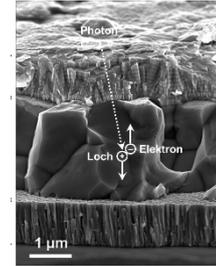




Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
Institut für Physik

Fortgeschrittenen- Praktikum

Stand der Anleitung:
01.10.2022



Versuch M14: Solarzelle

1. Aufgaben

An einer CIGS-Dünnschichtsolarzelle sind folgende Messungen durchzuführen:

1. Messen Sie die Kapazität der Solarzelle ohne Beleuchtung bei 25 °C und bei verschiedenen Sperrspannungen. Ermitteln Sie die Spannungsabhängigkeit der Breite der Raumladungszone, die Konzentration der p-Dotierung und das innere Potential.
2. Messen Sie die Strom-Spannung-Kennlinie im vierten Quadranten unter Beleuchtung mit weißem Licht der Intensität von 1 Sonne* bei 25 °C, indem Sie den Lastwiderstand variieren. Bestimmen Sie aus der Kennlinie den Füllfaktor und den Wirkungsgrad sowie Serien- und Parallelwiderstand. Wiederholen Sie die Messung bei einer um ca. 10 % reduzierten Beleuchtungsintensität und bestimmen Sie die externe Sammlungseffizienz.
3. Messen Sie Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung bei verschiedenen Beleuchtungsintensitäten und 25 °C. Bestimmen Sie aus der sich daraus ergebenden Kennlinie den Diodenqualitätsfaktor und den Sperrsättigungsstrom. Ermitteln Sie, unter welchen Bedingungen Rekombinationen innerhalb bzw. außerhalb der Raumladungszone dominieren.
4. Messen Sie Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung bei verschiedenen Temperaturen und einer Beleuchtungsintensität von 1 Sonne. Berechnen Sie jeweils den Sperrsättigungsstrom und stellen Sie die Temperaturabhängigkeit der drei Größen dar. Bestimmen Sie die Breite der Bandlücke.
5. Verwenden Sie die ermittelten Parameter der Solarzelle, um die Strom-Spannung-Kennlinie im Modell der idealen und der realen Solarzelle zu berechnen. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit der gemessenen Kennlinie.

* 1 Sonne ist eine für Zwecke der Photovoltaik genormte Beleuchtung mit der Intensität $0,1 \text{ W/cm}^2$; sie entspricht der Beleuchtung durch die Sonne auf der Erdoberfläche bei einem Zenitwinkel von $48,2^\circ$ und hat ein Spektrum, das als AM1.5 bezeichnet wird.

2. Kontrollfragen

Wie kann die Breite der Raumladungszone eines p-n-Übergangs bestimmt werden?

Wie verändert sich die Breite der Raumladungszone, wenn eine äußere Spannung angelegt wird?

Welche Gleichung beschreibt die Kennlinie einer idealen Solarzelle im Dunkeln und wie verändert sie sich unter Beleuchtung?

Wie ist der Füllfaktor definiert und wie hängt er mit dem Wirkungsgrad zusammen?

Wie verändert sich die Kennlinie einer idealen Solarzelle, wenn Serien- und Parallelwiderstand hinzukommen?

Was ist der Diodenqualitätsfaktor und welche Werte nimmt er unter welchen Bedingungen an?

Wo in der Kennlinie ist der Sperrsättigungsstrom zu finden und wie hängt er von der Temperatur ab?

Was ist stärker temperaturabhängig - Kurzschlussstrom oder Leerlaufspannung?

Wie hängen Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung mit der Bandlücke zusammen?

Was ist der Unterschied zwischen Kurzschlussstrom und Photostrom?

Warum ist der Photostrom spannungsabhängig und wie wirkt sich das auf die Kennlinie aus?

3. Grundlagen

3.1 Aufbau und Funktionsweise einer CIGS-Solarzelle

CIGS-Solarzellen sind eine Variante der Dünnschichtphotovoltaik, die hohe Wirkungsgrade mit vergleichsweise niedrigem Energie- und Kostenaufwand in der Herstellung verbindet. Sie bestehen hauptsächlich aus dem Chalkopyrit $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, einem Verbindungshalbleiter, dessen Absorptionskoeffizient für Licht ca. 100 mal so groß wie der von Silizium ist. Dementsprechend sind CIGS-Solarzellen ca. 100 mal dünner als herkömmliche Silizium-Solarzellen. Ein Querschnitt im Rasterelektronenmikroskop in Abb. 1 zeigt den typischen Aufbau.

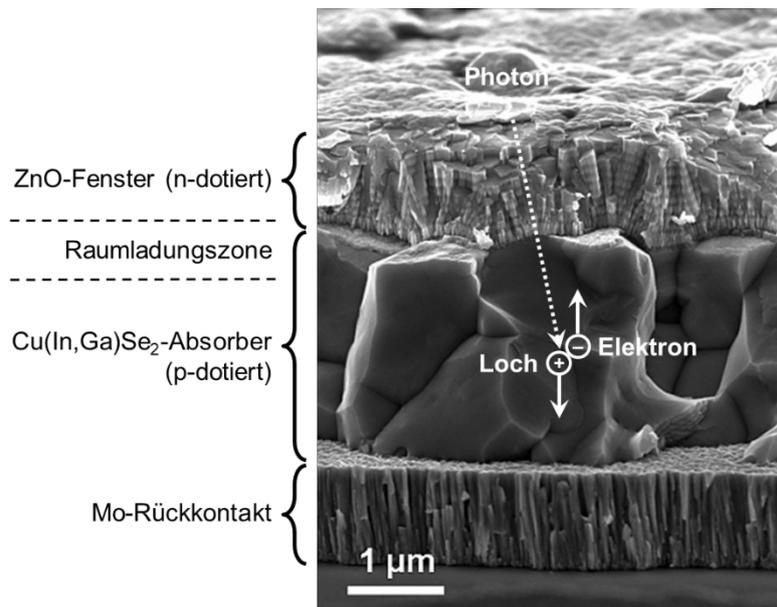


Abb. 1: Querschnitt einer CIGS-Solarzelle im Rasterelektronenmikroskop (Schichtaufbau vereinfacht)

Ein transparentes und leitfähiges, n-dotiertes Metalloxid dient als Fensterschicht, durch die das Licht eindringen kann. Am Übergang zur p-dotierten CIGS-Absorberschicht bildet sich eine Raumladungszone, die sich überwiegend in den Absorber ausdehnt, da dieser eine wesentlich niedrigere Dotierkonzentration aufweist als das Fenster. In diesem Fall kann die Breite der Raumladungszone w wie folgt angenähert werden:

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon (U_0 - U)}{N_a q}} \quad (1)$$

Hierbei ist ε die Dielektrizitätskonstante und N_a die Dotierkonzentration des Absorbers, U_0 ist das innere Potential des p-n-Übergangs, U die äußere Spannung und q die Elementarladung.

Bei Beleuchtung wird der größte Teil des einfallenden Lichts im Cu(In,Ga)Se₂ absorbiert, indem Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden, sofern die Energie der eintreffenden Photonen ausreicht, um die Bandlücke zu überwinden. Dadurch werden freie Elektronen-Loch-Paare erzeugt, die vom inneren Potential des p-n-Übergangs getrennt werden, wobei die Löcher zum metallischen Rückkontakt diffundieren und die Elektronen in Richtung Fenster driften. Der auf diese Weise erzeugte Strom wird Photostrom I_{ph} genannt und fließt in Sperrrichtung des p-n-Übergangs. Er fließt auch ohne äußere Spannung und heißt in diesem Fall Kurzschlussstrom I_{sc} .

Auf dem Weg zum Fenster kommt es zur Rekombination von Elektronen mit den Löchern im Absorber, so dass generierte Ladungsträger wieder verlorengehen. Die bei der Rekombination verschwindenden Löcher werden aus dem Rückkontakt ersetzt. Der dadurch entstehende Strom fließt dem Photostrom entgegen und entspricht dem Strom, der auch ohne Beleuchtung bei Anlegen einer äußeren Spannung fließt. Er wird deshalb Dioden- oder Dunkelstrom I_{dc} genannt. Wenn die beiden Kontakte der Solarzelle nicht verbunden sind, so dass kein äußerer Strom fließt, kompensieren sich I_{ph} und I_{dc} , und es baut sich die Leerlaufspannung U_{sc} zwischen den Kontakten auf.

Bei Vernachlässigung der inneren Widerstände wird der Diodenstrom durch die Shockley-Gleichung

$$I_{dc} = I_0 \left(\exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right) \quad (2)$$

beschrieben. Hierbei ist I_0 der Sperrsättigungsstrom, q die Elementarladung, A der Diodenqualitätsfaktor, k die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur. Der exponentielle Zusammenhang mit der Spannung resultiert aus der Abhängigkeit der Rekombinationsrate von den Ladungsträgerdichten.

Dabei spielt auch der Ort der Rekombination eine Rolle. In der Raumladungszone variieren Elektronen- und Lochdichte gleichermaßen mit der Spannung. Dies wird durch den Diodenqualitätsfaktor berücksichtigt, der den Wert 2 annimmt, wenn die Rekombination in der Raumladungszone dominiert. Außerhalb der Raumladungszone variiert überwiegend die Elektronendichte mit der Spannung. Dominiert die Rekombination in diesem Bereich, so nimmt der Diodenqualitätsfaktor den Wert 1 an. Sind beide Gebiete beteiligt, so ergibt sich ein Wert zwischen 1 und 2. Diodenqualitätsfaktoren größer als 2 können auftreten, wenn Rekombinationen an Grenzflächen von Bedeutung sind.

3.2 Strom-Spannung-Kennlinie

Eine ideale Solarzelle kann im Ersatzschaltbild als Parallelschaltung aus einer Stromquelle, die den Photostrom repräsentiert, und einer Diode, über die der Diodenstrom fließt, wie in Abb. 2 dargestellt werden. Neben den inneren Widerständen wird dabei auch die Spannungsabhängigkeit des Photostroms vernachlässigt, für den der Kurzschlussstrom eingesetzt wird.

Photostrom und Diodenstrom addieren sich zum Gesamtstrom I , so dass sich mit (2) ergibt:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right) + I_{sc} \quad (3)$$

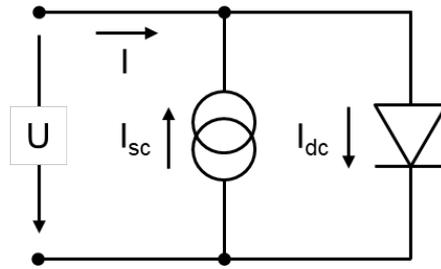


Abb. 2: Ersatzschaltbild einer idealen Solarzelle

Die Dunkelkennlinie der Solarzelle verschiebt sich somit bei Beleuchtung um I_{sc} in negativer Richtung entlang der Ordinatenachse, wie in Abb. 3 dargestellt. Dadurch verläuft die Kennlinie durch den vierten Quadranten, in diesem Bereich wird die elektrische Leistung $I \cdot U$ abgegeben.

Für den maximalen Wirkungsgrad η gilt:

$$\eta = \frac{I_{mp} U_{mp}}{P_{\gamma}} \quad (4)$$

wenn I_{mp} und U_{mp} der Strom bzw. die Spannung am Punkt maximaler Leistung und P_{γ} die einfallende Lichtleistung sind.

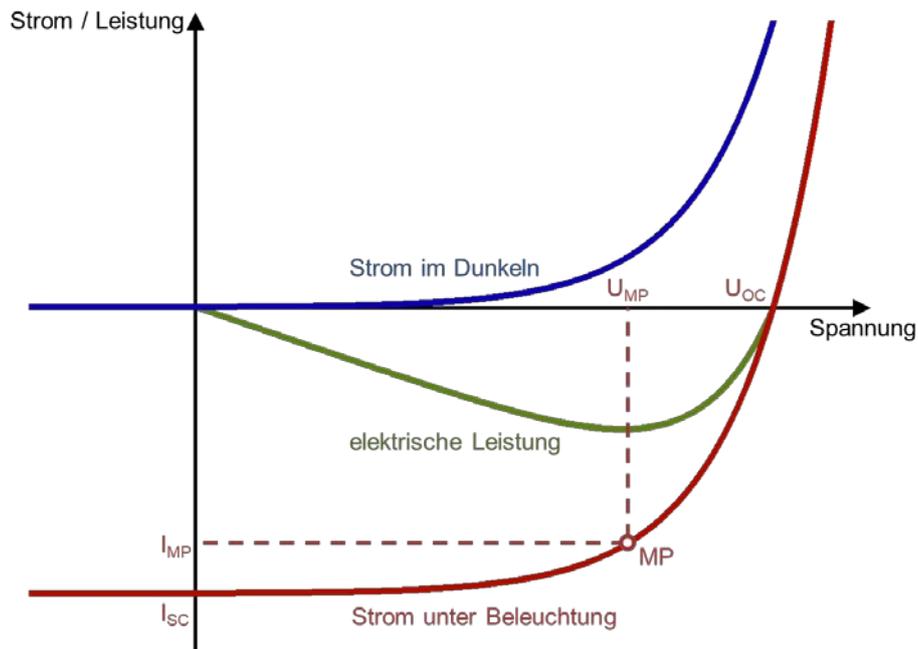


Abb. 3: Kennlinien und Kenngrößen einer Solarzelle

Mit der Leerlaufspannung U_{oc} kann der Füllfaktor FF definiert werden als:

$$FF = \frac{I_{mp} U_{mp}}{I_{sc} U_{oc}} \quad (5)$$

Damit folgt:

$$\eta = \frac{I_{sc} U_{oc}}{P_V} FF \quad (6)$$

Eine reale Solarzelle weist Parallel- und Serienwiderstand R_p und R_s auf, so dass sich das in Abb. 4 dargestellte Ersatzschaltbild ergibt.

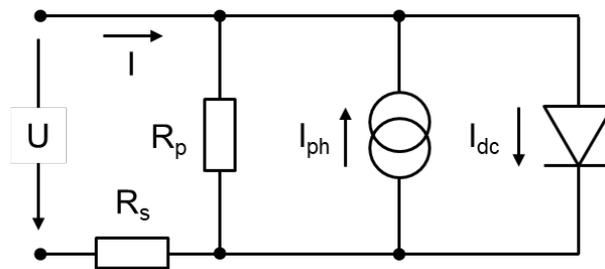


Abb. 4 Ersatzschaltbild einer Solarzelle mit Parallel- und Serienwiderstand

In diesem Fall müssen in (3) der Spannungsabfall am Serienwiderstand IR_s und der Strom durch den Parallelwiderstand $(U - IR_s)/R_p$ ergänzt werden:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{q(U - IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right) + \frac{U - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (7)$$

Außerdem ist zu beachten, dass der Photostrom in einer realen Solarzelle von der äußeren Spannung abhängt. Die wichtigste Ursache dafür ist, dass die Raumladungszone im Absorber bei Anlegen einer Vorwärtsspannung schmaler wird und ein größerer Teil der Elektron-Loch-Paare außerhalb davon erzeugt wird. Dadurch nimmt die Rekombinationsrate zu und der Anteil der zum Photostrom beitragenden Ladungsträger sinkt. Dies kann mithilfe einer externen Sammlungseffizienz $\eta_s(U) \leq 1$ ausgedrückt werden, so dass:

$$I_{ph} = \eta_s(U) I_{sc} \quad (8)$$

3.3 Abhängigkeit von Beleuchtungsintensität und Temperatur

Im Folgenden wird wieder eine ideale Solarzelle betrachtet. Der Zusammenhang von Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung bei variierender Beleuchtungsintensität kann durch Betrachtung des Leerlauffalls, in dem für den Gesamtstrom $I = 0$ und für die Spannung $U = U_{oc}$ gilt, aus (3) abgeleitet werden:

$$I_{sc} = I_0 \left(\exp \left(\frac{qU_{oc}}{AkT} \right) - 1 \right) \quad (9)$$

Für $qU_{oc} \gg AkT$ kann der negative Term vernachlässigt und der Sperrsättigungsstrom sowie der Diodenqualitätsfaktor aus einer Auftragung von $\ln(I_{sc})$ als Funktion von U_{oc} bestimmt werden. Dabei werden zwei verschiedene Rekombinationsbereiche sichtbar. Bei höheren Beleuchtungsintensitäten ist die Raumladungszone aufgrund der Photodotierung schmal, so dass die Rekombination der Ladungsträger im Gebiet außerhalb der Raumladungszone dominiert und der Diodenqualitätsfaktor nahe bei 1 liegt. Bei niedrigen Beleuchtungsintensitäten kommt die Rekombination in der Raumladungszone zum Tragen und der Diodenqualitätsfaktor nähert sich dem Wert 2 an.

Das Verhalten der Solarzelle bei variierender Temperatur wird hauptsächlich durch die thermische Aktivierung intrinsischer Ladungsträger über die Bandlücke bestimmt. Die am stärksten temperaturabhängige Größe ist daher der von diesen Ladungsträgern getragene Sperrsättigungsstrom, für den gilt:

$$I_0 = I_{00} \exp\left(-\frac{E_a}{AkT}\right) \quad (10)$$

mit dem nur schwach temperaturabhängigen Parameter I_{00} und der Aktivierungsenergie E_a/A . Damit folgt unter erneuter Vernachlässigung des negativen Terms aus (9) für die Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung:

$$qU_{oc} = E_a + AkT \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{00}}\right) \quad (11)$$

I_{sc} ist ebenfalls nur schwach von der Temperatur abhängig, daher kann E_a aus einer Auftragung von U_{oc} als Funktion von T bestimmt werden.

Dieser Wert entspricht jedoch nicht genau der Bandlücke, da aufgrund der Besetzungswahrscheinlichkeit bei endlicher Temperatur T_0 die Anregung der Ladungsträger aus einem Bereich der Breite $3/2 kT_0$ unterhalb der Oberkante des Valenzbandes in einen ebensolchen Bereich oberhalb der Unterkante des Leitungsbandes erfolgt. Daher gilt für die Anregungsenergie:

$$E_a = E_g + 3kT_0 \quad (12)$$

3.4 Literatur

<http://pveducation.org/pvcdrom>

H.-G. Wagemann, H. Eschrich: „Photovoltaik.“ Teubner, Wiesbaden (2007)

J. Nelson: „The Physics of Solar Cells.“ Imperial College Press, London (2003)

R. Scheer, H.-W. Schock: „Chalcogenide Photovoltaics.“ Wiley-VCH, Weinheim (2011)

4. Hinweise zum Versuch

Zu Aufgabe 1

Die Kapazität der Solarzelle C wird, wie in Abb. 5 dargestellt, mittels eines kapazitiven Spannungsteilers bestimmt.

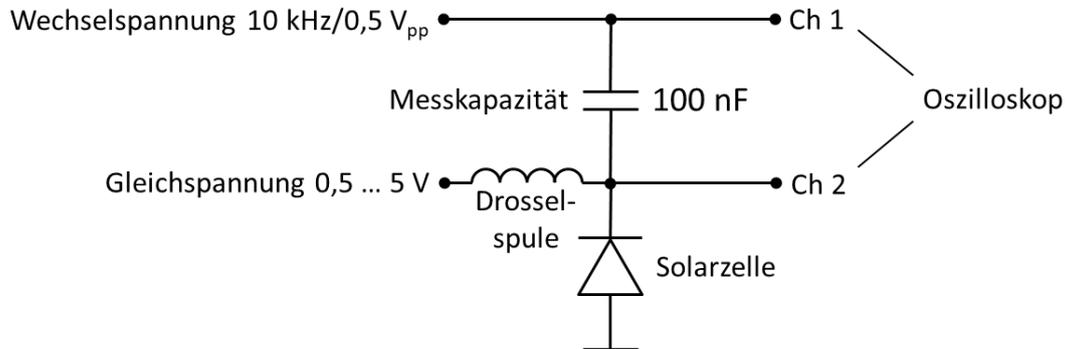


Abb. 5 Kapazitiver Spannungsteiler zur Messung der Kapazität der Solarzelle

An den beiden Kanälen eines Oszilloskops wird der Wechselspannungsabfall U_r über der Reihenschaltung der Solarzelle und einer Messkapazität C_m sowie der Wechselspannungsabfall U_s über der Solarzelle gemessen. Es gilt:

$$\frac{C}{C_m} = \frac{U_r}{U_s} - 1$$

Die Kapazität der Solarzelle wird von der nahezu isolierenden Raumladungszone dominiert. Daher kann ihre Breite w im Modell eines einfachen Plattenkondensators aus $C = S \epsilon/w$ bestimmt werden, wobei S die Fläche der Solarzelle ist. Die Dielektrizitätskonstante von CIGS beträgt $\epsilon = 13,6 \epsilon_0$.

Stellen Sie die Breite der Raumladungszone als Funktion der Sperrspannung in geeigneter Weise nach (1) dar und ermitteln Sie die Dotierungskonzentration und das innere Potential.

Zu Aufgabe 2

Für die Messung der Kennlinie wird die Solarzelle mit einer Halogenlampe beleuchtet. Überlegen Sie, wie sich die Beleuchtungsintensität am besten variieren lässt.

Vorsicht! Die Lampe wird im Betrieb sehr heiß.

Achtung! Der Lampenstrom soll 8 A nicht überschreiten.

Die Beleuchtungsintensität wird mithilfe der Referenzdiode eingestellt. Ihr Kurzschlussstrom beträgt 24,1 mA bei Beleuchtung mit 1 Sonne und wird, ebenso wie bei der Solarzelle, aus dem Spannungsabfall über einem kleinen Messwiderstand bestimmt. Begründen Sie, warum der Kurzschlussstrom nicht direkt mit einem Amperemeter gemessen werden kann, und berechnen Sie die Kurzschlussstromdichte. Die Fläche der CIGS-Solar-

zelle beträgt $(0,5 \pm 0,1 \text{ cm})^2$. Die Leerlaufspannung kann direkt mit einem Voltmeter gemessen werden, indem die Anschlusskabel der Solarzelle entsprechend umgesteckt werden.

Achtung! Der Solarzellenaufbau ist empfindlich. Die Solarzellen und die Anschlussdrahre dürfen nicht berührt werden; achten Sie auch auf herumhangende Kabel.

Um die verschiedenen Punkte der Kennlinie zu erreichen, wird die Solarzelle mittels einer Kaskade von Dekadenwiderstanden belastet. Strom und Spannung werden wie zuvor gemessen. Achten Sie darauf, dass die Stecker gut sitzen, damit die Kontaktwiderstände gering sind, sowie auf eine gleichmäßige Verteilung der Messpunkte über die Kennlinie. Tragen Sie die Stromdichte als Funktion der Spannung auf. Die Bestimmung von Wirkungsgrad und Füllfaktor erfolgt nach (5) und (6).

Zur Ermittlung von Parallel- und Serienwiderstand soll (7) in den folgenden beiden Grenzfällen betrachtet werden:

$U \rightarrow 0$: Vernachlässigen Sie den Diodenstrom, berücksichtigen Sie $R_s \ll R_p$ und leiten Sie dI/dU ab.

$U \rightarrow U_{oc}$: Vernachlässigen Sie den Strom durch den Parallelwiderstand, berücksichtigen Sie $q(U - IR_s) \gg AkT$ und leiten Sie dI/dU ab. Substituieren Sie den Diodenstrom nach der zuvor vereinfachten Version von (7) und setzen Sie den Leerlauffall ein.

Parallel- und Serienwiderstand können danach näherungsweise aus den Anstiegen der Kennlinie im Kurzschluss- bzw. Leerlauffall bestimmt werden.

Um die Sammlungseffizienz $\eta_s(U)$ zu ermitteln, wird eine zweite Kennlinie bei einer um ca. 10 % reduzierten Beleuchtungsintensität aufgenommen. Hierzu wird ein Graufilter in den Lichtweg eingesetzt (beachten Sie dabei den Warnhinweis zu Aufgabe 3). Zur Berechnung von $\eta_s(U)$ schreiben Sie (7) für zwei Beleuchtungsintensitäten auf, wobei Sie (8) einsetzen. Nehmen Sie an, dass der Diodenstrom und die Sammlungseffizienz in beiden Fällen gleich sind, ziehen Sie die Gleichungen voneinander ab und stellen Sie das Ergebnis entsprechend um.

Zu Aufgabe 3

Um die Beleuchtungsintensität zu variieren, ohne das Spektrum zu verändern, werden verschiedene Graufilter sowie Kombinationen davon verwendet.

Achtung! Die Graufilter sollen in möglichst großer Entfernung von der Lichtquelle und von Fokuspunkten in den Lichtweg platziert werden, da sie durch Erwärmung beschädigt werden können.

Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung werden wie zuvor gemessen. Der Diodenqualitätsfaktor ist aus einer geeigneten Auftragung nach (9) in den beiden Bereichen hoher bzw. niedriger Beleuchtungsintensität zu bestimmen. Zeigen Sie, dass die dafür notwendige Bedingung $qU_{oc} \gg AkT$ erfüllt ist. Ermitteln Sie außerdem den Sperrsättigungsstrom.

Zu Aufgabe 4

Die Temperatur der Solarzelle wird mithilfe eines Peltier-Elements und eines Temperatur-Controllers variiert. Die Messung von Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung

sollte jeweils nach einer Wartezeit von mindestens einer Minute, nachdem die Temperaturanzeige den Zielwert erreicht hat, erfolgen, damit auch die Solarzelle die entsprechende Temperatur angenommen hat.

Berechnen Sie jeweils den Sperrsättigungsstrom nach (9) und stellen Sie seine Temperaturabhängigkeit entsprechend (10) dar. Bestimmen Sie die Breite der Bandlücke aus der Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung nach (11) und (12). Stellen Sie auch die Temperaturabhängigkeit des Kurzschlussstroms dar.

Zu Aufgabe 5

Verwenden Sie die ermittelten Solarzellenparameter, um die Strom-Spannung-Kennlinie in folgenden Varianten zu berechnen:

1. Modell der idealen Solarzelle nach (3)
2. Modell der realen Solarzelle nach (7) und (8) unter Vernachlässigung der internen Widerstände
3. Modell der realen Solarzelle nach (7) und (8) unter Vernachlässigung der Spannungsabhängigkeit der externen Sammlungseffizienz
4. Modell der realen Solarzelle nach (7) und (8) unter Berücksichtigung der internen Widerstände und der externen Sammlungseffizienz

Da es sich bei (7) um eine implizite Gleichung handelt, muss sie - außer im Fall 2 - iterativ (manuell oder mithilfe eines Computerprogramms) gelöst werden. Stellen Sie die berechneten Kennlinien gemeinsam mit der gemessenen dar und diskutieren Sie die Abweichungen.