

V8 - Solarzelle

Aufgabenstellung:

1. Bestimmen Sie Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom verschieden geschalteter Solarzellen in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke.
2. Bestimmen Sie Arbeitspunkt und Füllfaktor der Solarzelle.

Stichworte zur Vorbereitung:

Halbleiter, pn-Übergang, Halbleiterdiode, $U(I)$ –Kennlinie, Solarzelle, innerer Photoeffekt, Füllfaktor, Reihen- und Parallelschaltung, Leistungsanpassung, Beleuchtungsstärke

Literatur:

- W. Schenk, F. Kremer (Hrsg.), *Physikalisches Praktikum*, Kap. E1 & Kap. E5, 13. Auflage, Vieweg und Teubner **2011**
- H.-J. Eichler, H.-D. Kronfeld, J. Sahm, *Das Neue Physikalische Grundpraktikum*, Kap 29, 2. Auflage, Springer-Verlag **2006**

1. Theoretische Grundlagen

Lichtquelle, Intensität und Beleuchtungsstärke

Als Lichtquellen bezeichnet man Orte, von denen elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Spektralbereich ausgeht. Dabei können Lichtquellen sehr verschiedene Eigenschaften aufweisen, entsprechend existieren verschiedene Unterteilungen. Beispielsweise unterscheidet man nach ihrer räumlichen Ausdehnung in *Punktlichtquellen* und diffuse Lichtquellen. Nach der Abstrahlcharakteristik kann in rundum strahlende und gerichtet strahlende Lichtquellen unterteilt werden.

Punktlichtquellen zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Ausdehnung sehr viel kleiner ist als die Entfernung zwischen der Lichtquelle und einem beleuchteten Objekt. Die ideale Punktlichtquelle besitzt keine Ausdehnung, Licht breitet sich von diesem Punkt in alle Richtungen gleich aus. Reale Lichtquellen können bestenfalls eine gute Näherung für dieses Modell darstellen - Sterne sind beispielsweise eine sehr gute Näherung.

Die *Lichtintensität* gibt die pro Zeiteinheit auf eine bestimmte Fläche übertragene Energie. Sie ist also ein Begriff für den Energiefluss. Strahlt eine Punktlichtquelle Energie in alle drei Raumrichtungen aus, und gibt es keinen Energieverlust durch Absorptionsprozesse, dann fällt die Intensität mit dem Abstand r von der Lichtquelle ab: Die abgestrahlte Gesamtleistung P ist konstant, sie trifft aber im Abstand r auf die Oberfläche $A = 4\pi r^2$ einer Kugel. Verdoppelt sich also der Abstand von der Lichtquelle, so vervierfacht sich die Fläche, auf die die Leistung aufgeteilt wird. Es gilt folglich

$$I = \frac{P_{\text{Licht}}}{A} = \frac{P_{\text{Licht}}}{4\pi r^2}. \quad (1)$$

Die Tageslichtempfindlichkeit des menschlichen Auges ist besonders ausgeprägt für grünes Licht. Andererseits löst eine starke Strahlungsquelle, die außerhalb des sichtbaren Spektralbereiches emittiert, keine Empfindung aus. Beider Charakterisierung von Lichtquellen ist also zu unterscheiden zwischen der physikalischen Größe (wie der durch Gl. (1) gegebenen Intensität, $[I] = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$) und den zugeordneten photometrischen (oder auch physiologischen) Größen zu unterscheiden. Die der Lichtintensität entsprechende photometrische Größe ist die *Beleuchtungsstärke* E_v , die in der zusammengesetzten SI-Einheit Lux (lx) angegeben wird.

elektrische Leitung im Halbleiter - pn-Übergang

Eine Solarzelle wandelt Lichtenergie in elektrische Energie um. Grundlage dafür bildet der photovoltaische Effekt, ein Spezialfall des inneren photoelektrischen Effektes. Eine Solarzelle ist im Prinzip eine Halbleiterdiode und besitzt wie diese einen pn-Übergang. Das typische Halbleitermaterial ist das vierwertige Silizium.

Ein pn-Übergang entsteht, wenn man eine p-dotierte Halbleiterschicht und eine n-dotierte Schicht in Kontakt bringt. Dabei bedeutet *Dotieren* das gezielte Einbringen von Fremdatomen in den Halbleiter. In Silizium erreicht man eine *p-Dotierung*, indem in den Siliziumkristall dreiwertige Atome (z.B. Bor oder Aluminium) eingebaut werden. Die Bor- bzw. Aluminiumatome besitzen ein Bindungselektron zu wenig. Das fehlende Bindungselektron wird auch Fehlstelle oder Loch genannt und kann oft wie ein einfach positiv geladenes Teilchen behandelt werden, obwohl es sich in Wirklichkeit um kein reales Teilchen handelt. Die eingebauten Fremdatome werden in diesem Fall auch Akzeptoren genannt. Entsprechend haben fünfwertige Atome (als Donator bezeichnet, z. B. Phosphor), die in der *n-dotierten* Schicht in das Siliziumgitter eingebaut werden, ein Bindungselektron mehr, als für die Kristallbindung erforderlich ist.

Es folgt daraus, dass in einer n-dotierten Halbleiterschicht ein Elektronenüberschuss existiert, Elektronen sind die Majoritätsladungsträger (Mehrheit) und Löcher die Minoritätsladungsträger (Minderheit). In einem p-Halbleiter herrscht dem entgegengesetzt ein Elektronenmangel bzw. Löcherüberschuss. Dies bedeutet allerdings nicht, dass ein n-Halbleiter elektrisch negativ und ein p-Halbleiter elektrisch positiv geladen ist - beide sind nach außen elektrisch neutral! Es befinden sich jedoch im Gitterverband eines n-Halbleiters nicht für die Bindung der Atome im Kristall benötigte Elektronen, und im p-Halbleiter sind mangels Elektronen nicht alle Bindungsmöglichkeiten des Siliziums gesättigt.

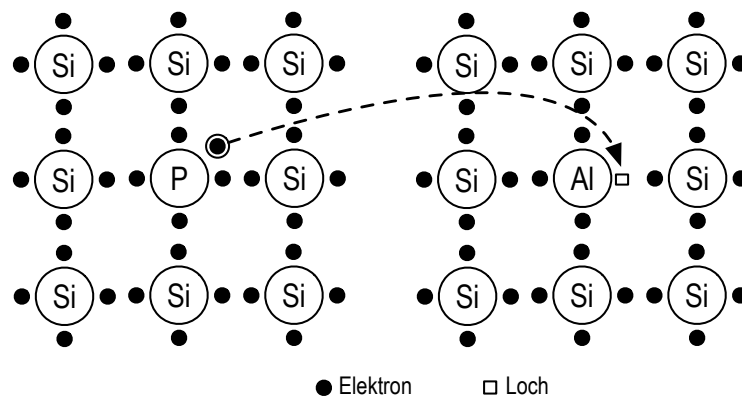


Abb. 1: Modellvorstellung eines pn-Übergangs. Überschüssige Donatorelektronen diffundieren aus dem n-Bereich (links) in den p-Bereich.

Bringt man eine p- und eine n-Schicht in Kontakt, diffundieren die freien Donatorelektronen vom n- in den p-Halbleiter und besetzen dort die Fehlstellen. Dies ist in Abb. 1 illustriert. Dadurch wird ein Teil des p-Bereiches nahe an der Kontaktfläche negativ und entsprechend ein Teil des n-Bereiches wird positiv geladen. An der Diffusion sind nur die Majoritätsladungsträger beteiligt. Der Übergangsbereich, in dem diese Aufladung erfolgt, heißt Raumladungszone. Innerhalb dieser Zone entsteht ein elektrisches Feld,

welches einen Driftstrom (der Minoritätsladungsträger) zur Folge hat, welcher dem Diffusionsstrom entgegenwirkt. Der Diffusionsprozess kommt zum Erliegen, wenn der Driftstrom auf die Größe des Diffusionsstroms gewachsen ist. Typische Werte für die Spannung im resultierenden elektrischen Feld sind in Silizium $0,5\text{ V} \dots 0,7\text{ V}$.

Ein Bauelement mit einem pn-Übergang wirkt als Diode. Wird an diese eine äußere Spannung angelegt, so ist das in der resultierende Verhalten, das in der $U(I)$ -Kennlinie (schematisch in Abb. 2) ablesbar ist, abhängig von der Polung. Wird die n-Schicht an den Pluspol der Spannungsquelle angeschlossen, wird der Diffusionsstrom kleiner, die Raumladungszone wächst und ein Stromfluss wird weitgehend unterdrückt (Sperrrichtung der Diode). Ist die n-Schicht jedoch an den Minuspol angeschlossen und ist die äußere Spannung groß genug, um das innere elektrische Feld der Raumladungszone zu überwinden (so genannte Schleusenspannung, abhängig vom Diodenmaterial), so entsteht ein kontinuierlicher Stromfluss, der mit wachsender Spannung sehr stark ansteigt. Die Diode ist dann in Durchlassrichtung geschaltet.

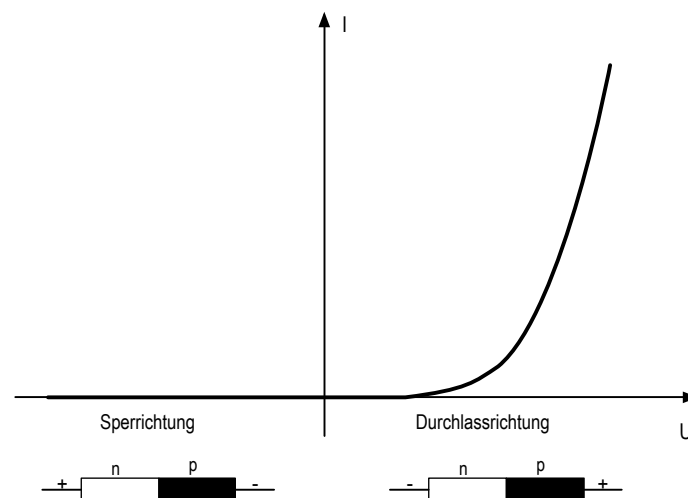


Abb. 2: $U(I)$ -Kennlinie einer Halbleiterdiode. Je nach Polung zeigt die Diode Sperr- oder Durchlassverhalten.

Solarzelle

In einem Halbleiter entstehen freie Ladungsträger - d.h. sowohl Elektronen als auch Löcher - durch Anregung gebundener Elektronen. Erhält ein Elektron genügend Energie, so kann es sich aus der Bindung an die Atome lösen, wird im Halbleitermaterial beweglich und hinterlässt ein Loch. Solche Elektron-Loch-Paare können z.B. durch thermische Anregung oder einfallende Strahlung erzeugt werden. Fällt Licht auf den Halbleiter, entstehen durch Absorption der Photonen zusätzliche Elektronen-Loch-Paare, die einen Photostrom I_{ph} hervorrufen. Der angepasste Aufbau der Solarzelle (dünne n-

Schicht, Oberfläche zur Verminderung der Reflexion des einfallenden Lichtes beschichtet, Streifenkontakte für geringstmögliche Abschattung) begünstigt dies.

In einem n-dotierten Halbleiter ist die Anzahl der optisch angeregten freien Elektronen sehr gering gegenüber der Zahl der freien Donatorelektronen (Majorität). Dagegen wächst die Anzahl der Löcher im n-Halbleiter (Minoritätsladungsträger), die ohne Anregung praktisch null ist, enorm. Analog dazu wächst die Elektronenzahl im p-Halbleiter. Die Folge ist, dass sich der Diffusionsstrom der Majoritätsladungsträger kaum ändert, aber der Driftstrom stark ansteigt. Wird der Driftstrom größer als der Diffusionsstrom, so entsteht ein Gesamtstrom I_{ph} in Sperrrichtung ($I < 0$), der die Diode in Durchlassrichtung polt ($U > 0$), da sich Elektronen im n-Gebiet und Löcher im p-Gebiet ansammeln. Die Diodenkennlinie wird also bei Beleuchtung im $U(I)$ -Diagramm zu negativen Strömen hin verschoben, und der Bereich, indem die Solarzelle als Spannungsquelle arbeitet liegt im 4. Quadranten des Kennliniendiagramms. Die anderen Bereiche sind nur dann von Bedeutung, wenn an die Solarzelle eine äußere Spannung angelegt wird.

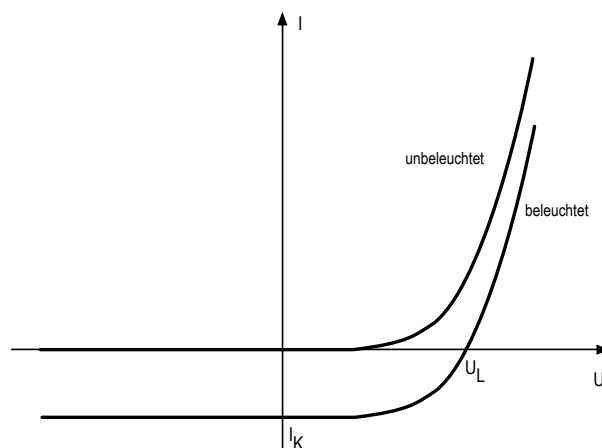


Abb 3: Kennlinie der Solarzelle ohne und mit Beleuchtung.

Betreibt man nun die Solarzelle als Spannungsquelle, und misst den Stromfluss durch einen Verbraucher (z.B. einen ohmschen Widerstand) sowie den Spannungsabfall über dem Widerstand, so erhält man den in Abb. 4 schematisch dargestellten Kurvenverlauf. Bei großer Belastung (d.h. großen Strömen entsprechend kleinem Widerstand des Verbrauchers) sinkt die Klemmspannung der Solarzelle drastisch ab. Der maximale Strom I_K ist im Kurzschlussfall möglich - man spricht vom Kurzschlussstrom. Anders herum kann die maximale Klemmspannung erzielt werden, wenn sehr kleine Ströme fließen (entsprechend großer Widerstände). Die maximale Spannung U_L (Leerlaufspannung) erhält man bei geöffnetem Stromkreis. Dieser Kurvenverlauf entspricht damit dem horizontal gespiegelten vierten Quadranten der Solarzellenkennlinie aus Abb. 3.

Obwohl Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom für die Charakterisierung der Solarzelle herangezogen werden, haben beide Fälle keine Bedeutung, da die entnehmbare elektrische Leistung

$$P = U \cdot I \quad (2)$$

jeweils Null ist. Es existiert jedoch ein optimal an die Solarzelle angepasster Verbraucher, bei dem die maximale Leistung P_{MPP} entnommen werden kann. Dann fließt der in Abb. 4 mit I_{MPP} bezeichnete Strom und am Verbraucher fällt die Spannung U_{MPP} ab. Der Punkt $(U_{\text{MPP}}; I_{\text{MPP}})$ im Diagramm ist der so genannte Arbeitspunkt, Punkt maximaler Leistung bzw. „Maximum Power Point“. An anderen Verbraucher mit größerem oder kleinerem Widerstand wird eine geringere Leistung umgesetzt - man spricht daher auch von Leistungsanpassung. Man führt den so genannten Füllfaktor F_F ein:

$$P_{\text{MPP}} = F_F \cdot U_L \cdot I_K. \quad (3)$$

Der Füllfaktor liegt gewöhnlicherweise zwischen 60% und 80 %.

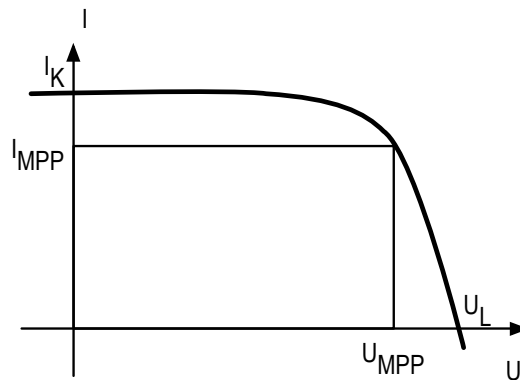


Abb. 4: Solarzelle als Spannungsquelle - Arbeitspunkt

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Systems beschreibt das Verhältnis der abgegebenen Leistung zur zugeführten Leistung und ist ein typisches Merkmal von Energieumformenden Maschinen wie Motoren oder Generatoren. Im Fall der Solarzelle wird Strahlung (elektromagnetische Energie) in elektrische Energie umgewandelt. Für den Wirkungsgrad gilt dann

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{P_{\text{MPP}}}{P_{\text{Licht}}} = \frac{F_F U_L I_K}{P_{\text{Licht}}}. \quad (4)$$

Siliziumsolarzellen können theoretisch bis zu 28% der mit dem Sonnenlicht eingestrahlten Energie in elektrische Energie umwandeln. Tatsächlich werden im Labormaßstab Solarzellen mit einen Wirkungsgrad von bis zu 24% realisiert. Solarzellen aus industrieller Fertigung erzielen bis zu 19%.

2. Versuchsdurchführung

Im Versuch steht ein Solarpanel mit zwei Modulen, die je zehn in Reihe geschaltete Solarzellen enthalten, zur Verfügung. Eine reproduzierbare und einstellbare Beleuchtung wird durch eine an einen Stelltransformator angeschlossene Halogenlampe realisiert. Bei allen Messungen ist darauf zu achten, dass die Solarzelle senkrecht zum Lichteinfall steht. Die Solarzelle ist vor starker Aufheizung durch die Lampe zu schützen - ein Mindestabstand von 50 cm sollte nicht unterschritten werden!

Kalibrieren der Beleuchtungsstärke

Am Trenntransformator ist die Lampenspannung zu regulieren. Diese ist jedoch kein Maß für die die Solarzelle erreichende Lichtenergie. Daher müssen zunächst die Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke E_V von Lampenspannung und Abstand von der Lampe als Kalibrierkurven aufgenommen werden. Wählen Sie dazu bei einem Abstand $d = 50 \text{ cm}$ mindestens fünf Lampenspannungen zwischen 80 V und 200 V, und bei einer Lampenspannung $U_{\text{Lampe}} = 200 \text{ V}$ mindestens fünf Abstände bis hin zu 100 cm.

Reihen- und Parallelschaltung

Zur Messung von Strom und Spannung stehen zwei Digitalmultimeter bereit. Da Sie Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung nicht zeitgleich messen können, ist zudem ein Umschalter erforderlich. Die Messschaltung ist in Abb. 5 gezeigt. Messen Sie für die bei der Kalibrierung gewählten Lampenspannungen bzw. Beleuchtungsstärken I_K und U_L für ein einzelnes Solarmodul, zwei Solarmodule in Reihenschaltung und zwei parallel geschaltete Solarzellen.

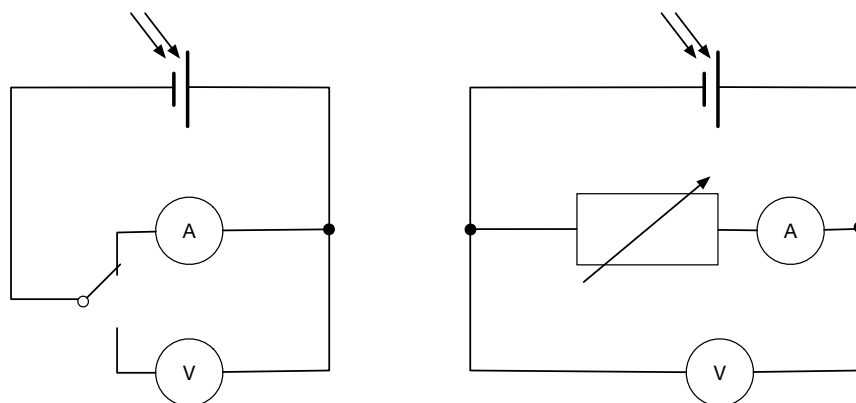


Abb. 5: Messschaltung zur Bestimmung von Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung (links) und zur Ermittlung des Arbeitspunktes (rechts).

Arbeitspunkt der Solarzelle

Spannung und Stromstärke werden nun an verschiedenen Lastwiderständen gemessen. Beide Solarmodule sind in Reihe zu schalten. Die Messschaltung ist ebenfalls in Abbildung 5 gegeben. Für die

Messung sind $d = 50 \text{ cm}$ und $U_{\text{Lampe}} = 200 \text{ V}$ zu verwenden. Stromstärke und Spannung ist für Widerstände $R = 0, 30 \Omega, 90 \Omega, 120 \Omega, 150 \Omega, 200 \Omega, 250 \Omega, 300 \Omega, 400 \Omega, 500 \Omega, 700 \Omega, 1000 \Omega$ zu erfassen.

3. Hinweise zur Auswertung

Kalibrieren der Beleuchtungsstärke

Die Kalibrierkurven $E_V(U_{\text{Lampe}})$ und $E_V(d)$ sind graphisch darzustellen. Um zu prüfen, ob sich eine Intensitätsabhängigkeit vom Abstand entsprechend Gleichung (1), d.h. eine Proportionalität $E_V \sim \frac{1}{d^2}$ einstellt, ist es dabei zweckmäßig, die Beleuchtungsstärke über dem Quadrat des Abstandes aufzutragen. Erhält man dann eine Ursprungsgerade, so ist die Proportionalität bestätigt.

Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung

Stellen Sie Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom sowie das Produkt beider Größen über der Beleuchtungsstärke graphisch dar. Dabei ist es zweckmäßig, die jeweils gleichartigen Kurven zu den drei Schaltungsarten in einem Diagramm abzubilden. Vergleichen Sie die Kurven!

Bestimmung des Arbeitspunktes und des Füllfaktors

Berechnen Sie die an den jeweiligen Lastwiderständen umgesetzte elektrische Leistung und stellen Sie diese über dem Lastwiderstand dar. Der $P(R)$ -Kurve können Sie den Widerstand des optimal angepassten Verbrauchers und somit auch die maximale Leistung P_{MPP} entnehmen. Stellen Sie schließlich Ihre Strom- und Spannungswerte analog zu Abb. 4 dar und markieren Sie den Arbeitspunkt der Solarzelle. Nutzen Sie Gleichung (3) zur Berechnung des Füllfaktors.