

VERSUCHSANLEITUNG FÜR DAS ANFÄNGERPRAKTIKUM

Kennlinien einer Solarzelle

20. Februar 2025

Raum MD147

Inhaltsverzeichnis

1	Informationen	2
1.1	Stichworte	2
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Halbleitertheorie	4
2.2	p - n Übergang	5
2.3	Kennlinien einer Solarzelle	6
3	Versuchsaufbau	8
4	Versuchsdurchführung	9
5	Auswertung	10
5.1	Aufgabe 1	10
5.2	Aufgabe 2	10
5.3	Aufgabe 3	10
5.4	Aufgabe 4	11

Abbildungsverzeichnis

1	pn -Übergang im Energiebanddiagramm	5
2	Aufbau einer Silizium-Solarzelle.	6
3	Strom-Spannung-Kennlinie einer Solarzelle.	7
4	Versuchsaufbau.	8
5	Schaltung zur Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie.	8
6	Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung als Funktion der Bestrahlungsstärke J	9
7	Spektrum der Sonne und einer Glühlampe	11

1 Informationen

1.1 Stichworte

- Halbleiter, p - n -Übergang
- Innenwiderstand
- Fotoleitender Effekt
- Akzeptor, Donatoren

- Valenzband, Leitungsband

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Halbleitertheorie

Der Hauptbestandteil einer Solarzelle ist der **Halbleiter**, da dieser Teil das Licht in Elektrizität umwandelt. Halbleiter können aufgrund der Struktur ihrer Elektronenenergieniveaus Sonnenenergie in Strom umwandeln.

Elektronenenergieniveaus werden im Allgemeinen in zwei Bänder eingeteilt: das „Valenzband“ und das „Leitungsband“. Das Valenzband enthält die höchsten besetzten Elektronenenergieniveaus, während das Leitungsband die niedrigsten unbesetzten Elektronenenergieniveaus enthält.

Der Energieunterschied zwischen dem oberen Ende des Valenzbandes und dem unteren Ende des Leitungsbandes wird als „Bandlücke“ (E_g) bezeichnet. In einem Leiter gibt es keine Bandlücke, da das Valenzband nicht vollständig gefüllt ist, sodass sich die Elektronen frei durch das Material bewegen können. Isolatoren haben sehr große Bandlücken, die zum Überwinden große Mengen an Energie benötigen, und behindern daher die Bewegung von Elektronen vom Valenzband zum Leitungsband.

Die Bandlücke in Halbleitern ist relativ klein, sodass einige Elektronen in das Leitungsband gelangen können, wenn die geringe Energiemenge zugeführt wird.

Diese kleine Bandlücke ermöglicht es einigen Halbleitern, mithilfe von Licht Elektrizität zu erzeugen. Wenn die Energie eines Photons größer ist als die Bandlücke, wird es absorbiert – ein Elektron wandert vom Valenzband in das Leitungsband. Dieser Vorgang wird als „Anregung“ bezeichnet. Durch das Elektron im Leitungsband entsteht im Valenzband ein unbesetzter Zustand. Dieser wird als „Loch“ bezeichnet und verhält sich wie ein Teilchen, das einem Elektron im Leitungsband ähnelt (jedoch mit positiver Ladung).

Aufgrund ihrer entgegengesetzten Ladung werden das angeregte Elektron und das Loch durch die Coulomb-Wechselwirkung in einem Zustand gebunden, der als „Exziton“ bezeichnet wird. Dieses Exziton muss gespalten werden (auch als „Dissoziation“ bezeichnet), bevor die Ladungsträger gesammelt und genutzt werden können. Die dafür erforderliche Energie hängt von der Dielektrizitätskonstante des Materials ab. Diese beschreibt den Grad der Abschirmung zwischen den Ladungen in einem Halbleitermaterial und beeinflusst die Bindungsenergie des Exzitons.

Sobald die Ladungen getrennt sind, diffundieren sie zu den Elektroden der Zelle (wo sie gesammelt werden) – dies wird durch eingebaute und angelegte elektrische Felder unterstützt. Das eingebaute elektrische Feld eines Geräts entsteht durch die relativen Energieniveaus der Materialien, aus denen die Zelle besteht.

Bei anorganischen Halbleitern wie Silizium werden dem Halbleiter häufig andere Materialien hinzugefügt (ein Prozess, der als Dotierung bezeichnet wird), um Bereiche mit hoher (n-Typ) und niedriger (p-Typ) Elektronendichte zu erzeugen. Wenn diese Bereiche in Kontakt stehen, bauen sich auf beiden Seiten der Grenzfläche Ladungen auf, wodurch ein elektrisches Feld entsteht, das vom n-Typ- zum p-Typ-Bereich gerichtet ist.

2.2 p - n Übergang

Reines Silizium wird absichtlich mit drei- und fünfwertigen Fremdatomen „verunreinigt“ (*dotiert*), um einen p - oder n -Typ-Halbleiter herzustellen. Bringt man einen p - und einen n -Typ-Kristall zusammen, entsteht ein Übergang (p - n Übergang), dessen elektrische Eigenschaften die Leistung der Solarzelle bestimmen.

Im Gleichgewicht (ohne äußere Spannung) liegen die Fermi-Energieniveaus sowohl für p - als auch für n -Material auf demselben Wert. Aufgrund der unterschiedlichen Konzentrationen von Elektronen und Löchern in den p - und n -Regionen diffundieren Elektronen in die p -Region und Löcher in die n -Region. Die unbeweglichen Verunreinigungsatome erzeugen einen ladungsbegrenzten Raumstrombereich; der Diffusionsstrom und der Feldstrom gleichen sich im Gleichgewicht aus.

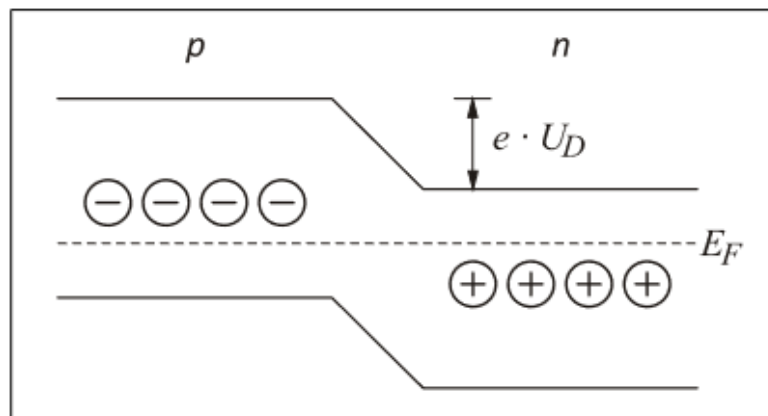


Abbildung 1: pn -Übergang im Energiebanddiagramm: - Akzeptoren, + Donatoren, U_D ist das Diffusionspotential, E_F ist das charakteristische Fermi-Energieniveau und e ist die Elementarladung.

Das Diffusionspotential U_D im pn -Übergang hängt von der Höhe der Dotierung ab und entspricht der ursprünglichen Differenz zwischen den Fermi-Energieniveaus der getrennten p - und n -Bereiche. Der Abstand zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband in Silizium bei Raum Temperatur beträgt $\Delta E = 1.1 \text{ eV}$. Für Silizium das Diffusionspotential ist $U_D = 0.5 \dots 0.7 \text{ V}$.

Wenn Licht auf den pn -Übergang fällt, erzeugen die Photonen Elektron-Loch-Paare, die durch die Raumladung getrennt sind. Die Elektronen werden in das n -Gebiet und die Löcher in das p -Gebiet gezogen. Die Photonen werden nicht nur im pn -Übergang, sondern auch in der darüber liegenden p -Schicht absorbiert. Die Elektronen sind Minoritätsträger in diesen Bereichen: Ihre Konzentration wird durch Rekombination stark verringert und damit auch ihr Wirkungsgrad. Die p -Schicht muss daher ausreichend dünn sein, damit die Elektronen mit Diffusionslänge l_e in die n -Schicht eindringen können.

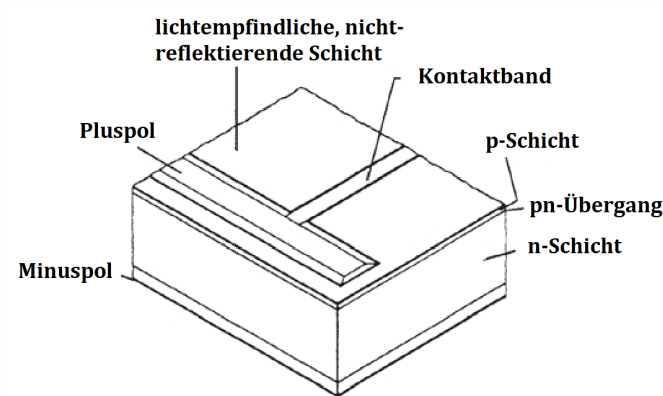


Abbildung 2: Aufbau einer Silizium-Solarzelle.

($l_e \gg d_p$, d_p - Dicke der p -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

$$i = e \cdot \left(\frac{eU}{kT} - 1 \right) \left(\frac{n_0 D_E d_p}{L_E^2} + \frac{p_0}{L_L} \right) - ep \quad (1)$$

mit

- e - Elementarladung
- k - Boltzmann-Konstante
- T - Temperatur
- L - Diffusionslänge von Elektronen und Löchern
- n_0, p_0 - Gleichgewichtskonzentrationen der Minoritätsträger

2.3 Kennlinien einer Solarzelle

Werden die äußeren Metallkontakte kurzgeschlossen, fließt ein Kurzschlussstrom I_S in Sperrrichtung 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

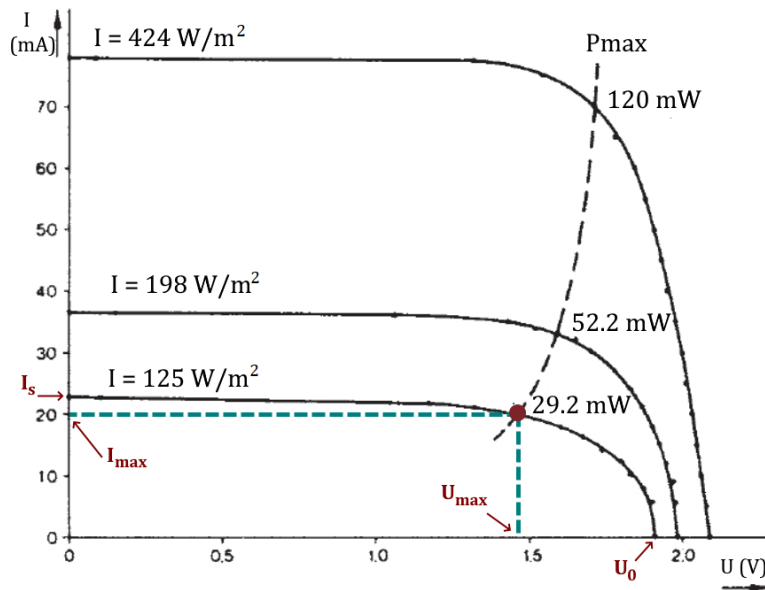


Abbildung 3: Strom-Spannung-Kennlinie einer Solarzelle.

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 abhängigen Strom I_S in Sperrrichtung und dem von der Klemmenspannung U abhängigen Strom I_D der unbeleuchteten Halbleiterdiode in Durchlassrichtung

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

Auf diese Weise ergeben sich die charakteristischen Strom-Spannungs-Kennlinien einer Solarzelle. 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

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

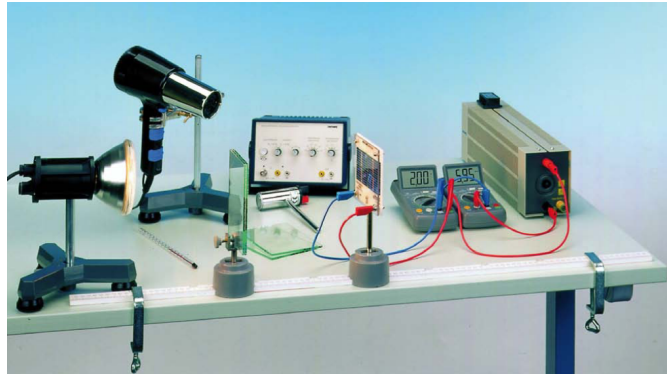


Abbildung 4: Versuchsaufbau.

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

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

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.

3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 dargestellt. Stellen Sie die elektrischen Anschlüsse wie in Abb. 5 gezeigt her.

Beachten Sie, dass die Thermosäule nur das Licht der Lampe misst, die Solarzelle jedoch auch das diffuse Licht erkennt, das von Reflexionen auf der Tischplatte stammt. Daher kann das diffuse Licht vom Tisch die Genauigkeit der Messungen beeinträchtigen, wenn es nicht vollständig unterdrückt wird.

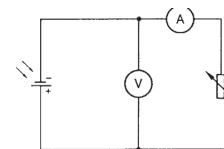


Abbildung 5: Schaltung zur Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie.

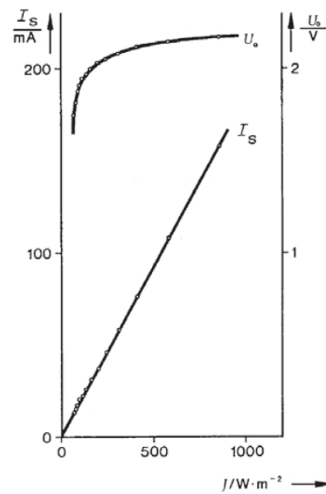


Abbildung 6: Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung als Funktion der Bestrahlungsstärke J .

4 Versuchsdurchführung

Die Lichtintensität wird durch Veränderung des Abstands zwischen Lichtquelle und Solarzelle variiert. Zunächst wird die Lichtintensität mit Thermosäule und Verstärker bei unterschiedlichen Abständen zur Lichtquelle gemessen. (Hinweis: Die maximale Ausgangsspannung des Verstärkers beträgt 10 V). Die Einlassöffnung markiert die Position der Thermosäule.

Der Abstand zwischen Lampe und Thermosäule sollte mindestens 50 cm betragen, da der Öffnungswinkel der Thermosäule nur 20° beträgt. Um den Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften der Solarzelle zu unterdrücken, halten Sie sie während des Experiments mithilfe des Kaltluftgebläses auf Raumtemperatur. Um den Temperatureinfluss zu demonstrieren, blasen Sie heiße Luft über die Solarzelle und messen Sie die Temperatur direkt davor mit einem Thermometer. Berühren Sie die Zelle nicht, da ihre dünne p-Schicht leicht beschädigt werden kann.

Der Abstand zwischen Lampe und Solarzelle muss mehr als 50 cm betragen, da bei geringeren Abständen der durch Strahlung verursachte Temperaturanstieg die Messung verfälschen könnte. Führen Sie die Messung der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstroms durch.

5 Auswertung

5.1 Aufgabe 1

Für diese Aufgabe wird angenommen, dass das gesamte in die Blende (Durchmesser 2,5 cm) einfallende Licht die Messfläche erreicht. Die Empfindlichkeit beträgt 0,16 mV/mW. Berechnen Sie die Bestrahlungsstärke J ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) der Thermosäule und stellen Sie die Abhängigkeit von J als Funktion der Entfernung s grafisch dar. Verwenden Sie in der entsprechenden Software eine doppelt logarithmische Skala (oder doppelt logarithmisches Funktionspapier). Ermitteln Sie den Exponenten anhand der Steigung des erhaltenen Diagramms und interpretieren Sie die Ergebnisse.

Abb. 6 zeigt die Beziehung zwischen der Lichtintensität und dem Kurzschlussstrom und der Leerlaufspannung.

Die Solarbatterie, die aus vier in Reihe geschalteten Zellen besteht, hat somit eine maximale Leerlaufspannung von 2 V. Der Kurzschlussstrom ist proportional zur Lichtintensität.

$$I_S = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ A/Wm}^{-2} \cdot J \quad (5)$$

Die Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Lichtintensitäten J ist in Abb. 3 dargestellt. Die maximale Leistungsabgabe liegt an den Wendepunkten der Kurven (durch die gestrichelte Linie verbunden; Abb. 3), an denen der Lastwiderstand den gleichen Wert wie der Innenwiderstand R_i der Solarbatterie hat.

Der Innenwiderstand nimmt mit zunehmender Lichtstärke ab. Vergleicht man die maximale Leistungsabgabe mit der einfallenden Leistung, so erhält man einen Wirkungsgrad von ca. 6 % (Fläche der Solarbatterie 50 cm^2).

5.2 Aufgabe 2

Bei der Messung des Einflusses der Temperatur auf U_0 und I_S muss die Temperaturverteilung über dem Heißluftbereich berücksichtigt werden. Die Messungen können hierfür nur eine grobe Größenordnung liefern.

Für die Analyse bewerten Sie die Variation der Leerlaufspannung mit heißer und kalter Luft $\frac{\Delta U_0}{\Delta T}$.

Durch die Anzahl der Zellen (4) teilen, um den Wert für eine Zelle zu erhalten.

5.3 Aufgabe 3

Eine Glasplatte, die Licht im Infrarotbereich absorbiert, kann verwendet werden, um einen Temperaturanstieg der Solarbatterie zu reduzieren. Messen und vergleichen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinien der Solarbatterie in den folgenden Betriebsmodi:

- mit Gebläsekühlung

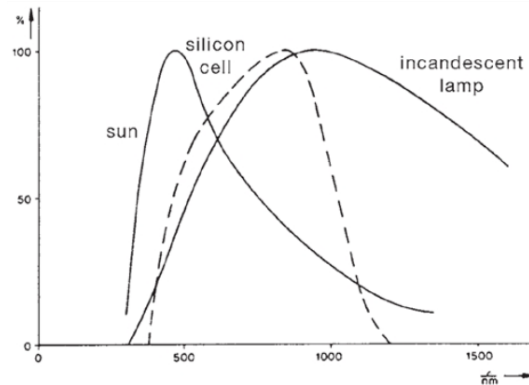


Abbildung 7: Spektrum der Sonne (T ca. 5800 K) und einer Glühlampe (T ca. 2000 K) sowie die spektrale Empfindlichkeit der Silizium-Solarzelle.

- ohne Gebläsekühlung
- mit Abschirmung durch eine Glasplatte

5.4 Aufgabe 4

Sonnenlicht, das auf Solarzellen fällt, erzeugt andere Kennlinien als Glühlampenlicht. Der Grund liegt in den unterschiedlichen Spektren der beiden Lichtquellen (Abb. 7). Bei gleicher Lichtintensität erzeugt Sonnenlicht einen höheren Kurzschlussstrom. Da der Infrarotbereich des Spektrums des Sonnenlichts kleiner ist, erwärmt sich die Solarzelle nicht so stark und die Messungen mit und ohne Kühlung liefern die gleichen Eigenschaften für Sonnenlicht.