

## E-11 – Solarzellen

(Version 1.1 – 22. Mai 2020)

Die nachhaltige Deckung unseres stetig zunehmenden Energiebedarfs gehört zu den wichtigsten Herausforderungen unserer Zeit. Photovoltaikanlagen leisten dabei einen zunehmenden Beitrag zur Stromerzeugung in Deutschland. Im Rahmen dieses Experiments werden die Eigenschaften von Solarzellen als Energiequellen untersucht. Dabei geht es zum einen um die Frage, wann Solarzellen am effektivsten arbeiten, d. h. unter welcher Last die Leistung maximal ist. Zum anderen wird ein Panel aus Solarzellen als Spannungsquelle benutzt am Beispiel der Untersuchung von elektrischen Bauteilen.

### Dioden

Vereinfacht ausgedrückt versteht man unter einer Diode ein elektronisches Bauteil, das den Strom nur in eine Richtung leitet. Dioden bestehen aus einem Halbleitermaterial, das in geeigneter Weise dotiert ist. Dabei werden gezielt Fremdatome in das Material implantiert, die eine höhere (n-Dotierung) bzw. niedrigere Valenz (p-Dotierung) haben als die Atome des Halbleiters, wodurch man die elektronischen Eigenschaften des Materials im Hinblick auf die gewünschte Anwendung manipulieren kann.

Bei einem *pn-Übergang* bringt man einen p- und einen n-dotierten Halbleiter in Kontakt. Dabei baut sich ein elektrisches Feld innerhalb des Materials auf, da die Ladungsträger vom einen in den jeweils anderen Bereich des Kristalls wandern. Legt man hieran eine externe Spannung in *Durchlassrichtung* an, wird dieses Feld abgeschwächt, so dass bereits eine geringe externe Spannung genügt, um das innere Feld zu kompensieren und schließlich einen Strom fließen zu lassen. In *Sperrrichtung* hingegen wird das innere Feld verstärkt, was zunächst einen nennenswerten Stromfluss verhindert. Erst oberhalb der *Durchbruchspannung* kann die Diode auch in Sperrrichtung leitend werden. Dies führt allerdings bei den meisten Dioden zur Zerstörung des Bauteils. Die charakteristische Abhängigkeit der Stromstärke von der angelegten Spannung,  $I(U)$  bezeichnet man als die *Kennlinie* der Diode.

Vorbereitung: An welchen Pol muss man die p- und n-Seite der Diode für Durchlassrichtung anschließen?

### Solarzellen

Solarzellen sind Halbleiterdioden, die mithilfe des inneren photoelektrischen Effekts die Energie von einfallender Strahlung in elektrische Energie umwandeln können. Daher kann eine Solarzelle als Spannungsquelle genutzt werden.

Im Detail ist die Funktionsweise einer Solarzelle vom jeweiligen Typ abhängig. Das grundlegende Prinzip unterscheidet sich jedoch nicht: Das Halbleitermaterial, häufig wird Silizium verwendet, ist dotiert, d. h. es werden Atome in das Material implantiert, die sich in der Valenz vom Halbleitermaterial unterscheiden. Implantiert man ein Atom mit einer um eins höheren Valenz in einen Halbleiter, so können nicht alle Elektronen dieses Atoms Bindungen mit den Atomen des Halbleitermaterials ausbilden und ein Elektron bleibt frei beweglich. Hierbei spricht man von n-Dotierung. Implantiert man umgekehrt ein Atom mit einer um eins niedrigeren Valenz, so fehlt für die Bindung ein Elektron und man erhält ein positives Loch, das durch ein Elektron aus einer anderen Bindung aufgefüllt werden kann. Dadurch liegt hier ein frei bewegliches positiv geladenes Loch vor; dies wird als p-Dotierung bezeichnet.

Wie oben beschrieben, kommt es beim Kontakt von p- mit n-dotierten Halbleitern zu einem elektrischen Feld innerhalb des Materials. Bei einer Solarzelle ist die mit Licht beschienene Seite n-dotiert, die Rückseite p-dotiert. Fällt nun Licht auf die Solarzelle, dringt es in das Material ein und erzeugt dort Elektron-Loch-Paare, also Ladungsträger. Durch das innere elektrische Feld werden Elektron und Loch voneinander getrennt und in entgegengesetzte Richtungen gezogen. Dieser Ladungstransport innerhalb der Zelle kann nun durch das Schließen eines Stromkreises zwischen der Vorder- und Rückseite der Solarzelle kompensiert und der elektrische Strom genutzt werden.

## Spannungsquellen

Eine Strom- oder Spannungsquelle dient zur Energieversorgung einer elektrischen Schaltung. D.h. hier wird entweder zuvor gespeicherte Energie (z.B. Kondensator), oder aber direkt durch Umwandlung aus einer anderen Energieform (Solarzelle: Licht  $\rightarrow$  elektrische Energie) gewonnene elektrische Energie zur Verfügung gestellt.

Ideale Stromquellen liefern unabhängig von angeschlossenen Verbrauchern immer denselben Strom  $I$ , ideale Spannungsquellen immer dieselbe Spannung  $U$ . Diese Idealisierung kann in der Praxis, bedingt durch den *Innenwiderstand*  $R_i$  niemals erreicht werden. Im Folgenden ist mit einer Spannungsquelle immer eine *reale* Spannungsquelle gemeint.

Die Leistung  $P$ , die an einem an der Spannungsquelle angeschlossenen Lastwiderstand umgesetzt wird ist gegeben durch

$$P = U_{\text{Last}} \cdot I$$

und hängt von der Dimensionierung des angeschlossenen Verbrauchers, d. h. des Lastwiderstandes  $R_{\text{Last}}$  ab ( $U_{\text{Last}} = R_{\text{Last}} \cdot I$ ). Daraus resultiert eine für die jeweilige Spannungsquelle übliche Leistungscharakteristik  $P(R_{\text{Last}})$ , welche bei einem bestimmten Wert des Lastwiderstandes ein Maximum aufweist.

*Vorbereitung:* Für welchen Wert von  $R_{\text{Last}}$  wird die Leistung maximal? Begründen Sie dies anhand einer Rechnung. Als Ausgangspunkt wird das Ohmsche Gesetz  $U = R \cdot I$  auf eine Spannungsquelle mit der Quellspannung  $U_Q$  und dem Innenwiderstand  $R_i$  angewandt, an welche ein Lastwiderstand  $R_{\text{Last}}$  angeschlossen ist.

## Beleuchtung

Zur Durchführung der Experimente sollte die Beleuchtung der Solarzellen bestimmte Bedingungen erfüllen. So sollte die Beleuchtung nicht nur über die Zeit weitestgehend konstant sein, sondern bei Experimenten mit einem Solarpanel auch so gewählt sein, dass alle Solarzellen gleichmäßig beschienen werden. Letztere Bedingung wird durch das Tageslicht in der Regel hinreichend erfüllt. Erstere Bedingung hängt dagegen vom Wetter sowie Tages- und Jahreszeit ab. Weiterhin haben diese Größen einen Einfluss auf die Leistung der Solarzellen, da eine höhere Intensität einen größeren Strom zur Folge hat. Daher steht für den Fall, dass das Tageslicht keine guten Bedingungen für das Experiment bietet, die an der der Wand montierte Lampe zur Verfügung.

*Vorbereitung:* Unter welchen Bedingungen ist es sinnvoll, auf die Lampe als Lichtquelle zurückzugreifen?

## Vorversuch

Das Ziel des Vorversuchs ist herauszufinden, ob das Tageslicht die notwendigen Bedingungen für die Durchführung der Experimente erfüllt.

## Durchführung

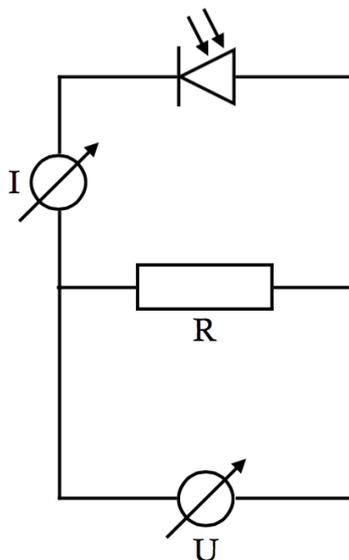


Abbildung 1: Schaltbild des Vorversuchs

Um die Intensitäten von Lampe und Tageslicht zu vergleichen wird eine Solarzelle über ein Amperemeter an einen Lastwiderstand ( $1,5 \Omega$ ) angeschlossen (s. Abb. 1). Der Spannungsabfall  $U$  über diesen Widerstand wird mit dem Voltmeter gemessen.

- Sowohl bei Beleuchtung durch Tageslicht als auch durch die Lampe wird je ein Wertepaar für Strom  $I$  und Spannung  $U$  aufgenommen. Berechnen Sie jeweils die Leistung.
- Die in der Vorbereitungsaufgabe gefunden Bedingungen für die Durchführung der Messung mit Tageslicht (subjektiv) sollen überprüft und die Ergebnisse aufgelistet werden.

## Auswertung

- Es soll entschieden werden, ob das Experiment mit Tageslicht durchgeführt werden kann.
- Die Entscheidung soll kurz (1-2 Sätze) begründet werden.

## Experiment 1: Leistungscharakteristik von Solarzellen

Im ersten Experiment soll untersucht werden, wie sich die Leistung von Solarzellen in Abhängigkeit von einer angehängten Last, also einem Widerstand verhält. Dies soll zunächst für eine einzelne Solarzelle und anschließend für ein Solarpanel aus 6 in Reihe geschalteten Solarzellen untersucht werden.

## Durchführung

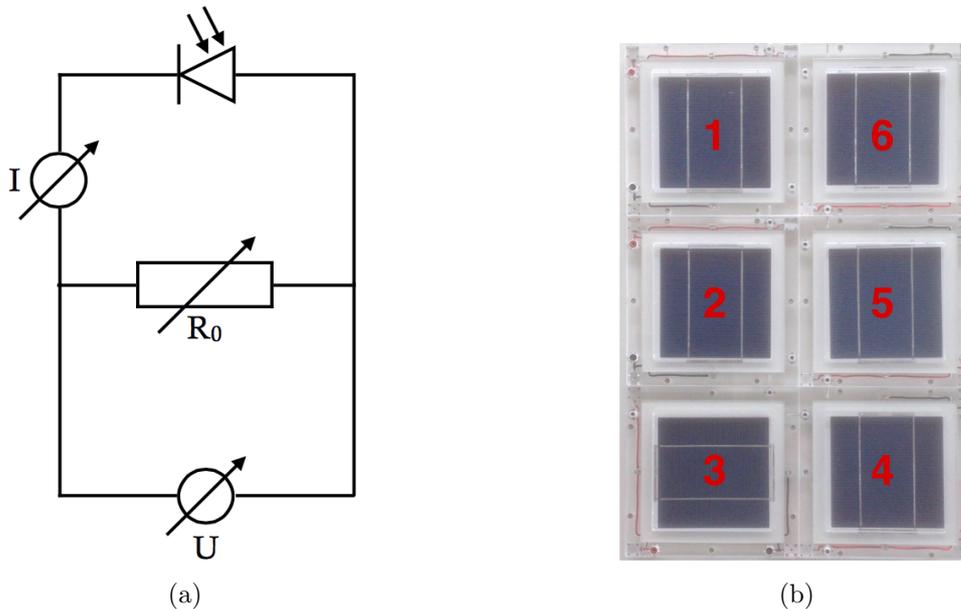


Abbildung 2: Schaltbild des Aufbaus zur Messung der Leistungscharakteristik (a) einer einzelnen Solarzelle sowie eines Panels aus 6 in Reihe geschalteten Solarzellen (b).

Eine Solarzelle wird über ein Amperemeter an den Lastwiderstand  $R_0$  (hierzu wird der 100  $\Omega$  10-Gang Widerstand verwendet) angeschlossen (s. Abb. 2a). Mit einem Voltmeter wird der Spannungsabfall  $U$  über den Lastwiderstand gemessen.

- Die Leistungscharakteristik  $P(R)$  einer einzelnen Solarzelle soll bestimmt werden.
- Es werden 10 Wertepaare von Spannung  $U$  und Strom  $I$  gemessen. Mithilfe des Potentiometers kann der Lastwiderstand  $R_0$  variiert und somit die Spannung eingestellt werden.

Vorbereitung: Wo sollten sinnvollerweise mehr/weniger Werte aufgenommen werden?

Vorbereitung: Welchen Nutzen kann man in der praktischen Anwendung aus der Kenntnis der Leistungscharakteristik ziehen?

Nun soll die Leistungscharakteristik eines Solarpanels untersucht werden.

**Achtung:** Die Solarzellen dürfen nur durch an-/auseinanderverschieben auf dem Tisch liegend verbunden bzw. getrennt werden. Anordnungen aus zusammengesteckten Solarzellen müssen auf dem Tisch liegen bleiben.

- Schalten Sie 6 Solarzellen wie in Abb. 2b in Reihe und achten Sie darauf, die Zellen 1 und 6 nicht leitend miteinander zu verbinden.

Vorbereitung: Weshalb ist das wichtig?

- Die Solarzellen sollen möglichst gleichmäßig beleuchtet werden.
- Die Messungen werden wie bei der einzelnen Solarzelle durchgeführt.

Vorbereitung: Welche Veränderungen erwartet man für Position und Wert des Leistungsmaximums gegenüber der Messung an einer einzelnen Solarzelle?

## Auswertung

- Für eine einzelne und für 6 in Reihe geschaltete Solarzellen sollen die Leistungscharakteristiken  $P(R)$  jeweils in einem eigenen Diagramm graphisch dargestellt werden (mit Fehlerbalken!).
- Der Wert des Widerstandes, bei dem die Leistung maximal wird soll jeweils inkl. Messungengenauigkeit bestimmt werden.
- Die Ergebnisse sollen miteinander verglichen werden.

## Experiment 2: Solarzelle im Schatten

Ein alltägliches Problem bei der Stromerzeugung mit Solarzellen ist die Frage was passiert, wenn einzelne Solarzellen in einem Solarpanel im Schatten liegen. Das kann beispielsweise dann der Fall sein, wenn Herbstlaub auf dem Panel liegt.

Um einen solchen Fall zu simulieren werden Sie in diesem Versuchsteil ein Experiment aufbauen, bei dem zusätzlich zur Gesamtspannung und zur Stromstärke auch das Verhalten der Spannung an einer einzelnen Solarzelle (zunächst beschienen, dann abgeschattet) untersucht wird.

## Durchführung

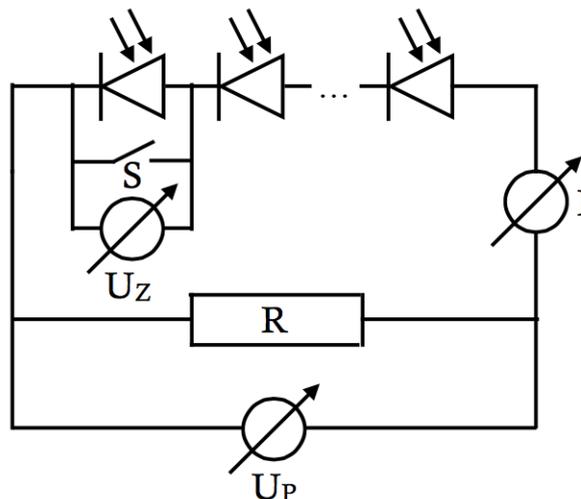


Abbildung 3: Schaltbild des Aufbaus zur Untersuchung des Effektes durch die Abschattung einer Solarzelle

Wie in Experiment 1 werden 6 Solarzellen in Reihe geschaltet (vgl. Abb. 2b) und über ein Amperemeter an einen Lastwiderstand  $R$  angeschlossen. Die Spannung  $U_P$  an diesem Widerstand wird gemessen. Zusätzlich werden die Kontakte einer Solarzelle über einen Schalter  $S$  verbunden. Der Spannung  $U_Z$  über diese Solarzelle wird mit einem Voltmeter gemessen.

- Bauen Sie die Schaltung wie in Abb. 3 auf. Zur Messung der Spannungen  $U_P$  über die gesamte Anordnung und  $U_Z$  über die einzelne Solarzelle werden die Digitalmultimeter verwendet. Bei der Wahl des Lastwiderstandes soll das Ergebnis aus Experiment 1 berücksichtigt werden.

- Es ist darauf zu achten, dass bei allen Versuchsteilen die gleichen Beleuchtungsverhältnisse gewährleistet sind!
- Die Werte für  $I$ ,  $U_P$  und  $U_Z$  sollen gemessen und inkl. Messungenauigkeiten protokolliert werden. Dabei muss der Schalter S geöffnet bleiben.
- Nun wird die Solarzelle, über die die Spannung  $U_Z$  gemessen wird mit der dafür vorgesehenen Platte abgeschattet und die obigen Messungen zunächst bei geöffnetem und anschließend bei geschlossenem Schalter S wiederholt.

### Auswertung

- Die vom Solarpanel erbrachte Leistung soll jeweils berechnet und mit den experimentellen Ungenauigkeiten angegeben werden.
- Vergleichen Sie die gemessenen Werte für  $U_Z$  der einzelnen Versuchsteile sowohl quantitativ als auch qualitativ.
- Wie kann man bei einer Solaranlage dem Problem der Abschattung begegnen?

## Experiment 3: Solarzellen als Spannungsquelle

In diesem abschließenden Versuchsteil sollen die Solarzellen nun als Spannungsquelle für ein Diodenexperiment genutzt werden. Die Solarzellen - selber Halbleiterdioden - stellen dabei die Spannung für die Bestimmung der Diodenkennlinie  $I(U)$  zur Verfügung.

### Durchführung

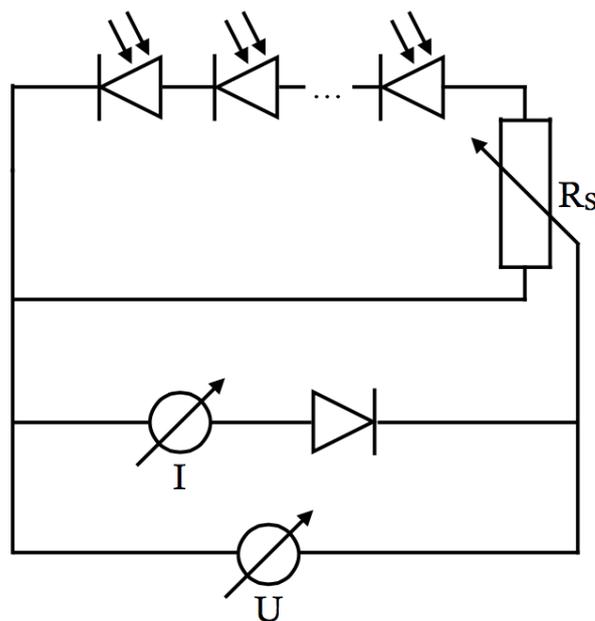


Abbildung 4: Schaltbild des Aufbaus zur Messung der Diodenkennlinien.

Sechs Solarzellen dienen in Reihe geschaltet als Spannungsquelle und versorgen einen Spannungsteiler  $R_S$ . An den Spannungsteiler wird über ein Amperemeter eine Diode angeschlossen.

Der Spannungsabfall  $U$  über die Diode kann dann mit dem Spannungsteiler eingestellt werden. Er wird mit einem Voltmeter gemessen.

- Die Schaltung soll mit einer beliebigen Diode wie in Abb. 4 aufgebaut werden.
- Mithilfe des Potentiometers wird die Spannung an der Diode eingestellt und jeweils zusammen mit der Stromstärke und den jeweiligen Messungenauigkeiten protokolliert. Die Werte der Spannungen sollen sinnvoll gewählt werden.
- Es muss jeweils in Durchlass- und in Sperrrichtung gemessen werden (insgesamt 10 - 15 Werte)!
- Die Diode soll durch eine abgeschattete Solarzelle ersetzt werden, um deren Kennlinie analog zur Diodenkennlinie aufzunehmen.

### Auswertung

- Die Kennlinien  $I(U)$  von Diode und Solarzelle sollen jeweils in einem eigenen Diagramm (inkl. Fehlerbalken) graphisch dargestellt werden.
- Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse.

### Zusammenfassung und Diskussion

Das Versuchsprotokoll soll mit einer Zusammenfassung des Experimentes und einer Bewertung der Messergebnisse abgeschlossen werden. Welche Erkenntnisse hat dieses Experiment geliefert? Nebenfachstudenten sollen einen Bezug herstellen zu ihrem Hauptfach, Lehramtsstudenten zur Erfahrungswelt eines Schülers.