

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E6
Institut für Physik	Solarzelle	Seite 1

1. Aufgabenstellung

- 1.1. Die Strom-Spannungs-Kennlinien einer Silizium-Solarzelle ohne und mit Beleuchtung sind aufzunehmen und miteinander zu vergleichen.
- 1.2. Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke der Solarzelle sind in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke zu messen und in geeigneten Diagrammen darzustellen.
- 1.3. Die maximal abgegebene elektrische Leistung, optimaler Lastwiderstand, Füllfaktor und Wirkungsgrad der Solarzelle sind bei zwei verschiedenen Bestrahlungsstärken zu ermitteln.

Literatur:	Eichler, H. J. Kronfeldt, H.-D. Sahm, J.	Das Neue Physikalische Grundpraktikum Springer Berlin, Heidelberg, New York 2. Auflage 2006, S. 301-309
	Schenk., W. Kremer, F. (Hrsg.)	Physikalisches Praktikum Vieweg+Teubner Verlag Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 13. Auflage 2011, S. 220-224
	Becker, J. Jodl, H.-J.	Physikalisches Praktikum für Naturwissenschaftler und Ingenieure, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1. Auflage 1991, S. 98-102

2. Grundlagen

Klassifiziert man Stoffe bezüglich ihrer elektrischen Leitfähigkeit, dann nehmen die so genannten *Halbleiter* eine Stellung zwischen Isolatoren und beispielsweise Metallen ein. Bei reinen Halbleitern wird eine geringe elektrische Leitfähigkeit durch thermische Anregung von Valenzelektronen der Gitterbausteine hervorgerufen. Sie stehen für eine kurze Zeit als *Leitungselektronen* zur Verfügung (n-Leitung) und hinterlassen ein *Defektelektron* bzw. Loch, das durch andere Valenzelektronen aufgefüllt werden kann, wodurch es zu einer scheinbaren Bewegung von positiven Ladungsträgern kommt (p-Leitung). Die elektrische Leitfähigkeit eines eigenleitenden Halbleiters ist stark temperaturabhängig.

Gezielter Einbau von Fremdatomen mit einer anderen stöchiometrischen Wertigkeit als der der Atome des Wirtsgitters führt zu einer drastischen Veränderung des Leitfähigkeitstyps. In Silizium verhalten sich dreiwertige Atome (B, Al) als *Akzeptoren* und verursachen eine p-Leitung, während fünfwertige Atome (P, As) zu *Donatoren* werden und n-Leitung hervorrufen. Man unterscheidet jetzt zwischen den die Leitfähigkeit bestimmenden Majoritätsladungsträgern und den in ihrer Konzentration stark herabgesetzten Minoritätsladungsträgern. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist das Produkt der Konzentration beider Ladungsträgersorten eine temperatur- und stoffabhängige Konstante (Massenwirkungsgesetz).

Mithilfe geeigneter technologischer Verfahren wie Diffusion oder Ionenimplantation kann man innerhalb eines Kristalls p- und n-leitende Gebiete in unmittelbare Nähe bringen und so einen *pn-Übergang* erzeugen. Das hieraus resultierende starke Konzentrationsgefälle für die beweglichen Ladungsträger setzt elektronische Diffusionsprozesse in Gang, welche ortsfeste ionisierte Atomrümpfe der Dotanden hinterlassen und zu elektrischen Raumladungsgebieten führen. Die Halbleitertheorie liefert Grundlagen für ein anschauliches so genanntes Bändermodell, welches die energetischen Verhältnisse in der Nähe eines pn-Übergangs verdeutlicht (Abb. 1). Man muss hierzu noch wissen, dass Elektronen sich nur in bestimmten Energiebändern aufhalten können. Zwischen ihnen existiert eine *Bandlücke* mit der

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E6
Institut für Physik	Solarzelle	Seite 2

Gapenergie E_G . Auf Grund der vorherrschenden elektrischen Felder mit einem daraus resultierenden Potentialverlauf sind die Ränder der Bandlücke (Bandkanten) energetisch verkrümmt.

Im thermodynamischen Gleichgewicht ohne äußere Spannung kompensieren sich Diffusions- und Feldstrom, darüber hinaus kann man ein besonderes Energieniveau, das Fermienergie E_F , definieren, welches horizontal durch die betrachtete Struktur verläuft. Elektronische Zustände am Fermienergie sind im Mittel zur Hälfte besetzt.

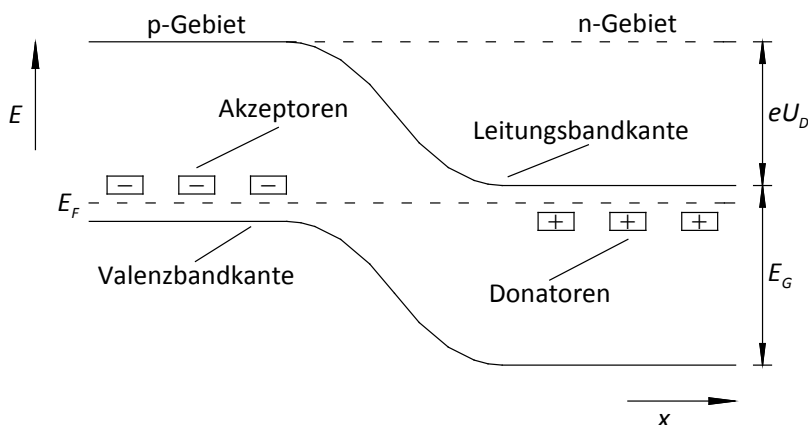


Abb. 1: pn-Übergang im Energiebändermodell

Die Diffusionsspannung U_D des pn-Übergangs ist außer vom Wirtsmaterial von der Konzentration der Dotanden abhängig, sie entspricht der ursprünglichen Differenz der Fermienergien im p- und n-Gebiet. Bei Raumtemperatur hat Silizium beispielsweise einen Bandabstand $E_G = 1,1\text{eV}$, U_D beträgt typischerweise $0,5\text{V}$ bis $0,7\text{V}$.

Fällt Licht auf den pn-Übergang, dann erzeugen die absorbierten Photonen Elektron-Loch-Paare im Halbleiter (*innerer lichtelektrischer Effekt*), welche im elektrischen Feld sofort getrennt werden und zu den angrenzenden Bahngebieten driften. Durch geeignete Wahl der Dotierungskonzentrationen (niedrig dotiertes Substratmaterial, hoch dotierte Deckschicht, Abb. 2) versucht man, die Dicke des pn-Übergangs so einzustellen, dass ein möglichst großer Teil des auftreffenden Lichtes in diesem Gebiet absorbiert wird. Außerhalb des pn-Übergangs erzeugte Ladungsträger tragen nur dann zum Photostrom bei, wenn sie diesen als Minoritätsladungsträger durch Diffusion erreichen. Aus diesem Grund sind die Dicken der Bahngebiete geringer als die Diffusionslängen der entsprechenden Ladungsträger.

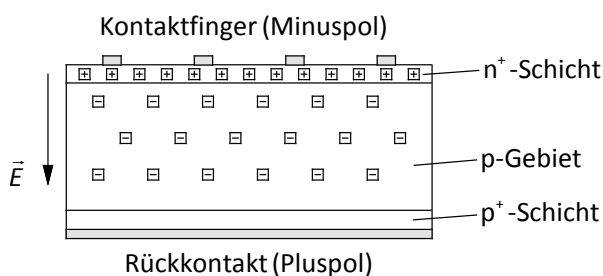


Abb. 2: Aufbau einer Solarzelle

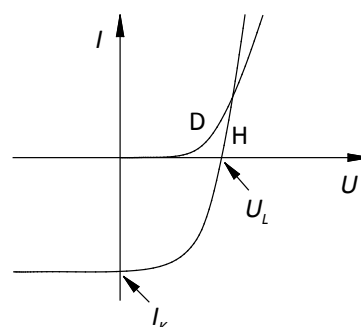


Abb. 3: I-U-Kennlinien ohne (D) und mit (H) Beleuchtung

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E6
Institut für Physik	Solarzelle	Seite 3

Wird ein beleuchteter pn-Übergang an einen äußeren Stromkreis angeschlossen, dann fließt, abhängig von der erzwungenen Klemmenspannung U , ein Strom von Elektronen und Löchern mit der Stärke

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] - I_k \quad (1)$$

I_s ist dabei der Sperrsättigungsstrom, der Ausdruck $I_s \left[\exp(eU/kT) - 1 \right]$ beschreibt den Dunkelstrom. Charakteristische Parameter von Solarzellen bei einer vorgegebenen Beleuchtung sind *Kurzschlussstrom* I_k und die *Leerlaufspannung* U_L mit $U_L < U_D$. Für Spannungen größer als die Leerlaufspannung verliert der pn-Übergang seine Wirkung und die Photoleitung im Volumen führt zu einem Überwiegen des Hellstromes (Abb.3, I. Quadrant). Für $U \leq 0$ (III. Quadrant) arbeitet das Bauelement als Photodiode und ist wegen der Proportionalität zwischen Photostrom und Bestrahlungsstärke für Strahlungsmessungen verwendbar.

Bei Anwendung als Solarzelle wird keine äußere Spannungsquelle angeschlossen, die Anordnung arbeitet als Stromgenerator (IV. Quadrant). An einen mit der Solarzelle verbundenen Verbraucher wird die elektrische Leistung $P_{el} = UI$ abgegeben, die bei optimalem Verbraucherwiderstand ein Maximum erreicht. An diesem Arbeitspunkt definiert man den Füllfaktor

$$FF = \frac{P_{el,max}}{U_L I_k} \quad (2)$$

der bei guten Zellen Werte um 0,8 erreicht. Er wird wesentlich durch Rekombination der Ladungsträger sowie parasitäre Parallel- und Serienwiderstände bestimmt. Ein weiteres Qualitätsmerkmal ist der Zellenwirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{el,max}}{AJ} \quad (3)$$

mit A - Zellenfläche und J - Bestrahlungsstärke.

3. Messanleitung und Auswertung

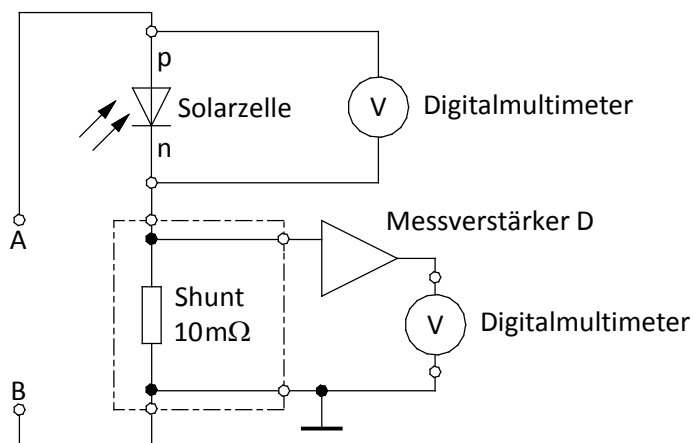


Abb. 4: Prinzipielle Messschaltung

Die bei diesem Versuch eingesetzte monokristalline Si-Solarzelle ist ein niederohmiges Bauelement. Der Aufbau des Strommesskreises wird daher über Gabelkabelschuhe und feste Verschraubungen an den Messbuchsen realisiert. Für die Spannungsmessung an der Zelle benötigte Steckverbindungen werden danach aufgestöpselt (Abb. 4).

Über einen niederohmigen Messwiderstand (Shunt) fällt nur eine geringe Spannung ab, sie wird deshalb mit einem empfindlichen Messverstärker, am

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E6
Institut für Physik	Solarzelle	Seite 4

besten um den Faktor 100, nachverstärkt und dann mit einem Digitalmultimeter zur Anzeige gebracht.

Achtung: Der analoge „Messverstärker D“ darf nicht in einem der Strom- oder Ladungsmessbereiche betrieben werden!

Die abgelesenen Spannungen sind zu notieren und müssen für die weitere Auswertung in die korrekten Stromwerte umgerechnet werden.

3.1. Zur Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie bei Anlegen einer äußeren Spannung werden die Kabelverbindungen A und B an das regelbare Netzgerät geschraubt, B ist mit dem Masseanschluss zu verbinden. Vor dem Einschalten des Gerätes ist zu überprüfen, ob sich das Einstellpotentiometer in seiner Mittenstellung (Skalenwert 5,00) befindet.

Für die Messung der Dunkelkennlinie muss die Solarzelle mit der Abdeckvorrichtung abgedunkelt werden, für die Hellmessung wird die am Versuchsplatz vorhandene Glühlampe (230V, 120W) in einer Entfernung von $r = 0,8\text{m}$ zur Zelle aufgestellt. Als Entfernung zählt der Abstand zwischen Solarzellenoberfläche und dem Zentrum der Streuscheibe der Glühlampe. Zur einfacheren Ermittlung dieser Größe erfolgte die Konstruktion des Solarzellenhalters so, dass Zellenoberfläche und markierte Fläche des optischen Reiters (aufgeklebter Pfeil) in einer Ebene liegen.

Messbereich für diesen Versuchsteil: $U = (-0,6 \dots \approx +0,6)\text{V}$

Von $(-0,6 \dots +0,2)\text{V}$ genügt eine Schrittweite von $\Delta U = 0,1\text{V}$, bis etwa $+0,4\text{V}$ wird aller $0,05\text{V}$ gemessen, danach sind die Spannungsschritte so anzupassen, dass hinreichend viele Punkte auf der steil ansteigenden Strom-Spannungs-Kurve erfasst werden. Bei einem Zellenstrom von $I = 3\text{A}$ ist die Messung zu beenden.

Beide Kennlinien sind in ein gemeinsames Diagramm einzuzeichnen und ihre Unterschiede zu diskutieren. Wenn zur grafischen Darstellung das Praktikumsprogramm benutzt wird, eignet sich hierfür am besten die „Interpolation mittels kubischer Splines“.

3.2. Sowohl Kurzschlussstrom I_k als auch die Leerlaufspannung U_L einer Solarzelle sind abhängig von der Bestrahlungsstärke J . Für die Messung beider Kenngrößen eignet sich die aufgebaute Schaltung nach Abb. 4, indem man die Kabelenden A und B für den Kurzschlussfall miteinander verbindet und für den Leerlauf einfach offen lässt. Nicht benötigte Leitungen können aber auch aus der Schaltung entfernt werden, wichtig ist nur, dass bei der Bestimmung des Kurzschlussstromes die verbleibende Zellenspannung kontrolliert wird ($U \leq 50\text{mV}$). Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung sind für verschiedene Abstände r zwischen Lampe und Solarzelle aufzunehmen und in Diagrammen $I_k(J)$ und $U_L(J)$ als Funktion der Bestrahlungsstärke darzustellen. Der Zusammenhang $J = f(1/r^2)$ ist dem im Anhang der Versuchsanleitung abgebildeten Diagramm (Abb. 5) zu entnehmen.

Entfernungsbereich der Glühlampe: $0,6\text{m} \leq r \leq 1,6\text{m}$

Zur Vermeidung einer übermäßigen Erwärmung der Solarzelle ist die Messung bei großen Abständen zu beginnen und möglichst zügig durchzuführen.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch E6
Institut für Physik	Solarzelle	Seite 5

3.3. Die Strom-Spannungs-Kennlinien bei unterschiedlicher Belastung werden wieder mit der Messschaltung nach Abb. 4 aufgenommen, die Kabelschuhe A und B verbindet man hierzu mit dem einstellbaren Dekadenwiderstand. Dieser ist zunächst auf $R=0\Omega$ einzustellen, danach kontrolliert man bei eingeschalteter Beleuchtung die Realisierung des Kurzschlussfalls.

Abstände Lampe – Solarzelle: $r_1 = 1,0\text{ m}$ und $r_2 = 0,8\text{ m}$

Es werden folgende Messparameter empfohlen:

Der Dekadenwiderstand ist bis $R=1,0\Omega$ in $0,1\Omega$ -Schritten zu vergrößern, danach in $0,2\Omega$ -Schritten bis $R=2,0\Omega$. Die Messwerte sind in einem gemeinsamen Diagramm $I(U)$ darzustellen, die entnommene Leistung P_{el} ist zu berechnen und für beide Lampenentfernungen in einem Diagramm $P_{el} = P_{el}(U)$ darzustellen. Optimaler Lastwiderstand R_o , Füllfaktor FF und Wirkungsgrad η sind jeweils für den Arbeitspunkt maximaler Leistung anzugeben. Die für die Ermittlung des Wirkungsgrades benötigte Zellenfläche A ist selbst zu bestimmen.

Zur Berechnung der Unsicherheiten sind die am Versuchsplatz ausliegenden Herstellerangaben zu den Messgeräten sowie die Unsicherheiten der Regressionsparameter für die Bestimmung der Bestrahlungsstärke heranzuziehen. Für die Kombination Shunt, analoger Messverstärker und Digitalmultimeter wurde die Unsicherheit für Strommessungen mit 1,5% vom Anzeigewert ermittelt.

4. Anhang

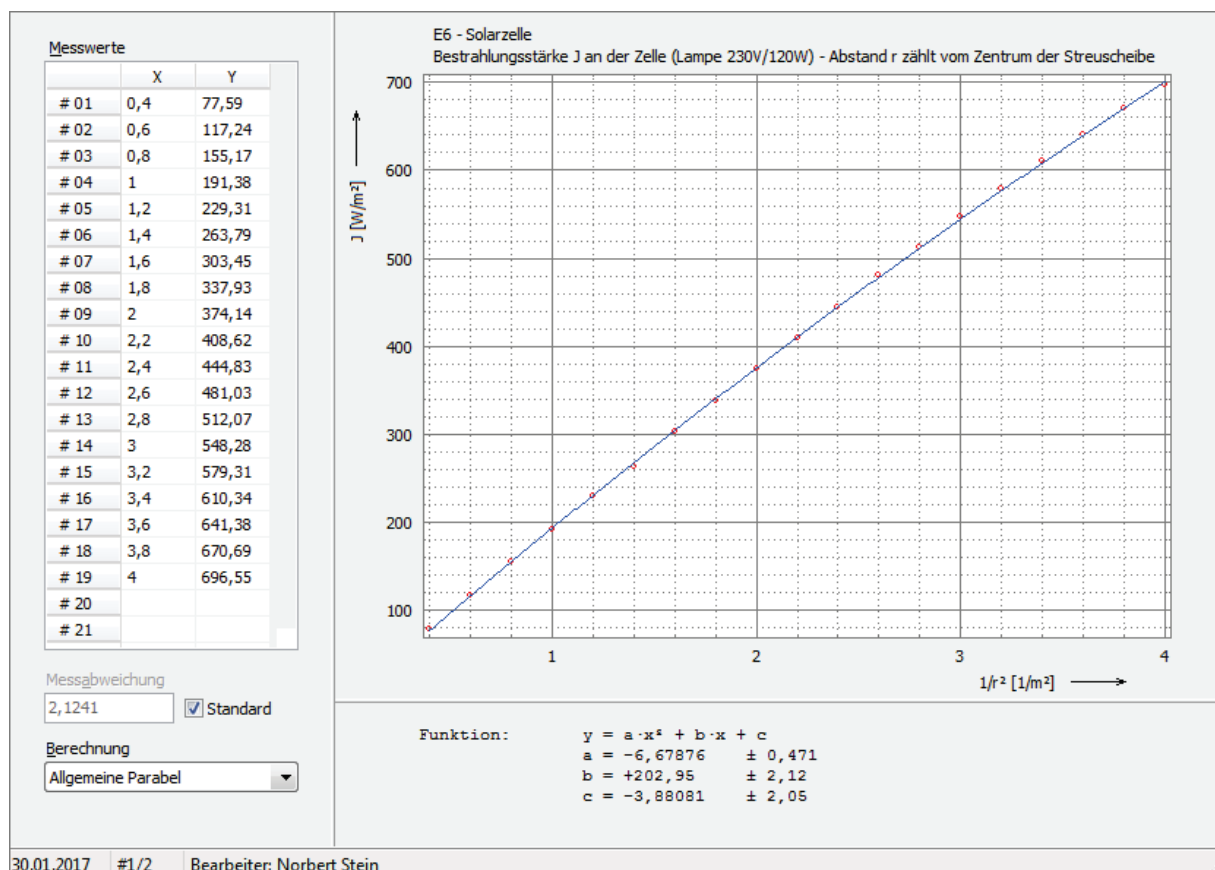


Abb. 5: Kalibrierkurve zur Berechnung der Bestrahlungsstärke