

Die Effizienz der Umwandlung von Strahlungsenergie einfallenden Sonnenlichts unmittelbar in elektrische Energie durch eine Solarzelle soll untersucht werden. Dazu sind die Strom-Spannungs-Kennlinie und die Leistungskennlinie einer Solarzelle bei verschiedenen Lichtintensitäten zu bestimmen. Die Temperaturabhängigkeit der Kenngrößen Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom sind zu untersuchen.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Physikalische Grundlagen zur Solarzelle als Halbleiterbauteil

Reines Silizium wird durch gezielte „Verunreinigung“ (*Dotierung*) mit 3- oder 5-wertigen Fremdatomen zu einem p - oder n - leitenden Halbleiter. Bringt man einen p - und einen n - leitenden Kristall zusammen, so entsteht eine Übergangszone (pn -Übergang **Bild 1**), deren elektrische Eigenschaften das Verhalten einer Solarzelle bestimmen.

Im Gleichgewicht (*ohne äußere Spannung*) liegt die Fermienergie E_F überall auf gleicher Höhe. Wegen des Konzentrationsunterschiedes von Elektronen und Löchern im p - und n -Gebiet diffundieren Elektronen in das p -Gebiet und Löcher in das n -Gebiet. Die ortsfesten Fremdatome erzeugen ein Raumladungsgebiet; Diffusionsstrom und Feldstrom kompensieren sich im Gleichgewicht.

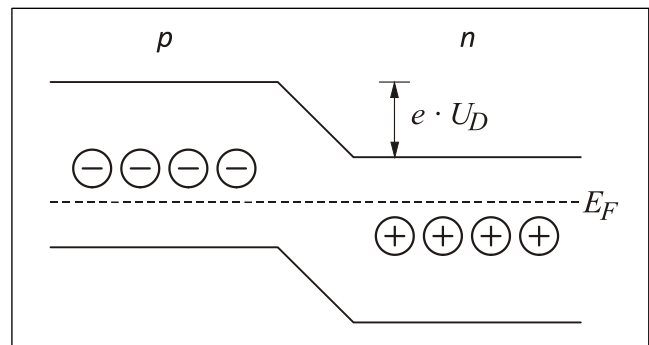


Bild 1: pn -Übergang im Bändermodell

Die Diffusionsspannung U_D im pn -Übergang ist von der Größe der Dotierung abhängig, sie entspricht der ursprünglichen Differenz der Fermienergien von p - und n - Gebiet.

Valenz- und Leitungsband haben in Silizium bei Raumtemperatur einen Bandabstand von $\Delta E = 1,1 \text{ eV}$. Die Diffusionsspannung beträgt üblicherweise $U_D = (0,5 \dots 0,7) \text{ V}$.

Fällt Licht auf den pn -Übergang, so erzeugen die Photonen Elektronen-Loch-Paare, die durch die Raumladung getrennt werden. Die Elektronen werden in das n -Gebiet und die Löcher in das p -Gebiet gezogen.

Die Absorption der Lichtquanten erfolgt nicht nur im pn -Übergang, sondern auch in der darüberliegenden dünnen p -Schicht. Die erzeugten Elektronen sind dort Minoritätsträger; ihre Konzentration wird durch Rekombination merklich erniedrigt und damit der Wirkungsgrad herabgesetzt. Die p -Schicht muss daher so dünn sein, dass die Diffusionslänge L_E der Elektronen ausreicht, in die n -Schicht zu gelangen ($L_E \gg d_p$ mit $d_p = \text{Dicke der } p\text{-Schicht}$).

Ist p die Anzahl der pro Flächeneinheit erzeugten Elektronen-Loch-Paare und liegt die Spannung U über dem pn -Übergang, so entsteht ein Strom von Elektronen und Löchern mit der Stromdichte

$$i = e \cdot \left(e^{\frac{e \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{n_0 \cdot D_E \cdot d_p}{L_E^2} + \frac{p_0}{L_L} \right) - e \cdot p. \quad (1)$$

e : Elementarladung

k : Boltzmann-Konstante

T : Temperatur

L : Diffusionslänge von Elektronen und Löchern

n_0, p_0 : Gleichgewichtskonzentrationen der Minoritätsträger

1.2 Kenndaten einer Solarzelle

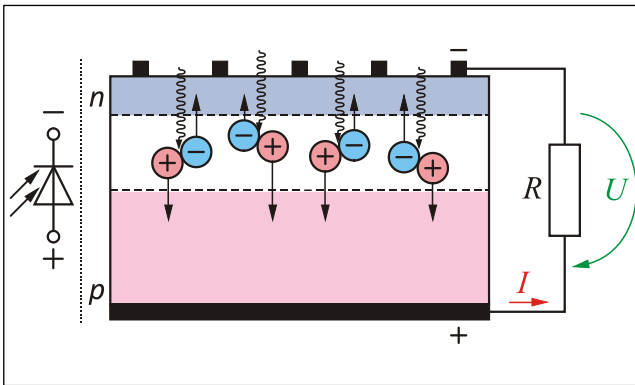


Bild 2: Funktionsweise einer Solarzelle

Werden die äußeren Metallkontakte kurzgeschlossen, fließt ein Kurzschlussstrom I_S in Sperrichtung der Photodiode, der weitgehend proportional zur Zahl der pro Zeiteinheit erzeugten Elektronen-Loch-Paare ist, also proportional zur Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts und zur Oberfläche der Solarzelle. Bei offenen Metallkontakten führt dieser Sperrstrom zum Aufbau einer Leerlaufspannung U_0 , die wiederum einen gleich großen Diffusionsstrom I_D in Durchlassrichtung der Diode bewirkt, so dass insgesamt kein Strom fließt. Bei Anschluss eines Verbrauchers mit beliebigem Widerstand hängt der Strom I durch den Verbraucher von der resultierenden Spannung U zwischen den Metallkontakten ab. Er kann vereinfachend aufgefasst werden als Differenz zwischen dem von der Bestrahlungsstärke Φ abhängigen Strom I_S in Sperrichtung und dem von der Klemmenspannung U abhängigen Strom I_D der unbeleuchteten Halbleiterdiode in Durchlassrichtung:

$$I = I_S(\Phi) - I_D(U) \quad (2)$$

Auf diese Weise ergeben sich die charakteristischen Strom-Spannungs-Kennlinien einer Solarzelle (siehe **Bild 3**). Bei kleinen Verbraucherwiderständen und somit kleinen Klemmenspannungen verhält sich die Solarzelle wie eine Konstantstromquelle, da der Durchlassstrom I_D vernachlässigbar ist. Bei großen Verbraucherwiderständen entspricht das Verhalten näherungsweise einer Konstantspannungsquelle, da hier der Strom $I_D(U)$ bei geringer Spannungsänderung schnell anwächst.

Die abgegebene Leistung der Solarzelle hängt bei fester Bestrahlungsstärke vom Lastwiderstand R ab. Ihre maximale Leistung P_{max} erreicht die Solarzelle bei einem Lastwiderstand R_{max} , der in guter Näherung mit dem sogenannten Innenwiderstand

$$R_i = \frac{U_0}{I_S} \quad (3)$$

übereinstimmt. Diese maximale Leistung ist kleiner als das Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom (**Bild 3**). Das Verhältnis

$$F = \frac{P_{max}}{P_0} \quad P_0 = U_0 \cdot I_S \quad (4)$$

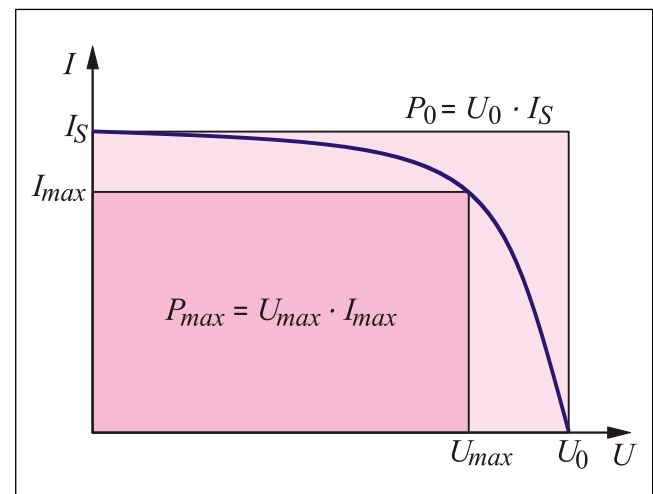


Bild 3: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle bei gegebener Bestrahlungsstärke

wird auch als Füllfaktor F bezeichnet. Häufig werden mehrere Solarzellen zu einer Solarbatterie kombiniert. Durch eine Reihenschaltung erreicht man eine größere Leerlaufspannung U_0 , durch eine Parallelschaltung einen größeren Kurzschlussstrom I_S . Im Versuch wird eine Reihenschaltung aus vier Solarzellen aufgebaut und deren Kenndaten ermittelt.

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe 1: Mit einer Thermosäule (Empfindlichkeit $\varepsilon_{Th}=0,16 \text{ mV/mW}$) kann die Bestrahlungsstärke E ermittelt werden. Wie groß ist sie, wenn der Durchmesser der gleichmäßig bestrahlten Fläche der Thermosäule $d=25 \text{ mm}$ beträgt und dabei eine Spannung $U=10 \text{ mV}$ am Ausgang erzeugt wird?

Aufgabe 2: Wie kann man bei einer Solarzelle (siehe **Bild 4**) die Leerlaufspannung bzw. den Kurzschlussstrom messen?

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Optische Bank mit montiertem Strahler, Thermosäule nach Moll, Solarzelle, Schiebewiderstand, 2 Vielfachmessgeräte, Gebläse

2.2.2 Versuchshinweise

Aufgabe 1: Bestimmung der Bestrahlungsstärke einer Thermosäule in Abhängigkeit von dem Abstand zur Lichtquelle

- Positionieren Sie die Thermosäule in einem Abstand **von $a=50 \text{ cm}$** zur Bestrahlungslampe (*Öffnungswinkel der Thermosäule beträgt 20°*).
- Messen Sie zunächst am Ausgang der Thermosäule mit einem Vielfachmessgerät die Spannung U ohne Zuschalten der Lichtquelle (*Nullwert*).
- Schalten Sie die Bestrahlungslampe ein und messen Sie die Ausgangsspannung der Thermosäule bei einer Variation des Abstandes a in **5cm-Schritten** bis $a=95 \text{ cm}$ (*Bank-Ende*).
- Ziehen Sie den ermittelten Nullwert von den Messwerten ab.
- Berücksichtigen Sie bei der Messung immer eine Einschwingdauer der Thermosäule von **(5-10)s**.

Aufgabe 2: Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Abständen der Thermosäule und Erfassung des jeweiligen Kurzschlussstromes sowie der Leerlaufspannung

- Montieren Sie statt der Thermosäule die Solarzelle in den Reiter der optischen Bank.
- Positionieren Sie diesen für die erste Messung in einem Abstand **von $a=50 \text{ cm}$** zur Bestrahlungslampe.

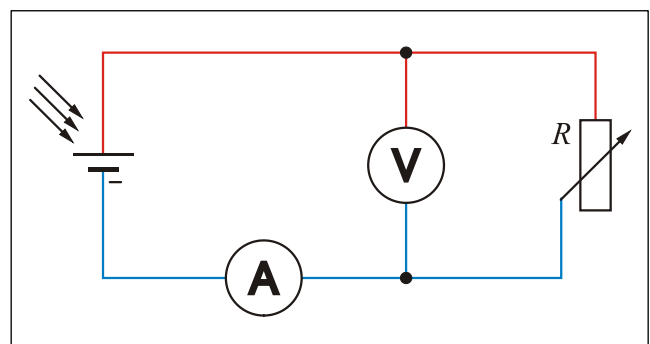


Bild 4: Schaltung zur Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie

- Bauen Sie die Schaltung zur Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie entsprechend **Bild 4** auf.
 - Erhöhen Sie durch Verändern des Lastwiderstandes R (*in 15 Schritten*) die Klemmenspannung schrittweise und lesen Sie jeweils die Stromstärke und die Spannung ab.
 - Messen Sie anschließend die Leerlaufspannung U_0 , indem Sie den Stromkreis unterbrechen.
 - Den Kurzschlussstrom I_S messen Sie, indem Sie das Spannungsmessgerät überbrücken.
- Wiederholen Sie diese Messungen für die Abstände von $a=(60, 70, 80 \text{ und } 90) \text{ cm}$.

Aufgabe 3: Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie sowie der Leerlaufspannung U_0 und des Kurzschlussstromes I_S bei verschiedenen Betriebsarten

- Positionieren Sie die Solarzelle für die Messungen in einem Abstand **von $a=70 \text{ cm}$** zur Bestrahlungslampe. Nehmen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinien analog zur **Aufgabe 2**
 - a) bei Kühlung mit einem Gebläse,
 - b) bei zusätzlicher Erwärmung (**Stufe 1**) mit dem Gebläse und
 - c) bei Abschirmung mit einer Glasplatte auf.

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Bestimmung der Bestrahlungsstärke mit einer Thermosäule in Abhängigkeit von dem Abstand zur Lichtquelle

- Berechnen Sie die Bestrahlungsstärke $[E] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ der Thermosäule und stellen Sie den funktionalen Zusammenhang $E = f(a)$ in einem Diagramm auf doppelt-logarithmisch geteiltem Funktionspapier graphisch dar.
- Ermitteln Sie aus dem Anstieg des Graphen den Exponenten, deren funktionale Abhängigkeit zu einander und interpretieren Sie das Ergebnis.

Zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke E der Thermosäule wird vorausgesetzt, dass alles Licht, welches durch die Öffnung eintritt auch auf die Messfläche mit dem Durchmesser von $d=25 \text{ mm}$ trifft.

Die Empfindlichkeit der Thermosäule beträgt $\varepsilon_{Th}=0,16 \text{ mV/mW}$. Somit kann gesagt werden:

$$E = \frac{U}{\varepsilon_{Th} \cdot A} \quad . \quad (5)$$

Aufgabe 2: Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Abständen der Thermosäule und Erfassung des jeweiligen Kurzschlussstromes sowie der Leerlaufspannung

- Zur Auswertung und Diskussion sind folgende Diagramme zu erstellen:
 - a) Strom-Spannungs-Kennlinie $I = f(U)$
 - b) Leistungs-Lastwiderstand-Kennlinie $P = f(R)$
 - c) Abhängigkeit des Kurzschlussstromes von der Bestrahlungsstärke $I_S = f(E)$
 - d) Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Bestrahlungsstärke $U_0 = f(E)$
- Diskutieren Sie diese Diagramme.
- Bestimmen Sie aus dem Diagramm $P = f(R)$ die maximalen Leistungen P_{max} für alle Abstände a , sowie die Widerstände R_{max} bei P_{max} .

- Berechnen Sie die Innenwiderstände R_i nach Gleichung (3) und ermitteln Sie das Widerstandsverhältnis V aus dem maximalen Widerstand R_{max} und dem Innenwiderstand R_i einer Solarzelle.
- Berechnen Sie P_0 sowie den jeweilige Füllfaktor F einer Solarzelle nach Gleichung (4).
- Bestimmen Sie das Widerstandsverhältnis R_{max} zu R_i und diskutieren Sie die Ergebnisse.

Aufgabe 3: Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie sowie der Leerlaufspannung U_0 und des Kurzschlussstromes I_S bei verschiedenen Betriebsarten

- Stellen Sie die Ergebnisse in einem Diagramm der Funktion $I = f(U)$ dar.
- Diskutieren Sie die Ergebnisse vergleichend mit den aufgenommenen Werten der **Aufgabe 2**.

3. Ergänzung

3.1 Vertiefende Aufgaben

Tragen Sie in der Strom-Spannungs-Kennlinie die Punkte ein, bei denen maximale Leistungsabgabe (P_{max}) erfolgt. Verbinden Sie diese Punkte und erläutern Sie die erhaltene Kurve.

3.2 Ergänzende Bemerkungen

Eine Beleuchtung der Solarzelle mit Sonnenlicht liefert andere Kennlinien als bei Glühlampenlicht. Die Ursache liegt im unterschiedlichen Spektrum der Lichtquellen. Bei gleicher Bestrahlungsstärke bzw. gleicher Lichtintensität liefert die Beleuchtung mit Sonnenlicht einen höheren Kurzschlussstrom. Wegen des spektral geringeren Infrarotanteils des Sonnenlichts erwärmt sich die Solarzelle nicht so stark, die Messungen mit und ohne Kühlung liefern für Sonnenlicht die gleichen Kennlinien.

3.3 Zusammenhang Photometrie - Strahlungsphysik

Photometrie			Strahlungsphysik		
Größe	Einheit	Symbol	Formel	Einheit	Größe
Lichtmenge	lm·s		Q	W·s	Strahlungsenergie
Lichtstrom	lm		$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	W	Strahlungsfluss
Lichtstärke	cd = lm·sr ⁻¹		$I = \frac{d\Phi}{d\Omega_S}$	W·sr ⁻¹	Strahlstärke
Spezifische Lichtausstrahlung	lm·m ⁻²		$M = \frac{d\Phi}{dA_S}$	W·m ⁻²	Spezifische Ausstrahlung
Leuchtdichte	lm·m ⁻²		$L = \frac{dI}{dA_S \cdot \cos \alpha}$	W·m ⁻² ·sr ⁻¹	Strahldichte
Beleuchtungsstärke	lx = lm·m ⁻²		$E = \frac{d\Phi}{dA_E}$	W·m ⁻²	Bestrahlungsstärke
Belichtung	lx·s		$H = \int E \cdot dt$	W·s·m ⁻²	Bestrahlung

Quelle: Prof. D. Ertelt (FH-Oldenburg)