

## 1 Vorbereitung







Folgende Kenntnisse werden am Versuchstag vorausgesetzt:

### 1.1 Fragen zu den theoretischen Grundlagen:

- ? Wie unterscheiden sich Metalle, Isolatoren und Halbleiter?
- ? Was versteht man bei Halbleitern unter Elektronen, Löchern und Dotierung?
- ? Wie ist eine Halbleiterdiode aufgebaut, wie lautet die Diodengleichung und wie sieht ihre I-U-Kennlinie aus?
- ? Was versteht man unter dem innerem photoelektrischen Effekt und unter dem photovoltaischen Effekt?
- ? Wie sieht eine I-U-Kennlinie einer Solarzelle aus und wie bestimmt man daraus die wichtigsten Zellparameter Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung, Maximum Power Point, Füllfaktor, Wirkungsgrad, Parallelwiderstand und Serienwiderstand?

Es steht ein MATLAB-Skript zur Verfügung für den Vergleich experimenteller Ergebnisse mit numerischen Simulationen der Strom-Spannungs-Kennlinien (I-U-Kennlinie) von Solarzellen auf Basis verschiedener Halbleiter.

#### LITERATUR

-  A. Goetzberger, B. Voß, J. Knobloch: Sonnenenergie: Photovoltaik, B.G. Teubner, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1. Kapitel 5 Physik der Solarzelle, Kapitel 6 Solarzellen hoher Wirkungsgrade.
-  M. Kaltschmitt, W. Streicher, A. Wiese: Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte Springer-Verlag Berlin 2006, ISBN-10 3-540-28204-1 Kapitel 5.1 Physikalische Grundlagen, Kapitel 5.2.1 Photovoltaikzelle und -modul.
-  B. Diekmann, K. Heinloth: Energie, B.G. Teubner, Stuttgart 1997, ISBN 3-519-13067-2, Kapitel 5.4 Nutzung über den photoelektrischen Effekt.
-  T. Bürke, R. Wengenmayr: Erneuerbare Energie, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008, ISBN 978-3-527-40727-9, Photovoltaik: Solarzellen - Ein Überblick S.32-38.
-  P. Singh, N.M. Ravindra: Short Circuit Densities, Reverse Saturation Current Densities, Band gap Energies and Temperature coefficients, Sol. Energ. Mat. Sol. Cells **100** (2012) 36-45, doi: 10.1016/j.solmat.2012.02.019.
-  T.W. Murphy: Maximum spectral luminous efficacy of white light, J. Appl. Phys. **111** (2012) 104909, doi: 10.1063/1.4721897.

## 2 Motivation und Grundlagen

### 2.1 Einleitung

Eine Solarzelle wandelt Sonnenenergie in einen elektrischen Strom um. Absorbierte Photonen generieren im Halbleitermaterial aufgrund des inneren photoelektrischen Effekts bewegliche Elektronen-Loch-Paare. Diese werden aufgrund des photovoltaischen Effekts am p-n-Übergang in der Zelle getrennt und bilden einen Photostrom. Der photovoltaische Effekt erzeugt eine elektrische Spannung zwischen den Kontaktbereichen, die von außen an der Zelle abgegriffen werden kann. Wird ein Verbraucher an die Solarzelle angeschlossen, fließt zwischen den Kontakten in Folge der Spannung ein elektrischer Strom. Der Wirkungsgrad der Solarzellen konnte im Lauf der letzten 60 Jahre von 4% auf mittlerweile 44,7% unter Laborbedingungen gesteigert werden.

In diesem Versuch werden der Wirkungsgrad und weitere Zellparameter einer einkristallinen Si-Solarzelle gemessen. Weiterhin werden die Ursachen für optische und insbesondere elektrische Verluste erläutert und untersucht. Hierzu werden Strom-Spannungs-Kennlinien (I-U-Kennlinien) aufgenommen, die für jede Solarzelle einen charakteristischen Verlauf aufweisen. Die Zellparameter der Solarzelle werden aus den Kennlinien extrahiert. Sie hängen in komplexer Weise von der Materialwahl, dem Zelldesign, dem Fertigungsprozess und den Messbedingungen wie der Temperatur und der Beleuchtungsstärke ab. Anhand dieser leicht zugänglichen Zellparameter ist es möglich, die Leistungsfähigkeit von Solarzellen und insbesondere den Einfluss der elektrischen Verluste zu vergleichen und zu optimieren.

### 2.2 Halbleiterphysik

#### 2.2.1 Der p-n-Übergang einer Diode

Viele Solarzellentypen werden aus dem Halbleitermaterial Silizium gefertigt. Eine kristalline Silizium-Solarzelle besteht aus einer p-dotierten Si-Schicht (Basis), die mit einer n-dotierten Si-Schicht (Emitter) in Kontakt steht. Im Kontaktbereich zwischen den beiden Schichten entsteht ein p-n-Übergang, welcher die Physik der Solarzelle maßgeblich bestimmt. Aufgrund der Konzentrationsgefälle der Ladungsträger im Kontaktbereich diffundieren Löcher aus dem p- in das n-Gebiet und umgekehrt Elektronen aus dem n- in das p-Gebiet. Im p-Gebiet bleiben negativ ionisierte Akzeptoren und im n-Gebiet positiv ionisierte Donatoren als feste Raumladungen zurück (Abb. SZ.1b). Die Raumladungen mit unterschiedlicher Polarität auf beiden Seiten der Grenzfläche führen zu einem elektrischen Feld, das einen Feldstrom in umgekehrter Richtung zum Diffusionsstrom erzeugt und diesen schließlich kompensiert.

#### 2.2.2 Innerer Photoelektrischer Effekt

Im beleuchteten Fall werden Photonen mit einer Energie größer oder gleich der Bandlücke ( $E_g = 0.1 \dots 3\text{eV}$ ,  $E_g = 1,12\text{eV}$  für Si bei 300 K) des verwendeten Halbleitermaterials von der Solarzelle absorbiert. Ein absorbiertes Photon führt dazu, dass ein gebundenes Elektron aus einem besetzten Niveau im Valenzband in ein unbesetztes Niveau im Leitungsband des

Halbleiters übergeht (Abb. SZ.1a). Zusammen mit dem resultierenden positiv geladenem Loch im Valenzband bildet es ein bewegliches Elektron-Loch-Paar.

### 2.2.3 Photovoltaischer Effekt

Wird ein Photon in der Raumladungszone der Solarzelle absorbiert, trennt das dort bestehende elektrische Feld unmittelbar das Elektron-Loch-Paar. Das Elektron geht in Richtung n-Gebiet, das Loch geht in Richtung p-Gebiet. Wird das Elektron-Loch-Paar außerhalb der Raumladungszone erzeugt, so kann es aufgrund thermischer Bewegung in die Raumladungszone diffundieren. Die jeweiligen Minoritätsladungsträger, Elektronen im p-Gebiet und Löcher im n-Gebiet, werden dann vom elektrischen Feld der Raumladungszone erfasst und auf die gegenüberliegende Seite beschleunigt. Zusammen mit den Ladungsträgern, welche im Kontaktbereich entstehen, bilden sie den Photostrom  $I_{ph}$ . Elektronen werden vom p- in das n-Gebiet und Löcher vom n- in das p-Gebiet transportiert. Die p-Seite lädt sich positiv und die n-Seite negativ auf, die Spannungsdifferenz kann als Leerlaufspannung abgegriffen werden. Dieser Vorgang der lichtinduzierten Ladungsträgertrennung am p-n Übergang der Diode nennt man p-n-Photoeffekt oder auch photovoltaischer Effekt und ist in Abbildung SZ.1b veranschaulichend dargestellt.

## 2.3 Optische und elektrische Verluste

Optische Verluste reduzieren den Ausgangsstrom und entstehen wie folgt:

- Eine ebene Si-Oberfläche reflektiert je nach Wellenlänge 35 – 50% des einfallenden Lichts. Eine dünne Antireflexschicht aus  $\text{SiO}_2$  und eine texturierte Oberfläche (Abb. SZ.2a) reduzieren diese Verluste.
- Die Gitterstruktur des Front-Kontaktes, bestehend aus den Fingern und dem Sammelbus (Abb. SZ.2a,b), schattet je nach Ausführung 3 – 5% des einfallenden Lichts ab.
- Die Absorption des Si - indirekter Halbleiter - ist im langwelligen Bereich des Sonnenlichts, d.h. in der Nähe der Bandkante, recht gering. Dieses Licht wird im rückseitigen Kontakt ohne photovoltaische Wirkung absorbiert. Eine spiegelnder Rückseitenkontakt aus Al reduziert Durchstrahlungsverluste (Abb. SZ.2a,b).

Die elektrischen Verluste sind halbleiterphysikalischer und halbleitertechnologischer Natur. Sie reduzieren den Ausgangsstrom und vor allem die abgreifbare Spannung. **Die Minimierung der elektrischen Verluste ist Schwerpunkt der Arbeiten zur Erzielung hocheffizienter Solarzellen.** Zu den elektrischen Verlusten zählen:

- Die strahlende Rekombination, der inverse innere Photoeffekt, ist für indirekte Halbleiter wie Si unbedeutend.
- Für Dotierungen  $< 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  führt die Störstellenrekombination an Fremdstoffen und Kristallbaufehlern maßgeblich zur Abnahme der Ladungsträger im Volumen, im Bereich des p-n Übergangs und an der Oberfläche der Halbleitermaterialien. Fremdstoffe erzeugen tiefliegende Störniveaus im verbotenen Band der Halbleiter, die als Fallen (Trap) für Ladungsträger wirken. Die Störstellendichte ist an der Oberfläche des Halbleitermaterials besonders hoch und kann durch eine dünne  $\text{SiO}_2$ -Passivierungsschicht (Abb. SZ.2a)

gemindert werden. Rekombinationsverluste an der rückseitigen Grenzfläche zwischen p-leitender Basis zu Metallkontakt werden durch eine zusätzliche hochdotierte  $p^+$  Zone an dieser Grenzfläche reduziert. Diesen  $p^+p$ -Übergang (high-low-junction) nennt man Back-Surface-Field (BSF). Das BSF wirkt ebenfalls wie ein Spiegel auf die Ladungsträger (Abb. SZ.2a).

- Für Dotierungen  $> 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ist die Auger-Rekombination dominant. Die erzeugten Ladungsträger geben ihre Energie an ein zweites Elektron im Leitungs- oder Valenzband ab, das seine überschüssige Energie durch Stöße mit dem Kristallgitter verliert.
- Ohmsche Verluste entstehen durch Kriechströme (Leckströme) entlang den Kanten der Solarzelle und aufgrund Punktdefekten im p-n Übergang. Diese Verluste werden durch einen Parallelwiderstand  $R_p$  im Ersatzschaltbild einer Solarzelle berücksichtigt.
- Ohmsche Verluste entstehen weiterhin innerhalb der Halbleitermaterialien (Basis  $R_{base}$  und Emitter  $R_{emitter}$ ), innerhalb der metallischen Kontakte (Finger  $R_{finger}$ , Sammelbus  $R_{busbar}$ , Rückkontakt  $R_{back}$ ) und aufgrund von Kontaktwiderständen an Metall-Halbleiter-Grenzflächen ( $R_{contact}$ ). Diese Verluste summieren sich und werden durch einen Serienwiderstand  $R_s$  im Ersatzschaltbild einer Solarzelle berücksichtigt. Die Einzelbeiträge zum Serienwiderstand sind in Abbildung. SZ.2b veranschaulicht.

## 2.4 Das Ein-Diodenmodell

Im folgenden wird die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle hergeleitet, die wie im Experiment als Solarbatterie betrieben wird.

Die einzelnen Beiträge zum Ausgangsstrom  $I$  können anhand des Ersatzschaltbildes (Abb. SZ.3a) einer realen Solarzelle zugeordnet werden. Die Solarzelle lässt sich als Parallelschaltung einer Stromquelle, einer in Durchlassrichtung gepolten Diode, und eines Parallelwiderstandes  $R_p$  verstehen. Die eingezeichnete Stromquelle liefert den konstanten Photostrom  $I_{ph}$ . Der Photostrom  $I_{ph}$  wird um den Diodenstrom  $I_d$  und Leckstrom  $I_p$  durch den Parallelwiderstand  $R_p$  verringert. Der Serienwiderstand  $R_s$  schließlich reduziert den Ausgangsstrom und die abgreifbare Spannung.

Eine unbeleuchtete Solarzelle verhält sich aufgrund des p-n-Übergangs wie eine Diode. Für eine ideale Diode ist die I-U-Kennlinie durch die Diodengleichung bestimmt

$$I_d(U_D) = I_0 \left[ \exp\left(\frac{e U_D}{n k_B T}\right) - 1 \right] \quad (\text{SZ.1})$$

wobei  $I_d$  den Dunkelstrom,  $I_0$  den Sättigungsstrom und  $U_D$  den Spannungsabfall über der Diode darstellen. Die weiteren Größen sind die Elementarladung  $e$ , die Boltzmann-Konstante  $k_B$ , der Diodenfaktor  $n \approx 1$  und die Zelltemperatur  $T$ .

Der Sättigungsstrom  $I_0$  berechnet sich aus den Diffusionskoeffizienten und Diffusionslängen für die Elektronen und Löcher, den Donatoren- und Aktivatorenkonzentrationen und der intrinsischen Ladungsträgerdichte und zeigt letztlich eine Temperaturabhängigkeit

$$I_0(T) \propto T^s \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (\text{SZ.2})$$

wobei  $E_g$  die Bandlückenenergie und  $s$  ein materialabhängiger Exponent ( $s = 0$  für Si, Ge, GaAs;  $s = 3$  für CdS, CdTe, InP) darstellen.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie einer idealen Solarzelle ergibt sich aus der Differenz von Dunkelstrom  $I_d$  und Photostrom  $I_{ph}$  zu

$$I_D(U_D) = I_{ph} - I_d(U_D) \quad (\text{SZ.3})$$

$$I_D(U_D) = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e U_D}{n k_B T}\right) - 1 \right] \quad (\text{SZ.4})$$

Photo- und Dunkelstrom fließen in entgegengesetzter Richtung, wobei der Dunkelstrom vom p- in das n-Gebiet wie bei einer in Durchlassrichtung gepolten Diode fließt (Abb. SZ.1b).

Bei einer realen Solarzelle sind noch der Parallelwiderstand  $R_p$  und der Serienwiderstand  $R_s$  zu berücksichtigen. Wegen  $R_p = U_D / I_p$  und  $R_s = (U_D - U) / I$  lässt sich die Gleichung SZ.4 erweitern zu

$$I(U_D) = I_{ph} - I_d(U_D) - I_p(U_D) \quad (\text{SZ.5})$$

$$I(U) = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(U + I R_s)}{n k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{U + I R_s}{R_p} \quad (\text{SZ.6})$$

mit dem Ausgangsstrom  $I$  und der Ausgangsspannung  $U$ , welche an den Kontakten der Solarzelle abgegriffen werden kann.

## 2.5 Bestimmung der Solarzellenparameter aus den I-U-Kennlinien

Aus den Strom-Spannungs-Kennlinien (Abb. SZ.4) lassen sich verschiedene Zellparameter extrahieren. Im folgenden werden Näherungsausdrücke für diese Parameter angegeben, für die Herleitung sei auf die Literatur verwiesen.

### 2.5.1 Kurzschlussstrom

Bei einem Kurzschluss ( $U = 0 \text{ V}$ ) zwischen den Solarzellenkontakten fließt der Kurzschlussstrom  $I_{sc}$ :

$$I_{sc} \approx I_{ph} \left( 1 + \frac{R_s}{R_p} \right) \quad (\text{SZ.7})$$

### 2.5.2 Leerlaufspannung

Wird kein Verbraucher an die Solarzelle angeschlossen ( $I = 0 \text{ A}$ ), so kann die Leerlaufspannung  $V_{oc}$  abgegriffen werden:

$$V_{oc} \approx \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) \quad (\text{SZ.8})$$

### 2.5.3 Maximum Power Point

Der Maximum Power Point (MPP) bezeichnet den Punkt  $(U_m, I_m)$  einer I-U-Kennlinie, an dem die nutzbare Ausgangsleistung  $P_{out} = U \cdot I$  einer Solarzelle maximal wird:

$$P_{MPP} = U_m I_m = P_{out,max} \quad (SZ.9)$$

### 2.5.4 Füllfaktor

Der Füllfaktor  $FF$  ergibt sich anschaulich aus der I-U-Kennlinie aus dem Verhältnis der größtmöglichen Rechtecksfläche  $I_m \cdot V_m$ , die man unter der I-U-Kennlinie einzeichnen kann, zur einrahmenden Rechtecksfläche  $I_{sc} \cdot V_{oc}$ , die durch den Kurzschlussstrom und der Leerlaufspannung vorgegeben sind:

$$FF = \frac{U_m I_m}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{MPP}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (SZ.10)$$

### 2.5.5 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist gegeben durch die maximale Nutzleistung  $P_{MPP}$  im Verhältnis zur eingestrahnten Leistung  $P_{in}$ :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{in}} = \frac{P_{MPP}}{A E_e} \quad (SZ.11)$$

wobei  $A$  die beleuchtete Fläche und  $E_e$  die Bestrahlungsstärke sind.

### 2.5.6 Parallelwiderstand

Die Steigung im Punkt  $(U = 0 \text{ V}, I = I_{sc})$  entspricht näherungsweise dem Parallelwiderstand  $R_p$ :

$$R_p \approx \left[ - \left( \frac{\partial I}{\partial U} \right)_{I_{sc}} \right]^{-1} \quad (SZ.12)$$

### 2.5.7 Serienwiderstand

Die Steigung im Punkt  $(U = V_{oc}, I = 0 \text{ A})$  entspricht näherungsweise dem Serienwiderstand  $R_s$ :

$$R_s \approx \left[ - \left( \frac{\partial I}{\partial U} \right)_{V_{oc}} \right]^{-1} \quad (SZ.13)$$

### 3 Versuchsdurchführung

#### 3.1 Messprinzip

Es sind Strom-Spannungs-Kennlinien für verschiedene Beleuchtungsstärken, Parallel- und Serienwiderstände zu messen und die Zellparameter zu extrahieren. Nach dem Aufbau des Schaltkreises entsprechend dem Plan in Abbildung [SZ.3b](#) kann zuerst die Beleuchtungsstärke über die Entfernung der Lampe zur Solarzelle eingestellt werden. Mit Hilfe eines Potentiometers wird der Lastwiderstand und somit die abgegriffene Spannung geregelt. So kann die gesamte Kennlinie der Solarzelle aufgenommen werden.

#### 3.2 Probe, Messhalter und Messung

Die zu untersuchenden  $15\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  großen Probenstücke entstammen einer  $156\text{ mm} \times 156\text{ mm}$  großen Solarzelle basierend auf einem einkristallinen p-Typ Czochralski-Si Al-BSF Wafer. Die Oberflächentexturierung erfolgte in alkaliner KOH-Lösung. Die Emitterstruktur wurde durch Eindiffusion von  $\text{POCl}_3$  in einem Rohofen erzeugt. Die Passivierungs- und Antireflectionsschichten wurden mittels PECVD-Verfahren aufgetragen. Die Metallisierung von Front- und Rückseite der Solarzellen wurde unter Verwendung von Siebdrucktechniken realisiert. Die Finger und der Sammelbus auf der Vorderseite bestehen aus einer Silberpaste, die in einem Banddurchlaufofen geformt wurden.

Die Solarzelle ist bereits in einen Messhalter eingebaut, wobei mittels einer Federvorrichtung die Zelle zwischen zwei Cu-Kontaktblechen eingespannt ist (Abb. [SZ.3b](#)). Der Solarzellenmesshalter und die Lichtquelle werden auf einer optischen Bank montiert. Der Solarzellenmesshalter sollte dabei auf einem Verschiebereiter befestigt werden, so dass die Zelle vertikal zur optischen Bank bewegt und dadurch zentral in den Strahl gestellt werden kann.

Es steht eine Gehäusebox zur Verfügung mit Buchsen zum Anschluss der Solarzelle sowie für ein Spannungs- und ein Strommessgerät (Abb. [SZ.3b](#)). Das Strommessgerät wird in Serie mit einem 10-Gang-Potentiometer angeschlossen, das in der Box integriert ist. Das Potentiometer hat einen Maximalwiderstand von  $500\ \Omega$ , so dass eine Umdrehung einer Widerstandsänderung von  $50\ \Omega$  und ein Skalenteil  $1\ \Omega$  entsprechen.

Es steht noch eine weitere Gehäusebox mit zwei Widerständen zur Verfügung, die zur Messung der I-U-Kennlinien bei Anschluss eines zusätzlichen Parallel- oder Serienwiderstandes an die Solarzelle benutzt werden.

Zur Strom- und Spannungsmessung stehen ein analoges und ein digitales Multimeter zur Verfügung. Das analoge Messgerät soll wegen seines kleineren Innenwiderstandes zur Strommessung verwendet werden ( $0,6\ \Omega$  beim analogen Multimeter für den Messbereich bis  $100\text{ mA}$ ,  $2,7\ \Omega$  beim digitalen Multimeter für den Messbereich bis  $200\text{ mA}$ ). Die gemessenen Ströme werden bis zu  $100\text{ mA}$  erreichen, die Spannungen weniger als  $1\text{ V}$ . Stellen Sie die Messbereiche vor Beginn der Messung ein. Das digitale Multimeter kann auch mit einem Temperatursensor ausgestattet werden um die Temperatur an der Solarzelle zu messen.

Zur Bestrahlung der Solarzelle sind zwei Halogenlampen und eine LED-Lampe mit unterschiedlichen Lichtstärken verfügbar, die auf den Lampenhalter gesteckt werden können. Dieser wird ebenfalls mit einem Reiter auf der optischen Bank montiert. Alle drei Lampen sind auf einen 12 V-Betrieb ausgelegt und werden mit einem separaten Netzgerät betrieben. Das Netzgerät BT-305 der Firma BASETech wird als Konstantspannungsquelle betrieben, wozu erst mit dem Drehgeber 'Voltage Coarse' die Spannung auf 12 V voreingestellt wird. Nun wird der Strom mit dem Drehgeber 'Current' auf Maximum geregelt. Mit 'Output' wird die Eingabe bestätigt und die Spannung auf die Lampe gegeben. Das Netzteil betreibt die Lampe dann mit der zulässigen Maximalleistung.

### 3.3 Aufgaben

1. Folgende Demoversuche werden mit einer Halogenlampe (12 V, 35 W, Strahlungswinkel  $10^\circ$ , Farbtemperatur 3000 K, maximale Lichtstärke 11 000 Cd) durchgeführt und sollen Ihnen einen Eindruck davon vermitteln, wie sich verschiedene Einstellungen der Messapparatur auf die Messung auswirken. Notieren Sie ihre qualitativen Beobachtungen.
  - Stellen Sie den Kurzschlussstrom über die Entfernung zur Lampe auf etwa 60 mA ein. Dazu muss das 10-Gang-Potentiometer auf  $0\ \Omega$  eingestellt sein.
  - Verändern Sie die Position der Solarzelle und den Einstrahlwinkel der Lampe, so dass die Solarzelle voll und direkt ausgeleuchtet wird und Sie maximalen Kurzschlussstrom erhalten.
  - Untersuchen Sie, wie sich eine Halbierung der Beleuchtungsstärke auf den Kurzschlussstrom auswirkt. Die Beleuchtungsstärke wird durch den Lampenstrom reguliert. Messen Sie die Beleuchtungsstärke mit einem Luxmeter.
  - Untersuchen Sie, wie sich eine Verdopplung der Entfernung der Lampe zur Solarzelle auf die Beleuchtungsstärke ( $=\text{Lichtstärke} \times \text{Raumwinkel} \times \text{Abstand}^{-2}$ ) und damit den Kurzschlussstrom auswirkt. Ein Maßband steht zur Verfügung. Messen Sie die Beleuchtungsstärke mit einem Luxmeter.
  - Vertauschen Sie Strom- und Spannungsmessgerät, um den Einfluss des Innenwiderstandes auf die Messung des Kurzschlussstroms herauszufinden.
2. Folgende Versuche dienen der Messwertaufnahme der I-U-Kennlinien
  - Messen Sie die beleuchtete Fläche  $A$  der Solarzelle mit dem Messschieber.
  - Stellen Sie den Kurzschlussstrom über die Entfernung zur Lampe auf 60 mA ein. Der Kurzschlussstrom verringert sich mit der Zeit, bis die Lampe nach etwa 30 min ihr Temperaturgleichgewicht erreicht hat. Warten Sie das Gleichgewicht ab und regeln Sie den Kurzschlussstrom über die Entfernung nach. Messen Sie zur Abschätzung des Wirkungsgrad die Beleuchtungsstärke  $E_v$  mit dem Luxmeter.
  - Nehmen Sie die Kennlinie #1 der Solarzelle für einen Kurzschlussstrom von etwa 60 mA auf. Die Kennlinie wird über das 10-Gang-Potentiometer abgefahren. Erhöhen Sie den Lastwiderstand dazu von  $0\ \Omega$  bis  $30\ \Omega$  in  $1\ \Omega$ -Schritten, von  $30\ \Omega$  bis  $60\ \Omega$  in  $5\ \Omega$ -Schritten und von  $60\ \Omega$  bis  $120\ \Omega$  in  $10\ \Omega$ -Schritten.



- Jetzt wird ein Parallelwiderstand von  $15\ \Omega$  parallel zur Solarzelle geschaltet. Nehmen Sie die Kennlinie #2 der Solarzelle auf.
- Jetzt wird ein Serienwiderstand von  $5,1\ \Omega$  in Reihe mit der Solarzelle geschaltet. Nehmen Sie die Kennlinie #3 auf.
- Entfernen Sie den Serienwiderstand wieder und halbieren Sie den Kurzschlussstrom auf  $30\ \text{mA}$  durch Verringerung des Lampenstroms. Warten Sie das thermische Gleichgewicht der Lampe ab und nehmen Sie die Kennlinie #4 auf. Messen Sie zur Abschätzung des Wirkungsgrad auch hier die Beleuchtungsstärke  $E_v$ .

### 3. Simulation einer Temperaturserie

- Ein MATLAB-Skript berechnet I-U-Kennlinien für verschiedene Halbleitermaterialien und stellt sie grafisch dar. Untersuchen Sie für Si-Solarzellen die Auswirkungen der Temperatur auf die Zellparameter bei Temperaturen von  $-15\ ^\circ\text{C}$ ,  $25\ ^\circ\text{C}$  und  $40\ ^\circ\text{C}$ . Erzeugen sie die entsprechenden Kennlinien #5, #6, und #7 und speichern Sie die Screenshots der GUIs als Grafikdateien und die I-U-Kurven als Excel-Dateien ab. Führen Sie die Simulation zuerst für eine Temperatur von  $25\ ^\circ\text{C}$  und einen Kurzschlussstrom von  $60\ \text{mA}$  durch. Ändern sie danach nur die Temperaturen, alle anderen Eingabeparameter bleiben unverändert.

## 3.4 Auswertung der I-U-Kennlinien und Fragen

1. Wie ändert sich der Kurzschlussstrom wenn man a) die Beleuchtungsstärke halbiert und b) den Abstand zwischen Lampe und Solarzelle verdoppelt?
2. Tragen Sie für alle vier experimentelle Messreihen die Stromstärke  $I$  über der Spannung  $U$  in einem gemeinsamen Plot auf.
3. Tragen Sie für alle vier experimentelle Messreihen die Leistung  $P = U \cdot I$  über der Spannung  $U$  in einem gemeinsamen Plot auf.
4. Bestimmen Sie für alle vier experimentelle Messreihen den Kurzschlussstrom  $I_{sc}$ , die Leerlaufspannung  $V_{oc}$ , die maximale Leistung  $P_{MPP}$ , den Füllfaktor  $FF$  und den Wirkungsgrad  $\eta$ . Bestimmen Sie zusätzlich den Parallelwiderstand  $R_p$  aus der Steigung im Intervall ( $U = 0 - 0,2 V_{oc}$ ). Bestimmen Sie den Serienwiderstand  $R_s$  im Intervall ( $I = 0 - 0,2 I_{sc}$ ).

Üblicherweise wird zur Ermittlung des Wirkungsgrades einer Solarzelle eine Lichtquelle mit Strahlungsbedingungen nach 'Standard AM1,5 global' benutzt. Diese liegen vor, wenn die Sonne unter einem Winkel von  $41,8^\circ$  über dem Horizont steht und die Zelle sowohl direkter als auch diffuser Strahlung mit Bestrahlungsstärke der Solar konstante  $E_{\text{Sonne}} = 1367\ \text{W m}^{-2}$  ausgesetzt ist. Hier benötigen wir für die Berechnung des Wirkungsgrades nach Gleichung **SZ.11** neben der beleuchteten Fläche  $A$  noch und die tatsächliche Bestrahlungsstärke  $E_e$  (in  $\text{W/m}^2$ ). Diese berechnet sich nach der mit dem Luxmeter gemessenen Beleuchtungsstärke  $E_v$  (in Lux bzw. Lumen pro Quadratmeter,  $1\ \text{lx} = 1\ \text{lm/m}^2$ ) unter Verwendung des photometrischen Strahlungsäquivalents  $K = E_v / E_e$ . Nehmen Sie für das Licht die hier verwendeten Halogenlampe  $K \cong 300\ \text{lm/W}$  an.

Wie wirkt sich eine Veränderung der Beleuchtungsstärke, des Parallelwiderstandes und des Serienwiderstandes auf die oben genannten Größen aus? Tragen Sie hierfür die Zellparameter in einer Tabelle folgender Art ein:

Nr.	Messung	$E_e$ / $\text{W m}^{-2}$	$I_{sc}$ /mA	$V_{oc}$ /V	$P_{MPP}$ /mW	FF /%	$\eta$ /%	$R_p$ / $\Omega$	$R_s$ / $\Omega$
#1	$I_{sc} = 60 \text{ mA}$								
#2	$I_{sc} = 60 \text{ mA}, R_p = 15 \Omega$								
#3	$I_{sc} = 60 \text{ mA}, R_s = 5,1 \Omega$								
#4	$I_{sc} = 30 \text{ mA}$								

5. Tragen Sie für alle drei Simulationen die Stromstärke  $I$  über der Spannung  $U$  in einem gemeinsamen Plot auf.

Das MATLAB-Skript berechnet die Zellparameter aus der I-U-Kennlinie. Wie wirkt sich die Temperatur auf die Zellparameter aus? Notieren Sie sich hierfür die Zellparameter aus den Screenshots der GUIs und tragen Sie diese in einer Tabelle folgender Art ein:

Nr.	Temperatur	$I_{sc}$ /mA	$V_{oc}$ /V	$P_{MPP}$ /mW	FF	$\eta$
#5	$-15^\circ\text{C} = 258 \text{ K}$	60				
#6	$25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$					
#7	$40^\circ\text{C} = 313 \text{ K}$					

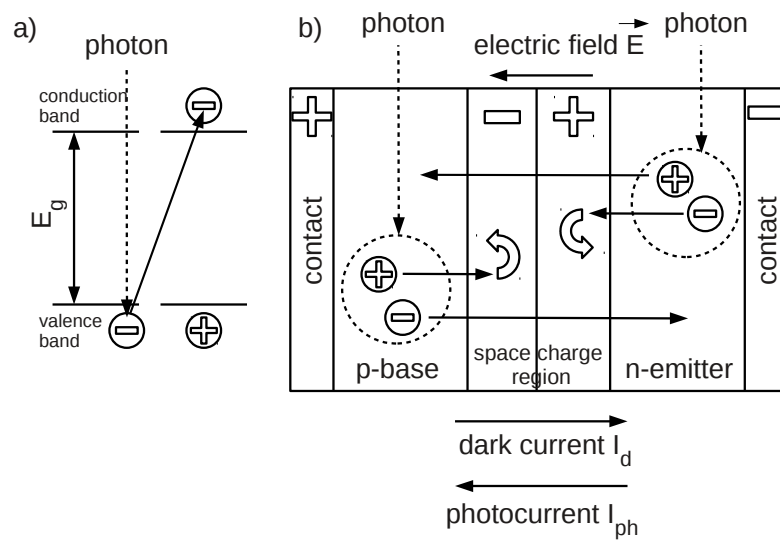
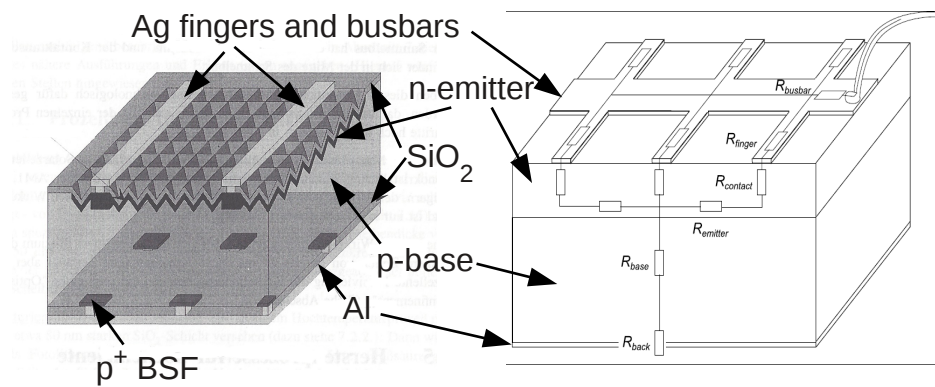
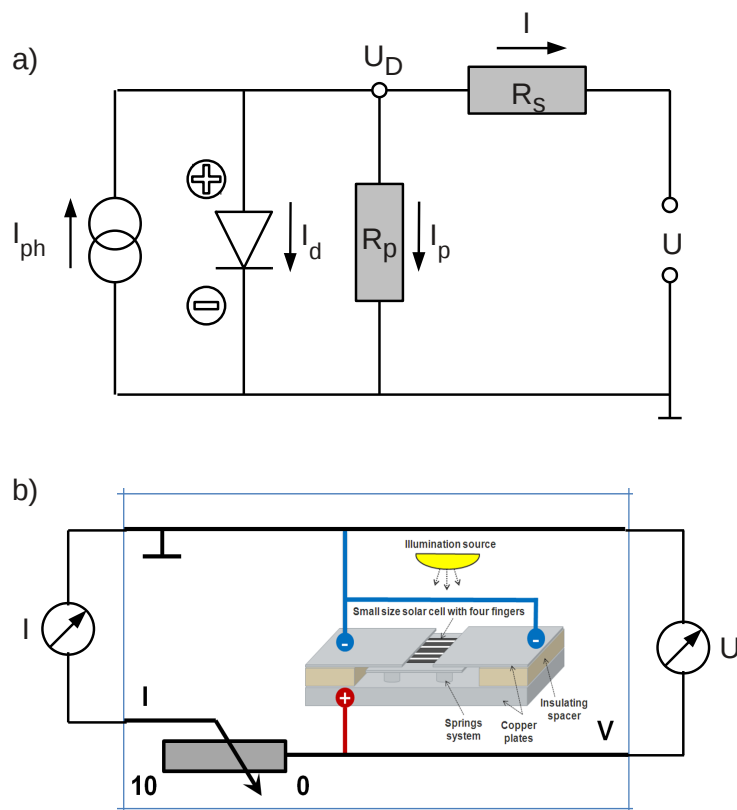


Abbildung SZ.1: a) Schema innerer photoelektrischer Effekt. b) Schema photovoltaischer Effekt.



**Abbildung SZ.2:** a) Schema zum Aufbau einer kristallinen Si-Solarzelle. b) Schema zur Zusammensetzung des Serienwiderstandes in einer Solarzelle.



**Abbildung SZ.3:** a) Ersatzschaltplan einer Solarzelle nach dem Ein-Diodenmodell. b) Schaltplan für den Versuch.

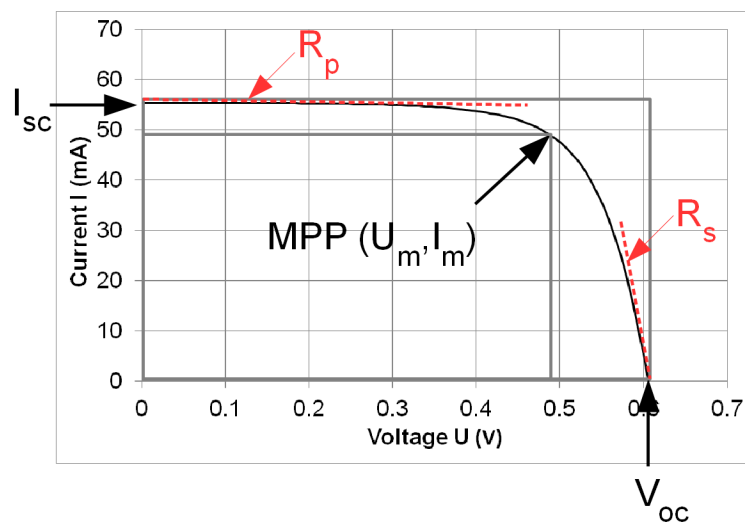


Abbildung SZ.4: a) Bestimmung der Zellparameter aus der I-U-Kennlinie.