

Solarzellen

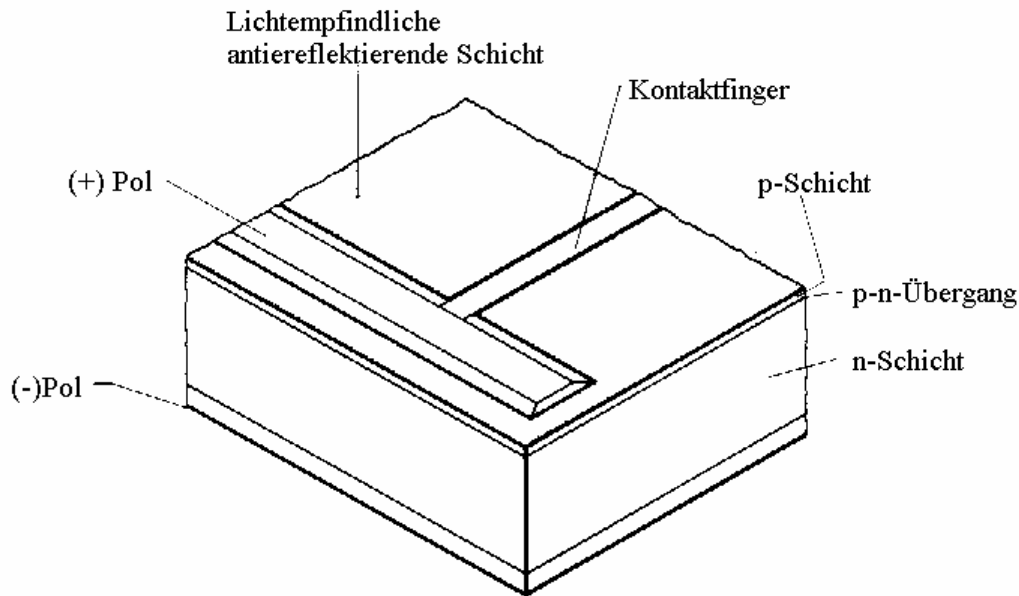


Abb. 1: Aufbau einer Silizium-Solarzelle

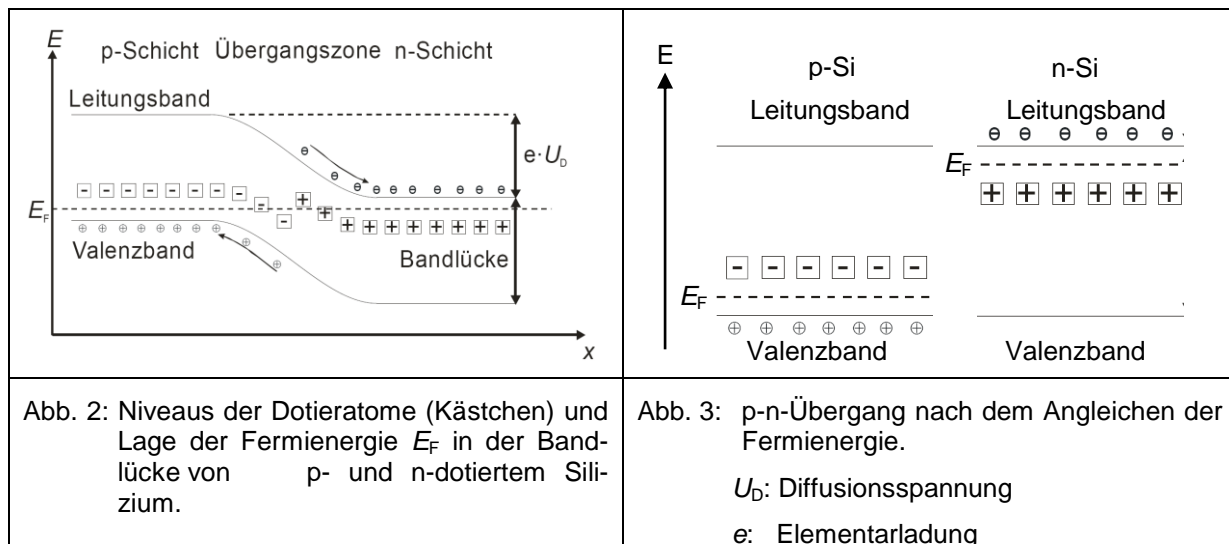
1 Warum geben Solarzellen Strom?

Solarzellen bestehen heute meist aus Silizium, einem Halbleitermaterial. Bei Halbleitern handelt es sich um Stoffe, die man eigentlich zu den Isolatoren zählt, die sehr schlechte Leitungseigenschaften besitzen. Allerdings weisen Halbleiter eine nur ca. 1 eV breite Bandlücke auf, während sie bei Isolatoren viel größer ist. Das hat zur Folge, dass schon bei Raumtemperatur einige Elektronen im Leitungsband vorhanden sind und für eine gewisse Leitfähigkeit sorgen¹. Neben den Elektronen im Leitungsband tragen auch die Löcher im nächsttieferen Band, dem Valenzband, zur Leitung bei. Ein Loch ist eine bewegliche Leerstelle, die ein Elektron im Valenzband hinterlässt, wenn es in das Leitungsband wechselt. Einem Loch wird eine positive Elementarladung zugeordnet.

Dotiert man das vierwertige Silizium mit fünf-, bzw. dreiwertigen Atomen, so verstärkt man damit die Elektronen-, bzw. Lochleitung. Bei Dotierung mit fünfwertigen Fremdatomen spricht man von n-Silizium. Die Verbesserung der Elektronenleitung resultiert hierbei aus der Tatsache, dass das fünfte Valenzelektron der Fremdatome keinen Bindungspartner bei den vier Siliziumnachbarn findet. Das Elektron ist also nur recht schwach gebunden und lässt sich besonders leicht ins Leitungsband heben. Bei n-leitendem Silizium bewirken deshalb die zahlreichen Leitungsbandelektronen eine Verbesserung der Leitfähigkeit. Das Bändermodell zeigt diese zusätzlichen Zustände der Dotieratome innerhalb der Bandlücke nahe des Leitungsbands (Abb. 2).

Bei p-Silizium, also bei Dotierung mit dreiwertigen Atomen, werden Zustände nahe des Valenzbands geschaffen. Hier ist es leicht möglich ein viertes Elektron an das Fremdatom zu binden (Energiebedarf ca. 1 meV). Damit wird die Lochleitung im Silizium verstärkt. Die Fremdatome im p-dotierten Halbleiter heißen Akzeptoren. Umgekehrt können fünfwertige Atome, wie zum Beispiel Arsen oder Phosphor

¹ Für die elektrische Leitung ist es erforderlich, dass ein Band nur teilweise besetzt ist. Bei Metallen ist dies für das Leitungsband stets der Fall. Bei Isolatoren hingegen ist das Leitungsband leer und die tieferen Bänder sind ganz gefüllt.



leicht ein Elektron in das Leitungsband abgeben. Die Fremdatome in n-dotiertem Halbleitern heißen daher Donatoren.

Der stromliefernde Effekt, den man bei den Solarzellen nutzt, hat aber nicht so sehr mit der Verbesserung der Leitungseigenschaften durch Dotierung zu tun, sondern beruht auf den Vorgängen, die sich in einer Diode, also an Übergängen von einer Dotierungsart zur anderen abspielen.

In der Übergangszone findet Diffusion statt: Elektronen wandern in angrenzende elektronenarme Bereiche ab. Umgekehrt diffundieren Löcher aus der p-dotierten in die n-dotierte Zone. An der Grenzfläche entsteht dabei eine Raumladungszone: Die Elektronen der n-Zone besetzen Akzeptorzustände der p-Zone, und umgekehrt rekombinieren Elektronen der Donatorzustände mit Löchern der p-Zone. Übrig bleibt eine Zone aus ionisierten Störstellen die (fast) keine beweglichen Ladungsträger enthält. Es bleiben positive Ladungen auf der n- und negative auf der p-Seite übrig, die an die Fremdatome gebunden sind. Diese Ladungen bauen ein elektrisches Feld auf. Das elektrische Feld wirkt dem Diffusionsstrom entgegen und bringt ihn zum Erliegen. Es kommt also zu einem Gleichgewicht zwischen Diffusions- und Feldströmen, d.h. das chemische Potenzial (in der Festkörperphysik sagt man dazu Fermienergie) gleicht sich aus (Abb. 3).

Das elektrische Feld ist mit einem Potentialsprung verknüpft, dessen Größe oft Diffusionsspannung U_D genannt wird. Der Potentialsprung ist von der p- und n-Dotierung der Diode und der Temperatur abhängig. Für die an den Diodenkontakten gemessene Spannung ist das elektrochemische Potential maßgeblich. Im Gleichgewicht, das heißt ohne Beleuchtung oder von außen angelegter Spannung, ist das elektrochemische Potential in der Diode konstant, d.h. an den Kontakten der Diode wird ohne Beleuchtung keine Spannung gemessen. Unter Beleuchtung können Photonen im p-n-Übergang Elektron-Loch-Paare erzeugen, die durch das elektrische Feld getrennt werden. Die Elektronen werden in die n-Schicht und die Löcher in die p-Schicht gezogen, wodurch der Potentialsprung über die Raumladungszone reduziert wird. An den Kontakten baut sich nun eine Photospannung auf. Mit zunehmender Beleuchtungsintensität wird die Photospannung größer, bis sie gerade der Diffusionsspannung entspricht. Die maximale, ohne angeschlossenen Verbraucher gemessene Photospannung wird oft Leerlaufspannung U_0 genannt. Sie beträgt bei Silizium-Photodioden etwa 0,5 bis 0,7 V. Wird ein Lastwiderstand an die Diode angeschlossen so rekombiniert ein Teil der photogenerierten Ladungsträger durch den über den Lastwiderstand fließenden Strom. Die beleuchtete Diode liefert also elektrische Energie.

Eine dünne Grenzschicht bedeutet geringe Elektron-Loch-Erzeugungsraten, eine dicke schwächt das Feld, das die Ladungsträger trennen soll. Die Absorption der Lichtquanten erfolgt aber nicht nur im p-n-Übergang, sondern auch in der darüber liegenden dünnen p-Schicht (Abb. 1). Die dort erzeugten Elektronen rekombinieren hier allerdings sehr schnell mit den zahlreich vorhandenen Löchern. Dadurch wird der Wirkungsgrad einer Solarzelle merklich verringert. Die p-Schicht sollte daher sehr dünn sein, damit möglichst viele der dort erzeugten Elektronen von der p- in die n-Schicht gelangen können.

2 Temperaturabhängigkeit

Die Stromdichte j , also der Strom, der pro Fläche erzeugt wird, hängt exponentiell von der Temperatur T ab:

$$j = \text{const.} \cdot e \cdot \exp\left[\frac{eU}{kT}\right] \quad (1)$$

e : Elementarladung
 U : Spannung über dem p-n-Übergang
 k : Boltzmannkonstante

Die Proportionalitätskonstante wird festgelegt durch die Gleichgewichtskonzentrationen von Elektronen (n-Seite) und Löchern (p-Seite), deren Diffusionskonstanten, sowie die Dicke der p-dotierten Schicht.

Wenn man die Zelle (z.B. über ein Amperemeter) kurzschließt, vereinfacht sich Formel (1) zu

$$j_{\text{kurz}} = e \cdot g, \quad (2)$$

wobei g die Anzahl der pro Flächeneinheit und pro Zeiteinheit erzeugten Elektron-Loch-Paare ist. Die Kurzschlussstromdichte j_{kurz} ist also proportional zur einfallenden Lichtmenge. Mit zunehmender Temperatur wird g geringfügig größer (weniger als 0,01 % pro K). Wenn man die Zelle nicht belastet, beispielsweise ein sehr hochohmiges Voltmeter anschließt, nähert sich die Spannung U der Leerlaufspannung U_0 an. In diesem Fall wird das Temperaturverhalten durch die beiden Gleichgewichtskonzentrationen n_0 der Elektronen und p_0 der Löcher bestimmt.

Für kleine Temperaturänderungen kann man eine lineare Näherung verwenden, nach der die Leerlaufspannung $U_0 \approx U_D$ bei zunehmender Temperatur typischerweise um 2,3 mV/K abnimmt.

3 Lichtquellen

Die Beleuchtung der Solarzelle mit Sonnenlicht liefert andere Kennlinien als bei Glühlampenlicht. Das Verhalten der Zellen bei Abschattungen und Intensitätsänderungen bleibt aber gleich. Die Ursache hierfür liegt im unterschiedlichen Spektrum der Lichtquellen (Abb. 3).

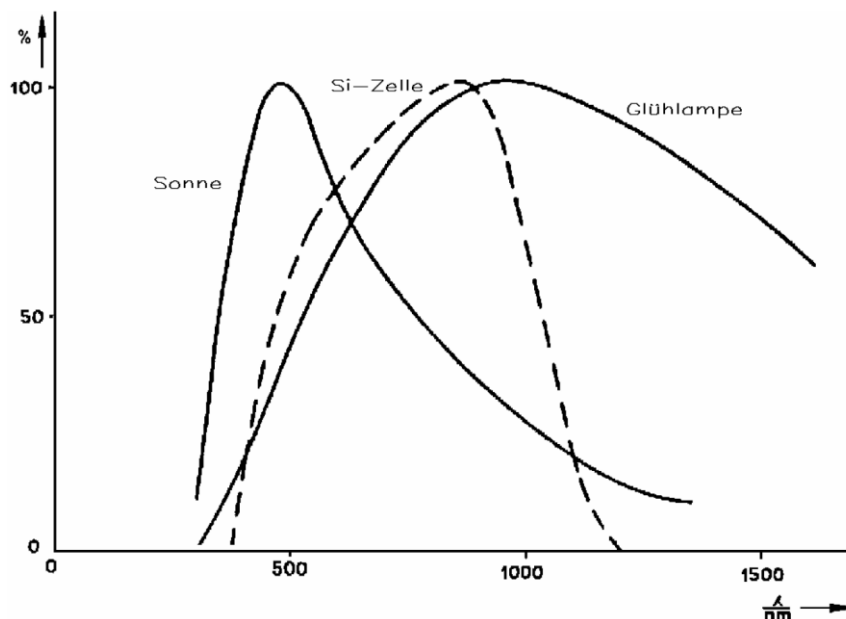


Abb.3: Spektren der Sonne, einer Glühlampe und die spektrale Empfindlichkeit einer Si-Solarzelle

4 Versuchsdurchführung

4.1 a) Abhängigkeit vom Lastwiderstand:

Die elektrische Leistung der Solarzelle soll in Abhängigkeit eines zugeschalteten Lastwiderstandes ermittelt werden. Dazu wird die Solarzelle mit einer Glühlampe in einem Abstand zwischen 50 und 60 cm voll bestrahlt. Der Lastwiderstand R_{last} soll im Bereich zwischen 0 und 100 Ω in 20 Ω -Schritten variiert werden. Da das Leistungsmaximum nicht bei hohen Widerständen

erwartet wird, soll der Bereich von $0-12\ \Omega$ zusätzlich in $2\ \Omega$ -Schritten untersucht werden. Um die Leistung zu bestimmen werden Spannung U und Strom I gemäß der Schaltskizze in Abb. 4 gemessen.

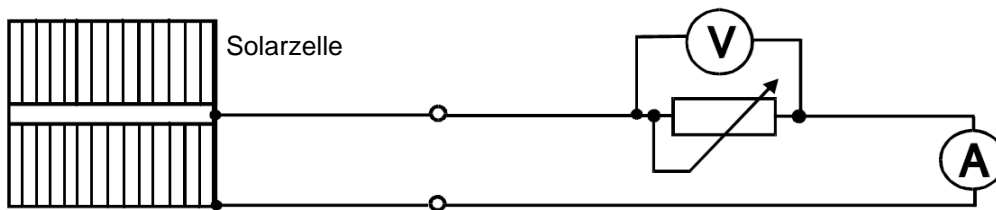


Abb. 4: Schaltung zur Aufnahme des I-U-Diagramms. Mit dem Voltmeter V wird die Spannung U mit dem Amperemeter A der Strom I gemessen.

4.1 b) Ausleuchtung der Zelle

Hier soll untersucht werden wie sich die Leistung verändert, wenn die Zelle nur zur Hälfte bestrahlt wird. Bei $R_{\text{Last}} = 100\ \Omega$ werden dazu Spannung und Strom gemessen, während die Solarzelle zur Hälfte durch die verschiebbare Kunststoffabdeckung abgeschattet ist.

4.1 c) Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom

Interessant sind die Grenzfälle, in denen der Lastwiderstand unendlich beziehungsweise Null ist. Um den ersten Fall zu untersuchen, wird der eventuell noch an der Zelle angeschlossene Lastwiderstand entfernt. Nun kann die Leerlaufspannung U_0 gemessen werden. Im zweiten Fall wird die Solarzelle mit einem Kabel kurzgeschlossen. Nun wird der Kurzschlussstrom I_{kurz} gemessen. Die Solarzelle soll in beiden Fällen voll beleuchtet werden.

4.1 d) Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom und Ausleuchtung

Wie 4.1 c), jedoch bei halb abgedeckter Solarzelle.

4.1 e) Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom bei geringerer Beleuchtungsintensität

Wie 4.1 c), es wird wieder die volle Zelle bestrahlt, jedoch mit einer frei wählbaren, geringeren Lichtleistung (Dimmer benutzen).

4.2 a) Intensitätsabhängigkeit:

Mit dem Dimmer kann man die abgegebene Lichtintensität der Glühlampe variieren. Es sollen 5 gleichmäßige Intensitätsschritte aufgenommen werden.

Bei jeder Intensität soll die Leerlaufspannung U_0 und Kurzschlußstrom I_{kurz} der Solarzelle gemessen werden. Hier wird nun zusätzlich die Lichtleistung mit einer Thermosäule gemessen. Beim Aufnehmen der von der Lichtleistung abhängigen Spannungswerte an der Thermosäule ist darauf zu achten, dass die Thermosäule eine gewisse Einschwingzeit besitzt. Man sollte deswegen jeden Wert möglichst nach der gleichen, angemessen gewählten Bestrahlungsdauer (z.B. nach 15 s) aufnehmen.

4.2 b) Spektrale Empfindlichkeit:

Es sollen U_0 und I_{kurz} gemessen werden, die die Solarzelle im Sonnenlicht erzeugt. Sollte die Sonne bereits untergegangen sein oder der Himmel durch eine dichte Wolkendecke kaum Sonnenlicht durchlassen, kann dieser Teil des Versuches übersprungen werden.

4.2 c) Temperaturabhängigkeit:

Mit dem Eisspray wird die Solarzelle über die kleine Eintrittsöffnung an ihrer rechten Seite durch 2-3 Sprühstöße auf etwa $-50\ ^\circ\text{C}$ abgekühlt. Diese Temperatur braucht nicht gemessen zu werden. U_0 und I_{kurz} sollen im kalten Zustand schnell hintereinander gemessen werden.

3) Reihen- und Parallelschaltung von Zellen

3a) Vergleich zweier Zellen

Messen Sie U_0 und I_{kurz} von zwei der zur Verfügung gestellten Solarzellen.

3b) Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom in der Parallel- beziehungsweise Reihenschaltung

Bauen Sie nun die beiden vermessenen Zellen einmal in Reihenschaltung und einmal in Parallelschaltung auf, und messen Sie jeweils U_0 und I_{kurz} .

Stimmen die Ergebnisse mit Ihrer Erwartung überein? Diskutieren Sie die Ergebnisse mit Ihrem Versuchsbetreuer.

Hinweise zum Aufbau:

- Auf einer optischen Bank befinden sich zwei Reiter, einer dient zur Aufnahme der Lampe. Die Helligkeit der Lampe lässt sich über einen Dimmer einstellen. Der andere Reiter nimmt entweder die Solarzellen oder die Thermosäule auf.
- Der Abstand zwischen Lampe und Solarzelle muss 50 bis 60 cm betragen.
- Für die Aufgaben 4.1 bis 4.2 wird eine einzelne Solarzelle verwendet, die sich mit einer verschiebbare Kunststoffabdeckung abschatten lässt. Für die anderen Aufgaben stehen vier Solarzellen zur Verfügung, die auf einem gemeinsamen Halter montiert sind und separate Anschlüsse haben.
- Bei der Fehlerbetrachtung werden die Digitalmultimeter oft als wichtige Fehlerquelle genannt – völlig zu Unrecht, sie arbeiten bis auf ca. 1% genau. Viel häufiger ist die eigentliche Fehlerquelle ein defektes Kabel, die Verkabelung selbst oder ein Wackelkontakt.
- „DCA“ heißt **D**irect **C**urrent in **A**mpere, „DCV“ heißt **D**irect **C**urrent in **V**olt.

5 Auswertung

zu 4.1:

- a) Erstellen Sie ein Diagramm zur Abhängigkeit der Ausgangsleistung vom Lastwiderstand! Wie ist der Kurvenverlauf, wo liegt P_{max} ?
- b) Wie hoch ist der Wirkungsgrad der Solarzelle? Die auf die Solarzelle fallende Lichtleistung wird mit den Ergebnissen aus Versuchsteil 4.2 a) bestimmt.
- c) Wie hat sich die Leistung gegenüber dem Experiment mit voller Fläche verändert? Begründung?
- d) Wenn man $P_{max,theoretisch} = I_{kurz} \cdot U_0$ annimmt, erhält man eine Abschätzung der maximalen Ausgangsleistung der Solarzelle. Vergleichen Sie diese mit der ermittelten maximalen Leistung P_{max} aus Aufgabe 1a. Ermitteln Sie das Verhältnis: $D_{relativ} = P_{max,theoretisch} / P_{max}$
- e) Vergleichen und kommentieren Sie Ihre Messergebnisse aus den Aufgaben 4.1 c) bis 4.1 e)! Erstellen Sie dazu unbedingt eine kurze Übersichtstabelle!

zu 4.2:

- a) Mit der Thermosäule können Sie die Lichtleistung P_{Licht} bestimmen, die auf die Sensorfläche trifft. Wenn der Lichtstrahl senkrecht auf eine Solarzelle oder ein Sensorelement der Fläche A auftrifft, so ist der Zusammenhang zwischen der Intensität S_{Licht} des Lichtstrahls und der Lichtleistung P_{Licht} :

$$S_{Licht} = P_{Licht} / A$$

S_{Licht} : Intensität

A : Beleuchtete Fläche

Beträgt die Leistung des auf den Sensor der Thermosäule einfallenden Lichts 1 mW, so liefert die Thermosäule eine Spannung von 0,16 mV. Der Quotient aus Leistung und gemessener Spannung ist unabhängig von der einfallenden Leistung. Erstellen Sie ein Diagramm, in dem Sie die $P = I_{kurz} \cdot U_0$ über die Lichtintensität (gemessen mittels der Thermosäule) auftragen! Die Fläche des Thermosäulensensors ist 156,25 mm², und die Fläche der Solarzelle beträgt 2,25 · 10⁻³ m².

Verwenden Sie die Ergebnisse aus Aufgabe 4.1a, um den Wirkungsgrad der Solarzelle zu bestimmen.

- b,c) Vergleichen und diskutieren Sie die Ergebnisse jeweils mit denjenigen aus Aufgabenteil 4.1 c)!

zu 4.3:

Bestimmen und vergleichen Sie die Leistungen in Parallel- und Reihenschaltung! Was ist günstiger: Parallel- oder Reihenschaltung?