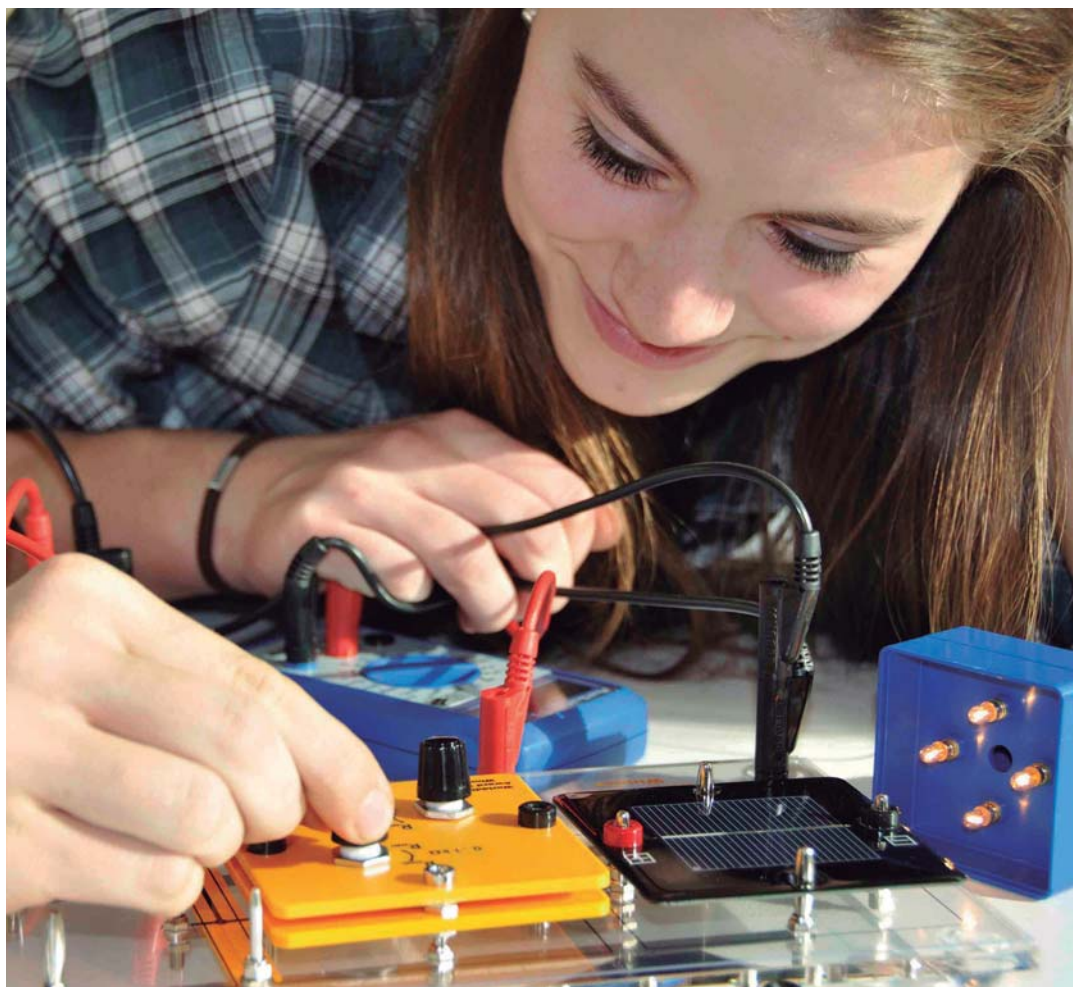


leXsolar-PV



Lehrerheft

Inhalt

1 KONZEPTION	6
2 EINLEITUNG	9
2.1 Was ist Photovoltaik?.....	9
2.2 Photovoltaik im Spektrum der erneuerbaren Energiequellen	9
2.3 Kosten.....	12
2.4 Effizienz	13
2.5 Anwendungen.....	13
2.6 Fragen.....	13
3 DAS SYSTEM LEXSOLAR-PV	14
3.1 Stückliste der in leXsolar-PV enthaltenen Geräte	14
3.2 Die Arbeit mit leXsolar-PV	15
3.2.1 Das Stecksystem.....	15
3.2.2 Die Verschaltung der Steckmodule	16
3.2.3 Die Veränderung des Einfallswinkels des Lichtes	17
3.2.4 Das leXsolar-Beleuchtungsmodul	18
3.2.5 Das leXsolar-Potentiometermodul	19
3.2.6 Der leXsolar-Solarmotor	19
3.2.7 Das leXsolar-Glühlampenmodul	19
3.2.8 Das leXsolar-Hupenmodul	20
3.2.9 Das leXsolar-Motormodul.....	20
3.2.10 Reparaturhinweise	20
3.3 Beispiele einer möglichen Einbindung der Experimente von leXsolar-PV <i>Large</i> in den Lehrplan	21
4 GRUNDLAGEN DER PHOTOVOLTAIK	24
4.1 Anforderungen an Materialien für die Photovoltaik	24
4.2 Phänomenologische Erklärung des p/n-Übergangs.....	24
4.2.1 Der Halbleiterkristall.....	24
4.2.2 Dotierung von Halbleitern.....	25
4.2.3 Der p/n-Übergang.....	26
5 PHOTOVOLTAIK FÜR FORTGESCHRITTENE	29
5.1 Bändermodell und Energielücke	29
5.2 Absorption und Absorptionsspektrum	30
5.3 Warum gibt es eine ideale Bandlücke für Solarzellen?.....	31
5.4 Eigenschaften und Verhalten der Ladungsträger im Kristall: Generation von Elektron-Loch-Paaren bei Beleuchtung	31
5.5 Aufbau der Solarzelle.....	33
6 EXPERIMENTE FÜR LEXSOLAR-PV <i>MEDIUM/GLOBAL</i>	34
6.1 Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen	35
6.1.1 Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen (phänomenologisch) (M1.1).....	35
6.1.2 Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen (quantitativ) (M1.2).....	35
6.2 Abhängigkeit der Leistung von der Fläche der Solarzelle (M2).....	35
6.3 Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (M3)	35
6.4 Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Temperatur (M4)	35
6.5 Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke (M5).....	35
6.6 Abschattung von Solarzellen (M6)	35

6.6.1 Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung 1 (M6.1)	36
6.6.2 Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung 2 (M6.2)	36
6.6.3 Abschattung von Solarzellen bei Parallelschaltung (M6.3)	36
6.7 Diodencharakter von Solarzellen (M7)	37
6.7.1 Diodencharakter von Solarzellen 1: Dunkelkennlinie (M7.1)	37
6.7.2 Diodencharakter von Solarzellen 2: Sperr- und Durchlassrichtung bei Beleuchtung und Abdunklung (M7.2).....	37
6.8 <i>U-I</i> -Kennlinie der Solarzelle (M8)	37
6.8.1 <i>U-I</i> -Kennlinie und Füllfaktor der Solarzelle (M8)	37
6.8.2 <i>U-I</i> -Kennlinie der Solarzelle in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke (M8.2).....	37
6.9 Helligkeitsunterschiede (M9)	37
6.9.1 Helligkeitsunterschiede 1 (M9.1)	37
6.9.2 Helligkeitsunterschiede 2 (M9.2)	38
6.10 Verschiedene Strahlungsarten	39
6.10.1 Diffuse Strahlung (M10.1)	40
6.10.2 Direkte Strahlung (M10.2)	41
6.10.3 Albedostrahlung (M10.3)	41
6.11 Grundaufbau: Rotationsscheiben	43
6.11.1 Farbeigenschaften (M11.1)	43
6.11.2 Farbmischung (M11.2).....	43
6.11.3 Farbtäuschung mit der Benham-Scheibe (M11.3)	45
6.11.4 Reliefscheibe (M11.4).....	46
6.12 Fliehkraft (M12)	47
7 EXPERIMENTE FÜR LEXSOLAR-PV LARGE	49
7.1 Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen (L1).....	49
7.2 Abhängigkeit der Leistung von der Fläche der Solarzelle (L2)	50
7.3 Abhängigkeit der Leistung der Solarzelle vom Einfallswinkel des Lichtes (L3)	51
7.4 Abhängigkeit der Leistung der Solarzelle von der Beleuchtungsstärke	56
7.4.1 Abhängigkeit des Kurzschlussstromes und der Leerlaufspannung von der Beleuchtungsstärke (L4.1)	56
7.4.2 Abhängigkeit der Leistung von der Beleuchtungsstärke bei gegebenem Verbraucher (L4.2).....	58
7.5 Bestimmung des Wirkungsgrades einer Energieumwandlung (L5)	60
7.6 Innenwiderstand der Solarzelle	61
7.6.1 Abhängigkeit des Innenwiderstands der Solarzelle von der Beleuchtungsstärke (L6.1).....	61
7.6.2 Abhängigkeit des Innenwiderstands der Solarzelle von der Entfernung zur Lichtquelle (L6.2).....	62
7.7 Diodencharakter der Solarzelle	63
7.7.1 Dunkelkennlinie (L7.1)	63
7.7.2 Sperr- und Durchlassrichtung bei Beleuchtung und Abdunkelung (L7.2).....	63
7.8 <i>U-I</i> -Kennlinie der Solarzelle	66
7.8.1 Grundexperiment - Aufnehmen und Auswerten der Kennlinie (L8.1)	66
7.8.2 Abhängigkeit der <i>U-I</i> -Kennlinie von der Beleuchtungsstärke (L8.2).....	70
7.8.3 Abhängigkeit der <i>U-I</i> -Kennlinie von der Temperatur (L8.3)	71
7.8.4 Eine Knobelaufgabe zur <i>U-I</i> -Kennlinie	72
7.9 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Temperatur (L9).....	72
7.10 Abschattung von Solarzellen.....	75
7.10.1 Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung (L10.1)	75
7.10.2 Abschattung von Solarzellen bei Parallelschaltung (L10.2)	75

7.11 Die Solarzelle als Transmissionsmesser (L11)	76
7.12 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Frequenz des einfallenden Lichtes (L12).....	76

Mit Erweiterung " Messen ohne Messgeräte":

7.13 Untersuchungen am leXsolar-Stecksystem (L13).....	79
7.14 Vergleich von Reihen- und Parallelschaltung der Solarzellen.....	79
7.14.1 Vergleich der Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen mit dem leXsolar-Hupenmodul (L14.1).....	79
7.14.2 Vergleich der Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen mit der leXsolar-Glühlampe (L14.2).....	79
7.14.3 Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung (L14.3).....	79
7.15 Reihen- und Parallelschaltung von Glühlampen (L15).....	79
7.15.1 Vergleich der Reihen- und Parallelschaltung von Glühlampen (L15.1).....	79
7.15.2 Direkter Vergleich der Reihen- und Parallelschaltung von Glühlampen (L15.2).	80
7.16 Drehrichtung und Geschwindigkeit des Motors (L16)	80
7.17 Anlaufstrom und Betriebsstrom des Motors (L17).....	80
7.18 Helligkeitsunterschiede	81
7.18.1 Helligkeitsunterschiede 1 (L18.1).....	81
7.18.2 Helligkeitsunterschiede 2 (L18.2).....	81
7.18.3 Verkippen der Solarzelle (L18.3).....	82
7.19 Strahlungsarten.....	82
7.19.1 Diffuse Strahlung (L19.1)	82
7.19.2 Direkte Strahlung (L19.2)	82
7.19.3 Albedostrahlung (L19.3).....	82
7.20 Grundaufbau Rotationsscheiben	82
7.20.1 Farbeigenschaften (L20.1)	82
7.20.2 Farbmischung (L20.2).....	83
7.20.3 Farbtäuschung mit der Benham-Scheibe (L20.3)	83
7.20.4 Reliefscheibe (L20.4).....	83
7.21 Fliehkraft (L21).....	83

2 Einleitung

2.1 Was ist Photovoltaik?

Photovoltaik (PV) ist die *direkte* Umwandlung von Licht in elektrische Energie mit Hilfe von Solarzellen (auch photovoltaische Zellen genannt). Indem zu diesem Zweck Sonnenlicht verwendet wird, handelt es sich per Definition um eine erneuerbare Energiequelle.

Die Betonung liegt dabei auf *direkt*, da die Erzeugung von elektrischer Leistung mit Hilfe anderer erneuerbaren Energien über mindestens einen Umweg erfolgt. Im Fall der Wärmeenergie als Energiequelle (Solarthermie, Erdwärme und Biomasse) handelt es sich bei diesem Umweg um eine Turbine, die mit einem Generator verbunden ist. Im Falle kinetische Energie (Wind-, Wasser- und Gezeitenkraft) wird zumindest ein Generator benötigt. Hingegen kommt bei der Photovoltaik keines dieser Geräte mit mechanischen Bestandteilen zur Anwendung. Daraus resultieren ein vergleichsweise geringer Wartungsaufwand und eine lange Lebensdauer. Aufgrund dieser herausragenden Position werden hohe Erwartungen an die zukünftige Rolle Photovoltaiktechnologie im Energiemix geknüpft.

2.2 Photovoltaik im Spektrum der erneuerbaren Energiequellen

Wir verfügen auf der Erde nur über drei Energiequellen, die mit menschlichen Zeitmaßstäben betrachtet, als unbegrenzt bezeichnet werden können. Diese drei wiederum sind die Quelle aller durch den Menschen genutzten erneuerbaren Energien. Die Bezeichnung erneuerbare oder regenerative Energiequelle ist dabei aus streng physikalischer Sicht eigentlich falsch, hat sich im Sprachgebrauch aber etabliert.

Die drei Quellen regenerativer Energie sind die Sonnenstrahlung, die Erdwärme sowie die Rotationsenergie der Erde. Abbildung 2.1 stellt diese Energiequellen und die daraus gespeisten erneuerbaren Energieformen dar.

In

Abbildung 2.2 ist das Verhältnis der verschiedenen Formen der Absorption, Reflexion und Nutzung der Solarenergie auf der Erde dargestellt. Man erkennt daran, dass der technische Energieumsatz des Menschen gegenüber der Solarenergieeinstrahlung auf die Erde vernachlässigbar klein ist. Die Nutzung der Photovoltaik bietet also ein nahezu unerschöpfliches Potential für die Energieversorgung des Menschen.

2.3 Kosten

Das momentan größte Problem der Photovoltaik, das die umfassende Nutzung dieser Technologie bisher noch verhindert, sind die relativ hohen Kosten. Eine von einer Solaranlage erzeugte Kilowattstunde (kWh) elektrischer Energie kostet heute (2008) – abhängig vom Standort der Anlage – im Durchschnitt 0,20...0,50€. Glaubwürdige Studien sagen für das Jahr 2030 einen Preis von 0,10€ voraus. Der Hauptgrund für diese Kostenreduktion ist der so genannte Lernkurveneffekt. Danach verringert sich der Preis mit dem Anwachsen der insgesamt produzierten Menge des Produkts. Hauptursache dafür ist die Weiterentwicklung des Produktionsprozesses und der Technologie.

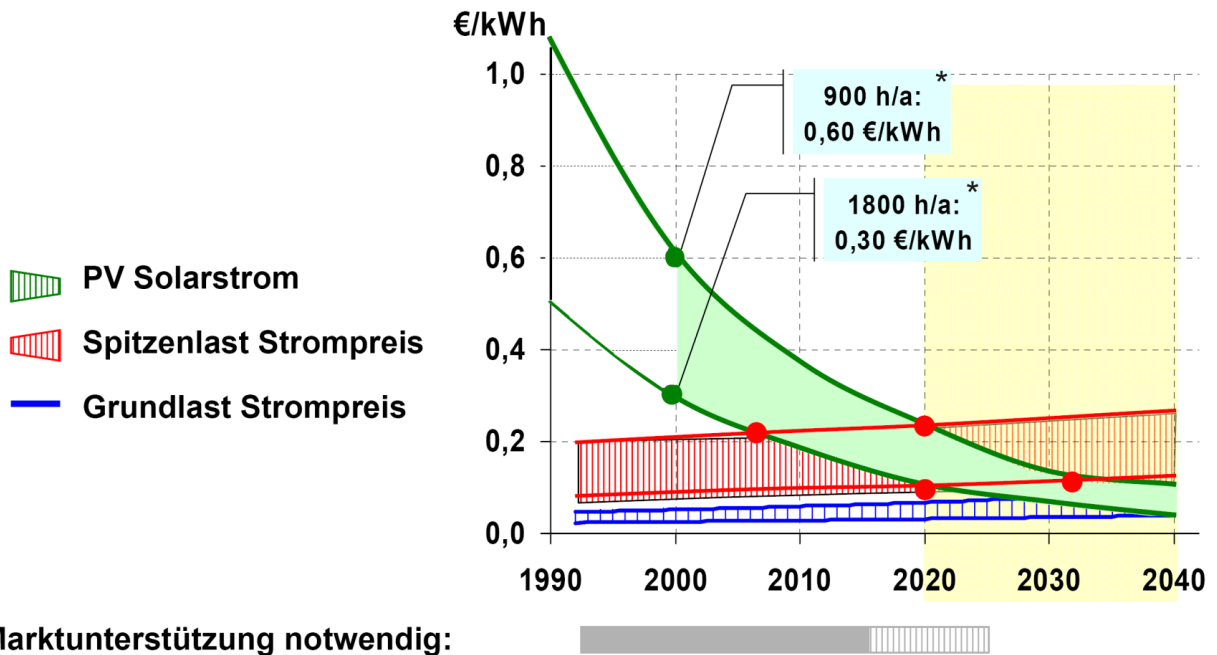


Abbildung 2.3: Mögliche Kostenentwicklung von photovoltaisch generierter Elektrizität im Vergleich zu Elektrizität, die mit nicht erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird. Quelle: SCHOTT-Solar

Abbildung 2.3 zeigt die Kosten für photovoltaisch erzeugten Strom an zwei Standorten mit unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen. Um verschiedene Standorte miteinander zu vergleichen gibt man den Wert der so genannten Spitzenlast-Stunden an. Dieser Wert entspricht der Dauer, mit der die Sonne mit maximaler Leistung (1000W/m²) einstrahlen müsste, um insgesamt die gleiche Energie auf den Erdboden einzustrahlen, wie an dem jeweiligen Standort in einem ganzen Jahr eingestrahlt wird.

In Deutschland liegt dieser Wert zwischen 900h und 1200h. Für Spanien dagegen liegt er bei 1800h und für den so genannten Sonnengürtel, die Wüstenregionen der nördlichen Halbkugel, bei 2000h. Mit der gleichen Photovoltaik-Anlage kann also in sonnenreicheren Gegenden mehr als doppelt soviel Energie pro Jahr erzeugt werden wie in Deutschland. Die Kosten für photovoltaisch erzeugten Strom liegen damit bei der Hälfte der in Deutschland erreichbaren Kosten. Diesen Fakt spiegelt auch Abbildung 2.3 wider. PV-Anlagen in Spanien erreichen gemäß der zugrunde liegenden Prognose bereits vor dem Jahr 2030 den Preis von Strom, der in Grundlastkraftwerken erzeugt wird. In Deutschland wird das erst für das Jahr 2040 erwartet. Bereits wesentlich eher wird die PV aber den Preis alternativer Spitzenlastkraftwerke erreichen und damit auch ohne staatliche Marktanreizprogramme wettbewerbsfähig sein.

2.4 Effizienz

Oft wird der Wirkungsgrad von Solarzellen als ein ernsthaftes Problem der Technologie genannt. Im Moment liegt er typischerweise zwischen 14 und 17%. Wie in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben werden wird, ist der Wirkungsgrad von Solarzellen aus prinzipiellen physikalischen Gründen begrenzt. Daher wird im Jahre 2030 voraussichtlich keine Solarzelle mit einer Effizienz größer als 25% als Massenprodukt auf dem Markt erhältlich sein.

Trotzdem kann die Sonneneinstrahlung auch mit den heutigen Effizienzen den Energiebedarf der Menschheit komplett befriedigen. Die Einstrahlung selbst übersteigt die Erfordernisse um einen Faktor von wenigstens 10.000 (vgl.

Abbildung 2.2). Da sich die wirtschaftliche Effizienz, also die Rentabilität aus Kosten *und* Wirkungsgrad zusammensetzt, ist der Wirkungsgrad folglich keinesfalls ein Problem der Photovoltaiktechnologie.

2.5 Anwendungen

Aus der Photovoltaik gewonnene elektrische Energie kann entweder in das öffentliche Netz eingespeist werden oder Anlagen bzw. Gebäude versorgen, die weitab vom öffentlichen Netz liegen. Soll dieser Strom in das Energienetz eingespeist werden, wird ein Wechselrichter benötigt, der den vom Solarmodul erzeugten Gleichstrom in den vom Netz genutzten Wechselstrom umwandelt.

Derzeit ist der Anteil der Photovoltaik an der insgesamt erzeugten elektrischen Leistung sehr gering. In Deutschland beträgt er 2% (2010). Dieser Prozentsatz wird einerseits von großtechnischen Solarkraftwerken mit Leistungen im Bereich einiger Megawatt (MW) und andererseits von kleinen Solaranlagen auf privaten Dächern, die je nur rund 1...10kW erzeugen, erreicht. Momentan ist die Photovoltaik allerdings nur durch staatliche Unterstützung in Form des Erneuerbare-Energien-Gesetze (EEG) wettbewerbsfähig. Solche Gesetze traten, beginnend in Deutschland im Jahre 2000, in vielen europäischen Ländern in Kraft.

Nichtsdestotrotz ist die Photovoltaik schon heute wettbewerbsfähig, wenn es um die Versorgung netzferner Anlagen, so genannter Inselanwendungen geht. Da deren Anschluss ans öffentliche Netz sehr teuer ist, kann die Photovoltaik in Kombination mit geeigneten Energiespeichern, wie Akkumulatoren sowie anderen Energiequellen, wie z. B. Windkraft eine ausreichende Versorgung garantieren.

Bekannte und weit verbreitete Beispiele für solche Inselanwendungen von Solarzellen sind Taschenrechner oder Armbanduhren.

2.6 Fragen

Welche Vorrichtung ist nötig, um Windenergie in elektrische Energie umzuwandeln?

Welche Vorrichtungen sind nötig, um Wärmeenergie (z. B. thermische Solarenergie) in elektrische Energie umzuwandeln?

Welches ist der große Vorteil von Photovoltaik bei der Erzeugung von Elektrizität im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energiequellen?

Welche Anwendungen der Solarzellen kennst du?

6.1 Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen

6.1.1 Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen (phänomenologisch) (M1.1)

Experiment

Das leXsolar-Hupenmodul soll jeweils in Reihe oder parallel mit einer, zwei oder drei Solarzellen geschaltet werden. In Abhängigkeit von der Anzahl der Solarzellen und von der Schaltungsart sind dabei Töne unterschiedlicher Lautstärke zu erwarten. Die Lichtverhältnisse während des Experiments sollten möglichst konstant gehalten werden.

Auswertung

Selbst bei idealen Lichtbedingungen werden mindestens zwei Solarzellen in Reihe benötigt, damit ein Ton erklingt. Je mehr in Reihe verschaltete Solarzellen die Hupe antreiben, desto lauter und schneller wird der Ton. Da die Gesamtspannung in der Parallelschaltung der einer einzelnen Solarzelle entspricht, reicht sie nicht aus, um die Hupe zu betreiben. Egal, wie viele Solarzellen also parallel geschaltet werden – die Hupe schweigt.

Erklärung

Die Hupe arbeitet erst ab einer Spannung von 0,8V. Selbst unter idealen Lichtbedingungen erreicht eine Silizium-Solarzelle aber nur etwa 0,6V. Da sich in Reihenschaltung die Spannungen addieren, werden mindestens zwei Solarzellen benötigt, um die Schwellspannung zu erreichen. In einer Parallelschaltung ist die Spannung jedoch konstant, also unabhängig von der Anzahl der Solarzellen. Die Schwellspannung kann damit nicht erreicht werden; die Hupe wird nicht aktiviert. Die Lichtverhältnisse während des Experiments spielen in jedem Fall eine untergeordnete Rolle, da das leXsolar-Hupenmodul nur die geringe Stromstärke von 1mA benötigt, um zu arbeiten.

6.1.2 Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen (quantitativ) (M1.2)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Large enthaltenen Experiment L1. Durchführung und Auswertung können in Kapitel [7.1](#) nachgeschlagen werden.

6.2 Abhängigkeit der Leistung von der Fläche der Solarzelle (M2)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Large enthaltenen Experiment L2. Durchführung und Auswertung können in Kapitel [7.2](#) nachgeschlagen werden.

6.3 Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (M3)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Large enthaltenen Experiment L3. Durchführung und Auswertung können in Kapitel [7.3](#) nachgeschlagen werden.

6.4 Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Temperatur (M4)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Large enthaltenen Experiment L9. Durchführung und Auswertung können in Kapitel [7.9](#) nachgeschlagen werden.

6.5 Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke (M5)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Large enthaltenen Experiment L4. Durchführung und Auswertung können in Kapitel [7.4](#) nachgeschlagen werden.

6.6 Abschattung von Solarzellen (M6)

Das Experiment M6.1 (*Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung 1*) behandelt das Phänomen der Abschattung rein phänomenologisch. Es kann völlig ohne die Verwendung von

Messgeräten durchgeführt werden und eignet sich somit für die Behandlung im Unterricht der Klassenstufen 5-7. Hingegen setzen die Experimente 6.2 und 6.3 (*Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung 2* und *Abschattung von Solarzellen bei Parallelschaltung*) die Kenntnis der Funktionsweise von Halbleiterdioden voraus und richtet sich daher an Schüler höherer Klassenstufen.

6.6.1 Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung 1 (M6.1)

Experiment

Zunächst sollen die Schüler eine Reihenschaltung von zwei Solarzellen mit einer Hupe aufbauen und die Reaktion der Hupe notieren. Diese Schaltung 1 dient als Referenz zum Vergleich mit dem Verhalten der Hupe in Schaltung 2. Hier sind drei Solarzellen als Stromversorgung in Reihe geschaltet. Jedoch wird eine der drei Zellen mit den blauen Abdeckplättchen verdunkelt.

Auswertung

Wie in Experiment 2 wird die Hupe bei zwei in Reihe geschalteten Solarzellen ein erkennbares Geräusch abgeben. Wird nun eine dritte Solarzelle hinzugeschaltet und diese mit der Hand vollständig abgedunkelt, wird der Schüler zunächst keine Veränderung vermuten, da sich die beleuchtete Solarzellenfläche nicht verändert. Diese Vermutung ist jedoch falsch, da die abgeschattete Solarzelle als Widerstand wirkt. Die Hupe wird nicht oder kaum noch hörbar sein.

Erklärung

Eine abgedunkelte Solarzelle überbrückt den Stromkreis nicht, sondern wirkt wie ein unendlich großer Widerstand. Es fließt also kein bzw. nur ein verschwindend geringer Strom durch das Hupenmodul, der nicht ausreicht um einen Ton zu erzeugen. Für dieses Verhalten verantwortlich ist der so genannte *Diodencharakter* der Solarzelle, der sich mit Hilfe ihres Aufbaus aus dotierten Halbleiterschichten mikroskopisch erklären lässt. In Kapitel 6.6.2 wird dieses Verhalten quantitativ beschrieben.

Anwendung

In großen Solarmodulen sind oft viele Solarzellen in Reihe geschaltet. Durch Abschattung eines Teils dieser Zellen (z. B. durch Laubfall im Herbst) besteht nun die Gefahr, dass ein Teil der Anlage ausfällt. In der Technik wird dies durch eine Überbrückung jeder einzelnen Zelle bzw. von Zellsträngen durch eine Halbleiterdiode – die so genannte Bypass-Diode – verhindert. Der in den nicht abgeschatteten Zellen generierte Strom wird nun nicht durch die abgedunkelten Zellen blockiert, sondern nimmt den Weg des geringsten Widerstands über die Bypass-Diode.

6.6.2 Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung 2 (M6.2)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Large enthaltenen Experiment L10.1. Durchführung und Auswertung können in Kapitel [7.10.1](#) nachgeschlagen werden.

6.6.3 Abschattung von Solarzellen bei Parallelschaltung (M6.3)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Large enthaltenen Experiment L10.2. Durchführung und Auswertung können in Kapitel [7.10.2](#) nachgeschlagen werden.

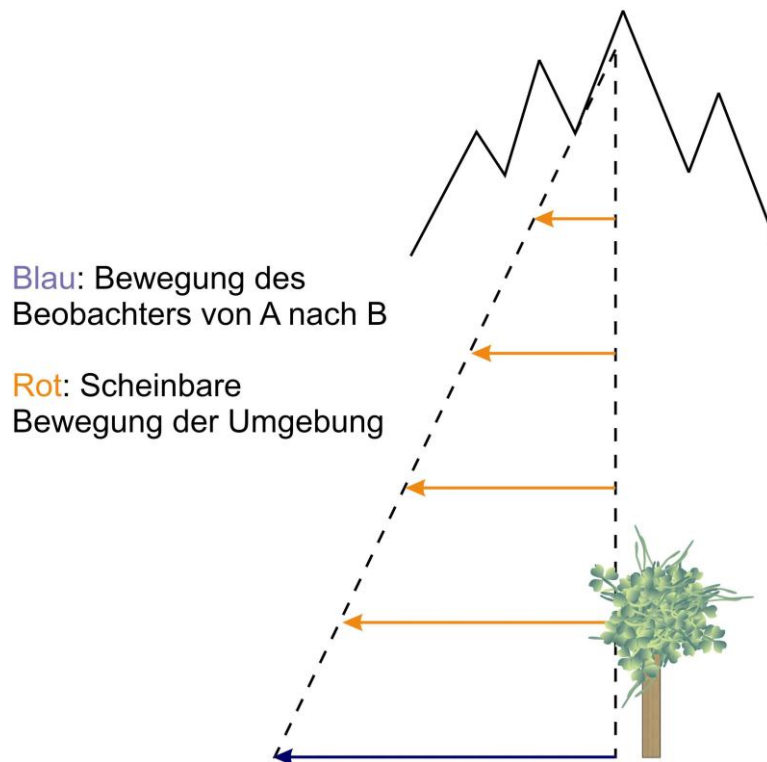


Abbildung 6.8: Weit entfernte Objekte bewegen sich scheinbar langsamer, als nahe.

6.12 Fliehkraft (M12)

Experiment

Dieses Experiment ist eher der Mechanik zuzuordnen und weniger der Optik, bereitet den Schülern aber erfahrungsgemäß sehr viel Spaß. Neben den vorhandenen Bestandteilen von leXsolar-PV werden noch einige weitere Materialien benötigt, die rechtzeitig vor dem Versuch bereitstehen sollten.

Als Gewicht wird eine Holzkugel vorgeschlagen, dies kann aber z. B. auch ein Knäuel Alufolie sein. Zunächst ist für jeden Schüler etwas Bastelarbeit nötig. Der Zahnstocher muss wie angegeben vorbereitet werden: An beiden Enden werden die Spitzen mit einer Schere entfernt. Nun wird in eines der beiden Enden eine Kerbe geschnitten, in der der Bindfaden befestigt wird. Das andere Ende muss in die Mitte der Drehscheibe gesteckt werden. Damit dies möglich ist, darf die Drehscheibe nur leicht auf den Motor aufgesteckt werden, so dass die Motorwelle und Zahnstocher gemeinsam Platz in dem Loch finden.

Eine Verschaltung des Motors in Reihe mit zwei kleinen Solarzellen sollte ausreichen, um das „Karussell“ anzutreiben. Für das Andrehen des Motors erweist es sich als günstig, den Faden mit der Kugel erst hoch zu halten, da sich der Faden sonst bei der anfänglich langsamen Drehung um den Zahnstocher wickelt.

Auswertung

Auch bei diesem Versuch erlangt der Schüler ein anschauliches Verständnis vom Begriff der Trägheit. Nach dem die Rotation in Gang gebracht wurde, dreht sich die Holzkugel wie die Gondel eines Kettenkarussells: Je schneller sich der Motor dreht, desto höher steigt die Kugel. Wird der Stromkreis unterbrochen, verlangsamt sich die Drehbewegung des Motors, bis er schließlich zum Stehen kommt. Im gleichen Maße sinkt die Höhe der Holzkugel. Wird hinge-

gen die Rotationsscheibe bei voller Drehgeschwindigkeit plötzlich gestoppt, schwingt die Kugel zunächst weiter, so dass sich der Faden um den Zahnstocher wickelt.

Erklärung

Für das Aufsteigen der Holzkugel während der Drehung der Rotationsscheibe ist die so genannte Fliehkraft verantwortlich. Diese ist umso größer, je schneller sich der Motor dreht. Aus diesem Grund nimmt auch die Höhe der Holzkugel ab, nachdem der Stromkreis unterbrochen wurde und die Drehgeschwindigkeit des Motors abnimmt.

Beim plötzlichen Anhalten der Rotationsscheibe dreht sich die Kugel am Faden aufgrund ihrer Trägheit weiter.

7 Experimente für leXsolar-PV Large

Allgemeines

Die folgenden Experimente sind in der Reihenfolge nach ihrem Schwierigkeitsgrad gestaffelt. Die Reihenfolge richtet sich dabei nach dem Schwierigkeitsgrad der Erklärung des Experiments, nicht nach dem der Durchführung. Die Ordnung und Nummerierung der Experimente ist dabei in Schüler- und Lehrerheft identisch. Als Orientierung in welcher Klassenstufe die Experimente durchgeführt werden sollten, können die Tabellen aus Abschnitt 3.3 herangezogen werden. Es lässt sich außerdem nicht vermeiden, dass bei einigen Zusatzexperimenten zu relativ leichten Versuchen Bezug auf später erklärte Versuche genommen wird. Beim Durcharbeiten des gesamten Kapitels werden diese Zusammenhänge aber klar.

Die in den folgenden Erläuterungen zu den Experimenten angegebenen Kurven wurden alle mit leXsolar-PV aufgenommen. Aufgrund verschiedener Raumausleuchtungen kann es natürlich quantitative Unterschiede zu den von Ihnen erzielten Ergebnissen geben. Die angegebenen Diagramme sollen daher lediglich als qualitativer Anhaltspunkt dienen. In den Erklärungen bzw. Auswertungen der Experimente werden alle Fragen aus dem Schülerheft ausführlich beantwortet. Die Schüleranleitungen sind aber keine Voraussetzung für das Verständnis dieses Kapitels.

Bei den meisten Experimenten soll die Abhängigkeit der Leistung der Solarzelle von einer physikalischen Größe untersucht werden. Dabei reicht es meist aus, nur die Kurzschlussstromstärke I_K anstelle der Leistung P zu messen. Da die Leerlaufspannung U_L der Solarzelle weitgehend konstant bleibt, ist diese Vereinfachung zulässig. Allerdings muss dieser Fakt dem Schüler vorher klar erläutert werden. Außerdem wird in einigen Experimente aus Leerlaufspannung U_L und Kurzschlussstromstärke I_K ein Leistung $P = U_L \cdot I_K$ berechnet. Diese Leistung stellt ein Maximum dar, das in der Realität nicht erreicht wird. Aus Gründen der Vergleichbarkeit verschiedener Messungen ist das Heranziehen dieser Größe aber gerechtfertigt.

7.1 Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen (L1)

Achtung: Dieses Experiment ist identisch zu Experiment M1.2 aus leXsolar-PV Medium.

Experiment

Mit diesem Experiment soll geklärt werden, wie sich Spannung und Stromstärke bei Reihen- bzw. Parallelschaltung quantitativ verhalten. Mehrere Solarzellen werden dafür in Reihe oder parallel auf die leXsolar-Grundeinheit aufgesteckt. Anschließend werden nacheinander Spannung und Stromstärke gemessen.

Auswertung und Erklärung

Eine Reihen- bzw. Parallelschaltung von Solarzellen entspricht im Wesentlichen einer Reihen- bzw. Parallelschaltung von Spannungsquellen (z. B. Batterien) und hat damit das gleiche Ergebnis wie diese. Bei der Reihenschaltung addieren sich die Spannungen der einzelnen Zellen, während die Stromstärke im gesamten Stromkreis gleich bleibt; bei Parallelschaltung addieren sich die Einzelstromstärken und die Spannung bleibt konstant:

	Reihenschaltung	Parallelschaltung
Spannung	$U_{\text{ges}} = U_1 + U_2 + \dots$	$U_{\text{ges}} = U_1 = U_2 = \dots$
Stromstärke	$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + \dots$	$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + \dots$

Die nutzbare Gesamtstromstärke ist bei ungleichmäßiger Ausleuchtung der Solarzellen immer die kleinste an einer Solarzelle anliegende Stromstärke. Solche Schwankungen können durch geringe qualitative Unterschiede zwischen den einzelnen Solarzellen zustande kommen.

Anwendung: Verschaltung von Solarzellen zu Solarmodulen

Mit der heutigen Technologie können Solarzellen nur mit einer begrenzten Fläche gefertigt werden. Kristalline Siliziumsolarzellen werden in der Massenproduktion heute meist mit einer Fläche von $12 \times 12 \text{ cm}^2$ hergestellt. Die Spannung einer solchen Zelle ist auf ca. $0,6 \text{ V}$ begrenzt (vgl. Kapitel 5). Für technische Zwecke sind diese sehr geringen Spannungen aber kaum nutzbar. Deshalb werden mehrere Solarzellen zu Einheiten, so genannten Modulen zusammengeschaltet. Handelsübliche Module haben meist eine Nennspannung von 6 V .

7.2 Abhängigkeit der Leistung von der Fläche der Solarzelle (L2)

Achtung: Dieses Experiment ist identisch zu Experiment M2 aus leXsolar-PV Medium.

Experiment

Der Schüler misst die Kurzschlussstromstärke der großen Solarzelle in Abhängigkeit von der aktiven Fläche. Dazu wird die Zellenoberfläche nacheinander zu einem Viertel, zur Hälfte zu drei Viertel sowie vollständig abgedeckt. Für jeden Experimentierplatz stehen dazu vier Kunststoffabdeckungen zur Verfügung.

Da die Kurzschlussstromstärke in etwa dasselbe Verhalten wie die Leistung zeigt, ist eine Spannungsmessung nicht unbedingt notwendig.

Auswertung

Die Messergebnisse zeigen eine Proportionalität zwischen Leistung und Solarzellenfläche (Abbildung 7.1). Bei der Messung der Spannung mit einem hochohmigen Messgerät würde man feststellen, dass diese bei allen drei Oberflächengrößen nahezu konstant bleibt, da sie nur eine logarithmische Abhängigkeit von der gesamten eingestrahlt Leistung aufweist.

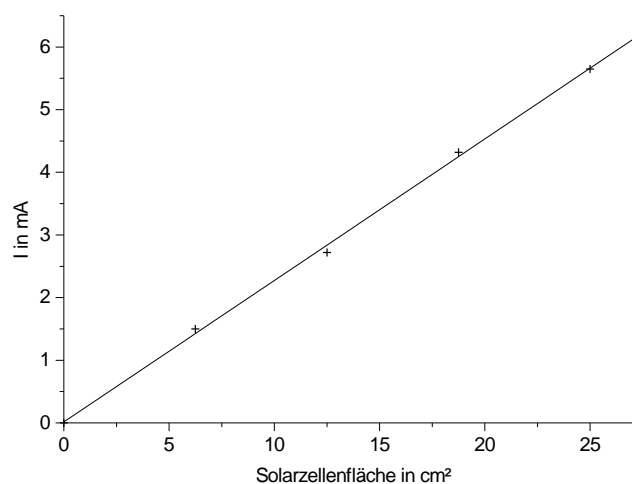


Abbildung 7.1 Abhängigkeit der Kurzschlussstromstärke der Solarzelle von deren Fläche.

Erklärung

Man kann sich eine ausgedehnte Solarzelle im Prinzip aus mehreren kleineren Zellen zusammengesetzt vorstellen, die parallel geschaltet sind. Hier ist klar, dass n beleuchtete Zellen n -mal soviel Strom liefern wie eine einzelne und die unbeleuchteten Zellen nicht zum Pho-

ren in der Regel erst nahe der maximalen Leistung. Im unteren Leistungsbereich dagegen ist auch der Wirkungsgrad relativ gering.

Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems liegt in der Größenordnung von einigen Hundertstel Prozent. Der Wert erscheint im ersten Moment vielleicht zu niedrig, folgende Überlegung zeigt aber, dass die Größenordnung stimmt: Der Wirkungsgrad von Glühlampen liegt bei ca. 2%, der Wirkungsgrad der Solarzelle beträgt ca. 15%. Der Wirkungsgrad der Motor-Getriebe-Anordnung beträgt laut Messung ca. 10%. Die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades nach

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n$$

ergibt damit 0,03%.

7.6 Innenwiderstand der Solarzelle

7.6.1 Abhängigkeit des Innenwiderstands der Solarzelle von der Beleuchtungsstärke (L6.1)

Experiment

Bei diesem Experiment funktioniert die Solarzelle als Spannungsquelle mit Innenwiderstand. Dieser soll nun genauer betrachtet werden. Dazu werden die Solarzelle, der eine bestimmte Leerlaufspannung U_L sowie ein Innenwiderstand R_i zugeordnet werden kann, und ein konstanter Lastwiderstand, an dem die Klemmspannung U_K abfällt, in Reihe geschaltet. Da auch am Innenwiderstand eine Spannung $U \cdot R_i$ anliegt, weichen die beiden oben erwähnten Spannungen U_L und U_K voneinander ab.

In Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, die wie bereits in Experiment 7.4 beschrieben, variiert werden kann, sollen nun Klemm-, Leerlaufspannung und die dazugehörige Stromstärke gemessen werden. Es empfiehlt sich zunächst die Leerlaufspannung zu messen und danach den Stromkreis zu schließen, um die noch fehlenden Messwerte aufzunehmen.

Die am Beleuchtungsmodul anliegende Spannung sollte jedoch 6V nicht überschreiten, da bei zu großen Beleuchtungsstärken der Innenwiderstand vernachlässigbar klein wird und sich somit Klemm- und Leerlaufspannung nicht messbar unterscheiden.

Auswertung

Die Schaltung wird durch folgenden Ersatzschaltplan beschrieben:

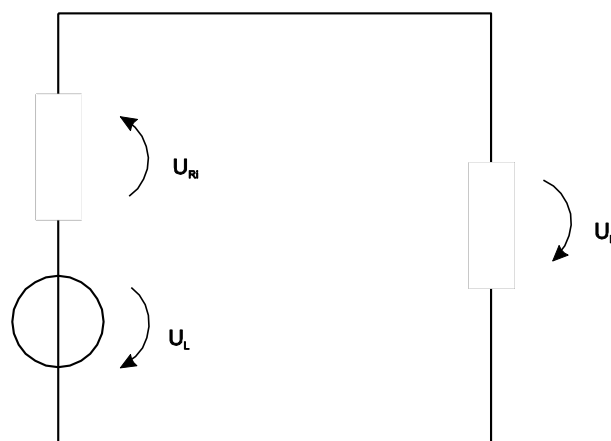


Abbildung 7.10 Ersatzschaltbild für eine Solarzelle mit Innenwiderstand.

Die Klemmspannung berechnet sich nach der Maschenregel mit $U_K = U_L - IR_i$. Durch Umstellen gelangt man nun leicht zum gesuchten Innenwiderstand, der nun über der jeweiligen Lampenanzahl n aufzutragen ist. Man erhält einen nichtlinearen Zusammenhang. Der Innen-

widerstand sinkt zuerst schnell und nähert sich bei stärkerer Beleuchtung asymptotisch dem Wert Null (vgl. Abbildung 7.11).

Der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Innenwiderstand spielte bereits in Experiment 7.4.2 eine wichtige Rolle. Da die Spannung bei jeder Beleuchtung annähernd konstant ist, ist es der veränderliche Innenwiderstand, der den Strom in eine Sättigungskurve zwingt. Sobald der Innenwiderstand der Solarzelle genügend klein ist, kann man den Gesamtwiderstand als konstant, gleich dem äußeren Lastwiderstand, betrachten. Ab diesem Punkt kann sich auch der Strom kaum noch verändern.

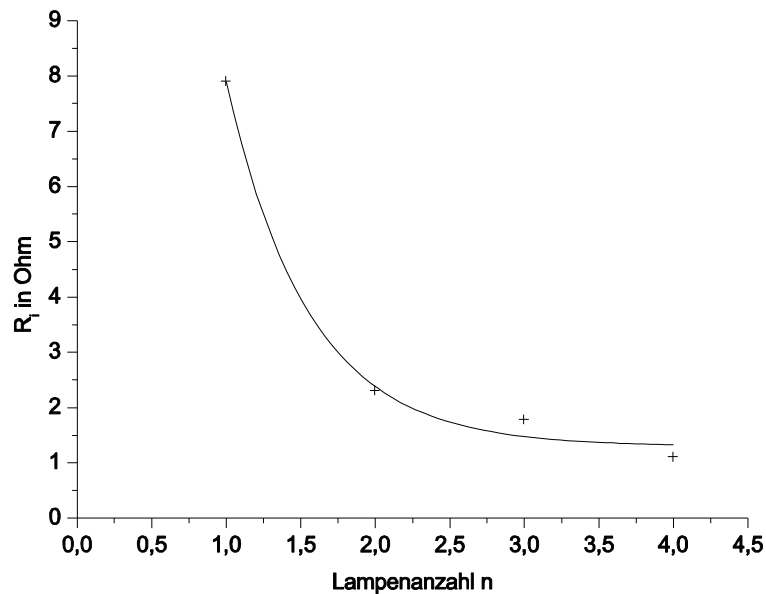


Abbildung 7.11 Abhängigkeit des Innenwiderstandes der Solarzelle von der Beleuchtungsstärke.

7.6.2 Abhängigkeit des Innenwiderstands der Solarzelle von der Entfernung zur Lichtquelle (L6.2)

Experiment

Grundsätzlich unterscheidet sich dieses Experiment nur wenig von Experiment 7.6.1. Nun wird jedoch die auf die Solarzelle treffende Lichtintensität durch den Abstand der Lichtquelle zur Solarzelle modifiziert. Um optimale Ergebnisse erzielen zu können, sollte der Raum, in dem das Experiment durchgeführt wird, gut abgedunkelt sein. Es empfiehlt sich, die leXsolar Grundeinheit, auf der sich die Solarzelle befindet, senkrecht zur Tischoberfläche aufzustellen. So kann der Abstand zur Lichtquelle durch einfaches Verschieben des leXsolar Beleuchtungsmoduls, das als Lichtquelle mit 10V betrieben wird, auf der Tischplatte realisiert werden. Die Entfernung kann mit einem langen, auf dem Tisch befestigten Lineal gemessen werden, das gleichzeitig als Richtscheit zum Verschieben der Lampe dient.

Auswertung

Bei parallel geschalteten Solarzellen tritt der Effekt wie in Experiment 10.1 natürlich nicht auf, da die abgedunkelte Solarzelle einen parallel geschalteten Widerstand darstellt. Die Gesamtleistung sinkt lediglich um den Anteil der abgedunkelten Solarzelle, also um ein Drittel bzw. zwei Drittel.

7.11 Die Solarzelle als Transmissionsmesser (L11)

Experiment

In diesem Experiment wird der Einsatz von Solarzellen in optischen Messgeräten simuliert. Die Zelle fungiert also als Messgerät für den Transmissionsgrad von Folien. Vor Durchführung des Versuchs sollte der Begriff Transmission zunächst theoretisch im Unterricht besprochen werden. Da sich die Kurzschlussstromstärke der Solarzelle proportional zur Beleuchtungsstärke verhält, ist dieser Versuch relativ einfach. Der Schüler bedeckt die Zelle lediglich nacheinander mit verschiedenen stark absorbierenden Gläsern oder Folien und vergleicht den dann gemessenen Kurzschlussstrom mit dem Kurzschlussstrom ohne Abdeckung. Aus diesen Messwerten kann somit ohne weiteres der prozentuale Transmissionsgrad errechnet werden. Der Versuch kann z. B. mit Fensterglas oder transparenten Plasten durchgeführt werden. Wichtig ist jedoch, dass diese Stoffe möglichst wenig farbig sind. Bei zu starker Einfarbigkeit kann die bevorzugt durchgelassene Frequenz aufgrund der spektralen Empfindlichkeit der Solarzelle die Messung verfälschen (Experiment 12).

7.12 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Frequenz des einfallenden Lichtes (L12)

Experiment

Bei diesem Versuch kann der Schüler mit einfachsten Mitteln den Zusammenhang zwischen Frequenz des einfallenden Lichtes und der Solarzellenleistung erkennen. Zur Durchführung werden lediglich verschiedene Farbgläser aus der Optik und eine große Solarzelle benötigt. Der Schüler legt die verschiedenfarbigen Gläser auf die Zelle und bestimmt bei gleicher Beleuchtungsstärke jeweils die Solarzellenleistung. Die Gläser müssen dazu annähernd den gleichen Transmissionsgrad haben, wie es für den mitgelieferten Satz Farbfilter der Fall ist.

Auswertung

Die Leistung der Solarzelle ist unter rotem Licht höher als unter blauem Licht.

Erklärung

Wenn man das Absorptionsspektrum von Silizium betrachtet, so vermutet man, je höher die Energie der einfallenden Strahlung, desto höher ist die entnehmbare Leistung. Das Experiment widerlegt dies allerdings. Das energieärmere rote Licht hatte eine höhere Leistung der Solarzelle zur Folge als das kurzwelligere und somit energiereichere blaue Licht.

Zunächst ist die spektrale Empfindlichkeit natürlich abhängig von der Bandlücke E_G des Halbleiters – hier Silizium. Jedoch spielen auch andere Effekte wie z. B. die Dotierung, Antireflexschichten u. v. m. eine wichtige Rolle. Diese sind in ihrer Gesamtheit dafür verantwortlich, dass rotes Licht stärker absorbiert wird als blaues. Es ist somit auch klar, dass keine generelle Empfindlichkeitskurve für ein bestimmtes Material existiert, vielmehr muss für jede Solarzelle einzeln eine konkrete Messung durchgeführt werden. Deshalb zeigt Abbildung 7.26 nur eine prinzipielle Kurve.

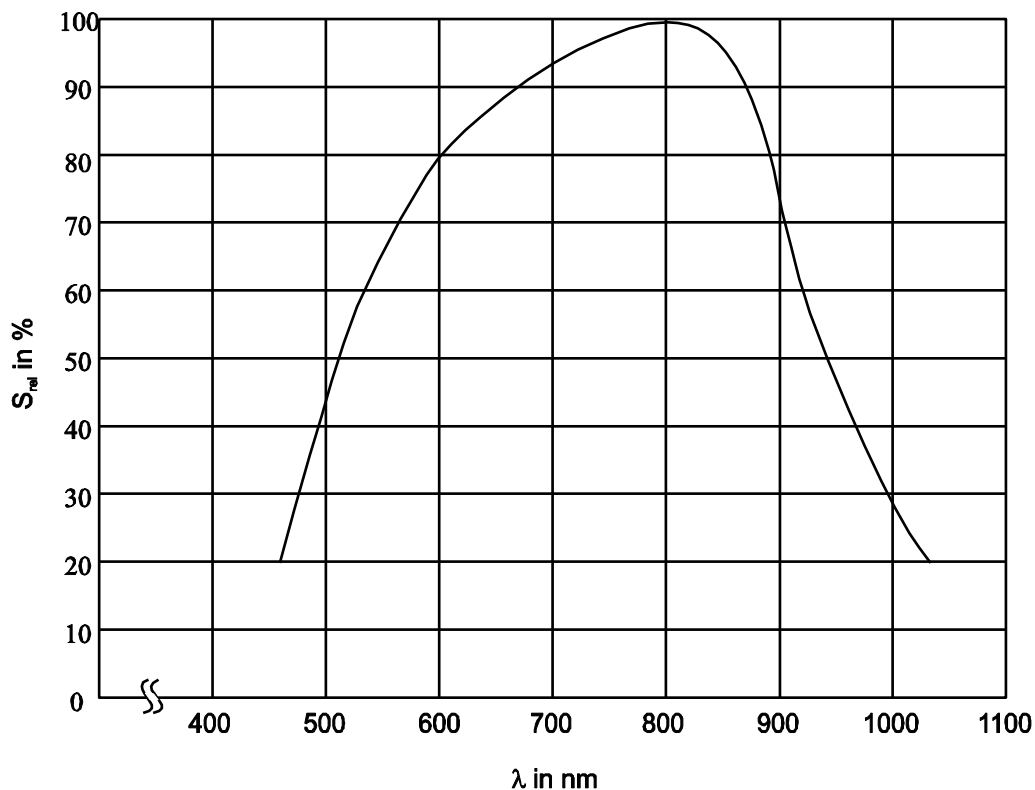


Abbildung 7.26: Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes.

Jedoch zurück zur Beantwortung des eingangs erläuterten scheinbaren Widerspruchs. Warum strebt die Kurve an der linken Flanke wieder gegen Null? Photonen in diesem Bereich müssten doch im Vergleich zur rechten Flanke genügend Energie haben, um Elektron-Loch-Paare generieren zu können.

In Kapitel 5 wurde beschrieben, dass $L_G = 1/\alpha$ die Eindringtiefe von Photonen in das Material ist. D. h. je höher die Absorptionskonstante α , desto näher wird das Licht an der Oberfläche des Materials absorbiert, desto kleiner ist also die Eindringtiefe. Die Oberfläche eines Halbleiters ist nun aber ein Ort mit hoher Rekombinationsrate. Werden nun wie beschrieben sehr viele Photonen direkt in Nähe der Oberfläche absorbiert, werden die generierten Ladungsträger sofort wieder an Oberflächendefekten rekombiniert. Die Ausbeute an Ladungsträgern strebt dann also wieder gegen Null.

Anwendung

Um Solarzellen mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad herzustellen, muss man Halbleitermaterialien verwenden, deren Empfindlichkeitsmaximum auf das Spektrum unserer Sonne abgestimmt ist. Der Stoff, der unter Sonnenlicht den höchsten Wirkungsgrad erzielen würde, müsste eine Bandlücke zwischen 1,3 und 1,5eV haben. Silizium hat eine Bandlücke von 1,1eV, was unter den übrigen Stoffen, die für die Photovoltaik verwendet werden, nur ein guter Mittelwert ist. Für die Verwendung von Silizium sprechen indes das hohe Vorkommen auf der Erde sowie seine leichte Verarbeitung.

Teil 1 Elektrizitätslehre

7.13 Untersuchungen am leXsolar-Stecksystem (L13)

Alle angegebenen Schaltungen stellen nur Variationen ein und derselben Reihenschaltung dar. In jedem der Fälle müsste die Lampe leuchten. Einschränkungen könnten sich u.U. aus einer mangelhaften Klassenzimmerbeleuchtung oder Neonröhren ergeben.

7.14 Vergleich von Reihen- und Parallelschaltung der Solarzellen

Bei der Reihenschaltung der Solarzellen addieren sich die Spannungen der Einzelzellen bei konstanter Stromstärke. Die nutzbare gesamte Stromstärke ist bei ungleichmäßiger Ausleuchtung der Solarzellen immer die kleinste an einer Solarzelle anliegende Stromstärke. Dadurch kann bei einigen Verbrauchern der Strom zu niedrig werden. Der Motor z.B. benötigt einen sehr hohen Anlaufstrom. Bei einer Parallelschaltung der Solarzellen addieren sich die Stromstärken bei konstanter Spannung.

Die Zuschaltung einzelner Solarzellen bedeutet eine Flächenvergrößerung und damit mehr genutztes Sonnenlicht, resultierend in größeren Gesamtleistungen.

7.14.1 Vergleich der Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen mit dem leXsolar-Hupenmodul (L14.1)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Medium/Global enthaltenen Experiment M1.1. Durchführung und Auswertung können in Kapitel 6.1.1 nachgeschlagen werden.

7.14.2 Vergleich der Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen mit der leXsolar-Glühlampe (L14.2)

Bei guten Beleuchtungsverhältnissen ist die benötigte Spannung von 15 mA meist gewährleistet. Im Wesentlichen hängt die Helligkeit der Lampe also von der Spannung ab. Die Lampe ist damit bei drei in Reihe geschalteten Solarzellen am hellsten. Bei zu hellem Umgebungslicht kann es teilweise schwierig werden das Glimmen der Lampe zu erkennen. Deshalb kann es hilfreich sein, sie mit der Hand abzuschatten.

7.14.3 Abschattung von Solarzellen bei Reihenschaltung (L14.3)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Medium/Global enthaltenen Experiment M6.1. Durchführung und Auswertung können in Kapitel 6.6.1 nachgeschlagen werden.

7.15 Reihen- und Parallelschaltung von Glühlampen (L15)

7.15.1 Vergleich der Reihen- und Parallelschaltung von Glühlampen (L15.1)

Dieses Experiment dient vor allem dazu, den evtl. in den vorherigen Experimenten entstandenen Eindruck, dass die Reihenschaltung „besser“ als die Parallelschaltung ist, aufzuheben. Hier müssen zwei Schülergruppen zusammen arbeiten. Wegen der relativ hohen benötigten Stromstärken (ca. 30 mA) ist es empfehlenswert dieses Experiment bei Sonne am Fenster durchzuführen. Da hier zwei Grundplatten verwendet werden, können die Verbindungskabel so lang gewählt werden, dass die Grundplatte mit den Glühlampen im Schatten steht – so sind die Glühlampen besser zu erkennen.

diese Strahlung auftreffen würde. Wir stellen uns daher eine Kugel vor, in deren Mittelpunkt die Sonne steht und deren Radius der mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne entspricht.

$$L = A \cdot S_E$$
$$A = 4\pi \cdot r_1^2$$
$$L = 4\pi \cdot r_1^2 \cdot S_E$$
$$L = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Mit Hilfe der Leuchtkraft lässt sich jetzt auch die Strahlung berechnen, die auf dem Merkur ankommt.

$$S_M = L / (4\pi \cdot r_2^2)$$
$$S_M = 9,126 \text{ kW/m}^2$$

7.18.3 Verkippen der Solarzelle (L18.3)

Nutzen Sie bei diesem Experiment möglichst nur eine Lichtquelle, so dass ein klarer Schatten entstehen kann. Außerdem sollte das Experiment nicht in der Sonne durchgeführt werden, da sonst die beobachteten Unterschiede zu gering sind. Durch das Verkippen der Solarzelle wird scheinbar die Fläche verkleinert, auf die das Sonnenlicht auftreffen kann. Dadurch sinkt die Stromstärke (und die Spannung geringfügig). Je mehr die Zelle verkippt wird, umso langsamer dreht sich der Motor. Dieser Effekt ist jedoch nur minimal, da die Drehgeschwindigkeit hauptsächlich von der Spannung abhängt.

7.19 Strahlungsarten

7.19.1 Diffuse Strahlung (L19.1)

7.19.2 Direkte Strahlung (L19.2)

Diese Experimente (L19.1 und L19.2) entsprechen den in leXsolar-PV Medium/Global enthaltenen Experimenten M10.1 und M10.2 Durchführung und Auswertung können in Kapitel 6.10.1 und 6.10.2 nachgeschlagen werden.

7.19.3 Albedostrahlung (L19.3)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Medium/Global enthaltenen Experiment M10.3. Durchführung und Auswertung können in Kapitel 6.10.3 nachgeschlagen werden.

7.20 Grundaufbau Rotationsscheiben

7.20.1 Farbeigenschaften (L20.1)

Dieses Experiment entspricht dem in leXsolar-PV Medium/Global enthaltenen Experiment M11.1. Durchführung und Auswertung können in Kapitel 6.11.1 nachgeschlagen werden.

neue energien verstehen

leXsolar GmbH
Strehleener Straße 24
01069 Dresden

Telefon: +49 351 47 96 56 0
Fax: +49 351 47 96 56 111
E-Mail: info@lexsolar.de
Internet: www.lexsolar.de

© Copyright leXsolar GmbH
Alle Rechte vorbehalten.