

## A5 Eigenschaften von Solarzellen – Spannung, Strom und Leistung

Hinweis: Auf die Auswertungen zu den einzelnen Teilerperimenten wird nachfolgend nur dann eingegangen, wenn sich dabei erfahrungsgemäß besondere Schwierigkeiten ergeben könnten.

### 1 Erste Erkundungen mit der Solarzelle

#### 1.5 Auswertung

Zähle auf, welche Einflussfaktoren die Leistung einer Solarzelle bestimmen.

**Hinweis:**

Die Einflussfaktoren sind:

- a) Beleuchtungsstärke
- b) Abstand der Lichtquelle von der Solarzelle
- c) Einfallswinkel des Lichts

Die Beleuchtungsstärke spielt eine Rolle, weil der Strom letztlich durch das Auftreffen der Lichtstrahlen (bzw. Lichtteilchen, Photonen) auf die einzelnen Atome der Solarzelle entsteht. Das heißt, nur die Atome, die beleuchtet werden, tragen zur Stromerzeugung bei. Die Leistung der Zelle wird besser, wenn sie bestmöglich beleuchtet ist, d. h. die Beleuchtungsstärke möglichst groß ist.

Bei Durchführung des Experiments mit einer Glühlampe wird die Beleuchtungsstärke am größten sein, wenn die Distanz zur Solarzelle am geringsten ist. Der Abstand zur Lichtquelle beeinflusst die Stromproduktion insofern, als die Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat des Abstandes zur Lichtquelle abfällt. D. h. je näher man die Lampe an die Solarzelle heranrückt (z. B. die Entfernung auf die Hälfte reduziert), desto höher wird die Lichtintensität (z. B. bei Halbierung des Abstands vervierfacht sich die Intensität). Mit Sonnenlicht können wir diesen Entfernungseffekt allerdings nicht erfassen, denn aufgrund des ungeheuren Abstands der Erde zur Sonne ist an jedem direkten Einstrahlungsort gleicher Länge und Breite zum selben Zeitpunkt die Helligkeit praktisch gleich. Die Leistung der Solarzelle wird aber auch schlechter, wenn die Lichtstrahlen nicht senkrecht auf die Solarzelle auftreffen. Diese Winkelabhängigkeit der Leistung beruht auf der Winkelabhängigkeit der Energieeinstrahlung. Bei senkrechtem Einfall, so lautet das Naturgesetz, ist der Energieeintrag der Strahlung am höchsten. Deshalb liefert die senkrecht bestrahlte Solarzelle auch die höchste Leistung.

#### 1.6 Fragen

Erläutere, wie Solarzellen an Häusern anzubringen sind, damit sie möglichst effektiv genutzt werden können.

**Antwort:** Beim Ausrichten von Solarzellen an Häusern ist insbesondere der Winkel zu beachten, den die Solarzellen zur Sonne bilden, da Solarzellen sehr unterschiedliche Leistungen bringen, je nach Einfallswinkel (nicht-linearer Zusammenhang zwischen Winkel und Leistung). Der Sonnenstand wird im Horizontsystem durch den Azimutwinkel und den Höhenwinkel bestimmt. Das Azimut gibt den Richtungswinkel der Sonne an, der von der Nordrichtung ausgehend in der Horizontebene im Uhrzeigersinn gemessen

wird. Der Höhenwinkel ist der Winkel, mit dem der Beobachter die Sonne über dem Horizont sieht. Im Idealfall werden die Solarmodule beweglich angebracht und automatisch dem Sonnenstand so nachgeführt, dass das Licht immer senkrecht auftrifft. Werden sie dagegen unbeweglich angebracht, ist eine Ausrichtung exakt nach Süden in der Regel optimal. Denn dann bekommt das Solarmodul morgens und abends aus Osten bzw. Westen schräges Licht und bekommt mittags bei höchstem Sonnenstand die volle Einstrahlungsleistung ab. Welcher Neigungswinkel über den Jahresdurchschnitt am besten ist, hängt allerdings vom Breitengrad ab. In der Mitte Deutschlands z. B. beträgt dieser optimale Neigungswinkel ca.  $35^\circ$ .

Im Einzelfall sind allerdings auch klima- und wetterbedingte Eigenheiten des Standorts zu berücksichtigen. D. h. wenn in der Region z. B. die Sonne nur am Morgen scheint und es am Nachmittag meist bewölkt ist, dann werden die Solarzellen eher in Richtung der aufgehenden Sonne gerichtet.

## 2 Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung bei unterschiedlichem Abstand zur Lampe

### 2.5 Auswertung

- a) Beschreibe, wie der Abstand und damit die Beleuchtungsstärke die gemessene Stromstärke und Spannung beeinflussen.

**Hinweis:** Die Stromstärke sollte quadratisch zum wachsenden Abstand abfallen, d. h. die Messpunkte im Diagramm, in dem Stromstärke gegen Abstand zur Lampe aufgetragen werden, sollten eine Parabel bilden. Die Spannung sollte ungefähr linear abfallen, d. h. die Messpunkte sollten entlang einer Geraden liegen.

- b) Nenne, was sich bei veränderten Lichtverhältnissen stärker verändert: Die Stromstärke oder die Spannung.

**Hinweis:** Die Messkurven machen deutlich, dass die Stromstärke wesentlich sensibler von der Beleuchtungsstärke abhängt als die Spannung.

### 2.6 Fragen

Man kann eine Solarzelle dazu benutzen, die Beleuchtungsverhältnisse an einem Ort zu messen. Welche Größe eignet sich dafür besser, die Stromstärke oder die Spannung? Begründe deine Antwort.

**Antwort:** Da die Stromstärke wesentlich empfindlicher gegen sich verändernde Lichtverhältnisse ist, eignet sie sich besser zur Bestimmung der Beleuchtungsverhältnisse.

### 3 Was passiert, wenn man Solarzellen in Reihe oder parallel schaltet?

#### 3.5 Auswertung

Wenn zwei Solarzellen verwendet werden, wird doppelt so viel elektrische Energie aus dem Licht erzeugt. Eigentlich würde man erwarten, dass der Solarmotor sich – unabhängig von der Verschaltung – mit zwei Solarzellen immer deutlich schneller dreht als mit einer. Erkläre, woran es liegen könnte, dass je nach Schaltung ein unterschiedlich großer Anteil der Energie bei dem Motor ankommt. (Tipp: Innenwiderstand der Solarzelle).

**Hinweis:** Je nach Schaltung geht mehr oder weniger elektrische Energie in Form von Wärme am Innenwiderstand der Solarzellen „verloren“. Diese Energie steht dann dem Motor nicht zur Verfügung. Verwendet man einen Solarmotor mit Anlaufspannung unter 0,5 Volt, senkt die Parallelschaltung der Solarzellen den Innenwiderstand so weit ab, dass der Solarmotor in der Regel mit dieser Schaltung schneller laufen wird.

#### 3.6 Fragen

- a) Erkläre, warum sich die Leistung der Solarzelle bei Parallel- und Reihenschaltung unterschiedlich verhält.

**Antwort:** Betrachten wir die Solarzellen ohne(!) Last, also ohne angeschlossenen Nutzer, gilt theoretisch: Zwei parallel geschaltete Zellen liefern dieselbe Spannung und den doppelten Strom, umgekehrt liefern zwei in Reihe geschaltete Zellen die doppelte Spannung und denselben Strom. Die Leistung als Produkt aus Spannung und Stromstärke bliebe also konstant. (Siehe Ergebnis von Telexperiment 4). Das legt den Trugschluss nahe, dass es egal ist, ob wir unseren Motor in Parallel- oder Reihenschaltung betreiben.

Welcher Strom bzw. welche Spannung nun aber tatsächlich unter Last von der Solarzelle geliefert wird, hängt davon ab, wie groß der Innenwiderstand der Solarzelle im Vergleich zum Lastwiderstand (= Motor) ist. Tatsächlich ist der Innenwiderstand einer einzelnen 150-mA-Solarzelle im Vergleich zu dem Innenwiderstand der meisten Verbraucher sehr groß. Auch unser Solarmotor hat einen sehr niederen Innenwiderstand, sodass bei Reihenschaltung der Solarzellen aufgrund des hohen Innenwiderstands ein Großteil der Leistung in den Solarzellen verloren geht. Schalten wir die Solarzellen dagegen parallel, sinkt der Innenwiderstand und der Solarmotor wird mit höherer Leistung laufen.

Doch Vorsicht: Es gibt auch andere Verbraucher, die anders als unser Solarmotor nicht „stromkontrolliert“, sondern „spannungskontrolliert“ sind. Dies ist z. B. bei einer roten LED der Fall. Sie hat eine ähnliche Nennleistung wie unser Solarmotor, benötigt aber mindestens 1,6 Volt. Hier nützt Parallelschaltung der Solarzellen also nichts, sondern wir müssten in diesem Fall sogar vier Solarzellen in Reihe schalten, um sie zum Leuchten zu bringen.

Es gibt also keine generelle Regel, welche Art von Schaltung der Solarzellen von Vorteil ist, sondern das hängt auch vom angeschlossenen Verbraucher ab.

- b) Wie verhalten sich im Vergleich zu Solarzellen zwei Mignonzellen, die man parallel oder in Reihe schaltet?

**Antwort:** Da der Innenwiderstand einer modernen Alkalimanganzelle im Vergleich zum Lastwiderstand der meisten Verbraucher relativ klein ist, kann man sie als konstante Strom- und Spannungsquelle betrachten. Man kann also durch Reihenschaltung die Spannung und durch Parallelschaltung den Strom maximieren und erhält mit Verbrauchern wie kleinen Solarmotoren praktisch dieselbe Leistung.

## 4 Stromstärke und Spannung bei der Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen

### 4.5 Auswertung

Vergleiche das Ergebnis dieses Teilexperiments mit dem von Teilexperiment 3 (Was passiert, wenn man Solarzellen in Reihe oder parallel schaltet?) und erkläre die Unterschiede.

**Hinweis:** Dieses Experiment untersucht die Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen unter den idealisierten Bedingungen eines fehlenden Verbrauchers. Unter diesen Bedingungen sind die Verhältnisse relativ einfach. Die Reihenschaltung liefert eine Verdopplung der Leerlaufspannung, während sich bei einer Parallelschaltung die Kurzschlussstromstärke verdoppelt.

### 4.6 Fragen

- a) Begründe, warum das Produkt aus Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung nicht die wirkliche Leistung der Solarzelle ergibt.

**Antwort:** Es liegt nahe, das Produkt aus Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung als Leistung zu interpretieren. Da es sich jedoch bei Kurzschluss und Leerlauf um Messungen unter grundsätzlich unterschiedlichen Bedingungen handelt, können die Werte nicht zu einer wirklich aussagekräftigen Leistung verrechnet werden. Es werden Messungen unter Last benötigt, um eine „reale“ Leistung zu ermitteln (was dann in Teilexperiment 6 auch geschieht). Trotzdem kann man die Leistung (aus dem Produkt aus Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung) als Leitwert benutzen, um Solarzellen zu klassifizieren.

## 5 Wie verhalten sich Solarzellen in Reihen- oder Parallelschaltung bei Abschattung?

### 5.6 Fragen

- a) Begründe, warum für die Herstellung von Solarmodulen Solarzellen in Reihe geschaltet werden und diese Reihen wiederum parallel geschaltet werden.

**Antwort:** Durch diese Art der Zusammenschaltung werden Module erzeugt, die für eine sinnvolle Verwendung der gelieferten elektrischen Energie die erforderlichen Spannungs- und Stromstärken besitzen.

- b) Auf einer Internetseite zur Solartechnik findet man den Satz: „Bei der Reihenschaltung bestimmt das schwächste Modul die Gesamtleistung.“ Erläutere, was damit gemeint ist. Formuliere einen entsprechenden Satz für die Parallelschaltung.

**Antwort:** Bei der Optimierung der Spannung durch Verschaltung von mehreren Solarmodulen in Reihe geht es darum, zu vermeiden, dass an einem einzelnen abgeschatteten Modul fast die gesamte Leistung abfällt. Dann würden nämlich in diesem einzelne Zellen „durchschmoren“, d. h. sie würden zerstört. Deshalb werden Schutzdioden parallel zu den Modulen geschaltet, die bei einem abgeschatteten Solarmodul automatisch durchschalten und es so überbrücken.

Dasselbe gilt auch für die Zusammenschaltung von Modulen: Das Modul mit der schwächsten Leistung erzeugt den größten Widerstand. Da der Gesamtwiderstand in einer Reihenschaltung durch die Summe der Widerstände gegeben ist, spielen die größeren Widerstände eine größere Rolle als die kleinen. Bei der Parallelschaltung wäre der Satz „Bei der Parallelschaltung bestimmt das stärkste Glied die Gesamtleistung.“ Einerseits gilt, dass die maximale Leistungsübertragung zwischen Stromquelle und Verbraucher dann stattfindet, wenn Widerstand des Verbrauchers und Innenwiderstand der Stromquelle gleich groß sind. Andererseits hängen die Leistung der Solarmodule und damit ihr Innenwiderstand letztlich von der Sonneneinstrahlung ab.

Deshalb ist die Stromrichtereinheit, die jede Solaranlage besitzt, um den Solarstrom ins öffentliche Netz einzuspeisen, nie auf konstante Leistung ausgelegt. Denn das würde heißen, der Lastwiderstand wäre konstant und der Innenwiderstand der Solaranlage schwankte ständig mit der Sonneneinstrahlung. Sie würden also fast nie optimal zueinander passen. Moderne Solarstromanlagen besitzen deshalb in dem Stromrichter eine zusätzliche Regelelektronik, die den Lastwiderstand und damit die nutzbare Leistung automatisch an die momentan verfügbare Leistung der Solaranlage anpasst.

- c) Tina möchte am Solarwettbewerb teilnehmen. Dazu muss sie ein Boot bauen, das mit einem Ventilator angetrieben wird. Sie darf maximal 4 Solarzellen (0,5 Volt, 100 mA) verwenden. Der Motor hat eine Anlaufspannung von 0,6 Volt und einen Anlaufstrom von 25 mA. Zu welcher Schaltung würdest du ihr raten, damit das Boot höchste Schnelligkeit erreicht? Begründe deine Antwort.

**Antwort:** Es müssen in diesem Fall zwei Solarzellen in Reihe (ca. 1 Volt) geschaltet sein, um die Anlaufspannung zu erreichen. Mit zwei parallelgeschalteten Solarzellen (200 mA) liegt man auch bei schwankender Sonneneinstrahlung sicher über dem Anlaufstrom. Man schaltet also jeweils 2 Solarzellen in Reihe und die Pakete dann zueinander parallel. Da sich unterschiedliche Beleuchtungsstärke stärker auf den Strom als die Spannung auswirkt (siehe Telexperiment 2), erhält man durch diese Parallelschaltung noch zusätzliche Laufsicherheit bei geringer Helligkeit.

## 6 Optimierung der Leistung von Solarzellen

### 6.5 Fragen

Die maximale Leistung wird entnommen, wenn der Widerstand eines Gerätes genau so groß ist wie der Innenwiderstand der Solarzelle. Der Innenwiderstand ist nicht konstant, sondern von der Beleuchtung abhängig. Um bei schlechteren Beleuchtungsverhältnissen eine maximale Leistung zu entnehmen, muss der Widerstand deshalb verändert werden. Entwirf ein Experiment, mit dem du prüfen kannst, ob der Widerstand des Gerätes vergrößert oder verringert werden muss, wenn sich die Beleuchtungsverhältnisse ändern.

**Antwort:** Wir arbeiten mit derselben Schaltung wie in diesem Telexperiment, verändern aber nun die Beleuchtungsstärke und drehen den Widerstand am Potentiometer stets so, dass die Spannung maximal bleibt, und messen dann den Strom. Aus der Spannung und dem gemessenen Strom bestimmen wir den jeweiligen Widerstand. Wir werden sehen, dass bei geringerer Beleuchtungsstärke ein höherer Widerstand zum Erhalt der Spannung nötig ist.