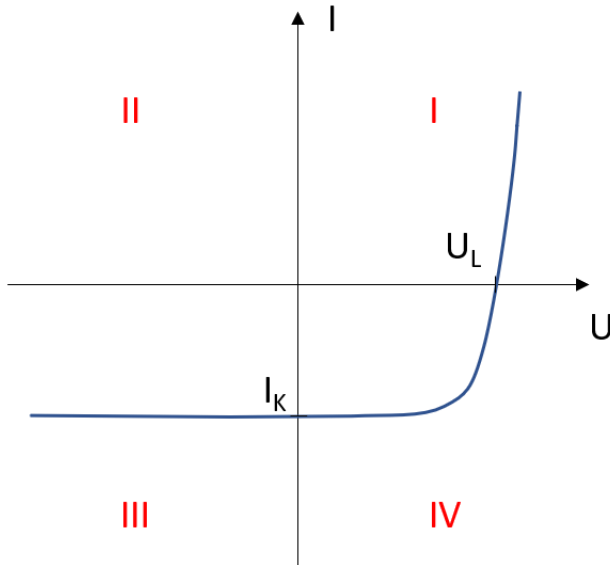


Abb.2 Schematische Darstellung der Hellkennlinie der Solarzelle in den Quadranten I, III und IV. Eingezeichnet sind der Kurzschluss-Strom  $I_K$  bei  $U = 0$  und die Leerlaufspannung  $U_L$  bei  $I = 0$ . Der Punkt maximaler Leistung befindet sich im Bereich des Knicks der Kennlinie im Quadranten IV. Im Quadranten III kann die Solarzelle als Photodetektor betrieben werden, da der gemessene Strom der einfallenden Bestrahlungsstärke (Leistung pro bestrahlte Fläche) proportional ist.

Zur Einstellung einer definierten Bestrahlungsstärke wird das Strahlungs-Messgerät (Powermeter) verwendet. Seine aktive Fläche wird gemessen und die Leistung berechnet, die auf dieser Fläche eine entsprechende Intensität (z.B.  $1000 \text{ W/m}^2$ ) erzeugt. Zur Einstellung der Intensität befindet sich an der Rückseite des Solarsimulators ein Drehknopf. An der Solarzelle wird wiederum die Fläche gemessen, um aus der eingestellten Intensität die einfallende Leistung zu berechnen, welche dann zur Bestimmung des Wirkungsgrades in Relation zur elektrischen Leistung gesetzt wird.

### 3.3 Verwendete Formeln

Eindioden-Modell:

$$I = I_{S1} \left( e^{\frac{e(U-IR_s)}{f_1 k_B T}} - 1 \right) - I_{ph} + \frac{(U - IR_s)}{R_p} \quad (1)$$

Zweidioden-Modell:

$$I = I_{S1} \left( e^{\frac{e(U-IR_s)}{f_1 k_B T}} - 1 \right) + I_{S2} \left( e^{\frac{e(U-IR_s)}{f_2 k_B T}} - 1 \right) - I_{ph} + \frac{(U - IR_s)}{R_p} \quad (2)$$

$I_{S1}, I_{S2} \dots$  Sättigungsstrom (beide positiv einzusetzen) (typ. Werte:  $10^{-9} - 10^{-6}$ )

$U \dots$  gemessene Spannung

$I \dots$  gemessener Strom

$R_s \dots$  Serienwiderstand (typ. Werte:  $0,1 - 1$ )

$R_p \dots$  Parallelwiderstand (typ. Wert:  $>10000$ )

$k_B \dots$  Boltzmann-Konstante

$e \dots$  Elementarladung

$T \dots$  abs. Temperatur

$I_{ph} \dots$  Photostrom (Betrag des Photostromes einzusetzen)

$f_1, f_2 \dots$  Diodenfaktoren zur Anpassung (typ. Werte:  $1,0 - 2,5$ )

Der Serienwiderstand der beleuchteten Solarzelle kann aus der Steigung  $dU/dI$  bei  $I = 0$  abgelesen werden. Der Parallelwiderstand ergibt sich wiederum aus der Steigung bei  $U = 0$ .

Aus der Diodenkennlinie können noch folgende Parameter bestimmt werden:

$$FF = \frac{I_{\max} U_{\max}}{I_K U_L} \quad (3)$$

$$P_{\max} = I_{\max} U_{\max} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{Licht}}} \quad (5)$$

$$P_{\text{Licht}} = A \cdot I_{\text{Licht}} \quad I_{\text{Licht}} = \frac{P_{\text{mess}}}{A_{\text{mess}}} \quad (6)$$

$FF \dots$  Füllfaktor

$P_{\text{mess}} \dots$  gemessene Leistung am Strahlungsmessgerät [W]

$A_{\text{mess}} \dots$  Fläche des Leistungsmessgeräts [ $\text{m}^2$ ]

$P_{\max} \dots$  maximale Leistung der Photodiode [W]

$U_{\max} \dots$  Spannung beim Punkt maximaler Leistung abgelesen [V]

$I_{\max} \dots$  Stromstärke beim Punkt maximaler Leistung abgelesen [A]

$U_L \dots$  Leerlaufspannung (Spannung an Photodiode bei  $I=0$ ) [V]

$I_K \dots$  Kurzschlussstromstärke (Strom an Photodiode bei  $U=0$ ) [A]

$P_{\text{Licht}} \dots$  Leistung die von der Lampe auf Solarzelle trifft [W]

$A \dots$  aktive Fläche der Solarzelle [ $\text{m}^2$ ]

$I_{\text{Licht}} \dots$  Lichtintensität der Lampe [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\eta \dots$  Wirkungsgrad

## 4 Verwendete Geräte

### 4.1 Quellenmessgerät (SourceMeter)

Das verwendete Modell mit der Bezeichnung Keithley 2450 dient als Strom- oder Spannungsquelle und kann gleichzeitig auch beide Größen messen. Je nach Beschaffenheit

des Messobjekts dient es als Quelle (z.B. an einem Widerstand) oder als Last (an der beleuchteten Solarzelle). In der aktuellen Anwendung kommt es zur Messung einer Strom-Spannungskennlinie zum Einsatz, wobei in einem vorgegebenen Bereich die Spannungswerte vorgegeben und die dabei fließenden Ströme gemessen werden. Um Fehler durch Spannungsabfälle an den Zuleitungen zu vermeiden, wird die Spannung am zu untersuchenden Objekt mit zusätzlichen (Sense-) Leitungen gemessen. Die Kennlinienfunktion kann entweder durch direkte Eingabe am Messgerät mittels Touchscreens aufgerufen werden oder mittels Fernsteuerung über die USB-Schnittstelle. Wir bevorzugen die zweite Variante, bei der die Speicherung der gewonnenen Messdaten sowie die Bedienung leichter ist.

*Anleitung zur Computergesteuerten Messung einer  $I(U)$ -Kennlinie mit dem Sourcemeter:*

1. Schalten Sie das Keithley 2450 Sourcemeter ein. Vom Gerät gehen 4 Kabel zur Solarzelle, je zwei von den „Source“ und den „Sense“ Ausgängen.
2. Öffnen Sie im Startmenü unter Programme/Keithley Instruments die „Kickstart“ Software.
3. Erstellen Sie in Kickstart einen neuen Test. Klicken Sie dafür auf „New“ und wählen Sie einen Dateinamen und Speicherort aus. Wichtig: der Speicherort muss lokal auf der Festplatte sein und nicht auf dem persönlichen Netzlaufwerk, sonst stürzt das Programm ab. Im neuen Test wählen Sie unter „Select Instrument“ das Keithley 2450 aus (rechter Mausklick „add instrument“) und starten Sie unter „Select Test Type“ den „IV Characterizer“.
4. Im Fenster des gewählten Tests werden Einstellungen wie Start- und Endwert der Spannung (z.B. -1 ... 1 V) und maximaler Strom (z.B. 0.4 A) eingegeben (s. Screenshot in Abb.3). „Measure Current“ und „Measure Voltage“ werden auf „enable“ gesetzt. Unter „Advanced Configuration“ wird „Sensing Mode“ auf „4-wire“ gesetzt. Im „Graph“ – Reiter wählen Sie für die x-Achse „Smul.V“ und für die y-Achse „Smul.I“ aus. Die Messung startet mit „Execute Test“. Nach Beendigung der Messung können die Daten als Excel-Datei gespeichert und weiter ausgewertet werden. Hier ist der Speicherort beliebig.

**Anmerkung zur Eingabe von Zahlen in die in Abb.3 dargestellte Maske:** Als Dezimaltrennzeichen muss der Punkt verwendet werden. Dieser kann aber nur eingegeben werden, wenn das in der Systemsteuerung des Computers so definiert wurde:  
Systemsteuerung / Zeit und Region / Datums- Uhrzeit- oder Zahlenformat ändern / weitere Einstellungen / Dezimal-Trennzeichen (am besten vor dem Start von Kickstart kontrollieren bzw. durchführen, da die Software danach neu gestartet werden muss).

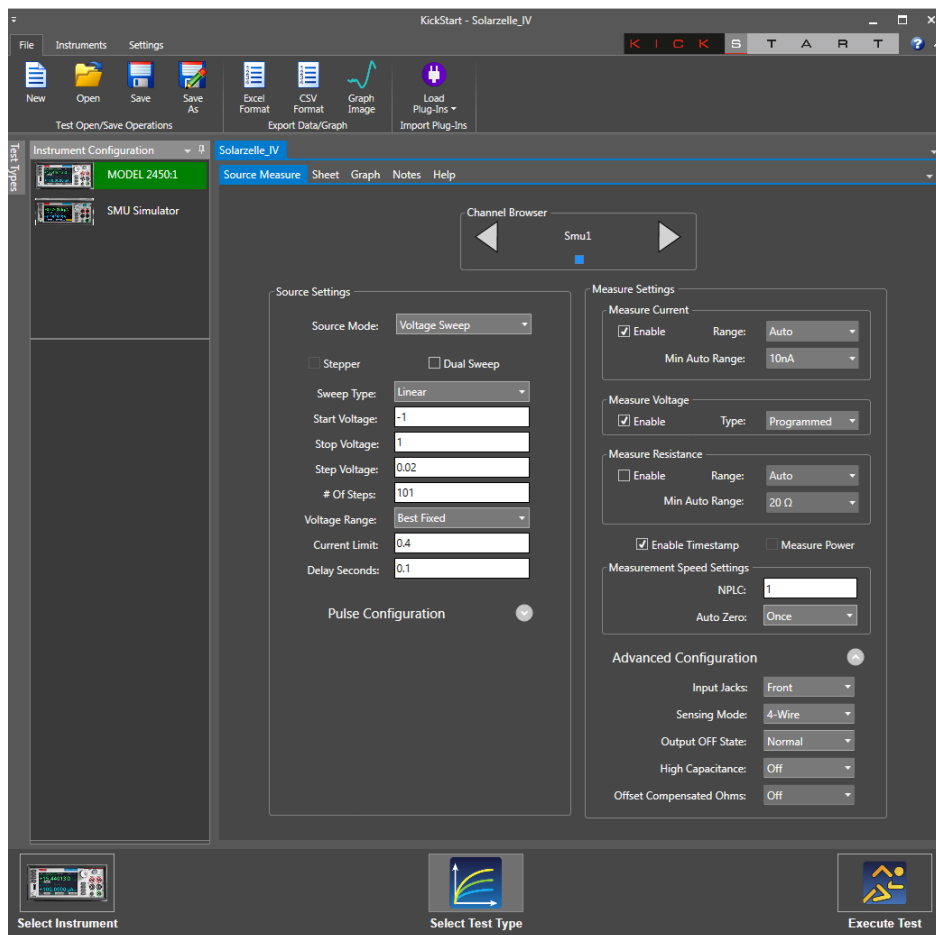


Abb. 3 Screenshot der Kickstart Software mit dem Eingabefenster für die Aufnahme der Solarzellen-Kennlinie

## 4.2 Sonnensimulator

Der Solarsimulator wird an der Rückseite eingeschaltet. Durch Filter wird eine spektrale Verteilung entsprechend Air Mass (AM, Weglänge durch Atmosphäre im Verhältnis zur Länge bei senkrechtem Einfall) 1,5 abgegeben. Durch eine rotierende Lochplatte kann die Gesamtleistung der von der Lampe abgegebenen Lichtleistung in einem weiten Bereich eingestellt werden. Die dazu gehörende Einstellschraube befindet sich ebenfalls an der Rückseite.



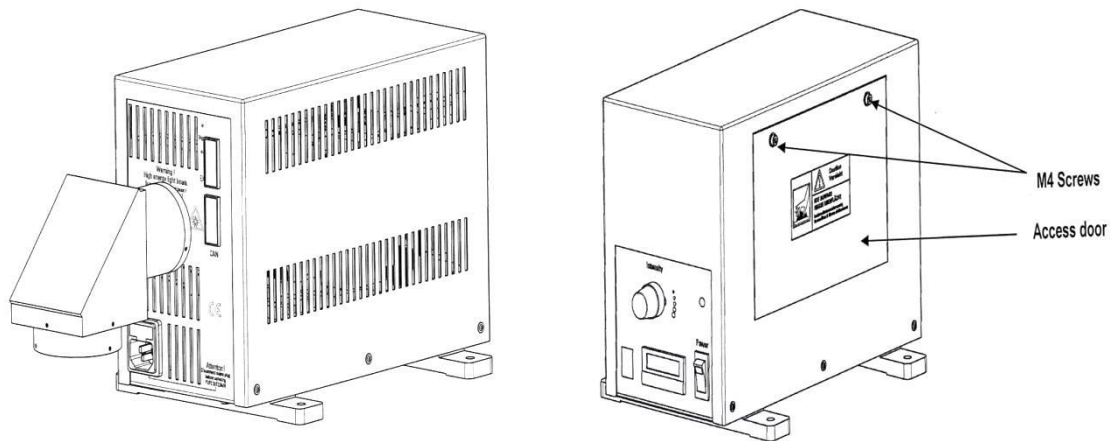


Abb.4 Sonnensimulator

### 4.3 Leistungsmessgerät

Das Leistungsmessgerät von Spectra Physics arbeitet mit einem breitbandigen Absorber und einem Thermoelement zur Messung der Strahlungsleistung. Da es sich dabei um eine empfindliche Temperaturmessung handelt, muss der Nullpunkt in jedem Bereich extra eingestellt werden. Nach der Messung ist das Gerät am Bereichsschalter auszuschalten aber am Stromnetz angesteckt zu bleiben, damit der Akku aufgeladen wird.

## 5 Hinweise zum sicheren Umgang mit den Geräten

Bei den Arbeiten ist zu beachten, dass der Sonnensimulator sehr schnell heiß wird, und daher bei Berührung Verbrennungsgefahr besteht.

Zu häufiges Ein- und Ausschalten des Sonnensimulators, ebenso wie zu lange unnötige Betriebszeiten können die Lebensdauer der Lampe reduzieren.

Maximale Spannungs- Strom- und Leistungswerte der verwendeten Fotodiode beachten.

## 6 Grundlagen

### 6.1 Funktionsweise

Abbildung 5 zeigt den schematischen Aufbau einer Solarzelle

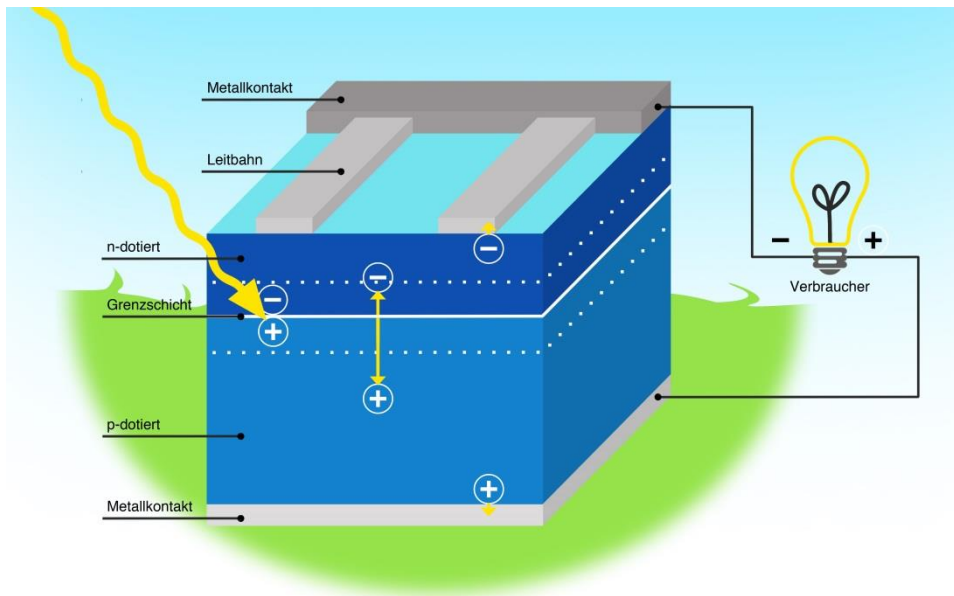


Abb.5 Schematischer Aufbau einer Solarzelle

Die Solarzelle besteht aus einer n-dotierten-Schicht und einer p-dotierten-Schicht. Eine n-dotierte Schicht enthält viele frei bewegliche Elektronen und wenige Elektronenlöcher, dies sind positive Ladungsträger, und in der p-dotierten Schicht ist es genau umgekehrt. Bei einer klassischen Siliziumzelle ist die n-Schicht ungefähr 0,001 mm dick und die p-leitende Silizium-Substrat-Schicht ca. 0,6 mm. Zwischen der p- und der n-Schicht befindet sich eine Grenzschicht, die als p/n-Übergang bezeichnet wird. Bei der hier verwendeten Solarzelle handelt es sich um eine monokristalline Siliziumsolarzelle, bei der die n-Schicht, durch oberflächennahes Einbringen, also Dotieren, von ungefähr  $10^{19}$  Phosphor-Atomen pro  $\text{cm}^3$  in das p-leitende Silizium-Substrat, erzeugt wird. Damit das Sonnenlicht vor allem am p/n-Übergang absorbiert wird, muss die n-Schicht, wie schon erwähnt, sehr dünn sein. Die Dicke der p-leitenden Silizium-Substrat-Schicht dient der mechanischen Stabilität. Die n-dotierte Schicht entsteht dadurch, dass z.B. fünfwertige Phosphoratome in das vierwertige Silizium eingebracht werden. Dadurch sind mehr Valenzelektronen vorhanden, welche im Leitungsband untergebracht werden und damit die Leitfähigkeit verursachen. Die Fermi-Energie wird dabei angehoben. Durch die höhere Protonenanzahl im Atomkern wird die höhere elektrische negative Ladung der Zusatzelektronen kompensiert, wodurch das Material elektrisch neutral bleibt. Bei der p-Dotierung geht man so vor, dass man ein niederwertiges Element, z.B. 3-wertige Bor-Atome, in das 4-wertige Siliziumgitter einbringt, dadurch entsteht ein Mangel an Elektronen im Valenzband, sogenannte Elektronenlöcher, welche sich wie positive Ladungsträger verhalten und zur Leitfähigkeit beitragen. Die Fermi-Energie wird dabei abgesenkt. In Abb.6 ist das idealisierte Dotierungsprofil eines p/n Überganges gezeigt, an dem sich sprunghaft die Besetzung von Valenz- und Leitungsband ändert.

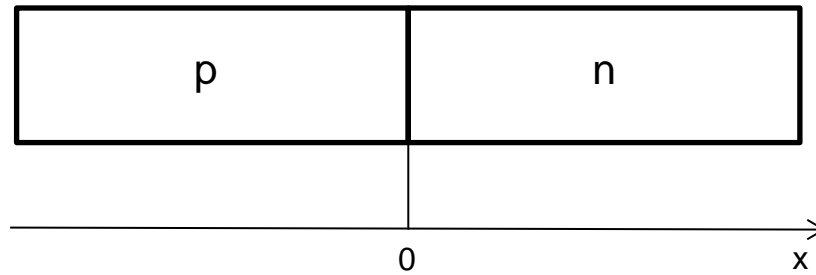


Abb.6: p/n-Übergang schematisch, mit scharfer Grenze zwischen p- und n-dotierten Bereichen.

Durch die unterschiedlichen Fermi-Niveaus wandern die Löcher in die n-Schicht und die Elektronen in die p-Schicht. Dadurch entsteht an der Grenzschicht eine von freien Ladungsträgern verarmte Sperrschicht einer bestimmten Breite. Durch diese Verschiebung der Ladungsträger bekommt das p-Gebiet eine negative, und das n-Gebiet eine positive Raumladung (Raumladungszone), welche das weitere Diffundieren der Ladungsträger verhindert. Erst durch Anlegen einer entgegengesetzten Spannung von außen, kann die entstandene Potentialbarriere für die Ladungsträger abgebaut werden und ein Strom fließen. Wird eine äußere Spannung in umgekehrter Polarität angelegt, vergrößert sich die Potentialbarriere und die Sperrschicht dehnt sich weiter aus und kein Strom kann fließen. Damit verhält sich der p/n-Übergang als Gleichrichter und entspricht einer Diode. Wird die Sperrschicht mit Photonen einer genügend hohen Energie bestrahlt, so entstehen zusätzliche Elektron-Lochpaare, welche die Energiebarriere überwinden können und ein Fotostrom in Sperrrichtung der Diode kann fließen. Aus der einfachen Diode ist dann eine Fotodiode geworden, welche als Solarzelle zur Stromerzeugung aus Strahlung verwendet werden kann.

## 6.2 Strom-Spannungs-Kennlinie der Fotodiode

Für einen idealisierten p/n-Übergang mit abrupten Dotierungsprofil, wie in Abb.6 gezeigt, erhält man als Strom-Spannungs-Charakteristik  $I(U)$  die Shockley-Gleichung:

$$I(U) = I_s \left( e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) \quad (7)$$

Dabei bedeutet  $U$  die an die Diode angelegte Spannung (positiv, wenn positiver Pol an der p-dotierten Schicht und der negative Pol an der n-dotierten Schicht liegt), wodurch ein exponentiell ansteigender Strom in Durchlassrichtung (positiver Strom) entsteht. Wird die Spannung in Sperrrichtung angelegt (negative Spannung), so müssen die Ladungsträger thermisch aktiviert die Potentialbarriere überwinden, weshalb nur ein sehr kleiner Sperrstrom fließt, welcher durch den Sättigungsstrom  $I_s$  limitiert ist. Dieses idealisierte Verhalten ist meist in der Praxis nicht gegeben, weshalb man für eine reale Diode den Diodenfaktor  $f$

eingeführt, welcher das Vorhandensein von z.B. Traps, zusätzlichem Aktivierungspotential, Streuung, etc. berücksichtigt.

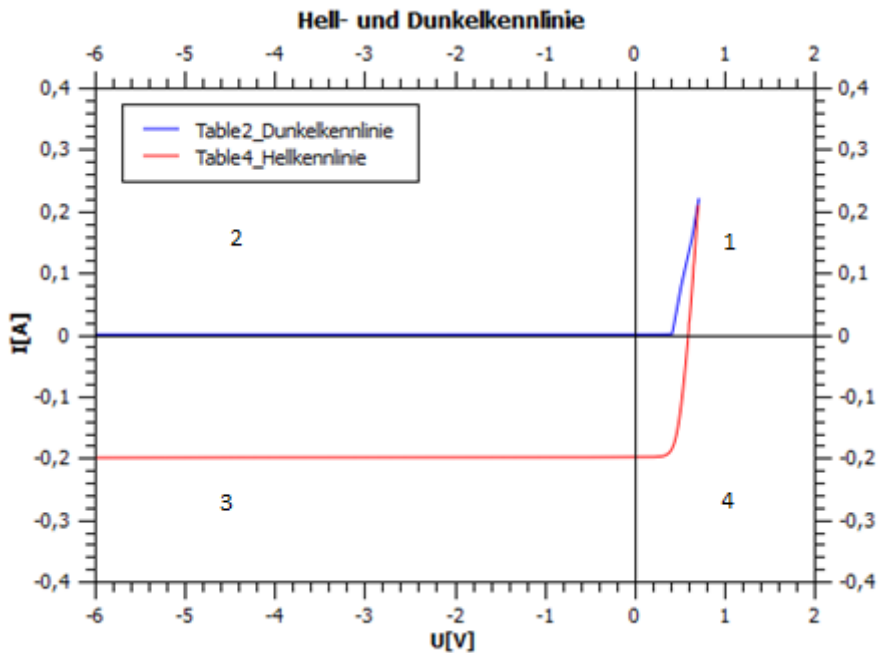


Abb.7: Typische Strom-Spannungs-Kennlinien einer Fotodiode

In Abb.7 wird ein beispielhafter Verlauf einer Strom-Spannungs-Kennlinie für eine unbeleuchtete und beleuchtete Fotodiode gezeigt. Wird die Sperrschicht beleuchtet, so entstehen Elektron-Lochpaare, welche einen Fotostrom  $I_{ph}$  in Sperrrichtung verursachen. Aus der Shockley-Gleichung erhält man dann für eine beleuchtete Fotodiode:

$$I(U) = I_S \left( e^{\frac{eU}{fk_B T}} - 1 \right) - I_{ph} \quad (8)$$

Meist sind auch noch parasitäre Widerstände zu berücksichtigen, so dass ein geeignetes Modell mit einer Fotodiode noch mit Serien- und Parallelwiderstand erweitert wird, wie in Abb.8 gezeigt.

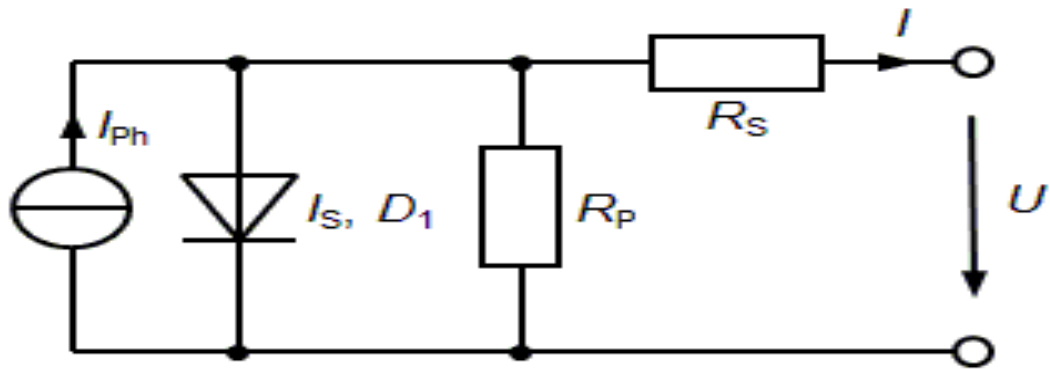


Abb.8: Ersatzschaltbild des Eindioden-Modells

Damit erhält man die Eindioden-Kennlinie aus Gl.(1).

Da Solarzellen meist sehr großflächige Fotodioden sind, muss man auch mit stärkeren Dotierungsschwankungen und Inhomogenitäten der Diodenparameter über der ausgedehnten Fläche rechnen, wodurch oft eine Ersatzschaltung mit zwei unterschiedlichen, parallelgeschalteten Fotodioden besseres reales Verhalten simuliert.

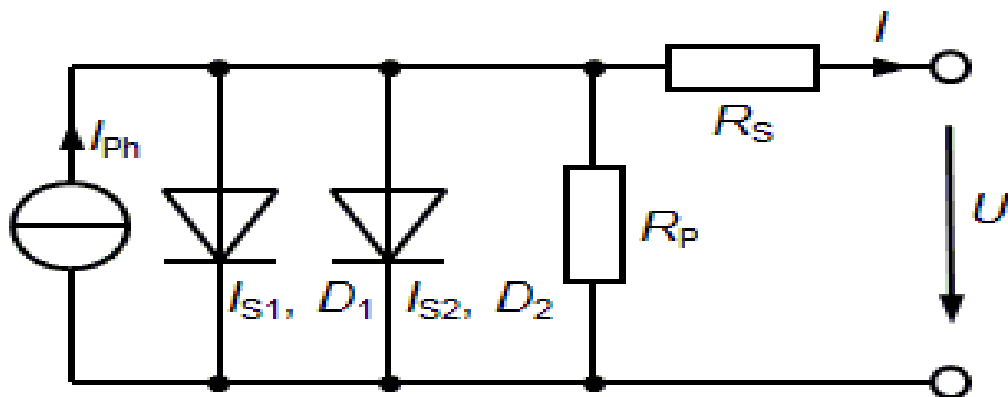


Abb.9: Ersatzschaltbild im Zweidioden-Modell

Dies ergibt schließlich die Zweidioden-Kennlinie in Gl.(2).

Kennlinien bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke sind in den folgenden Abbildungen gezeigt.

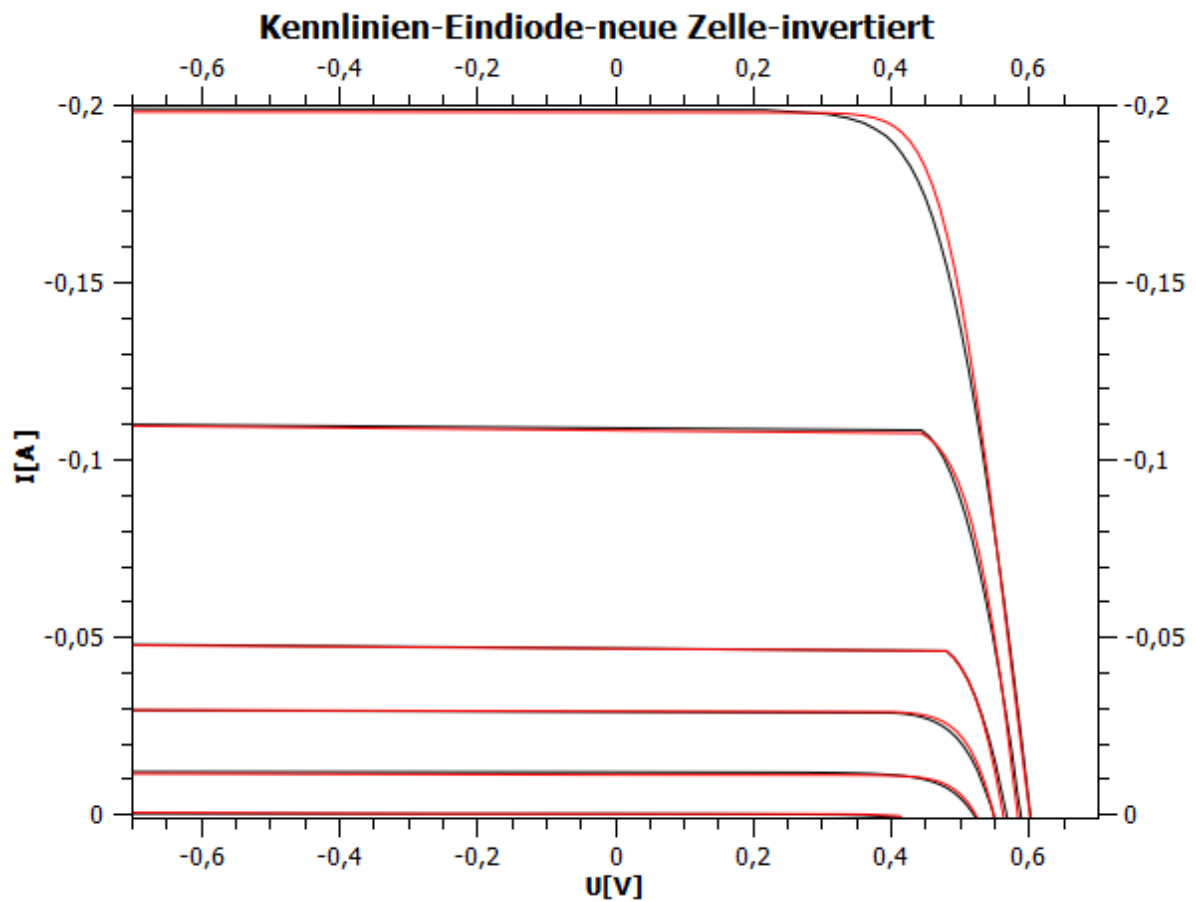


Abb. 10: Strom-Spannungs-Kennlinien in oft üblicher invertierter Strom-Darstellung für den leistungsrelevanten Teil der Kennlinie.

Daraus können im Bereich positiver Spannungen und negativer Ströme die erhaltenen Leistungen angegeben werden.

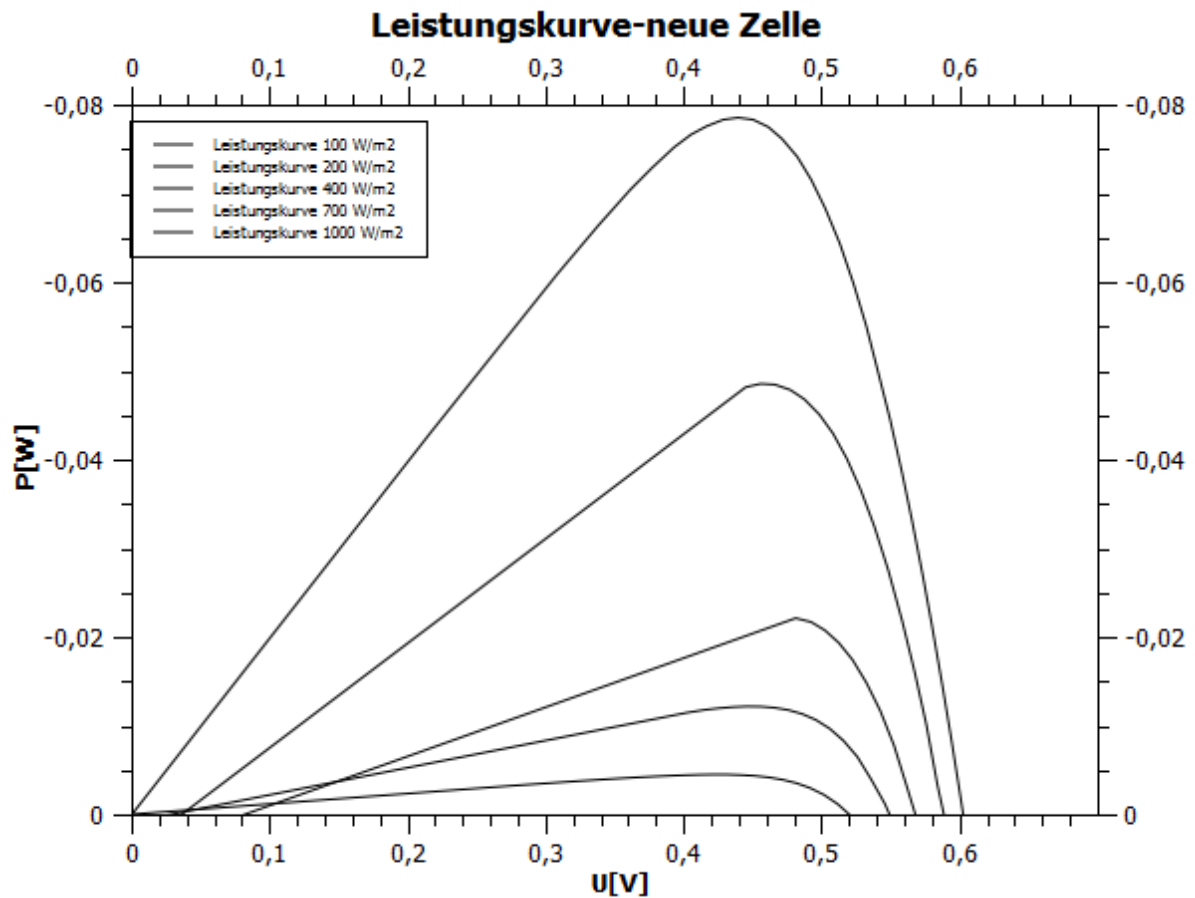


Abb. 11: Erhaltene elektrische Leistung der Fotodiode bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke.

Deutlich ersichtlich sind die Maxima der erhaltenen elektrischen Leistung, welche Punkte maximaler Leistung (Points of peak power PPP oder maximum power point MPP) genannt werden. Eingetragen in eine typische invertierte Strom-Spannungs-Kennlinie kann die Auswertung auch über den Füllfaktor erfolgen.

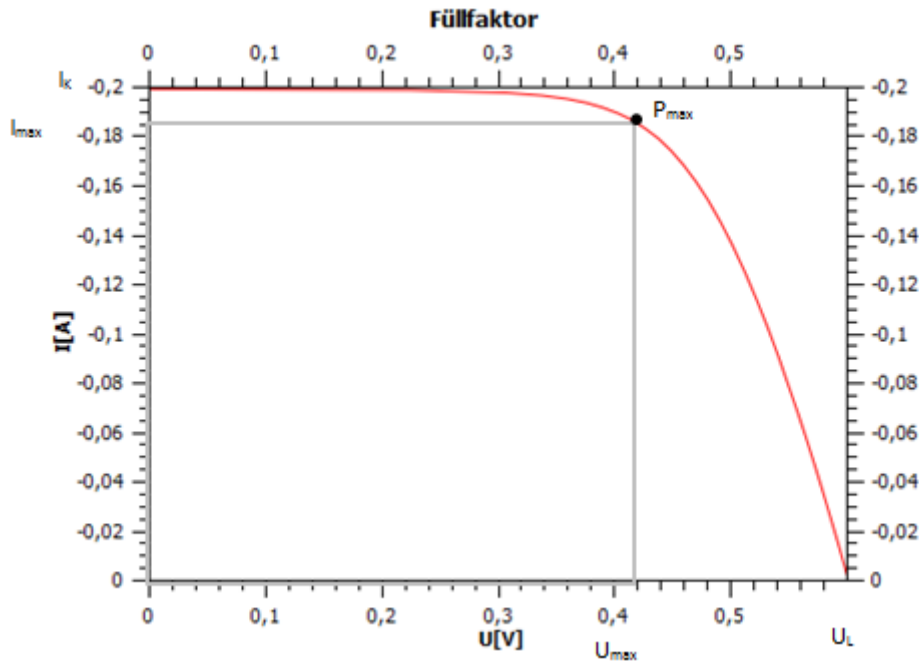


Abb. 12: Punkt maximaler Leistung im invertierten Strom-Spannungs-Diagramm.

Der Füllfaktor  $FF$  aus Gl.(3) ist als das Flächenverhältnis von der Fläche unter dem Punkt  $P_{max}$  und der Fläche aus Kurzschlussstrom  $I_K$  und Leerlaufspannung  $U_L$  gegeben (siehe Abb.12). Er gibt den Energieverlust bedingt durch die Krümmung der Kennlinie an.

Den Wirkungsgrad (Gl. 5) erhält man, indem man das Verhältnis aus elektrischer Leistung  $P_{max}$  und eingestrahelter Leistung  $P_{Licht} = A \cdot I_{Licht}$  bildet, wobei  $A$  die aktive Fläche der Fotodiode und  $I_{Licht}$  [W/m<sup>2</sup>] die Bestrahlungsstärke ist.

## 7 Kontrollfragen

- Wie funktioniert eine Solarzelle?
- Welche Faktoren haben Einfluss auf den Wirkungsgrad?
- Was sagt der Wirkungsgrad aus?
- Warum ändert sich die Leistung mit der Lichtintensität?
- Welche Faktoren verursachen Verluste?
- Wie kann der Füllfaktor interpretiert werden?
- Was ist ein 4-Quadranten-Netzgerät und warum muss es hier verwendet werden?
- Wozu dienen die Sense-Leitungen?
- Welche physikalischen Vorgänge werden in der Shockley-Gleichung berücksichtigt?
- Was ist der Unterschied zwischen 1-Dioden- und 2-Dioden-Modell?
- Welche parasitären Widerstände sind zu berücksichtigen?



## **8 Weiterführende Literatur**

Siehe z.B.

- K. Seeger, Semiconductor Physics (Springer)
- Mertens, Konrad: Photovoltaik – Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis. Carl Hanser Verlag. 2015
- Goetzberger A., Voß B., Knobloch J.: Sonnenenergie: Photovoltaik: Physik und Technologie der Solarzelle. Stuttgart: B.G.Teubner.1994
- Würfel, Peter: Physics of Solar Cells. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2009

## **9 Kontakt**

Autoren: P. Knoll, A. Schöffmann, G. Paltauf (Experimentpate, Tel. 8556, guenther.paltauf@uni-graz.at)