

## Versuchsanleitung F 2 : Solarzelle II

### 1 Einleitung

Die senkrecht einfallende Sonnenstrahlungsleistung pro Quadratmeter beträgt (außerhalb der Erdatmosphäre) rund 1,4 kW (Solarkonstante). Auf die Erde treffen somit rund 180 Millionen Gigawatt.

Im Vergleich dazu wird gegenwärtig weltweit nur eine etwa zehntausendfach geringere Leistung aus verschiedenen Energieträgern erzeugt und verbraucht. Wenn auch nur etwa die Hälfte der o. g. Strahlungsleistung der Sonne die Erdoberfläche erreicht und davon der überwiegende Teil wegen der Unzugänglichkeit der bestrahlten Flächen nicht nutzbar ist - der uns derzeit schon zugängliche Teil der Sonnenstrahlung ist eine riesige, regenerative und saubere Energiequelle.

Zur Nutzung dieser primären Sonnenenergie werden unter anderem Solarzellen eingesetzt. Sie wandeln die Sonnenenergie unmittelbar in die gut handhabbare Elektroenergie. Nachteilig beim Einsatz von Solarzellen sind ihr geringer Wirkungsgrad und die noch relativ hohen Kosten ihrer Herstellung.

Im vorliegenden Praktikumsversuch lernen Sie die Arbeitsweise einer Solarzelle kennen und messen ihre Leistungsparameter.

### 2 Grundlagen

Solarzellen, Photoelemente und Photodioden unterscheiden sich nicht grundlegend im physikalischen Wirkprinzip. Ihre Parameter und ihre Betriebsbedingungen dagegen sind für das jeweilige Einsatzgebiet optimiert und daher unterschiedlich. Photodioden und Photoelemente dienen i. Allg. der Strahlungsmessung, Solarzellen hingegen der quantitativen Energieumwandlung.

Der prinzipielle Aufbau entspricht dem einer Halbleiterdiode, in deren Sperrschicht jedoch Lichteinfall ermöglicht wird. Beispielsweise befindet sich auf einem p-dotierten Si-Träger eine n-dotierte Si-Schicht. Die n-Dotierung erfolgt durch den Einbau 5-wertiger Atome (z. B. des Phosphors) in das Kristallgitter des 4-wertigen Siliziums. Bei p-Dotierung werden 3-wertige Atome (z. B. des Bors) eingebaut.

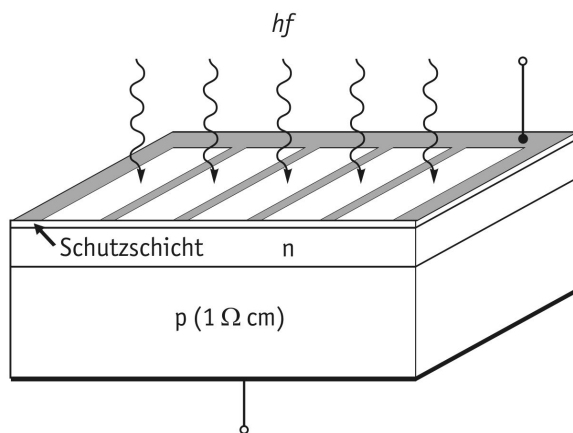


Bild 1 Aufbau einer Solarzelle

Bei Solarzellen finden wir im Gegensatz zu Photodioden großflächige Anordnungen, da die elektrische Leistung proportional mit der bestrahlten Fläche  $A'$  wächst. Auf der bestrahlten Seite sind kammartig metallische Kontaktbahnen aufgebracht, um Stromwege über das Halbleitermaterial zu verringern und eine effektive Ausleuchtung der Halbleiteroberfläche zu ermöglichen. Die n-dotierte Oberflächenschicht ist sehr dünn. Darüber ist eine reflexmindernde Schicht aufgebracht, die auch vor Witterungseinflüssen schützt.

Wir betrachten zunächst die Vorgänge im Bereich des pn-Überganges ohne Einfluss von Lichtstrahlung und ohne angelegte äußere Spannung. Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung des stromlosen pn-Überganges. Durch thermische Anregung werden bereits bei Zimmertemperatur nahezu alle Dotanten

ionisiert. Dabei löst sich jeweils ein Elektron von einem Phosphoratom und bewegt sich leicht im Gitter des Halbleiters, während das Phosphorion eine ortsfeste positive Ladung darstellt. Ganz analog nimmt ein Boratom von einem benachbarten Si-Atom ein Elektron auf und bildet damit eine ortsfeste negative Ladung. An die entstandene Fehlstelle am Si-Ion springt leicht ein benachbartes Elektron, so dass diese als positive Ladung (Loch) im Gitter leicht beweglich ist. In Bild 2 a sind die ortsfesten Ladungen durch Quadrate, die beweglichen durch Kreise gekennzeichnet.

Elektronen sowie Löcher sind gleichermaßen gut beweglich und demzufolge bestrebt, die starken Konzentrationsunterschiede durch Diffusion auszugleichen. Elektronen wandern ins p-Gebiet, Löcher ins n-Gebiet. Der hiermit verbundene Ladungstransport heißt Diffusionsstrom. Die Teilchendiffusion in Richtung eines Konzentrationsgefälles wird durch die Wärmebewegung aktiviert. Hierauf beruht die starke Temperaturabhängigkeit der damit verbundenen physikalischen Prozesse.

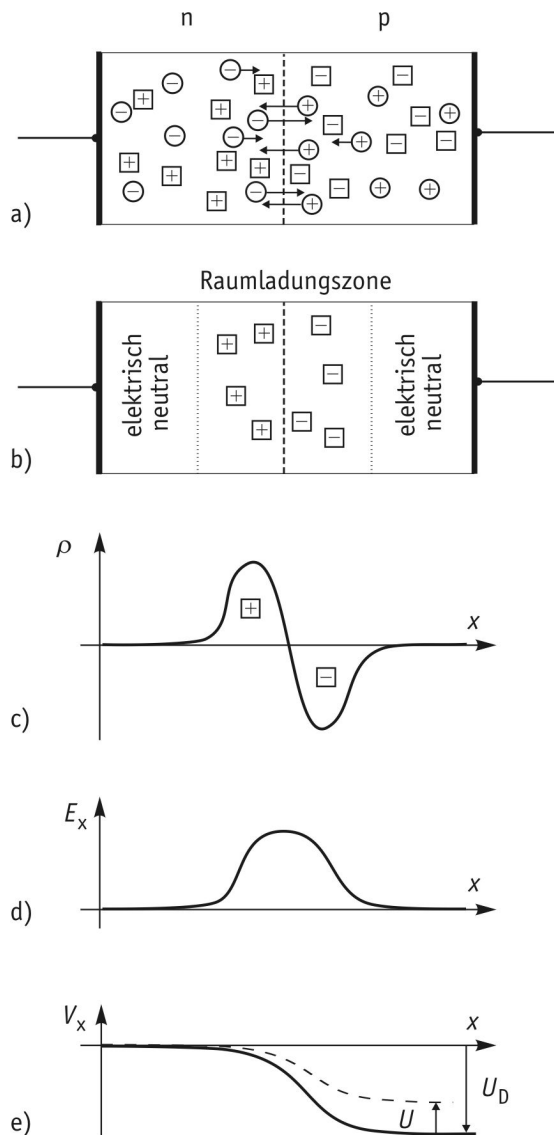


Bild 2 Wirkungsweise des pn - Überganges

Begegnen sich Elektronen und Löcher, kann ein solches Elektron-Loch-Paar (e - h - Paar) rekombinieren. Hierdurch entsteht eine an beweglichen Ladungsträgern verarmte Schicht am pn - Übergang, so dass durch die ortsfesten Dotantennionen eine Raumladung der Ladungsdichte

$$\rho(x) = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{A' dx} \quad (2-1)$$

resultiert. Die weiter entfernt liegenden Bereiche sind nach wie vor elektrisch neutral, da dort die Konzentration von Dotantennionen und freien Ladungsträgern ausgeglichen ist. Die Verhältnisse in Bild 2b sind vergleichbar mit einem aufgeladenen Kondensator. Ein Teil des p - dotierten Bereiches am pn - Übergang ist negativ geladen, gleich daneben befindet sich im n - Gebiet eine positive Ladung. Zwischen beiden ist eine an Ladungsträgern stark verarmte Zone, die somit wie ein Isolator wirkt. Die elektrisch neutralen Bereiche (sogenannte Bahngelände) sind gut leitfähig, analog den Anschlüssen eines Kondensators.

Die Raumladungen im pn - Gebiet erzeugen ein inneres elektrisches Feld

$$E_x = \frac{1}{\epsilon_0} \int \rho(x) dx \quad (2-2)$$

mit dem Potentialverlauf

$$V_x = - \int E_x dx \quad (2-3)$$

Das innere Feld bewirkt somit eine Potentialdifferenz (Diffusionsspannung  $U_D$ ) zwischen p - und n - dotierten Bereichen. Im Bereich des Feldes wirkt die Feldkraft  $F_x = \pm e E_x$  auf die dort befindlichen Löcher und Elektronen. Dies hat einen Driftstrom zur Folge, der dem Diffusionsstrom entgegengesetzt gerichtet ist. Somit wird ein Eindringen weiterer Ladungsträger in die pn - Schicht verhindert, die aus diesem Grund als Sperrschicht bezeichnet wird.

Wird eine äußere Spannung  $U$  angelegt, addieren sich  $U_D$  und  $U$ . Legt man den Minuspol an das p - dotierte Gebiet und den Pluspol an das n - dotierte, vergrößert sich die Potentialdifferenz über der Sperrschicht um diese Spannung, so dass nur ein sehr geringer Sperrstrom  $I_S$  (einige  $\mu A$ ) fließt. Entgegengesetzt gepolt (Durchlassrichtung, s. Bild 2 e) erfolgt mit zunehmender Spannung  $U$  ein rascher Anstieg des Durchlassstromes  $I_D$ , da nun äußeres und inneres Feld entgegengesetzt gerichtet sind (vgl. Kurve  $E=0$  in Bild 4). Für eine Diode gilt bei der Temperatur  $T$  mit der Boltzmannkonstanten  $k$ , dem Emissionskoeffizienten  $n$  und der Elementarladung  $e$  die SHOCKLEY-Gleichung

$$\frac{I_D}{I_S} = e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 = e^{nU_T} - 1 \quad (2-4)$$

$U_T = kT/e$  wird als *Temperaturspannung* bezeichnet. Bei Zimmertemperatur gilt  $U_T \approx 25$  mV. Für den Emissionskoeffizienten gilt in Flussrichtung  $n \approx 1 \dots 2$  und in Sperrichtung  $n \approx 2 \dots 4$ . Bestrahlt man eine p - n - Kombination mit Photonen geeigneter Wellenlänge (nahes IR und sichtbares Licht), so werden in der p - Schicht, in der Raumladungszone und auch noch in der n - Schicht durch den "inneren" Photoeffekt Elektron-Loch-Paare erzeugt, indem durch Aufnahme der Photonenenergie ein Elektron aus der Bindung zweier benachbarter Si - Atome herausgelöst wird. Zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares muss also die Bedingung

$$E_{ph} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq W_g \quad (2-5)$$

erfüllt sein, mit  $h$  - PLANCKSche Konstante,  $c$  - Lichtgeschwindigkeit,  $W_g$  - Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband (andere Bezeichnungen für  $W_g$ : Bandlücke, Breite der verbotenen Zone, gap).

Die Erzeugungsrates der Ladungsträger nimmt infolge Absorption mit zunehmender Eindringtiefe ab. Ein Teil der e - h - Paare rekombiniert sofort wieder, wobei die Energie als Wärme abgegeben wird. Nichtrekombinierte e - h -

Paare ermöglichen den Ladungstransport. Eine effektive Ladungstrennung erfolgt in der Diffusionszone, da die dort generierten Ladungsträger im Feld  $E_x$  der Raumladungen sofort auseinanderdriften. Die hierbei verrichtete Verschiebungsarbeit entspricht gerade der Diffusionsspannung  $W = eU_D$ . Die Trennung der photogenerierten Ladungsträger nennt man den "photovoltaischen" Effekt. Außerhalb der Diffusionszone generierte Minoritätsträger (also Elektronen in der p-Schicht und Löcher in der n-Schicht) diffundieren - soweit sie nicht vorher rekombinieren - zur Sperrschicht, wo sich ihre Konzentrationen aufgrund der Ladungsträgerdrift verringert haben (s. Bild 3).

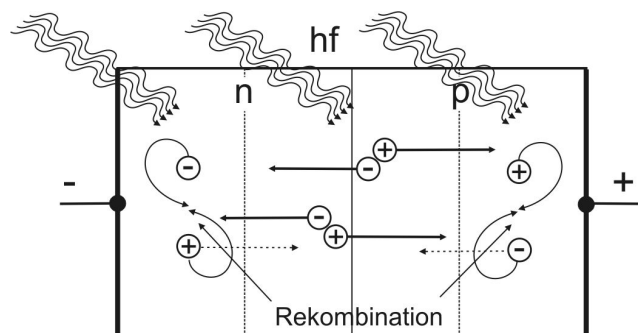


Bild 3 Photogeneration und Rekombination von Elektron-Loch-Paaren

$$U_0 = \frac{nkT}{e} \ln \left( 1 + \frac{I_K}{I_S} \right) \quad (2-6)$$

Wegen der Proportionalität von  $I_K$  zu  $E$  liegt eine logarithmische Abhängigkeit der Leerlaufspannung  $U_0$  von  $E$  vor. Mit der Temperatur  $T$  nimmt  $U_0$  ab, weil  $I_S$  mit  $T$  zunimmt.

Wird die Solarzelle mit einem Lastwiderstand beschaltet, fließt über diesen ein Strom  $I_L$  von (+) nach (-). Das durch die oben diskutierten Diffusionsprozesse hervorgerufene innere Feld wirkt also wie eine elektromotorische Kraft (EMK) einer Spannungsquelle und als eine solche ist die Solarzelle (bzw. das Photoelement) zu betrachten.

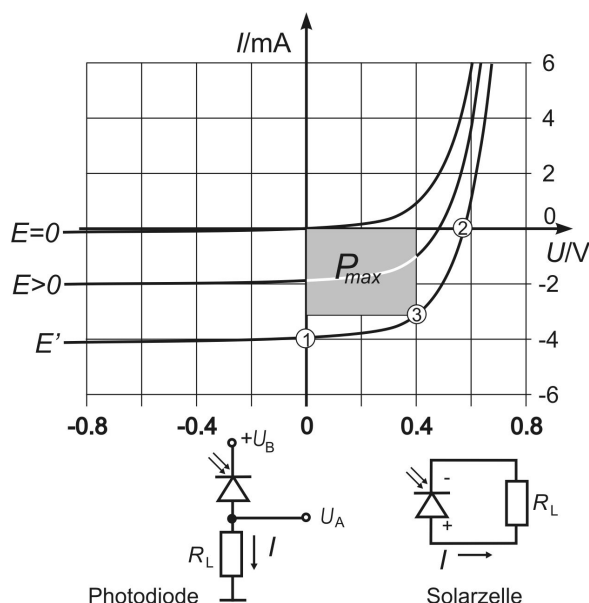


Bild 4 Kennlinien des beleuchteten pn-Übergangs mit Betriebsschaltungen als Solarzelle bzw. Photodiode

( $I=0$ , AP ②) und sind auf der  $U$ - bzw.  $I$ - Achse ersichtlich (in Diagrammen für die Solarzelle allein sind oft die Stromstärken positiv angegeben und die Kennlinien erscheinen an der  $U$ - Achse gespiegelt).

Der Arbeitspunkt wird durch den Lastwiderstand  $R_L$  i. Allg. in das Leistungsmaximum gelegt (AP ③).

Drift- und Diffusionsströme überlagern sich zum Photostrom, der innerhalb der Solarzelle von n nach p gerichtet ist.

Schließt man die Kontakte kurz, so fließt der Photostrom als Kurzschlussstrom  $I_K$  der Solarzelle von ihrem Pluspol (+) zu ihrem Minuspol (-). Er ist der Oberfläche der Solarzelle und deren Bestrahlungsstärke  $E$  proportional und nimmt mit der Temperatur geringfügig zu.

Lässt man die Kontakte offen, liegt die Leerlaufspannung  $U_0$  der Solarzelle in Durchlassrichtung an ihrer "inneren Diode". Der Durchlassstrom  $I_D$  hebt dabei den Photostrom  $I_K$  auf. Mit  $I_K = I_D$  folgt aus (2-4)

Wird eine äußere Spannung in Sperrichtung angelegt (Pluspol an n-dotierten Bereich, Minuspol an p-dotierten), fließt zusätzlich zum (i. Allg. sehr geringen) Sperrstrom ein zur Bestrahlungsstärke proportionaler Photostrom. Dies ist die Betriebsart der Photodiode (Bild 4).

Die Kurve ( $E=0$ ) in Bild 4 ist die (Dioden)-Kennlinie der unbestrahlten Solarzelle. Bei Bestrahlung wird dieser Kennlinie der Photostrom überlagert. Aufgrund seiner Richtung verringert er den Durchlassstrom und vergrößert den Sperrstrom.

Der 3. Quadrant zeigt die Betriebsbedingungen der Photodiode, im Sperrbetrieb sind die Ströme zur Bestrahlungsstärke  $E$  proportional ( $E$ -Messung).

Im 4. Quadranten sind die Betriebsbedingungen der Solarzelle (bzw. des Photoelementes) an der Kennlinie mit  $E=E'$  dargestellt.

An dem vom Strom  $I_L$  durchflossenen Lastwiderstand  $R_L$  fällt die Spannung  $U_L$  ab; in ihm wird die Leistung  $P_L = U_L \cdot I_L$  entwickelt (entspricht der getönten Fläche). Der Strom  $I_L$  ist um den der Spannung  $U_L$  zugeordneten Durchlassstrom  $I_D(U_L)$  (betragsmäßig) kleiner als  $I_K$ . Die Verhältnisse für Kurzschluss ( $U=0$ , AP ①), Leerlauf

### 3 Versuchsanordnung

Die Solarzelle und ein Strahlungsleistungsmesser sind auf einer Halterung so angebracht, dass sie abwechselnd an gleicher Stelle der Bestrahlung mit Licht ausgesetzt werden können. Die Bestrahlungsstärke  $E$  kann durch den

Abstand zur Lichtquelle verändert werden. Man bestimmt sie, indem man die vom Leistungsmesser angezeigte Strahlungsleistung  $P_r$  durch seine Empfängerfläche  $A$  teilt. Die Solarzelle ist gegen das Raumlicht ausreichend abgeschirmt und wird zum Schutz gegen zu starke Erwärmung im Luftstrom gekühlt. Die Messung von Solarzellenspannung  $U_L$  und Solarzellenstromstärke  $I_L$  erfolgt mit dem Messwandler nach Bild 5.

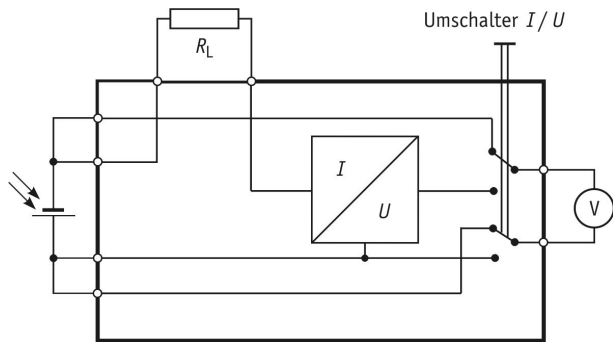


Bild 5 Prinzipschaltung des Messwandlers

An den Messwandler sind einerseits die Solarzelle und andererseits Dekadenwiderstände als verstellbarer Lastwiderstand  $R_L$  angeschlossen. In Schalterstellung [U] zeigt das angeschlossene Messinstrument die Spannung an. In Schalterstellung [I] wird die mit dem Faktor  $1\text{ V/A}$  in Spannung gewandelte Stromstärke im gleichen Messbereich wie zuvor angezeigt. Die Leitungs- und Kontaktwiderstände der Schaltung sind gegen den Lastwiderstand vernachlässigbar.

Man misst zunächst den Kurzschlussstrom (Strommessung bei kurzgeschlossenen Lastklemmen) und die Leerlaufspannung (Spannungsmessung bei offenen Lastklemmen) in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke  $E$ . Danach wählt man eine feste Bestrahlungs-

stärke  $E'$  und misst bei dieser die Solarzellenspannung  $U_L$  und den Solarzellenstrom  $I_L$  in Abhängigkeit vom Lastwiderstand  $R_L$ .

Stellt man die von der Solarzelle abgegebene Leistung  $P_L = U_L \cdot I_L$  über dem Lastwiderstand dar, so kann man das Leistungsmaximum  $P_{\max}$  finden. Es tritt dann auf, wenn Lastwiderstand  $R_L$  und Innenwiderstand  $R_i$  der Solarzelle gleich groß sind (Leistungsanpassung).

Als Wirkungsgrad  $\eta$  der Solarzelle (bei einer bestimmten Bestrahlungsstärke  $E'$ ) gibt man das Verhältnis von  $P_{\max}$  zu der auf die Solarzelle auftreffenden Strahlungsleistung  $P_{\text{auf}}$  an. Diese steht zu der mit dem Leistungsmesser gemessenen Leistung  $P_r$  im Verhältnis der Empfängerflächen von Solarzelle und Leistungsmesskopf.

#### 4 Aufgaben

- 4.1 Messung des Kurzschlussstromes  $I_K$  und der Leerlaufspannung  $U_0$  einer Solarzelle in Abhängigkeit von ihrer Bestrahlungsstärke  $E$ .
- 4.2 Messung des Sperrstroms  $I_S$  einer unbeleuchteten Solarzelle.
- 4.3 Bestimmung des Emissionskoeffizienten  $n$  der Solarzelle.
- 4.4 Bestimmung des Wirkungsgrades  $\eta$  der Solarzelle bei Leistungsanpassung.
- 4.5 Aufnahme von  $I - U$  - Kennlinien der Solarzelle mit  $E$  als Parameter.

#### 5. Fragen

- 5.1 Erläutern Sie die Begriffe "Eigenleitung" und "Störstellenleitung".
- 5.2 Erklären Sie an einer Prinzipskizze (zweidimensionale Veranschaulichung) des Siliziumgitters den Leitfähigkeitsmechanismus bei p- und n-dotiertem Material.
- 5.3 Skizzieren Sie den Aufbau und kennzeichnen Sie Plus- und Minuspol einer bestrahlten Solarzelle.
- 5.4 Erläutern Sie die Entstehung der Diffusionsspannung am pn-Übergang.
- 5.5 Zeichnen Sie das Kennlinienfeld von Solarzelle/Photodiode.
- 5.6 Eine punktförmige Lichtquelle  $Q$  der Strahlstärke  $I$  befindet sich im Abstand  $r$  über einer horizontalen Ebene  $E$ . Welche Bestrahlungsstärke erzeugt sie auf  $E$  im Punkte  $P$  lotrecht unter  $Q$  (mit Skizze)?
- 5.7 Geben Sie je eine (kurze) Beschreibung des inneren und äußeren photoelektrischen Effektes?
- 5.8 Was verstehen Sie unter dem photovoltaischen Effekt?
- 5.9 Was versteht man unter Leistungsanpassung bei einer belasteten Spannungsquelle?
- 5.10 Eine Solarzelle wird mit Licht der Wellenlänge  $550\text{ nm}$  bei einer Lichtleistung von  $1,5\text{ W}$  bestrahlt. Der Maximalstrom beträgt  $I_K = 100\text{ mA}$ . Wie hoch ist der Prozentsatz  $\Phi$  der Lichtquanten, die ein Elektron-Loch-Paar erzeugen, deren Ladung über den Strom messbar wird, bezogen auf die Gesamtheit der einfallenden Lichtquanten (Quantenausbeute)?

#### Literatur

- [ 1 ] Schenk/Kremer (Hrsg.): Physikalisches Praktikum Springer Spektrum, Heidelberg, Wiesbaden, 2014
- [ 2 ] Hering, E. u. a.: Physik für Ingenieure Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012