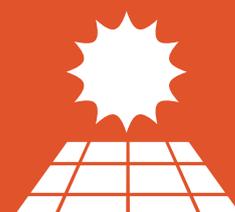
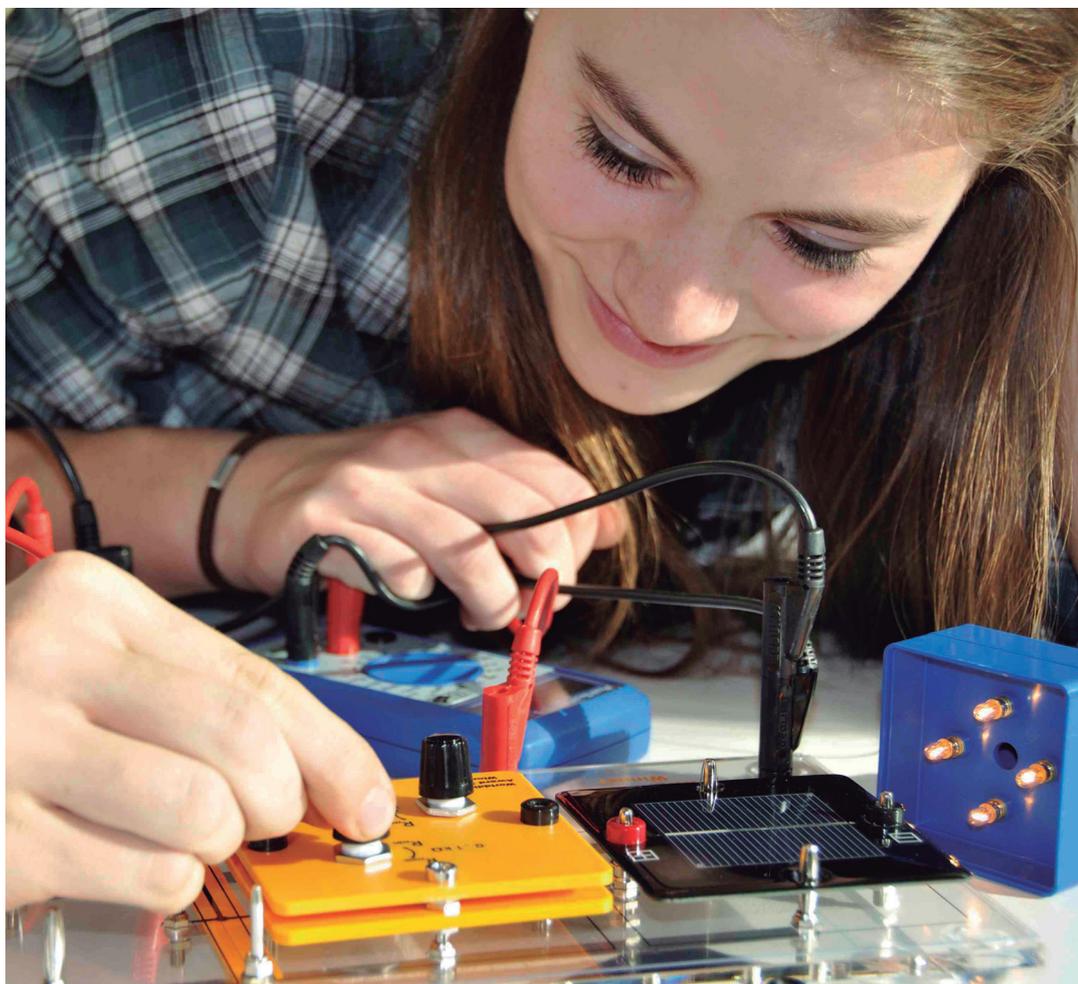


# leXsolar-PV Ready-to-go



Lehrerheft

Layout diagram leXsolar-PV Ready-to-go  
 Item-No.1105  
 Bestückungsplan leXsolar-PV Ready-to-go  
 Art.-Nr.1105

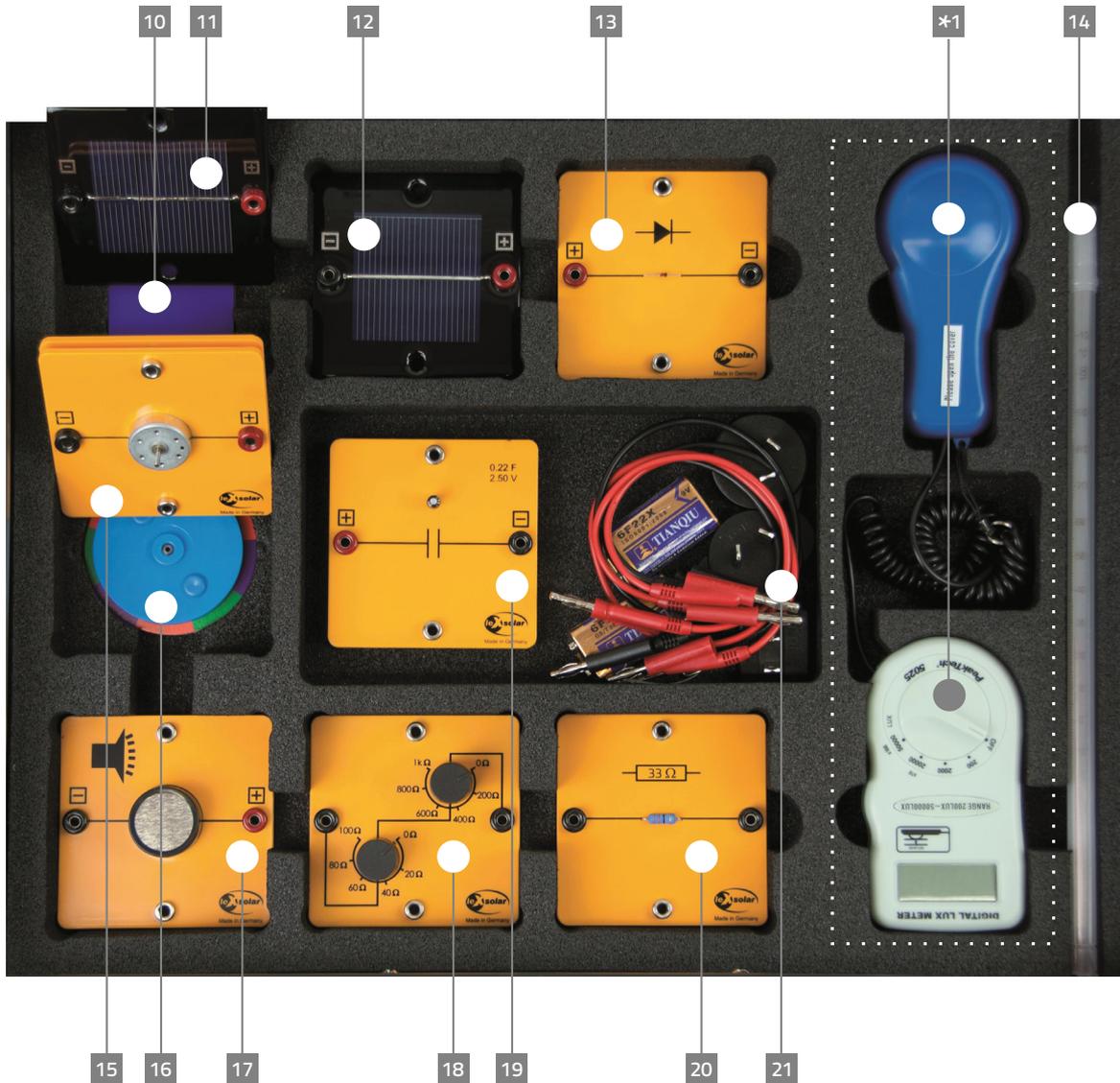


- |  |   |
|--|---|
| <p><b>1</b> 2xL2-06-011 Digital multimeter<br/>2xL2-06-011 Digitalmultimeter</p> <p><b>2</b> 1100-19 leXsolar-Base unit<br/>1100-19 leXsolar Grundeinheit groß</p> <p><b>3</b> 3x1100-01 Solar module 0.5 V, 420 mA<br/>3x1100-01 Solarmodul 0.5 V, 420 mA</p> <p><b>4</b> 1100-29 Solar cell cover set<br/>1100-29 Satz Abdeckung f. Solarzelle</p> | <p><b>5</b> 1100-20 Lighting module<br/>1100-20 Beleuchtungsmodul</p> <p><b>6</b> 9105-05 PowerModul with power supply<br/>9105-05 PowerModul mit Stromversorgungsgerät</p> <p><b>7</b> L3-03-016 leXsolar-CD<br/>L3-03-016 leXsolar-CD</p> <p><b>8</b> L2-05-024 Hook weight 20g<br/>L2-05-024 Hakengewicht 20g</p> <p><b>9</b> 1100-24 Gear motor module<br/>1100-24 Getriebemotormodul</p> |
|--|---|

Version number  
 Versionsnummer

L3-03-130\_01.07.2015

Layout diagram leXsolar-PV Ready-to-go  
 Item-No.1105  
 Bestückungsplan leXsolar-PV Ready-to-go  
 Art.-Nr.1105



- |  |  |
|--|--|
| <p><b>10</b> 1100-30 Color filters<br/>1100-30 Satz Farfilter</p> <p><b>11</b> 1100-02 Solar module 1.5 V, 280 mA<br/>1100-02 Solarmodul 1.5 V, 280 mA</p> <p><b>12</b> 1100-07 Solar module 0.5 V, 840 mA<br/>1100-07 Solarmodul 0.5 V, 840 mA</p> <p><b>13</b> 1100-21 Diode module<br/>1100-21 Diodenmodul</p> <p><b>14</b> L2-06-016 Laboratory thermometer<br/>L2-06-016 Laborthermometer</p> <p><b>15</b> 1100-27 Motor module<br/>1100-27 Motormodul</p> <p><b>16</b> 1100-28 Color discs with mount-Set I<br/>1100-28 Farbscheiben-Set I</p> <p><b>17</b> 1100-25 Buzzer module<br/>1100-25 Hupenmodul</p> | <p><b>18</b> 1100-23 Potentiometer module<br/>1100-23 Potentiometermodul</p> <p><b>19</b> 1400-07 Capacitor module 220 mF, 2.5 V<br/>1400-07 Kondensatormodul 220 mF, 2.5 V</p> <p><b>20</b> 1100-22 Resistor module<br/>1100-22 Widerstandsmodul</p> <p><b>21</b> L2-06-012 Test lead 25 cm, black<br/>L2-06-012 Messleitung 25 cm, schwarz<br/>L2-06-013 Test lead 25 cm, red<br/>L2-06-013 Messleitung 25 cm, rot<br/>2xL2-06-014 Test lead 50 cm, black<br/>2xL2-06-014 Messleitung 50 cm, schwarz<br/>2xL2-06-015 Test lead 50 cm, red<br/>2xL2-06-015 Messleitung 50 cm, rot</p> <p>Optional expansions<br/>Optionale Erweiterungen</p> <p><b>*1</b> L2-06-034 Luxmeter<br/>L2-06-034 Luxmeter</p> |
|--|--|

# leXsolar - PV Ready-to-go

## Lehrerheft

### Inhalt

Kapitel 1: Theoretische Grundlagen zur Photovoltaik .....	7
1.1 Einleitung .....	7
1.1.1 Was ist Photovoltaik? .....	7
1.1.2 Photovoltaik im Spektrum der erneuerbaren Energiequellen .....	7
1.1.3 Kosten .....	8
1.1.4 Effizienz .....	9
1.1.5 Anwendungen .....	10
1.2 Anforderungen an Materialien für die Photovoltaik .....	10
1.3 Phänomenologische Erklärung des p/n-Übergangs .....	11
1.3.1 Der Halbleiterkristall .....	11
1.3.2 Dotierung von Halbleitern .....	11
1.3.3 Der p/n-Übergang .....	12
1.4 Photovoltaik für Fortgeschrittene .....	14
1.4.1 Bändermodell und Energielücke .....	14
1.4.2 Absorption und Absorptionsspektrum .....	15
1.4.3 Warum gibt es eine ideale Bandlücke für Solarzellen? .....	16
1.4.4 Eigenschaften und Verhalten der Ladungsträger im Kristall: Generation von Elektron-Loch-Paaren bei Beleuchtung .....	17
1.4.5 Aufbau der Solarzelle .....	18
Kapitel 2: Bezeichnung und Handhabung der Experimentiergeräte .....	20
1. Verstehen des leXsolar Stecksystems .....	28
2. Optische Täuschungen .....	31
2.1 Der Grundaufbau für Farbscheibenexperimente .....	32
2.2 Farbeigenschaften .....	33
2.3 Die additive Farbmischung .....	34
2.4 Optische Täuschungen mit der Benham-Scheibe .....	35
2.5 Optische Täuschungen mit der Relief-Scheibe .....	36
3. Experimente zu verschiedenen Strahlungsarten .....	37
3.1 Der Einfluss der diffusen Strahlung auf die Solarzellenleistung (qualitativ) .....	38

3.2 Der Einfluss der diffusen Strahlung auf die Solarzellenleistung (qualitativ).....	39
3.3 Der Intensität der Albedostrahlung von verschiedenen Stoffen (qualitativ) .....	40
4. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche .....	41
5. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts.....	45
5.1 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (qualitativ) .....	46
5.2 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (quantitativ) .....	48
6. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke .....	50
6.1 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke 1 (qualitativ).....	51
6.2 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke 2 (qualitativ).....	52
6.3 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke 1 (quantitativ) .....	54
7. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Temperatur.....	56
8. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Frequenz des einfallenden Lichts .....	59
9. Der Diodencharakter der Solarzelle.....	62
9.1 Die Dunkelkennlinie einer Solarzelle .....	63
9.2 Der Innenwiderstand einer Solarzelle bei Sperr- und Durchlassrichtung bzw. Abdunkelung und Beleuchtung.....	65
10. Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle .....	67
10.1 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Last.....	69
10.2 Die U-I-Kennlinie und der Füllfaktor einer Solarzelle .....	71
10.3 Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke .....	74
11. Das Verhalten von Spannung und Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen .....	77
11.1 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltungen von Solarzellen (qualitativ).....	78
11.2 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltungen von Solarzellen (quantitativ) .....	79
12. Das Verhalten von Spannung und Stromstärke bei der Abschattung von Solarzellen in Reihen- und Parallelschaltung.....	81
12.1 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke bei der Abschattung einer Solarzelle in Reihenschaltungen (qualitativ).....	82
12.2 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke bei der Abschattung einer Solarzelle in Reihenschaltungen (quantitativ) .....	83
12.3 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke bei der Abschattung von Solarzellen in Parallelschaltungen (quantitativ).....	85
13. Simulation eines Inselsystem mit Solaranlage.....	87
14. Anwendungsexperimente.....	92
14.1 Die Wirkungsgradbestimmung mehrere Energieumwandlungen .....	93
14.2 Drehrichtung und Geschwindigkeit eines Motors .....	95

14.3 Anlaufstrom und Betriebsstrom eines Motors ..... 96

# Kapitel 1: Theoretische Grundlagen zur Photovoltaik

## 1.1 Einleitung

### 1.1.1 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.

### 1.1.2 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 1.1 stellt diese Energiequellen und die daraus gespeisten erneuerbaren Energieformen dar.

Abbildung 1.2 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.

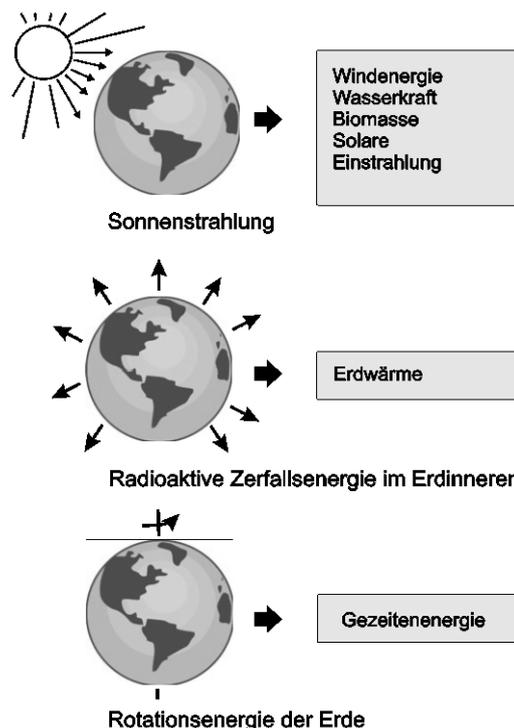


Abbildung 1.1: Die Quellen regenerativer Energie.

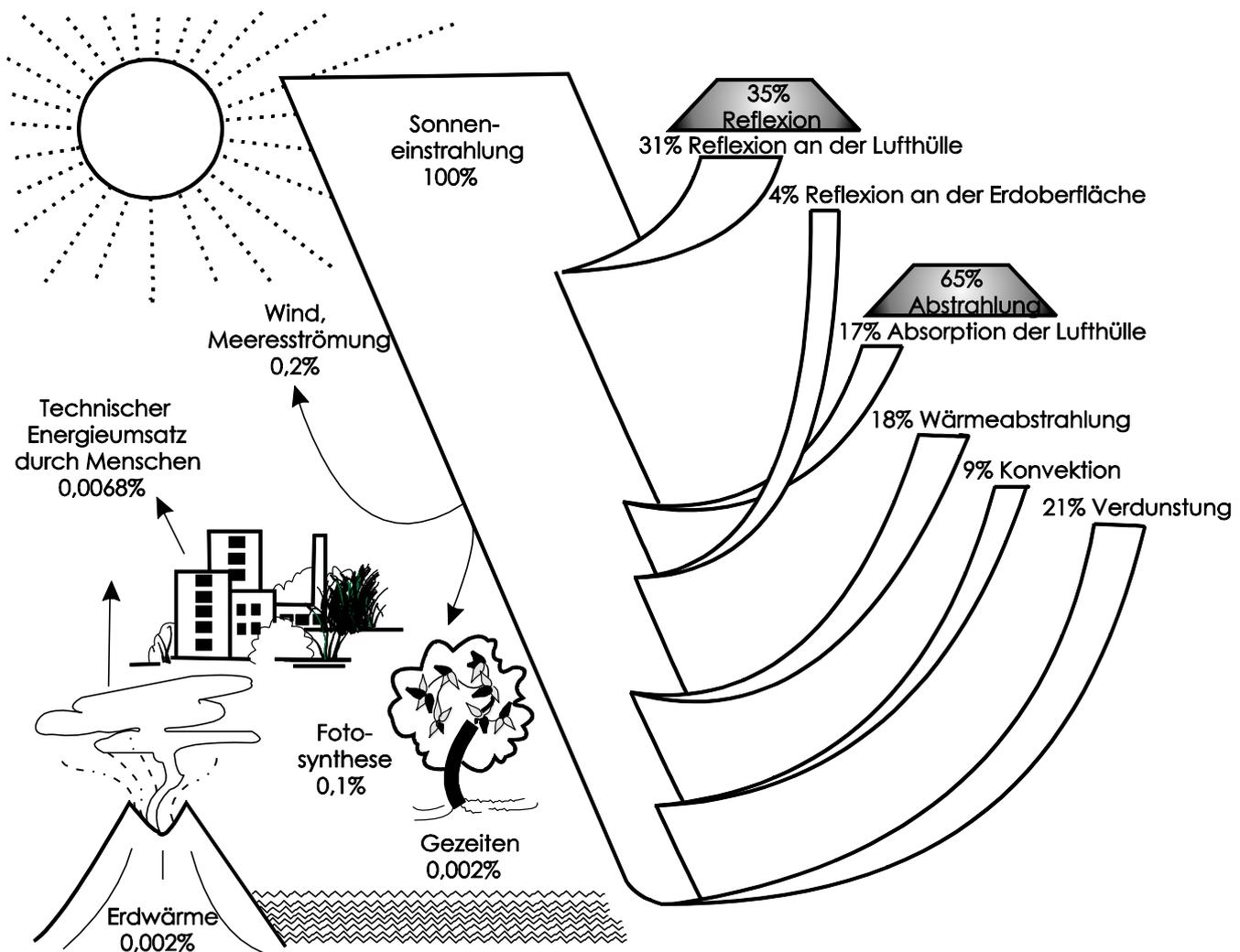
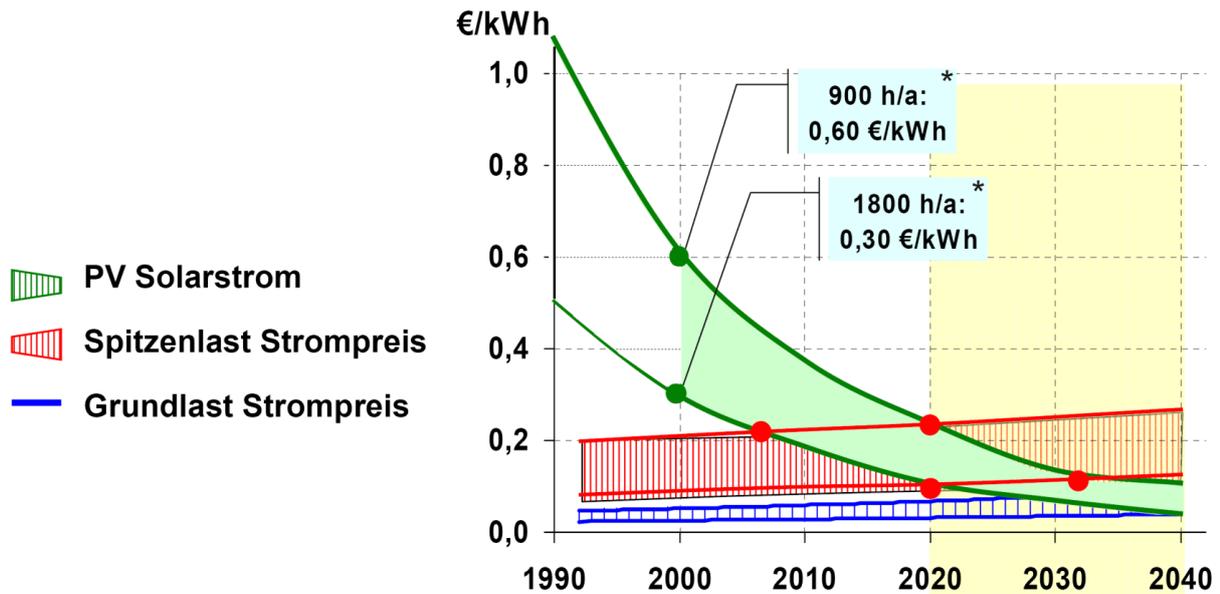


Abbildung 1.2: Energiebilanz der Erde.

### 1.1.3 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.



**Marktunterstützung notwendig:**

**Abbildung 1.3:** Mögliche Kostenentwicklung von photovoltaisch generierter Elektrizität im Vergleich zu Elektrizität, die mit nicht erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird. Quelle: SCHOTT-Solar

Abbildung 1.3 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 ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) 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 so viel 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 1.3 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 Marktanzreizprogramme wettbewerbsfähig sein.

### 1.1.4 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 2 und 3 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 der heutigen Effizienz den Energiebedarf der Menschheit komplett befriedigen. Die Einstrahlung selbst übersteigt die Erfordernisse um einen Faktor von wenigstens 10.000 (vgl. Abbildung 1.2.).

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

### **1.1.5 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-Gesetzes (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.

### **1.2 Anforderungen an Materialien für die Photovoltaik**

Eine Solarzelle wandelt Strahlungsenergie, d. h. die Energie von Photonen direkt in elektrische Energie um. Dies geschieht auf Grund des photovoltaischen oder auch inneren lichtelektrischen Effekts. Für dessen Auftreten müssen drei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Die Strahlung muss absorbiert werden.
2. Die Lichtabsorption muss zur Anregung von beweglichen negativen und positiven Ladungsträgern führen.
3. Die Ladungsträger müssen getrennt werden, d.h. ihre Coulombanziehung muss überwunden werden.

Diese Forderungen lassen sich mit bestimmten Polymer-Verbindungen, organischen Farbstoffen, Elektrolyt-Halbleiter-Kontakten oder anorganischen Halbleitern erfüllen. Solarzellen aus den drei erstgenannten Materialien sind zurzeit noch im Forschungsstadium und erreichen Laborwirkungsgrade von 5% (Polymere), 4% (Farbstoffe) bzw. 10% (Elektrolyt/Halbleiter). Im Gegensatz dazu erreichen klassische, aus dem Halbleiter Silizium aufgebaute Solarzellen Wirkungsgrade im Bereich >15%. Ein großes Problem stellt jedoch bei den neuen Konzepten noch die Stabilität des Wirkungsgrades dar. Es ist beim derzeitigen Stand der Wissenschaft noch nicht klar, wie weit man den Wirkungsgrad und die Stabilität dieser drei neuen Solarzellen-Konzepte steigern kann, da teilweise die Physik der ablaufenden Prozesse noch nicht vollständig verstanden ist. Es bleibt also abzuwarten, ob sich eines oder mehrere dieser Konzepte in Zukunft am Markt etablieren können.

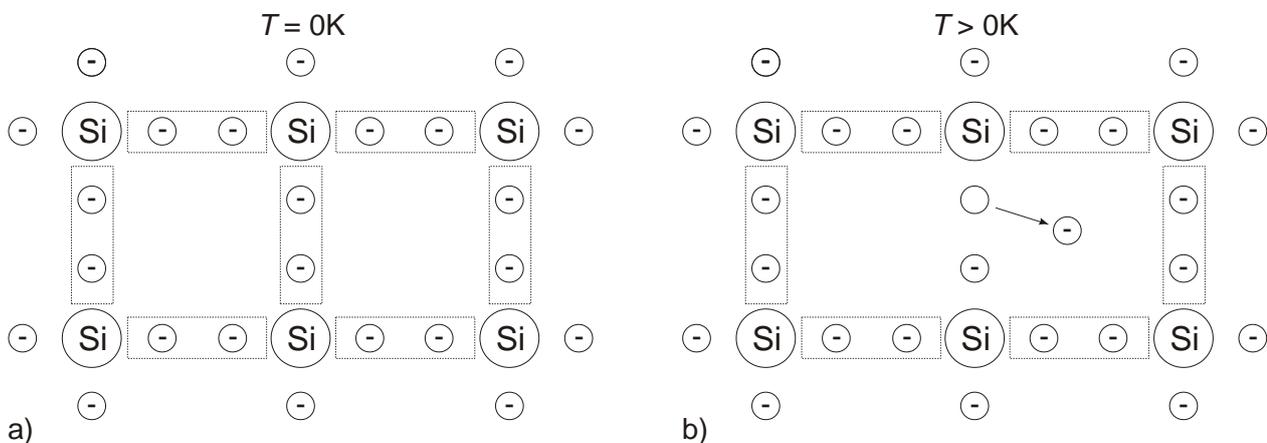
Die am besten erforschte und verstandene Solarzelle ist die Halbleiter-Solarzelle mit klassischem p/n-Übergang. Sie ist auch die einzige, die bereits heute in der Massenproduktion hergestellt und in größerem Umfang zur Stromerzeugung genutzt wird. Aus diesen Gründen wird sich dieses Heft ausschließlich mit Halbleiter-Solarzellen beschäftigen.

Halbleiter erfüllen die drei oben gestellten Bedingungen für den inneren photoelektrischen Effekt. Eine Absorption von Licht führt zur Anregung von beweglichen Ladungsträgern, den Elektronen und Löchern, welche im elektrischen Feld eines p/n-Übergangs voneinander getrennt werden können.

## 1.3 Phänomenologische Erklärung des p/n-Übergangs

### 1.3.1 Der Halbleiterkristall

Das für die Herstellung von Solarzellen zurzeit wohl bekannteste Halbleitermaterial ist Silizium. Im Periodensystem der Elemente ist es in der vierten Hauptgruppe zu finden – das heißt ein Siliziumatom besitzt vier Valenzelektronen. Im Halbleiterkristall sind diese Außenelektronen für die Bildung von stabilen Bindungen zwischen benachbarten Siliziumatomen verantwortlich. In Abbildung 0.4 a) wird der Aufbau eines solchen Kristalls schematisch wiedergegeben: Idealerweise bilden die Atomrümpfe des Silizium ein festes Kristallgitter. Da alle Elektronen an der Atombindung teilnehmen, gibt es keine freien Ladungsträger im Kristall. Jedoch können sich durch Energiezufuhr, z. B. in Form von Wärme, Elektronen aus dem Kristallgitter lösen, die dann als freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Bei Zimmertemperatur ist bereits ein kleiner Teil der Elektronen auf diese Weise *thermisch aktiviert* (s. Abbildung 0.4 b)). An Stelle des gebundenen Elektrons bleibt ein „Loch“ zurück. Diesem wird formal eine positive Ladung und die Bezeichnung *Defektelektron* zugeordnet.



**Abbildung 0.4:** a) Schematische Darstellung der Doppelbindungen zwischen den Valenzelektronen von Siliziumatomen bei der Bildung eines Kristallgitters. Bei einer Temperatur von 0K sind keine freien Ladungsträger im Kristall vorhanden. b) Durch thermische Aktivierung können sich Elektronen aus der Bindung lösen und als freie Ladungsträger zum Stromfluss beitragen. Der entstandenen Leerstelle wird formal eine positive Ladung und die Bezeichnung *Defektelektron* zugeordnet.

Die Leitfähigkeit eines Halbleiters steigt mit wachsender Temperatur. Im Realfall ist es allerdings auch unter Reinraumbedingungen nicht möglich völlig reine Siliziumkristalle herzustellen. Es existiert immer eine beträchtliche Anzahl an Verunreinigungen durch Fremdatome, die die intrinsische (materialeigene) Leitfähigkeit verfälscht. Auch in der Nähe des Temperaturnullpunkts wird es daher immer schon eine endliche Zahl freier Ladungsträger geben. Für Silizium beträgt die intrinsische Ladungsträgerdichte  $n_i$  bei  $20^\circ\text{C}$  beispielsweise  $n_i = 10^{10}\text{cm}^{-3}$ , d.h. bei dieser Temperatur gibt es  $10^{10}$  freie Elektronen und  $10^{10}$  freie Löcher pro Kubikzentimeter. Die Dichte der Verunreinigungen im Kristall beträgt typischerweise allerdings rund  $10^{16}\text{cm}^{-3}$ , liegt also um Größenordnungen über der Dichte der intrinsisch freien Ladungsträger. Die Eigenschaften des Kristalls werden sozusagen von den Verunreinigungen dominiert.

Es ist allerdings auch möglich solche Verunreinigungen gezielt einzusetzen, um die Eigenschaften des Halbleiters zu manipulieren. Man spricht hierbei von der so genannten *Dotierung*, die für die Herstellung funktionierender Halbleiterbauelemente unabdingbar ist.

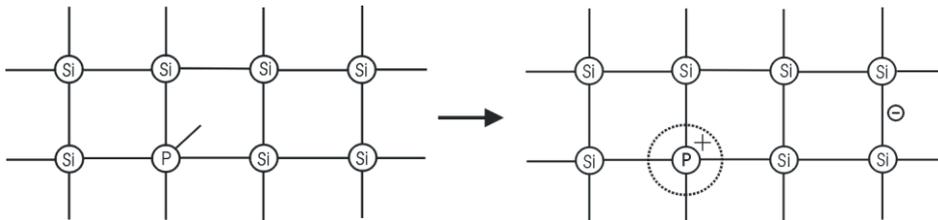
### 1.3.2 Dotierung von Halbleitern

Im thermodynamischen Gleichgewicht ( $T = \text{konst.}$ , keine Belichtung) ist in einem perfekten Kristall die Anzahldichte von Elektronen und Löchern,  $n$  und  $p$ , gleich groß. Durch den Einbau von Fremdatomen (Dotierung) kann man  $n$  und  $p$  gezielt verändern. Beispielsweise führt der Einbau eines Phosphoratoms auf einem Si-Gitterplatz zu einer Erhöhung der Elektronenkonzentration im Leitungsband. Ursache dafür ist, dass ein Phosphoratom (fünfte Hauptgruppe des Periodensystems) fünf Valenzelektronen besitzt, von denen nur vier für Bindungen mit den benachbarten Si-Atomen

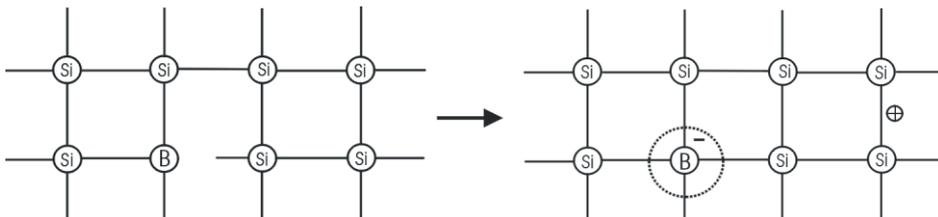
benötigt werden (vgl. Abbildung 0.5). Das verbleibende Elektron kann leicht abgespalten werden. In Phosphor-dotiertem Silizium findet man deswegen eine erhöhte Anzahl frei beweglicher Elektronen. Der Kristall bleibt trotzdem elektrisch neutral, da die entsprechende Anzahl ortsfester, positiv geladener Phosphor-Atomrümpfe zurückbleibt. Bezeichnet man diese mit  $N_D$ , so lautet die so genannte Neutralitätsbedingung im n-dotierten Halbleiter folglich

$$n = p + N_D.$$

Umgekehrt führt der Einbau eines Atoms aus der dritten Hauptgruppe des Periodensystems (z. B. Bor) zu einer höheren Konzentration von Defektelektronen, da nur drei Elektronen für die Bindungen mit den benachbarten Si-Atomen zur Verfügung stehen. (vgl. Abbildung 0.6).



**Abbildung 0.5:** n-Dotierung eines Si-Kristalls mit Phosphor: Das fünfte Außenelektron des Phosphors, das keinen Bindungspartner in Silizium findet, lässt sich vom Phosphor. Es entsteht ein freies Elektron und ein positiv geladenes Phosphor-Atom.



**Abbildung 0.6:** p-Dotierung von Si durch Bor. Das bei Bor fehlende vierte Außenelektron wird durch ein Elektron aus dem Valenzband des Siliziumkristalls aufgefüllt. Da dieses Elektron nun im Valenzband fehlt, ist ein frei bewegliches Loch entstanden und das Boratom liegt im Si-Kristall negativ geladen vor.

Unabhängig von der Dotierung besteht zwischen der Konzentration von Elektronen ( $n$ ) und von Löchern ( $p$ ) der folgende Zusammenhang:

$$n_i^2 = np$$

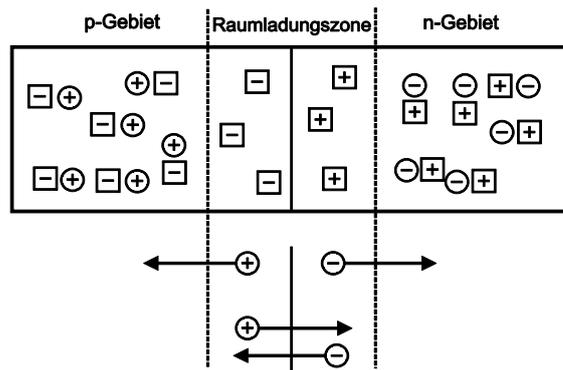
Da im undotierten (intrinsischen) Halbleiter  $n = p$  gilt, ist  $n_i$  gerade die intrinsische Ladungsträgerdichte und damit eine charakteristische Größe für ein bestimmtes Halbleitermaterial. Aus dem Zusammenhang folgt: Hebt man die Konzentration der einen Ladungsträgersorte an, so erzeugt man damit eine Abnahme der anderen. Die überwiegende Ladungsträgersorte nennt man *Majoritätsträger*, die in der Minderzahl vorhandene *Minoritätsträger*. Im n-dotierten Halbleiter sind beispielsweise die Elektronen die Majoritätsträger. Für den Aufbau einer Raumladungszone mit innerem elektrischem Feld sind die Majoritätsträger verantwortlich, für den Photostrom am p/n-Übergangs unter Beleuchtung sind die Eigenschaften und das Verhalten der Minoritätsträger entscheidend.

### 1.3.3 Der p/n-Übergang

#### *Die Entstehung der Raumladungszone und der eingebauten Spannung durch Diffusion von Majoritätsladungsträgern*

Einen p/n-Übergang kann man technisch realisieren, indem man in einen p-leitenden Kristall (Bor-dotiert) bei hohen Temperaturen Phosphor eindiffundieren lässt. Bei Raumtemperatur können die Dotanden nicht mehr diffundieren und man erhält ein ortsfestes Dotierungsprofil. Wir wollen hier den Idealfall eines p/n-Übergangs betrachten, in dem ein homogen p-dotiertes und ein homogen n-dotiertes Gebiet direkt aufeinander stoßen. In Abbildung 0.7 ist dies schematisch dargestellt. An der Grenze zwischen beiden Schichten findet ein Ladungsaustausch statt – ein Teil der freien Elektronen

der n-Schicht (Majoritätsladungsträger) diffundiert in das Gebiet der p-Schicht (Diffusion findet immer vom Gebiet hoher Konzentration ins Gebiet niedrigerer Konzentration statt) und rekombiniert dort mit freien Löchern. Umgekehrt diffundieren Löcher aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet, rekombinieren dort ebenfalls mit Elektronen. Dadurch nehmen in der Kontaktzone die Dichten von freien Löchern und Elektronen ab. Das Grenzgebiet ist nun an freien Ladungsträgern verarmt und wird daher auch als Verarmungszone bezeichnet. Die Dichte an ortsfesten, negativ bzw. positiv geladenen Atomrümpfen der Dotanden (hier: Bor und Phosphor) bleibt aber unverändert, so dass insgesamt eine Raumladungszone im p-Gebiet entsteht. Der Teil der Verarmungszone, der im n-dotierten Gebiet liegt, ist positiv geladen, da hier ortsfeste, positiv geladene Dotanden (Phosphor-Atomrümpfe) vorliegen, während der im p-Gebiet gelegene Teil eine ortsfeste negative Ladung aufweist (Bor-Atomrümpfe).



**Abbildung 0.7:** Schematische Darstellung der Verteilung von Ladungsträgern und geladenen Dotanden im unbeleuchteten p/n-Übergang. Die runden, unausgefüllten Symbole bezeichnen freie Elektronen und Löcher, die grau unterlegten Quadrate ortsfeste, geladene Dotanden. Diese sorgen für die Raumladung in der Raumladungszone. Die Gebiete außerhalb der Raumladungszone sind elektrisch neutral.

Man erkennt nun leicht, dass sich durch den Diffusionsprozess eine Spannung am Übergang aufgebaut hat: Eine positive Probeladung direkt an der Grenze zwischen p- und n-Gebiet spürt eine Kraft hin zum p-Gebiet, da sie von der negativen Raumladung angezogen und von der positiven Raumladung abgestoßen wird (vgl. Abbildung 0.7). Diese Kraft wirkt offensichtlich der Diffusionsrichtung entgegen, so dass sich ein Gleichgewicht einstellen kann. Eine Kraft  $F$  auf eine Ladung  $Q$  ist ein Hinweis auf ein elektrisches Feld  $E$  ( $F = EQ$ ), welches durch eine Spannung hervorgerufen wird. Die gesamte Spannung, die am Übergang entstanden ist, entspricht der Arbeit, die man aufbringen muss, um eine positive Ladung quer durch die Raumladungszone vom p-Gebiet ins n-Gebiet zu bringen. Sie wird als *Diffusionsspannung* bzw. *Eingebaute Spannung* bezeichnet.

### **Der p/n-Übergang unter Beleuchtung: Ladungstrennung und Diffusion von Minoritätsladungsträgern**

Wird eine solcher p/n-Übergang beleuchtet, so entstehen durch Paarbildung Elektronen und Löcher. Geschieht die Anregung in der Raumladungszone, so werden die Ladungsträger durch die Feldkräfte sofort getrennt: Löcher werden ins p-Gebiet und Elektronen ins n-Gebiet gezogen (vgl. Abbildung 0.7). Die folgende Abschätzung zeigt jedoch, dass es nicht ausreicht, wenn nur die Photonen verwertet werden, die in der Raumladungszone absorbiert werden: Der Absorptionskoeffizient für Silizium bei einer Wellenlänge  $\lambda = 820\text{nm}$ , welche einer Lichtenergie von  $hf = 1,7\text{eV}$  entspricht, beträgt  $\alpha = 600\text{cm}^{-1}$ . Bei dieser Wellenlänge absorbiert Silizium also das meiste Licht. Für die Eindringtiefe des Lichtes in den Halbleiterkristall ergibt sich damit  $d = 1/\alpha = 16\mu\text{m}$ . (Eine Beschreibung der dieser Rechnung zugrunde liegenden physikalischen Gegebenheiten findet sich in Kapitel 0.) Die Ausdehnung der Raumladungszone ist bei Silizium aber typischerweise  $w = 1\mu\text{m}$ . Der größte Teil des Lichtes wird damit außerhalb der Raumladungszone absorbiert. Es muss also noch einen weiteren Mechanismus geben, der es ermöglicht, auch das dort absorbierte Licht für den Photostrom auszunutzen. Der gesuchte Mechanismus ist die Diffusion von Minoritätsladungsträgern: Wird ein Photon – z. B. im p-Gebiet – außerhalb der Raumladungszone absorbiert, so führen die entstandenen Ladungsträger zufällige Bewegungen aus. Kommt dabei das Elektron an den Rand der

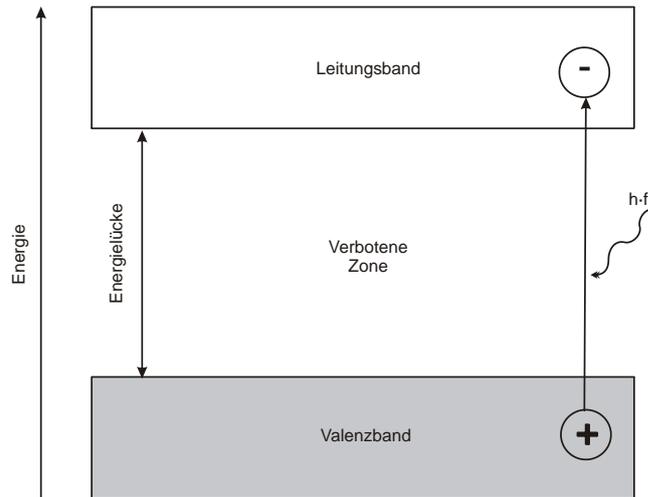
Raumladungszone, so wird es durch das dort herrschende Feld abgesaugt. Die Raumladungszone ist also eine Senke für Elektronen aus dem p-Gebiet. Trotz der zunächst zufälligen, ungerichteten Bewegung der Elektronen entsteht damit ein Strom in eine bestimmte Richtung, der zum Photostrom der Solarzelle beiträgt. Würden die Elektronen beliebig lange leben, könnten alle irgendwann die Raumladungszone erreichen und damit für die Solarzelle ausgenutzt werden. Da sie aber auch wieder mit den vorhandenen Löchern rekombinieren können (z. B. an Störstellen, Korngrenzen, Oberflächen etc.), leben sie nur eine beschränkte Zeit. In dieser Zeit legen sie durch ihre willkürliche Bewegung auch nur eine beschränkte mittlere Wegstrecke zurück, die *Diffusionslänge*  $L_D$  (vgl. Kapitel 0). Entscheidend für den Wirkungsgrad der Solarzelle ist, dass die Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger größer ist als die Eindringtiefe des Lichtes. In diesem Fall erreichen die angeregten Ladungsträger aus dem gesamten Bereich, auf den sich die Absorption verteilt, mit großer Wahrscheinlichkeit die Raumladungszone. Hat ein Minoritätsladungsträger einmal die Raumladungszone erreicht, so wird er vom dort herrschenden elektrischen Feld durch diese hindurch gezogen. Er kann dann als Majoritätsladungsträger problemlos den Rest der Solarzelle durchqueren und trägt damit zum Photostrom Strom bei, der außen an der Solarzelle abgegriffen werden kann. Behindert man das Abfließen der Ladungsträger im äußeren Stromkreis durch einen Widerstand (Verbraucher), so reduziert sich der Photostrom leicht; dafür entsteht ein gewisser Stau der photogenerierten Ladungsträger, der zu einer Photospannung führt.

## **1.4 Photovoltaik für Fortgeschrittene Photovoltaik für Fortgeschrittene**

Um ein tieferes Verständnis für die Funktion einer Solarzelle zu vermitteln, werden im folgenden Kapitel die Eigenschaften eines Halbleiterkristalls aus festkörperphysikalischer Sicht näher erläutert. Die bei der Erzeugung der Photospannung ablaufenden Prozesse werden dabei im Rahmen des Bändermodells behandelt.

### **1.4.1 Bändermodell und Energielücke**

Die Elektronen einzelner, isolierter Atome eines Halbleitermaterials (z. B. Silizium) befinden sich nach der Quantentheorie auf so genannten Orbitalen. Ein Orbital ist ein Bereich, für den sich an jedem Punkt im Raum eine Wahrscheinlichkeit angeben lässt, das Elektron dort vorzufinden. Jedem Orbital kann man eine bestimmte Energie zuordnen. Die Quantentheorie besagt nun (wie es das Bohr-Sommerfeldsche Atommodell vorher schon postuliert hatte), dass die Elektronen eines Atoms nur Orbitale mit ganz bestimmten, diskreten Energien einnehmen können und alle anderen Energiewerte für die Elektronen sozusagen verboten sind. Baut man nun aus solchen Atomen einen Kristall auf (wie es bei den meisten Halbleitermaterialien der Fall ist), so überlappen sich die Orbitale benachbarter Atome. Dies führt einerseits dazu, dass die einzelnen Elektronen nicht mehr auf bestimmte Atome lokalisiert, sondern über größere Bereiche des Festkörpers „verschmiert“ sind: Sie bilden im Kristall wellenförmige Zustände aus. Andererseits verbreitern sich die diskreten Energieniveaus der Atome zu Energiebändern, d. h. zu Bereichen im Energiespektrum, in denen sich Elektronen aufhalten können (siehe Abbildung 0.8). Die Energielücke  $E_G$ , eine charakteristische Größe für Halbleiter, die für die Funktion der Solarzelle entscheidend ist, befindet sich zwischen den äußeren beiden Elektronenbändern, also zwischen dem letzten vollbesetzten Band, dem *Valenzband*, und dem am absoluten Temperatur-Nullpunkt ( $T = 0K$ ) völlig unbesetzten *Leitungsband*. Werden Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband angeregt (thermisch oder optisch), so können sie zum Stromtransport beitragen. Die Anregung eines Elektrons vom Valenz- ins Leitungsband erfordert dabei mindestens den Energiebetrag  $E_G$ . Um in einer Solarzelle durch Lichtabsorption ein Elektron zur Verfügung zu stellen, muss ein Lichtteilchen (Photon) also mindestens die Energie  $hf = E_G$  haben. Hierbei bezeichnet  $f$  die Frequenz des Lichtes und  $h$  das Planck'sche Wirkungsquantum. (Die Energie eines Photons hängt also nicht von der Intensität des Lichtes, sondern nur von dessen Frequenz bzw. Wellenlänge ab.)



**Abbildung 0.8:** Schematische Bandstruktur eines Halbleiters und Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares durch Absorption eines Photons der Energie  $E = hf > E_G$ .

### 1.4.2 Absorption und Absorptionsspektrum

Die Absorption wird beschrieben durch die Absorptionskonstante  $\alpha$ , die durch das Absorptionsgesetz (Lambert-Beer-Gesetz)

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha d}$$

definiert ist.

Hierbei bezeichnet  $\Phi_0$  die Intensität des einfallenden Lichtes und  $\Phi$  die Lichtintensität nach Zurücklegen eines Weges der Länge  $d$  im Material. Ist  $d$  die Gesamtdicke des Materials, so ist  $\Phi/\Phi_0$

der Anteil des Lichtes, der nicht absorbiert wurde. Das Absorptionsspektrum, d. h. die Abhängigkeit der Absorptionskonstante von der Lichtwellenlänge bzw. der Energie der Photonen  $\alpha(\lambda)$ , hängt mit der Bandstruktur des Halbleitermaterials zusammen. Die Spektren verschiedener Halbleiter sind in Abbildung 0.9 dargestellt.

Nach dem Zurücklegen des Weges  $d = 1/\alpha$  des Lichtes im Halbleiter ist dessen Intensität um den Faktor  $e$  abgeschwächt. Die Größe  $L_G = 1/\alpha$  wird deshalb als Eindringtiefe bezeichnet. Abbildung 0.9 zeigt, wie gut die einzelnen Halbleitermaterialien Photonen bestimmter Frequenzen absorbieren. Photonen mit Energien kleiner der Bandlücke werden demnach, wie oben bereits beschrieben, nicht absorbiert. Man kann auch erkennen, dass die Absorption von Silizium wesentlich schlechter ist als die anderer Materialien. Man braucht also wesentlich dickere Schichten Silizium als z. B. Galliumarsenid (GaAs), um den gleichen Lichtstrom zu absorbieren. Die für das Spektrum des Sonnenlichtes jedoch recht günstige Bandlücke von 1,12eV sowie die sehr weit entwickelte Technologie für Si-Solarzellen und das häufige Vorkommen des Elements auf der Erde sprechen für die Verwendung von Silizium für Solarzellen.

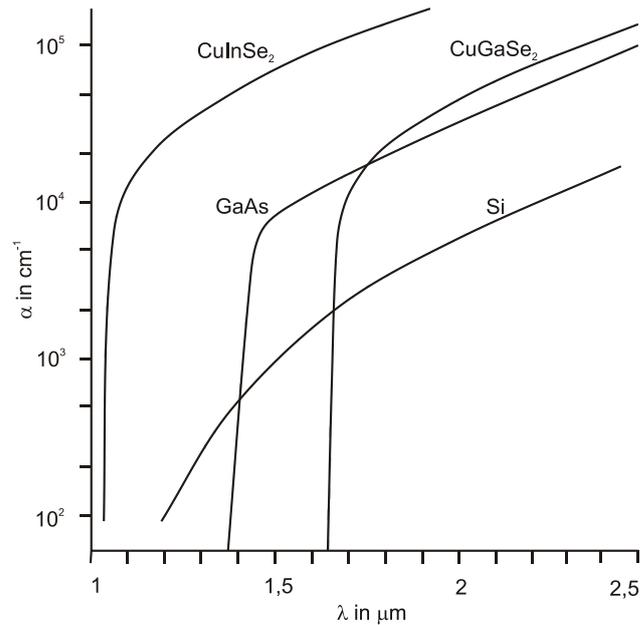


Abbildung 0.9: Optische Absorptionsspektren einiger wichtiger Halbleiter.

Aus den unterschiedlichen Absorptionsspektren der jeweiligen Materialien lässt sich jedoch nicht direkt auf die Abhängigkeit der abgegebenen Leistung von der Energie der einfallenden Photonen schließen! Diese so genannte spektrale Empfindlichkeit von Solarzellen wird auch sehr stark von anderen Effekten beeinflusst (Dotierung, Oberflächen etc.). Dieser Zusammenhang wird in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** auf Seite **Fehler! Textmarke nicht definiert.** ausführlich diskutiert.

### 1.4.3 Warum gibt es eine ideale Bandlücke für Solarzellen?

Nach dem oben Gesagten könnte man vermuten, dass ein Material umso besser für Solarzellen geeignet ist, je kleiner seine Bandlücke ist, denn in diesem Fall ist der Anteil an Photonen am geringsten, der auf Grund zu niedriger Photonenenergien nicht absorbiert werden kann. Es gibt aber auch einen gegenläufigen Effekt: Die maximale Spannung (angegeben in Volt), die eine Solarzelle abgeben kann, ist aus prinzipiellen Gründen immer etwas kleiner als die Bandlücke (angegeben in Elektronenvolt – eV) geteilt durch die Elementarladung  $e$  (vgl. Abbildung 0.11). Dies hat zur Folge, dass Solarzellen mit größerer Bandlücke tendenziell höhere Spannungen abgeben. Wenn man die beiden Effekte quantitativ betrachtet und die spektrale Verteilung des Sonnenlichtes berücksichtigt, stellt sich heraus, dass es eine ideale Bandlücke gibt. Galliumarsenid kommt dieser idealen Bandlücke sehr nahe. Die Kurve des maximal erreichbaren Wirkungsgrades über der Bandlücke verläuft aber zwischen ca. 1eV und 1,8eV ziemlich flach, so dass sich außer aus Germanium und Cadmiumsulfid aus allen in Abbildung 0.10 aufgeführten Materialien im Prinzip Zellen mit ähnlich hohen Wirkungsgraden herstellen lassen.

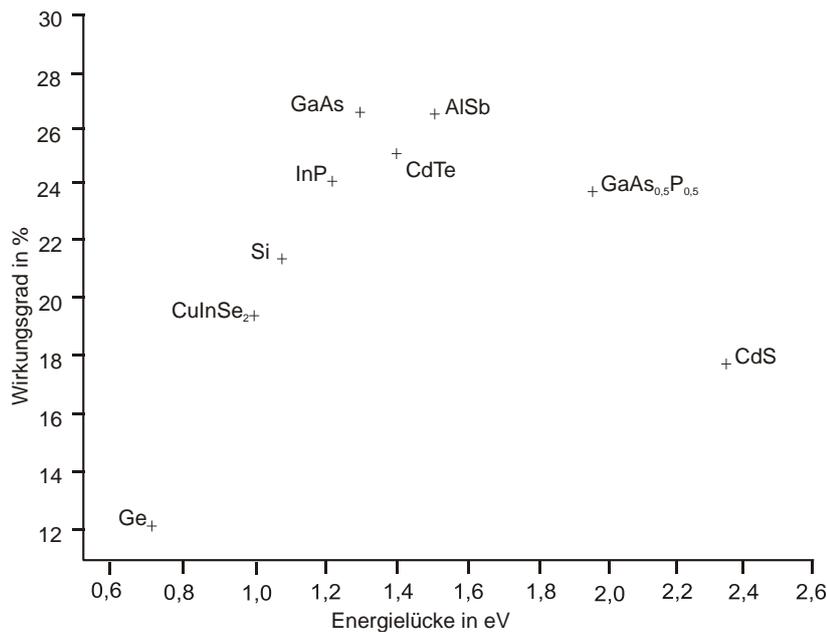


Abbildung 0.10: Theoretisch erreichbarer Wirkungsgrad bei 20°C als Funktion der Energielücke  $E_G$ .

#### 1.4.4 Eigenschaften und Verhalten der Ladungsträger im Kristall: Generation von Elektron-Loch-Paaren bei Beleuchtung

In den vorhergehenden Abschnitten ging es um die Entstehung der Energiebänder und Energielücken im Halbleiter, um die Absorption von Photonen und die damit verbundene Generation von Ladungsträgern. In diesem Abschnitt soll es um das Verhalten dieser Ladungsträger im Kristall gehen. Wird durch Lichtanregung ein Elektron aus dem zuvor voll besetzten Valenzband in das zunächst unbesetzte Leitungsband gehoben, so ist klar, dass das Elektron im Leitungsband sich als negativ geladener Ladungsträger im Band bewegen kann. Was bedeutet es aber, dass im Valenzband jetzt ein Elektron fehlt? Man kann sich das am Bild eines fast vollständig mit Wasser gefüllten Rohres klar machen, das an beiden Enden geschlossen ist und in dem sich vereinzelte Luftblasen befinden. Bewegt sich eine Luftblase nach rechts, so könnte man diesen Vorgang im Prinzip auch durch eine sehr komplizierte Bewegung des Wassers nach links beschreiben; aber das Bild der einzelnen Luftblase, die nach rechts wandert, ist einfacher und anschaulicher. In diesem Sinn betrachtet man in einem beinahe gefüllten Band, wie dem Valenzband, das fehlende Elektron nun als Luftblase im Elektronensee und bezeichnet diese als Loch bzw. Defektelektron. Da bei voll besetztem Valenzband der ganze Kristall aus Elektronen und positiv geladenen Atomkernen elektrisch neutral ist, kann man einem fehlenden Elektron eine positive Ladung zuordnen. Durch eine kollektive Bewegung der Elektronen (z. B. nach rechts) kann sich ein Loch nun (nach links) bewegen. Es verhält sich also wie ein positiv geladener, freier Ladungsträger. Zusammenfassend können wir festhalten, dass durch die Absorption eines Photons immer ein Paar aus einem Elektron im Leitungsband und einem Loch im Valenzband gebildet wird (Generation von Elektron-Loch-Paaren). Lichtanregung führt also zur Bildung von Elektronen und Löchern in gleicher Anzahl.

Mit Hilfe dieses Bildes lässt sich nun auch die Funktion des p/n-Übergangs im Rahmen des Bändermodells erklären. In Abbildung 0.11 sind die Vorgänge, die zur Stromerzeugung in der Solarzelle führen anschaulich skizziert.

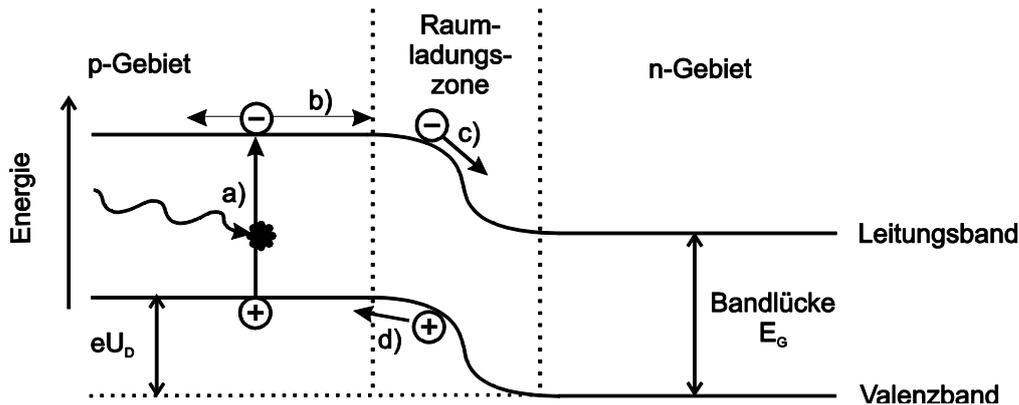


Abbildung 0.11: Rekombination von angeregten Ladungsträgern

Elektronen und Löcher können rekombinieren, d. h. ein Elektron aus dem Leitungsband füllt ein Loch im Valenzband und steht somit nicht mehr zur Stromleitung zur Verfügung. Die Energie des Elektron-Loch-Paares wird dabei in Form von Licht abgestrahlt oder führt zur Erwärmung des Kristalls. Die Rekombination verringert damit die Energieausbeute der Solarzelle. Der Rekombinationsprozess tritt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf, so dass sich für Elektronen bzw. Löcher eine mittlere Lebensdauer  $\tau_n$  bzw.  $\tau_p$  ergibt, deren Größen von der Natur des dominanten Rekombinationsprozesses abhängen. Mögliche wichtige Prozesse sind Übergänge direkt zwischen den Bändern und Rekombination über Defekte oder Fremdatome. Bei Silizium ist ersteres sehr unwahrscheinlich, so dass hohe Ladungsträgerlebensdauern auftreten können, falls die Defektdichte entsprechend gering ist. Dieser Vorteil wiegt den Nachteil der geringen Absorption von Silizium teilweise auf, was allerdings eine extrem hohe Materialqualität (chemische Reinheit und strukturelle Perfektion) voraussetzt.

Weitere Rekombinationsquellen sind die Oberfläche des Halbleitermaterials sowie Halbleiter-Metall-Kontakte (d. h. die Elektroden der Solarzelle), da hier das Halbleitergitter Defekte aufweist. Man kann die Rekombinationsverluste an den Oberflächen und Elektroden dadurch minimieren, dass man geeignete Dotierungsprofile wählt, die dafür sorgen, dass angeregte Minoritätsladungsträger (vgl. Kapitel 0) von den Oberflächen abgestoßen werden.

### Ladungsträgerbeweglichkeit, Leitfähigkeit, Schubweg und Diffusionslänge

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Ladungsträger ist die so genannte Ladungsträgerbeweglichkeit  $\mu$  im elektrischen Feld  $E$ , die sich aus der Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger  $v_d$  ergibt:

$$\mu = v_d / E.$$

Die Beweglichkeit der Ladungsträger bestimmt die Leitfähigkeit  $\sigma$  des Kristalls, die eine wichtige Kenngröße des Materials ist:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p).$$

Hier bezeichnen  $n$  und  $p$  die Dichte von Elektronen bzw. Löchern und  $\mu_{n/p}$  deren Beweglichkeit. Die Beweglichkeit beeinflusst außerdem den so genannten Schubweg, d. h. die Strecke, die ein Ladungsträger während seiner Lebensdauer  $\tau$  im elektrischen Feld driften kann. Der Schubweg ist eine entscheidende Größe für die Photoleitung eines Halbleitermaterials (Anwendung: Photowiderstand). Für Solarzellen ist die wichtigere Größe die Diffusionslänge  $L_D$  angeregter Ladungsträger, d. h. die Strecke, die ein Ladungsträger im feldfreien Material durch zufällige Bewegung typischerweise zurücklegt, bevor er rekombiniert (vgl. Kapitel 0). Auch in diese Größe geht die Beweglichkeit ein, da die Diffusionskonstante  $D$  der Ladungsträger direkt proportional zu deren Beweglichkeit ist.

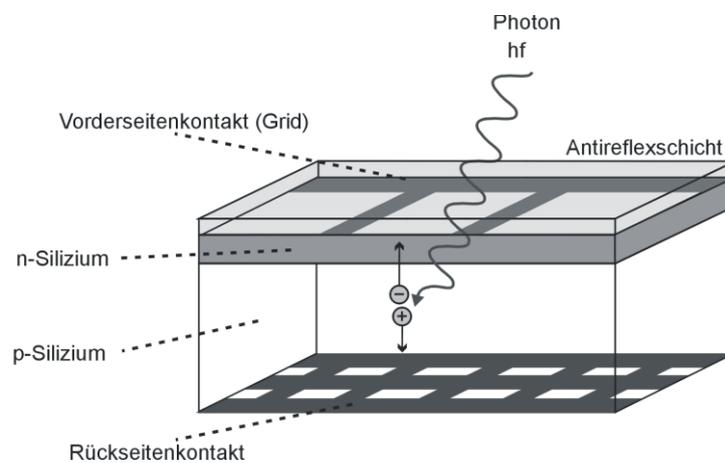
## 1.4.5 Aufbau der Solarzelle

Der Aufbau einer Solarzelle ist zunächst analog zu dem einer Halbleiterdiode. Sie besteht aus einer negativ und einer positiv dotierten Schicht eines Halbleitermaterials (Silizium), wobei die negative Schicht bei jeder Solarzelle die obere, dem Licht zugewandte darstellt. Bei Siliziumsolarzellen ist die n-Schicht der Solarzelle nur ca.  $1\mu\text{m}$  dick, die p-Schicht dagegen  $0,5\text{mm}$ . Auf der Oberfläche der

Solarzellen sind zum besseren Einfangen des Lichtes Antireflexschichten aufgebracht. Bei Zellen mit hohen Wirkungsgraden wird die Lichteinkopplung zudem noch durch Mikrostrukturen auf der Oberfläche erhöht, die das Licht in die Zelle hinein streuen. Das Licht bekommt dadurch einen größeren Laufweg im Material, was eine höhere Absorption zur Folge hat. Auf der Vorderseite der Zelle befindet sich das Grid, die gitterförmige Elektrode, die zumeist aus Silber besteht. Der Rückseitenkontakt ist – je nach Qualität der Zelle – ein Grid oder eine Metallschicht aus Aluminium oder Silber.

Bei Siliziumsolarzellen unterscheidet man verschiedene Typen. Die zwei am häufigsten verwendeten sind zum einen die ein- oder auch monokristalline Zelle, welche aus einem einzigen Siliziumkristall besteht. Sie liefert höchste Wirkungsgrade. Das ist darauf zurückzuführen, dass es in monokristallinem Material keine Korngrenzen gibt, die als Rekombinationszentren wirken könnten.

Zum anderen finden so genannte polykristalline Zellen Anwendung. Sie bestehen aus mehreren Kristallen und haben entsprechend den Rekombinationsverlusten an den Korngrenzen geringere Wirkungsgrade als monokristalline Zellen. Ihre Herstellung ist jedoch auch einfacher und damit kostengünstiger.

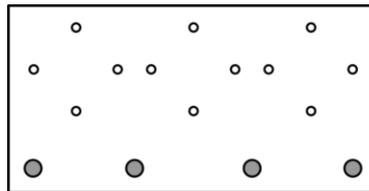
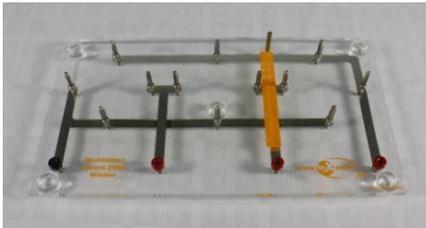


**Abbildung 0.12:** Aufbau einer Solarzelle (schematisch).

## Kapitel 2: Bezeichnung und Handhabung der Experimentiergeräte

In der folgenden Auflistung werden alle im leXsolar-PV Ready-to-go Koffer enthaltenen Einzelteile aufgeführt. Zu jeder Komponente finden Sie die Bezeichnung mit Artikelnummer, eine Abbildung, das Piktogramm in den Versuchsaufbauten und Hinweise zur Bedienung. Mit Hilfe der Artikelnummer können Sie jedes Einzelteil separat nachbestellen.

### Grundeinheit 1100-19

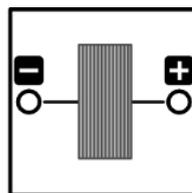


Die Grundeinheit ist eine Steckplatine auf der bis zu 3 Module in Reihe oder parallel zueinander geschaltet werden können. Der Strom fließt über die an der Unterseite angebrachten Leitungen. Um die Komponenten auf der Grundeinheit mit anderen zu verbinden, befinden sich am unteren Ende 4 Anschlüsse.

Die beiden Schaltpläne zum Auflegen auf die Grundeinheit zeigen jeweils die Verbindungen für eine Reihen- oder Parallelschaltung. Zum Wechsel zwischen Reihen- und Parallelschaltung müssen die Module jeweils um 90° gedreht aufgesteckt werden.

Des Weiteren befindet sich in der Mitte rechts ein Schattenstab mit orangefarbener Winkelskala. Dieser Schattenstab kann dazu genutzt werden, um auf der Grundeinheit aufgesteckte Solarmodule in einen bestimmten Winkel zu einer Lichtquelle zu halten. Für einen scharf umrissenen Schatten sollte die Lichtquelle ausreichend klein sein und einen möglichst großen Abstand zur Grundeinheit besitzen.

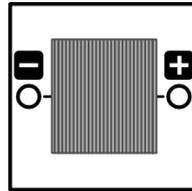
### Solarmodul 1100-01 0,5V 420 mA



#### Technische Daten:

Material: polykristallines Silizium  
Leerlaufspannung: 0,5V  
Kurzschlussstromstärke: 420mA  
Spitzenleistung: 0,2Wp

### Solarmodul 1100-02 0,5V 840 mA

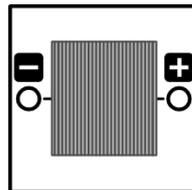


Auf der Rückseite befindet sich die Angabe zur Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke

#### Technische Daten:

Material: polykristallines Silizium  
Leerlaufspannung: 0,5V  
Kurzschlussstromstärke: 840mA  
Spitzenleistung: 0,4Wp

### Solarmodul 1100-07 1,5V 280 mA



Das Solarmodul ist eine Reihenschaltung aus den 3 Solarzellen. Auf der Rückseite befindet sich die Angabe zur Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke

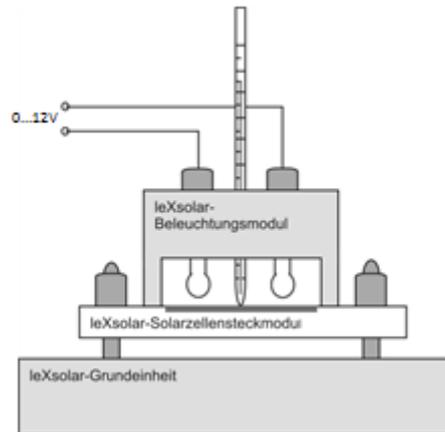
#### Technische Daten:

Material: polykristallines Silizium  
Leerlaufspannung: 1,5V  
Kurzschlussstromstärke: 280mA  
Spitzenleistung: 0,13Wp

## Beleuchtungsmodul (1100-20) mit PowerModul (2105-00)



Das Beleuchtungsmodul wird mit dem PowerModul betrieben. Im Inneren des Beleuchtungsmoduls befinden sich 4 Glühlampen, die durch das Herein- oder Herausdrehen zur Beleuchtung beitragen können oder nicht. Eine Veränderung der Helligkeit durch verschiedene Spannungen ist nicht zu empfehlen, da sich hierdurch auch das Spektrum des abgestrahlten Lichts ändert und die Messergebnisse hierdurch verfälscht werden können. In den Experimenten wird das Beleuchtungsmodul direkt auf die Solarzellen aufgelegt. Hierbei ist darauf zu achten, dass es aufgrund der Erwärmung der Solarzelle durch die Wärmestrahlung nicht zu lange auf der Solarzelle steht. Zwischen den beiden Anschlüssen befindet sich ein Loch für das Laborthermometer mit dem für einzelne Experimente die Temperatur der Solarzelle bestimmt werden kann. Das PowerModul ist ein kompaktes und intuitiv zu bedienendes Stromversorgungsgerät für Experimente. Zum Betrieb muss zunächst das beiliegende Steckernetzteil in die Steckdose gesteckt und mit der Eingangsbuchse oben rechts am PowerModul verbunden werden. Die Spannung wird mit der „+“ - und „-“ - Taste ausgewählt und durch die LEDs angezeigt. Ist die gewünschte Spannung eingestellt, wird mit dem Einschalt-Button die Spannung an die Ausgangsbuchsen angelegt. Die Spannung liegt an, solange der Einschalt-Button rot leuchtet. Bei Kurzschluss oder Strömen  $>2$  A schaltet das PowerModul die Spannung ab.



### Technische Daten:

#### **Beleuchtungsmodul**

Betriebsspannung: 0-12V

Maximalleistung: 4W

Maximale Beleuchtungsstärke: 200W/m<sup>2</sup>

Öffnung der Lichtquelle: 6x6cm

#### **Stromversorgungsgerät**

Ausgangsspannung: 0-12 V

Ausgangsleistung: max. 24 W

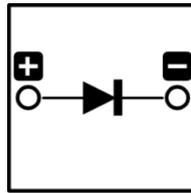
Regelbar in 0,5 V Schritten per Touchbuttons

Überstromerkennung  $>2$  A und Abschaltung

Eingangsspannung: 110-230 V, 50-60 Hz

(über beiliegendes Steckernetzteil)

### Diodenmodul 1100-21



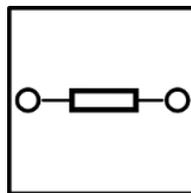
#### Technische Daten:

Schottkydiode

$U_{\text{fluss}} = 0,33 \text{ V}$

Maximaler Strom: 200 mA (500 mA Peak <1 s)

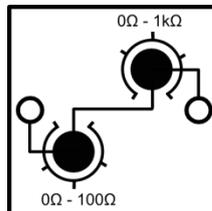
### Widerstandsmodul 1100-22



#### Technische Daten:

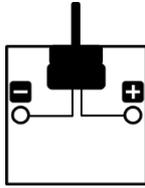
Maximalleistung: 2W

### Potentiometermodul 1100-23



Das Potentiometermodul besteht aus einem 0-100Ω-Drehwiderstand und einem 0-1kΩ-Drehwiderstand. Beide sind in Reihe geschaltet, sodass das Potentiometermodul Widerstände zwischen 0 Ω bis 1100 Ω annehmen kann. Die Messungenauigkeit beim Einstellen eines Widerstandes liegt bei 5 Ω beim kleineren Drehwiderstand und bei 20 Ω beim Größeren. Durch das Potentiometer dürfen keine Ströme von mehr als 190 mA fließen.

### Getriebemodul (1100-24) mit Hakengewicht 20g (L2-05-024)



#### Technische Daten:

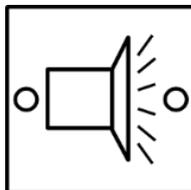
Anlaufstrom:  $\cong 20\text{mA}$

Anlaufspannung:  $\cong 0,35\text{V}$

Minimaler Betriebsstrom:  $10\text{mA}$

Maximalspannung:  $4\text{V}$

### Hupenmodul 1100-25

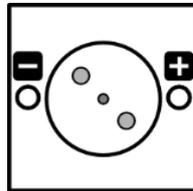


#### Technische Daten:

Startspannung:  $0,7\text{V}$

Startstrom:  $0,3\text{mA}$

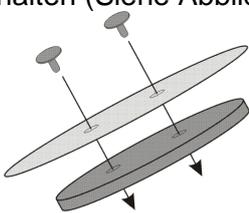
## Motormodul ohne Getriebe (1100-27) mit Farbscheiben – Set 1 (1100-28)



### Technische Daten:

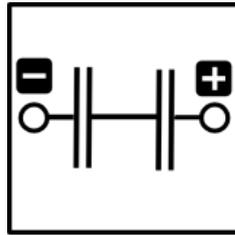
Anlaufstrom: 20mA  
Anlaufspannung: 0,35V

Die enthaltenen Farbscheiben sind: Rot-Grün-Blau, Rot-Blau, Rot-Grün, Grün-Blau und 3 schwarz-weiß Farbscheiben. Gehalten werden die Farbscheiben auf dem Motormodul mittels einer Plastikscheibe. Diese enthält 2 Clips, die die Farbscheiben sicher auf der Plastikscheibe halten (Siehe Abbildung).



In der Mitte der Plastikscheibe befindet sich ein Loch, das auf den Stift des Motors aufgesteckt wird.

### Kondensatormodul 1600-02



Das Kondensatormodul besteht aus zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren. Die maximale Spannung des Kondensatormoduls beträgt 5,4 V. Zum Aufladen sollte keine höhere Spannung als 5 V angelegt werden. Zum Entladen kann der Kondensator kurzgeschlossen werden, da Sicherungen im Modul eine zu hohe Stromstärke verhindern. Zum schnellen Aufladen kann der Kondensator direkt an die Spannungsquelle angeschlossen werden. Anschließend kann die Spannungsquelle bei 0,5 V eingeschaltet und alle 10 s um 0,5 V erhöht werden. In der Endspannung sollte der Kondensator ca. 30 s aufgeladen werden.

#### Technische Daten:

Kapazität: 5 F

Spannung: 5,4 V

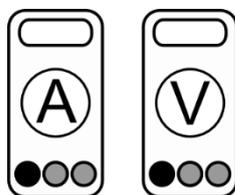
### Satz Abdeckung f. Solarzelle 1100-29



#### Technische Daten:

Größe: 3x3cm

### Digitalmultimeter L2-06-011



Das Multimeter ist mit den mitgelieferten Kabeln in der Lage, Wechsel- und Gleichspannungen, Stromstärke und Widerstände zu messen. Hierzu muss der jeweilige Messbereich mit dem Drehzeiger in der Mitte des Geräts ausgewählt werden. Die Einheit kann jeweils an der Beschriftung abgelesen werden. Für gewöhnlich werden die beiden Kabel an die linken Buchsen angeschlossen. Beträgt die Stromstärke mehr als 250mA müssen die beiden äußeren Buchsen genutzt werden, da sonst eine Sicherung das Gerät vor einem Überstrom schützt. Die mittlere Buchse ist mit einer defekten Sicherung nicht nutzbar. Durch das Öffnen des Multimeters über Schrauben auf der Rückseite kann die Sicherung gewechselt werden.

### Laborthermometer L2-06-016



#### Technische Daten:

Flüssigkeit: Alkohol

Messbereich: -10 ... +110°C; 1°C Teilung

### Erweiterung: Luxmeter (L2-06-034)



Das Luxmeter misst die Beleuchtungsstärke bzw. den Gesamtlichtstrom pro Flächeneinheit. Es ist als Erweiterung bestellbar und nicht standardmäßig im PV Ready-to-go enthalten.

Für die Benutzung muss zunächst die blaue Kappe vom Detektor entfernt werden. Anschließend muss auf mit dem Drehregler ein Messbereich ausgewählt werden, um das Gerät einzuschalten. Zeigt die Anzeige dabei eine „1“, so ist der Messbereich zu niedrig gewählt. Für eine möglichst genaue Messung muss der Detektor senkrecht zur Lichtquelle ausgerichtet werden.

#### Technische Daten:

Gesamtmessbereich: 0.01 bis 50000 Lux

Digitalanzeige mit 3 ½ Stellen

Messbereiche: 200, 2000, 20000 (abgelesener Wert x 10), 50000 (abgelesener Wert x 100) Lux

Genauigkeit: ±5 % < 10000 Lux, ±10 % > 10000 Lux,

Messrate: 1,5 x pro Sekunde



## 1. Verstehen des leXsolar Stecksystems

### Lernziele

- Die Schüler stecken die Module in verschiedenen Schaltungen auf die leXsolar Grundeinheit.
- Die Schüler bestimmen, um welche Art von Schaltung es sich handelt.
- Die Schüler zeichnen die Schaltpläne der verschiedenen Schaltungen.
- Die Schüler beschreiben, dass in den funktionierenden Schaltungen Lichtenergie in elektrische Energie und anschließend in Rotationsenergie umgewandelt wird.
- Die Schüler beschreiben, dass es aufgrund der Lichtenergie Elektronen-Loch-Paarbindungen aufbrechen und sich die Elektronen und Löcher aufgrund des immanenten elektrischen Feldes und des geschlossenen Stromkreises bewegen.

### Vorwissen

- Die Schüler kennen die physikalischen Vorgänge in einer Solarzelle und die verschiedenen Energieumwandlungsprozesse in einem Stromkreis aus Solarzelle und Verbraucher.
- Die Schüler können Schaltbilder der Experimentieraufbauten anfertigen.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Das Experiment eignet sich besonders dazu, um die Verdrahtungen auf der Grundeinheit kennenzulernen. Dieses Wissen ist hilfreich, da es für die nachfolgenden Experimente vorausgesetzt wird. Eventuell ist es hilfreich die Schablonen, auf der die Verkabelungen der Reihen- und Parallelschaltung schematisch verzeichnet sind, zu nutzen.



## 1. Verstehen des leXsolar Stecksystems

### Aufgabe

Untersuche verschiedene Schaltungen, um die leXsolar-Grundeinheit kennenzulernen.

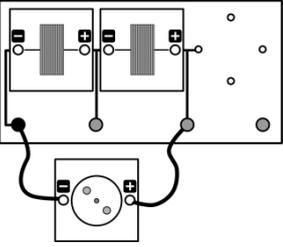
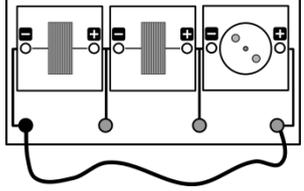
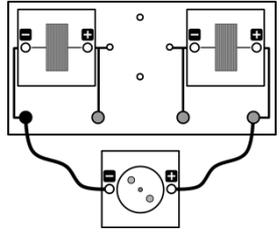
### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 3 kleine Solarzellen
- leXsolar-Motor
- 3 Messleitungen

### Durchführung:

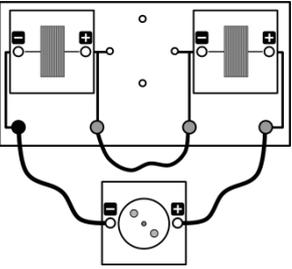
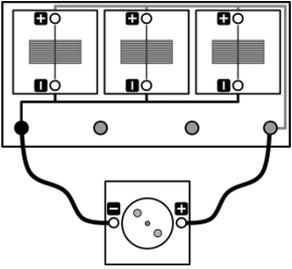
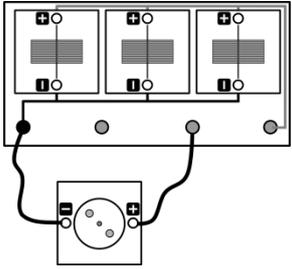
1. Baue die Schaltungen 1- 6 nacheinander auf und überprüfe, ob der Motor sich dreht.
2. Untersuche für jede Schaltung die Grundeinheit und zeichne den Schaltplan. Entscheide, ob es sich um eine Reihen- oder Parallelschaltung handelt.
3. Beschreibe die Energieumwandlungen und die physikalischen Prozesse während des Experiments mit Schaltung 1

### Auswertung

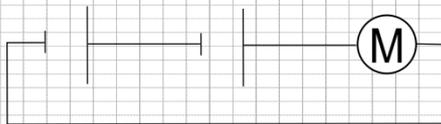
Schaltung 1	Schaltung 2	Schaltung 3
 <p>Dreht sich der Motor?  <input checked="" type="checkbox"/> ja    <input type="checkbox"/> nein</p>	 <p>Dreht sich der Motor?  <input checked="" type="checkbox"/> ja    <input type="checkbox"/> nein</p>	 <p>Dreht sich der Motor?  <input type="checkbox"/> ja    <input checked="" type="checkbox"/> nein</p>
<p>Es handelt sich um eine:  <input checked="" type="checkbox"/> Reihenschaltung  <input type="checkbox"/> Parallelschaltung</p>	<p>Es handelt sich um eine:  <input checked="" type="checkbox"/> Reihenschaltung  <input type="checkbox"/> Parallelschaltung</p>	<p>Es handelt sich um eine:  <input type="checkbox"/> Reihenschaltung  <input type="checkbox"/> Parallelschaltung</p>



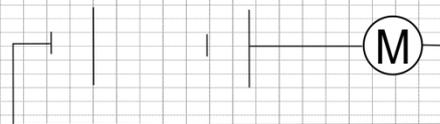
## 1. Verstehen des leXsolar Stecksystems

Schaltung 4	Schaltung 5	Schaltung 6
		
Dreht sich der Motor? <input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Dreht sich der Motor? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein	Dreht sich der Motor? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Es handelt sich um eine: <input checked="" type="checkbox"/> Reihenschaltung <input type="checkbox"/> Parallelschaltung	Es handelt sich um eine: <input type="checkbox"/> Reihenschaltung <input checked="" type="checkbox"/> Parallelschaltung	Es handelt sich um eine: <input type="checkbox"/> Reihenschaltung <input type="checkbox"/> Parallelschaltung

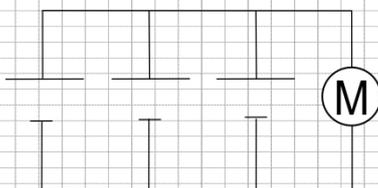
Schaltung 1, 2, 4



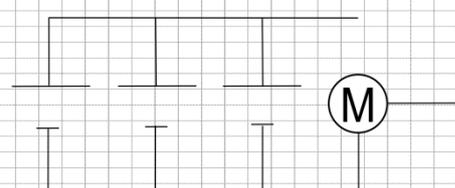
Schaltung 3



Schaltung 5



Schaltung 6



3.

In der Schaltung 1 wird Lichtenergie (elektromagnetische Energie) in elektrische Energie umgewandelt. Beim Motor wird dann die elektrische Energie in Rotationsenergie umgewandelt. Dafür werden zunächst, Elektronen aus ihren Elektronen-Loch-Paarbindungen durch die Lichtenergie gelöst. Aufgrund des immanenten elektrischen Feldes in der Verarmungszone bewegen sich die Elektronen und Löcher, durch den Stromkreis, wenn dieser geschlossen ist.



## 2. Optische Täuschungen

### Lernziele

- Die Schüler beschreiben verschiedene optische Täuschungen.
  - Die Schüler erkennen, dass sich Farben nur in den 3 Eigenschaften Farbton, Helligkeit und Sättigung unterscheiden.
  - Die Schüler beschreiben die optische Täuschung mit verschiedenen Kombinationen der 3 Grundfarben und entdecken die additive Farbmischung.
  - Die Schüler beschreiben die optische Täuschung mit der Benham-Scheibe.
  - Die Schüler beschreiben die optische Täuschung mit der Relief-Scheibe.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Eine hohe Umgebungshelligkeit ist für das Gelingen der meisten Farbscheibenexperimente von Bedeutung. Sie sorgt für eine schnelle Drehung des Motors und somit auch bei den meisten Experimenten für eine deutliche optische Täuschung.
- Für das Experiment 2.2 bietet es sich an, den HSV-Farbraum mit in die Auswertung einzubinden, der die 3 Eigenschaften beinhaltet.
- Das Phänomen der Benham-Scheiben (Experiment 2.4) ist bis heute nicht eindeutig erklärbar.
- Die Räumlichkeit entsteht nicht nur durch bikulares (mit zwei Augen) Sehen, sondern auch durch die monokular wirkende so genannte Bewegungsparallaxe. In Experiment 2.5 wurde diese bei der Konstruktion der Scheibe genutzt. Der Effekt der Bewegungsparallaxe kann besonders bei Zug- oder Autobahnfahrten beobachtet werden. Weit entfernte Objekte bewegen sich scheinbar langsamer als beispielsweise Bäume am Straßenrand. Durch die unterschiedlichen Relativbewegungen der einzelnen Kreise der Scheibe entsteht damit ein räumliches Empfinden.

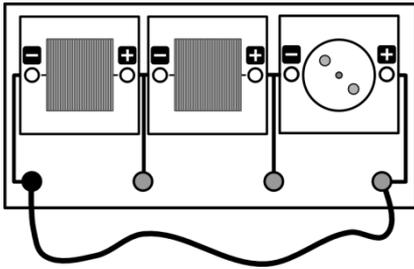


## 2.1 Der Grundaufbau für Farbscheibenexperimente

### Aufgabe

Untersuche die optische Täuschung der Farbscheibe

### Aufbau



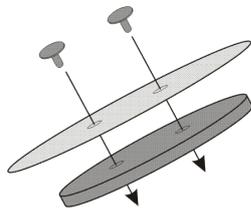
### Benötigte Geräte

- 1 leXsolar-Grundeinheit
- 1 große Solarzelle
- 1 großes Solarmodul
- 1 Motormodul
- 1 Messleitung

### Durchführung

Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.

Auf den Motor wird nun die Rotationsscheibe gesteckt. Gehalten wird die Pappscheibe durch zwei farbige Kunststoffclips.

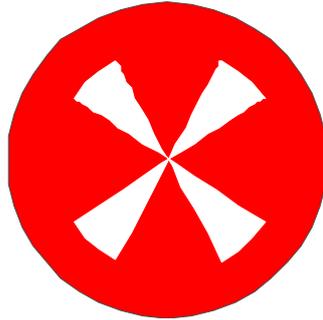


Wenn nötig, kannst du zum Lösen der Clips von der Rotationsscheibe einen Stecker zu Hilfe nehmen. Drücke den Stecker dazu vorsichtig von unten gegen den Clip.



## 2.2 Farbeigenschaften

### Pappscheibe



### Durchführung:

Lasse die Scheibe drehen. Halte deine Hand so darüber, dass eine Hälfte der Scheibe im Schatten liegt. Deine Ergebnisse helfen dir, Farbsysteme besser zu verstehen.

Farbton: Welche Farbe hat die Scheibe? rosa

Helligkeit: Auf der abgeschatteten Seite wirkt die Farbe

- heller als auf der beleuchteten Seite
- genauso wie auf der beleuchteten Seite
- dunkler als auf der beleuchteten Seite

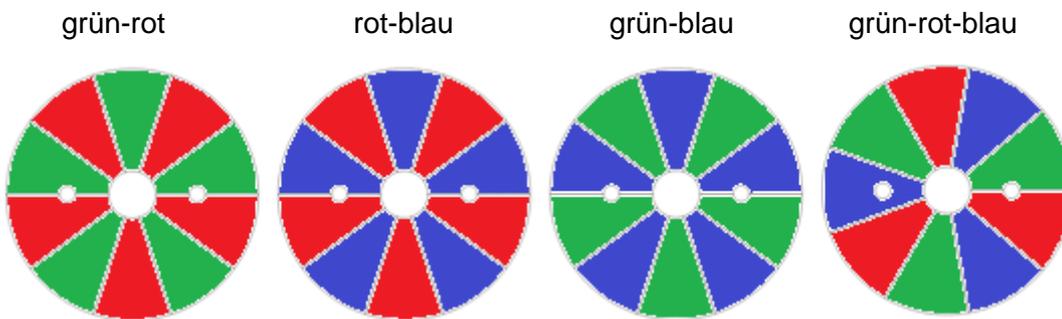
Sättigung: In der Mitte der Scheibe ist der Farbeindruck

- blasser als am Rand
- genauso wie am Rand
- kräftiger als am Rand



## 2.3 Die additive Farbmischung

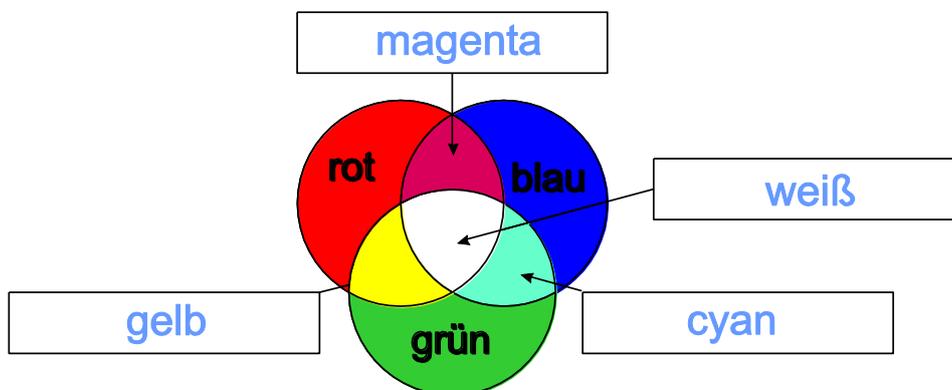
### Pappscheiben



### So geht`s:

Die Kreisstücke der verschiedenen Scheiben haben unterschiedliche Farben, wenn die Scheibe still steht. Lasse die Farbscheiben schnell drehen, damit sich die Farben vermischen.

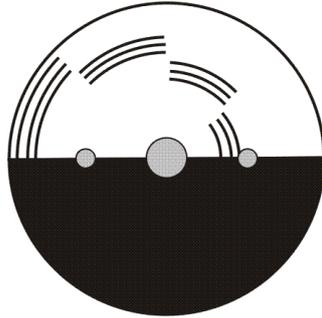
Male nun in der Zeichnung unten die einzelnen Bereiche aus. Fange mit den reinen Farben rot, grün und blau an. Male danach mit Hilfe deiner Beobachtungen an den Farbscheiben die vier Mischbereiche aus. Beschrifte die markierten Bereiche!





## 2.4 Optische Täuschungen mit der Benham-Scheibe

### Pappscheibe



### So geht's:

Notiere deine Beobachtungen auf der Scheibe.

Obwohl die Pappscheibe schwarzweiß ist, erscheinen bei der Drehung farbige Ringe

---

---



## 2.5 Optische Täuschungen mit der Relief-Scheibe

### Pappscheibe



### So geht`s:

Was siehst du, wenn sich die Scheibe langsam dreht? Falls du nichts siehst, weil sich die Scheibe zu schnell dreht, verschatte die Solarzellen ein wenig!

Bei langsamer Drehung scheint die Scheibe eine räumliche Tiefe zu besitzen. Dabei können verschiedene Objekte wahrgenommen werden, entweder ein nach innen zeigender „Vulkankrater“ oder ein sich nach außen windender „Wurm“.



### 3. Experimente zu verschiedenen Strahlungsarten

#### Lernziele

- Die Schüler messen qualitativ den Einfluss der diffusen und direkten Strahlung.
  - Die Schüler beobachten, dass die Hupe nur beim Betreiben mit diffuser Strahlung deutlich leiser erklingt und schlussfolgern daraus, dass der Strahlungseinfluss gering ist.
  - Die Schüler beobachten, dass die Hupe nur beim Betreiben mit direkter Strahlung deutlich lauter erklingt und schlussfolgern daraus, dass der Strahlungseinfluss hoch ist.
- Die Schüler beobachten, dass die Albedostrahlung bei festen, hellen Stoffen höher ist als bei dunklen flüssigen Stoffen.
- Die Schüler schlussfolgern, dass der Reflexionsgrad bei hellen, festen Stoffen höher ist, als bei dunklen flüssigen.

#### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass die Hupe bei höherer Leistung lauter hupt als bei geringerer.

#### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Experimente müssen bei strahlendem Sonnenschein und im Freien oder zumindest am Fenster stattfinden.
- Für das Experiment zur direkten und diffusen Strahlung werden zusätzlich eine Zeitung und Klebenband benötigt.
- Es ist auch möglich, die Experimente zur direkten und diffusen Strahlung an einem bewölkten Tag durchzuführen. Bei diesen Bedingungen ist die direkte Strahlung sehr schwach und die Hupe hupt nicht und es ist kaum ein Unterschied zwischen diffuser Strahlung und der vollständigen Beleuchtung feststellbar.
- In der Auswertung zur Albedostrahlung kann erwähnt werden, dass es auch so genannte bifaciale Solarzellen gibt, die beideseitig lichtempfindlich sind. Einige Albedowerte sind:
  - Frische Schneedecke 0,8 ... 0,9
  - Wolken 0,6...0,9
  - Alte Schneedecke 0,6 ... 0,9
  - Asphalt 0,15

In der Astronomie werden die Albedowerte von fernen Planeten genutzt, um sie mit irdischen Stoffen zu vergleichen und Rückschlüsse auf die Oberflächenbeschaffenheit zu ziehen.



### 3.1 Der Einfluss der diffusen Strahlung auf die Solarzellenleistung (qualitativ)

#### Aufgabe

Untersuche den Einfluss diffuser Strahlung auf die Leistung von Solarzellen.

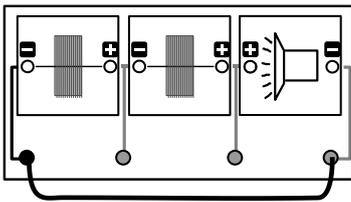
#### Vorbemerkungen

##### **Direkte und diffuse Strahlung:**

Es ist auch dann hell im Klassenzimmer, wenn die Sonne nicht direkt hinein scheint. Das liegt daran, dass es zwei verschiedene Strahlungsarten gibt. Einerseits die Strahlung, welche direkt von der Sonne ausgesandt wird, die direkte Strahlung und andererseits die indirekte Strahlung. Die indirekte Strahlung entsteht, wenn das Sonnenlicht in die Atmosphäre eintritt und gestreut wird. Diese gestreute Strahlung sorgt dafür, dass tagsüber der gesamte Himmel hell ist und nicht nur die Richtung, in der die Sonne steht. Diese indirekte Strahlung wird als diffuse Strahlung bezeichnet.

Dieses Experiment funktioniert nur im Freien bei Sonnenschein oder direkt am Fenster bei Sonnenschein.

#### Aufbau



#### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 2 kleine Solarzellen
- leXsolar-Hupenmodul
- 1 Messleitung

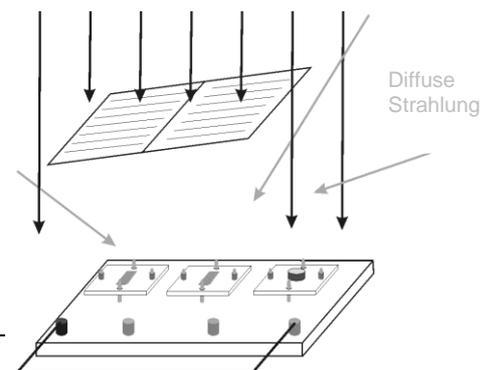
Zusätzlich benötigt:  
- Zeitung

#### Durchführung

Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Um nun die diffuse Strahlung zu „messen“, musst du die direkte Strahlung ausblenden. Lege dazu die Grundeinheit auf den Boden und nicht in die Nähe einer Hauswand oder eines Baumes. Stelle dich nun neben die Grundeinheit und halte die Zeitung so in Kopfhöhe, dass der Schatten auf die Solarzellen fällt. Achte darauf, dass wirklich nur die direkte Strahlung abgeschirmt wird. Notiere deine Beobachtungen.

Die Hupe gibt deutlich geringe Geräusche von sich.

Direktes Sonnenlicht



#### Auswertung

Ziehe Rückschlüsse auf den Einfluss der diffusen Strahlung auf die Leistung der Solarzelle.

Die Intensität der diffusen, von der Seite einfallenden Strahlung, ist viel geringer als die der direkten Sonnenstrahlung. So erzeugt die teilweise abgeschattete Solarzelle eine geringere Stromstärke.



## 3.2 Der Einfluss der diffusen Strahlung auf die Solarzellenleistung (qualitativ)

### Aufgabe

Untersuche den Einfluss direkter Sonnenstrahlung auf die Leistung von Solarzellen.

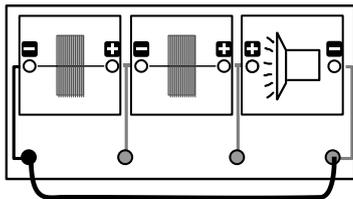
### Vorbemerkungen

#### **Direkte und diffuse Strahlung:**

Es ist auch dann hell im Klassenzimmer, wenn die Sonne nicht direkt hinein scheint. Das liegt daran, dass es zwei verschiedene Strahlungsarten gibt. Einerseits die Strahlung, welche direkt von der Sonne ausgesandt wird, die direkte Strahlung und andererseits die indirekte Strahlung. Die indirekte Strahlung entsteht, wenn das Sonnenlicht in die Atmosphäre eintritt und gestreut wird. Diese gestreute Strahlung sorgt dafür, dass tagsüber der gesamte Himmel hell ist und nicht nur die Richtung, in der die Sonne steht. Diese indirekte Strahlung wird als diffuse Strahlung bezeichnet.

Dieses Experiment funktioniert nur im Freien bei Sonnenschein oder direkt am Fenster bei Sonnenschein.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 2 kleine Solarzellen
- leXsolar-Hupenmodul
- 1 Messleitung

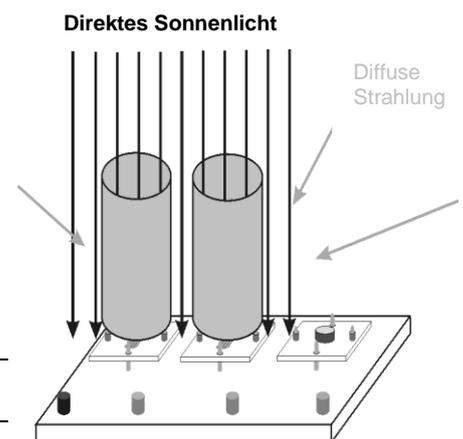
Zusätzlich benötigt:

- Zeitung
- Klebeband

### Durchführung

Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Um nun die direkte Strahlung zu „messen“, musst du die diffuse Strahlung ausblenden. Nimm dazu zwei Zeitungsblätter und rolle sie so zusammen, dass zwei Röhren entstehen. Die Durchmesser dieser Röhren müssen so groß sein, dass jeweils eine Solarzelle abgeschirmt werden kann. Haltbarer werden deine Röhren durch das Klebeband. Ein Experimentierpartner hält nun die Röhren so, dass das Sonnenlicht längs hindurch treten kann. Notiere deine Beobachtungen.

Die Lautstärke der Hupe verringert sich nur leicht.



### Auswertung

Erkläre das Verhalten der Hupe.

Da der Einfluss der diffusen Strahlung gering ist, muss der Einfluss der direkten Strahlung auf die Leistung der Solarzelle sehr groß sein. Dies bestätigt das Experiment.

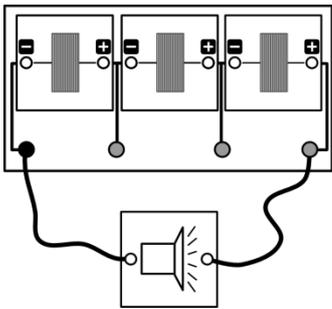


### 3.3 Der Intensität der Albedostrahlung von verschiedenen Stoffen (qualitativ)

#### Aufgabe

Untersuche die Intensität der Albedostrahlung bei verschiedenen Stoffen

#### Aufbau

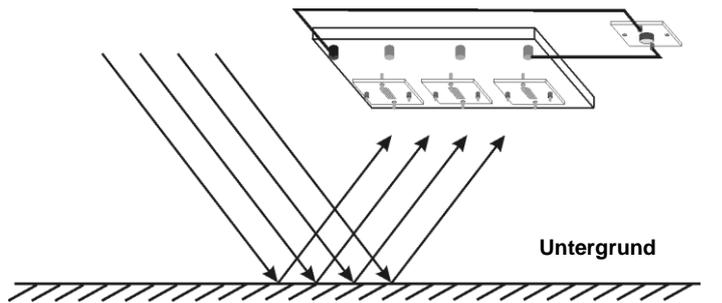


#### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 3 kleine Solarzellen
- leXsolar-Hupenmodul
- 2 Messleitungen

#### Durchführung:

Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Halte die leXsolar-Grundeinheit senkrecht nach unten über dem Boden. Auch auf diese Weise fällt noch Licht auf die Solarzellen, nämlich die Einstrahlung von unten. Die Einstrahlung von unten ist jene Strahlung, die vom Boden reflektiert wird. Dabei reflektiert jeder Untergrund unterschiedlich stark. Man bezeichnet diese Eigenschaft als die Albedo. Die Lautstärke deiner Hupe hängt also von der Albedo des Untergrundes ab. Nutze folgende Tabelle, um die Albedo verschiedener Untergründe zu bestimmen.



Untergrund	Lautstärke
Asphalt	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> </div> kein leises < lautes Geräusch
Betonboden	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 40px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> </div>
Rasen	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> </div>
Wasser	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> </div>
Sand	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 40px; height: 15px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> </div>

#### Auswertung

Erläutere, welche Objekteigenschaften eine hohe bzw. niedrige Albedostrahlung verursachen.

Helle feste Stoffe reflektieren mehr Licht und Albedostrahlung als dunkle und flüssige Stoffe.



## 4. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche

### Lernziele

- Die Schüler messen die Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung für eine Solarzelle, die vollständig, zu  $\frac{3}{4}$ , zur Hälfte, zu  $\frac{1}{4}$  und überhaupt nicht beleuchtet wird.
- Die Schüler berechnen aus der Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke eine fiktive Leistung.
- Die Schüler tragen ihre Messwerte in ein Beleuchtungsgrad-Spannung/Stromstärke/Leistung-Diagramm ein.
- Die Schüler beschreiben anhand ihrer Messwerte, dass die Stromstärke und Leistung mit zunehmenden Abdeckungsgrad proportional abnehmen, wohingegen die Spannung nur leicht sinkt.
- Die Schüler erklären das Verhalten der Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke der Solarzelle.

### Vorwissen

- Die Schüler kennen den Aufbau einer Solarzelle.
- Die Schüler wissen, dass Elektronen freigesetzt werden, wenn Licht auf die Solarzelle fällt.
- Die Schüler kennen die physikalischen Prozesse in einer Solarzelle, wenn diese mit Licht beschienen wird.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Eine alternative Erklärung für das Verhalten der Kurzschlussstromstärke und der Leerlaufspannung bietet die Vorstellung, dass die Solarzelle aus  $n$  kleineren parallelgeschalteten Solarzellen besteht. Hier ist klar, dass  $n$  beleuchtete Zellen  $n$ -mal soviel Strom liefern wie eine einzelne und die unbeleuchteten Zellen nicht zum Photostrom beitragen. Die Spannung, die jede der gedachten Teilzellen liefert ist unabhängig von ihrer Fläche und bei Parallelschaltung von beliebig vielen gleichen Spannungsquellen ändert sich die Gesamtspannung nicht. Könnte man die unbeleuchteten Flächen ganz aus dem Stromkreis herausnehmen, wäre die Spannung wirklich unabhängig von der beleuchteten Fläche. In Wirklichkeit sind sie aber noch im Stromkreis integriert und wirken wie rückwärts geschaltete Dioden parallel zum Verbraucher, über die eine kleine Verlustleistung abfällt. Im Kurzschlussfall ist dieser Effekt ohne Bedeutung, da sich Elektronen immer den Weg des geringsten Widerstands suchen. Deswegen ist der Kurzschluss-Photostrom  $I_K$  tatsächlich proportional zur beleuchteten Fläche. Der Effekt ist aber verantwortlich für die schwache Abhängigkeit der Leerlauf-Photospannung von der beleuchteten Fläche bzw. von der eingestrahlten Lichtintensität. Die Proportionalität zwischen Photostrom und beleuchteter Fläche kann man sich auch daraus erklären, dass jedes auf die Zelle treffende Lichtteilchen (Photon) eine bestimmte Wahrscheinlichkeit hat, in ein Elektron im Stromkreis umgesetzt zu werden. Schattet man einen bestimmten Teil der Photonen ab, fällt auch der entsprechende Teil des Stroms weg.

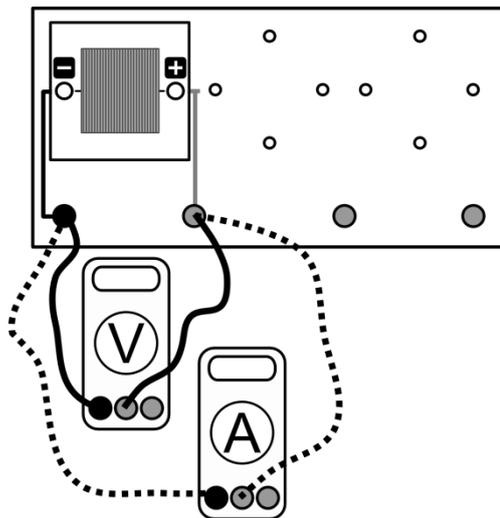


## 4. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche

### Aufgabe

Miss Spannung und Stromstärke und bestimme daraus die Leistung einer Solarzelle bei unterschiedlich großer aktiver Oberfläche! Benenne den Zusammenhang zwischen der Fläche und diesen drei Größen.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 1 große Solarzelle
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Strommessgerät
- Solarzellenabdeckungen (schwarze Kunststoffplättchen)

### Vorbemerkung

Bei diesem Experiment wird eine Leistung aus der Kurzschlussstromstärke und der Leerlaufspannung berechnet. Diese Leistung ist eine fiktive Leistung und entspricht nicht der Maximalleistung der Solarzelle. Sie wird jedoch verwendet, da die Ermittlung der Maximalleistung ohne technische Hilfsmittel aufwändig ist. Im Rahmen dieses Experiments führt der Vergleich der fiktiven Leistungen zum gleichen Ergebnis, wie der Vergleich der Maximalleistungen.

### Durchführung

1. Baue die Schaltung entsprechend dem Schaltplan auf!
2. Miss an der Solarzelle nacheinander Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke, da diese nicht gleichzeitig gemessen werden können!
3. Wiederhole diese Messung mit der Solarzelle, wenn sie zu 3/4, zur Hälfte, zu 1/4 und vollständig mit den Abdeckplättchen zugedeckt ist!
4. Erfasse alle Messwerte in einer Tabelle!

### Auswertung

1. Berechne aus den Messwerten die jeweilige Leistung  $P$  der Solarzelle!
2. Stelle die Ergebnisse in Diagrammen dar! (x-Achse: Abdeckungsgrad (0, 1/4, 1/2, 1); y-Achse:  $P$ ,  $I$  sowie  $U$ )
3. Benenne den Zusammenhang zwischen Spannung (Stromstärke, Leistung) und Fläche.
4. Erkläre das Verhalten der Leerlaufspannung und der Kurzschlussstromstärke in Abhängigkeit vom Abdeckungsgrad.

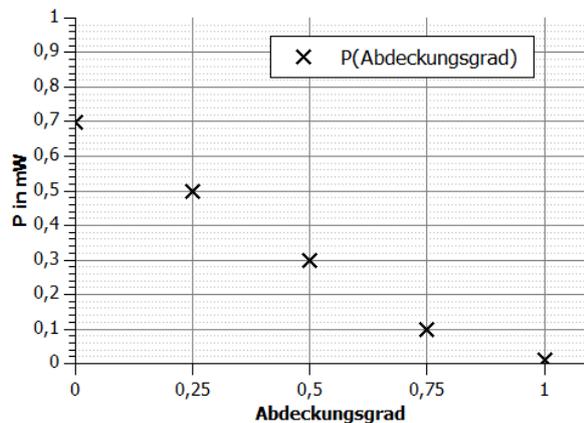
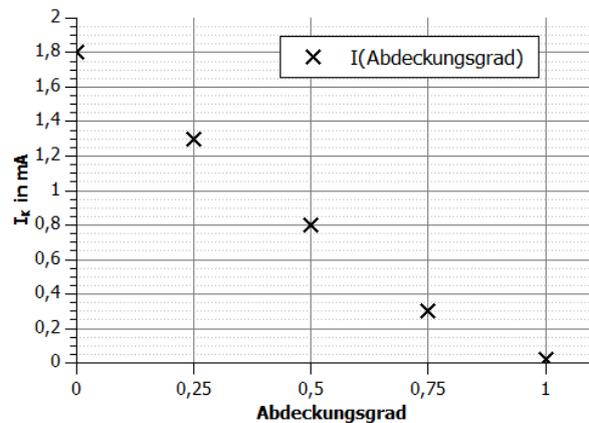
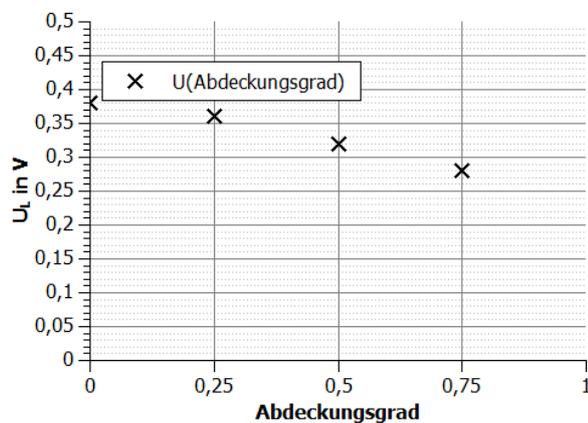


## 4. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche

### Messwerte

	Solarzelle abgedeckt zu				
	0 (ohne Abdeckung)	1/4	1/2	3/4	1 (ganz abgedeckt)
$U_L$ (V)	0,38	0,36	0,32	0,28	0,1
$I_K$ (mA)	1,8	1,3	0,8	0,3	0
$P = U \cdot I$ (mW)	0,7	0,5	0,3	0,1	0

### Diagramme



### Auswertung

3. Zusammenhang zwischen...

... Spannung und Fläche: **sinkt leicht**

... Stromstärke und Fläche: **proportional**

... Leistung und Fläche: **proportional**



## 4. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der beleuchteten Fläche

### Auswertung

4. Aufgrund der Abdeckung eines bestimmten Anteils der Solarzellenfläche wird der gleiche Anteil von Elektronen weniger aus dem Solarzellenmaterial herausgelöst. Somit ist die Stromstärke proportional zur Fläche bzw. zum Abdeckungsgrad.
- Trifft Licht auf die Solarzelle, werden Elektronen im Material freigesetzt und wandern aufgrund des elektrischen Feldes in der Verarmungszone in das n-Gebiet. Dabei ergibt sich eine bestimmte Konzentration von Elektronen in diesem Gebiet. Dieser Vorgang und die Konzentration sind nahezu unabhängig von der Intensität des Lichts.
- Trifft jedoch kein Licht mehr auf das Halbleitermaterial, werden keine Elektronen mehr freigesetzt und das Material wirkt nach außen hin elektrisch neutral. Es entspricht in diesem Fall einer gewöhnlichen Diode.



## 5. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts

### Lernziele

#### Qualitativer Versuch

- Die Schüler beschreiben das Verhalten des Motors, wenn die Solarzelle gekippt wird.
- Die Schüler ziehen Schlussfolgerungen über die Leistung und den Betrieb realer Solarzellen.

#### Quantitativer Versuch

- Die Schüler messen die Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung einer Solarzelle in Abhängigkeit vom Einfallswinkel.
- Die Schüler berechnen aus den Messgrößen eine fiktive Leistung.
- Die Schüler tragen ihre Messwerte in ein  $\cos(\alpha)$ -Stromstärke/Leistung-Diagramm.
- Die Schüler erkennen anhand der Diagramme, dass die Stromstärke /Leistung proportional zum Kosinus des Einfallswinkels ist.
- Die Schüler erklären den linearen Zusammenhang anhand geometrische Überlegungen und der Proportionalität zwischen Fläche und Stromstärke/ Leistung.

### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass eine schnellere Motordrehung eine größere Leistung der Solarzelle bedeutet.
- Die Schüler wissen, dass die Fläche proportional zur Stromstärke/Leistung ist.
- Die Schüler wissen, dass die effektiv beschienene Fläche gleich dem Produkt aus Kosinus des Einfallswinkels und der Gesamtfläche ist.

### Vorversuche

- Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Fläche

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Der quantitative Versuch darf nicht im strahlenden Sonnenlicht durchgeführt werden, da die hohe Intensität und die starken Reflexionen nur eine schwache Kosinusabhängigkeit zeigen.
- Nutzen Sie eine Lichtquelle mit geringer Streuung um einen möglichst deutlichen Schatten des Schattenstabes zu bekommen.
- In der Auswertung des Experiments bietet es sich an zu erwähnen, dass große Solaranlagen häufig mit einer Mechanik ausgestattet sind, die es erlauben, die Solarzellen der Sonne nachzuführen. Es gibt zwei grundlegende Typen von Nachführungen: Bei der so genannten einachsigen Nachführung ist, wie es der Name schon sagt, das Solarmodul nur in einer Achse beweglich und wird auch nur in dieser einen Achse dem Sonnenstand nachgeführt. Diese Art der Nachführung wird in zwei Varianten praktiziert: Einmal als jahreszeitliche Nachführung und einmal als tägliche. Der Vorteil der jahreszeitlichen Nachführung ist der geringe Aufwand von Mechanik, da eine solche Nachführung nur in größeren Abständen nötig ist und daher von Hand erfolgen kann. Bei täglicher Nachführung werden die Module mit Hilfe von Motoren in einer Achse der Sonne nachgedreht.  
Bei der so genannten zweiachsigen Nachführung sind die Module in der horizontalen und vertikalen Achse beweglich gelagert und werden über eine relativ komplizierte Mechanik dem Sonnenstand nachgeführt, so dass das Solarmodul immer genau senkrecht zum einfallenden Licht steht.  
Durch Nachführung wird die Energiebilanz eines Solarmoduls erheblich verbessert, da z. B. allein durch tägliche einachsige Nachführung ca. 20% mehr Energie erzeugt werden kann. Der Energieaufwand für die Motoren der Nachführung beträgt dagegen durchschnittlich nur 0,2% der gesamten erzeugten Energie des Systems.

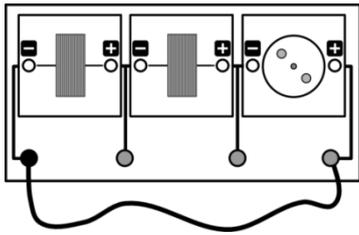


## 5.1 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (qualitativ)

### Aufgabe

Untersuche das Verhalten des Motors in Abhängigkeit vom Einstrahlwinkel.

### Aufbau

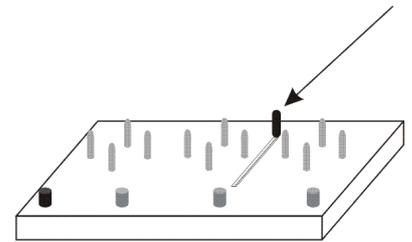


### Benötigte Geräte

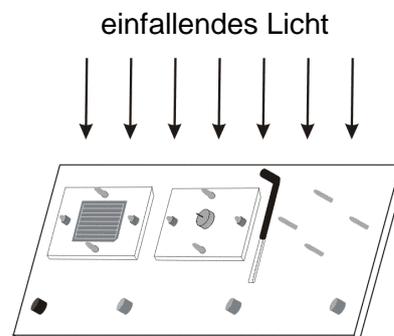
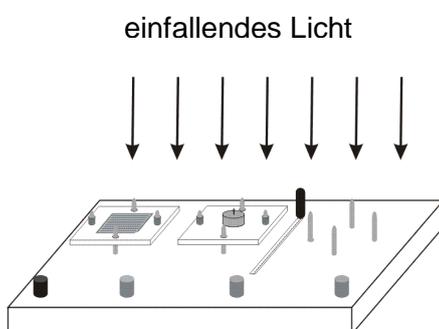
- leXsolar-Grundeinheit
- 2 kleine Solarzellen
- Motor
- 1 Messleitung

### Durchführung

1. Bei diesem Versuch kommt der Schattenstab der Grundeinheit zum Einsatz. Dieser befindet sich oben rechts auf der Grundeinheit (siehe Skizze). Mit ihm kann die Neigung der Grundeinheit zur Lichtquelle gemessen werden. Dazu muss die Grundeinheit zunächst so gedreht werden, dass der Schatten, den der Schattenstab wirft, auf die Winkelskala fällt. Den aktuellen Neigungswinkel kann man dann am Ende des Schattens ablesen. Mache dich zunächst mit der Funktion des Schattenstabs vertraut!



2. Baue aus Solarzelle und Motor eine Reihenschaltung auf. Halte nun die Grundeinheit mit der Vorderseite zur Lichtquelle. Dabei soll der Schattenstab keinen Schatten werfen - das Licht also senkrecht auf die Solarzelle fallen. (linke Skizze)  
Verkippe nun die Grundeinheit, sodass sie nicht mehr direkt in Richtung der Lichtquelle zeigt. Dabei wird vom Schattenstab ein Schatten geworfen. (rechte Skizze)  
(Hinweis: Für mehr Übersichtlichkeit ist das nötige Verbindungskabel zum Schließen des Stromkreises sowie die Drehscheibe auf dem Motor in den Skizzen nicht mitgezeichnet!)





## 5.1 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (qualitativ)

### Auswertung

1. Notiere deine Beobachtungen beim Kippen des Aufbaus. Formuliere eine Abhängigkeit zwischen Einfallswinkel des Lichts und Drehgeschwindigkeit des Motors.

Je schräger das Licht auf die Solarzellen fällt, desto langsamer dreht sich der Motor.

2. Ziehe Schlussfolgerungen über die Leistung der Solarzelle und für den Betrieb realer Solaranlagen.

Solarzellen scheinen ihre größte Leistung bei einem geringen Einfallswinkel zu haben. Somit sollten  
möglichst immer direkt zur Sonne ausgerichtet werden. Geringe Abweichungen scheinen je doch keine  
großen Leistungseinbrüche zu verursachen.

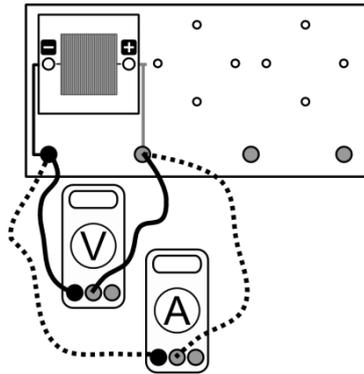


## 5.2 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (quantitativ)

### Aufgabe

Nimm Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung des Solarmoduls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Lichtes auf.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 1 große Solarzelle
- 1 Strommessgerät
- 1 Spannungsmessgerät
- Kabel

### Vorbemerkung

Bei diesem Experiment wird eine Leistung aus der Kurzschlussstromstärke und der Leerlaufspannung berechnet. Diese Leistung ist eine fiktive Leistung und entspricht nicht der Maximalleistung des Solarmoduls. Sie wird jedoch verwendet, da die Ermittlung der Maximalleistung ohne technische Hilfsmittel aufwändig ist. Im Rahmen dieses Experiments führt der Vergleich der fiktiven Leistungen zum gleichen Ergebnis, wie der Vergleich der Maximalleistungen.

### Durchführung

1. Halte die leXsolar-Grundeinheit mit dem Solarmodul in Richtung Sonne (oder Hauptlichtquelle im Zimmer), und finde eine Position, die einen scharf umrissenen Schatten des Schattenstabes entstehen lässt!
2. Richte die leXsolar-Grundeinheit so zu der Hauptlichtquelle aus, dass der Einfallswinkel  $\alpha$  zwischen Grundplatte und einfallendem Licht  $\alpha = 0^\circ$  beträgt, d.h. der Schattenstab keinen Schatten wirft!
3. Miss zu den gegebenen Winkeln  $\alpha$  nacheinander die Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung, da diese nicht gleichzeitig gemessen werden können. Erfasse die Messwerte in einer Tabelle! Achte hierbei darauf, dass sich der Abstand zwischen Lichtquelle und Grundeinheit nicht ändert.

### Auswertung

1. Berechne den Kosinus der Einfallswinkel und die fiktive Leistung aus Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung.
2. Zeichne das P- bzw.  $I_K - \cos \alpha$  - Diagramm!
3. Beschreibe die Abhängigkeit der Stromstärke bzw. der Leistung vom Einfallswinkel
4. Erkläre diese Abhängigkeit geometrisch unter der Voraussetzung  $I \sim A$ , dass also der Strom proportional mit der Fläche anwächst wie in Experiment 2 gesehen!

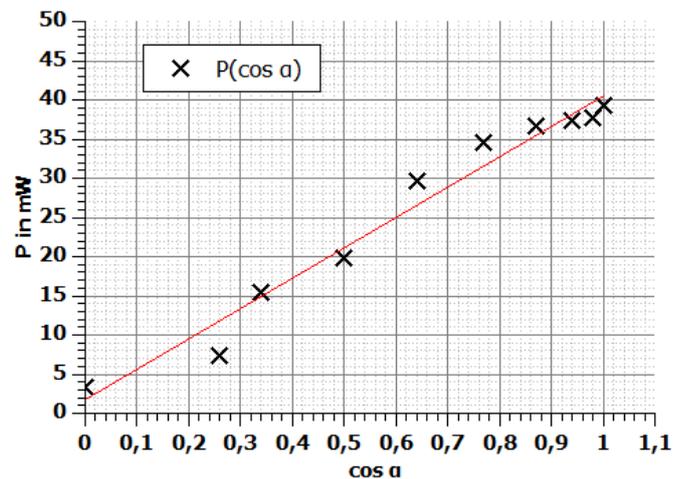
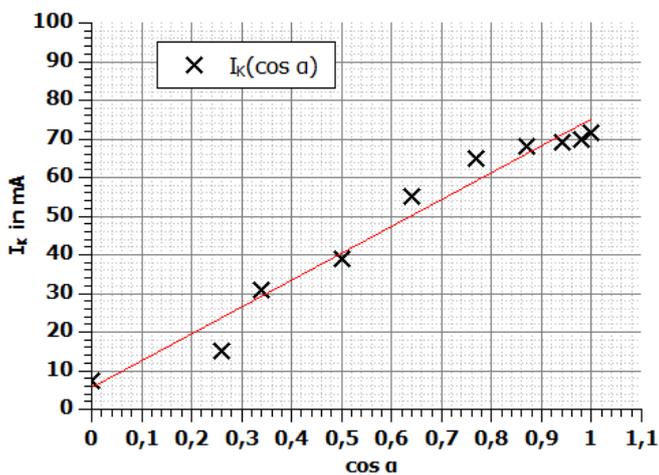


## 5.2 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung vom Einfallswinkel des Lichts (quantitativ)

### Messwerte

$\alpha$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	75°	90°
$U_L$ (V)	0,55	0,54	0,54	0,54	0,53	0,52	0,51	0,5	0,49	0,44
$I_K$ (mA)	71,5	70	69	68	65	57	39	31	15	7,5
zu berechnende Werte										
$\cos \alpha$ (°)	1	0,98	0,94	0,87	0,77	0,64	0,5	0,34	0,26	0
$P=U \cdot I$ (mW)	39,3	37,8	37,3	36,7	34,5	29,6	19,9	15,5	7,4	3,3

### Diagramme



### Auswertung

- Es besteht ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der Stromstärke beziehungsweise der Leistung und dem Kosinus des Einfallswinkels.
- Die von der Lichtquelle beschienene Fläche entspricht  $A_{\text{beschiene}} = \cos(\alpha) \cdot A_{\text{gesamt}}$ . Da  $I \sim A$  ist, gilt damit auch, dass  $I_{\text{beschiene}} = \cos(\alpha) \cdot I_{\text{gesamt}}$ . Da der Gesamtstrom eine Konstante ist, gilt somit auch, dass  $I \sim \cos(\alpha)$  ist.



## 6. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke

### Lernziele

#### Qualitativer Versuch 1

- Die Schüler beschreiben das Verhalten der Hupe bei steigender Beleuchtung.
- Die Schüler ziehen Schlussfolgerungen über die Leistung der Solarzelle und für die Nutzung realer Solarkraftanlagen.

#### Qualitativer Versuch 2

- Die Schüler beschreiben das Verhalten der Hupe bei steigender Beleuchtung.
- Die Schüler beschreiben das Verhalten der Hupe bei unterschiedlichem Abstand zur Sonne.
- Die Schüler erklären das unterschiedliche Verhalten über das Strahlenmodell.

#### Quantitativer Versuch

- Die Schüler messen die Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung bei verschiedenen Beleuchtungsstärken.
- Die Schüler berechnen aus den gemessenen Größen die Leistung.
- Die Schüler tragen ihre Messwerte in das *Anzahl der Lampen*-Leistung-Diagramm ein.
- Die Schüler erkennen, dass der Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der Leistung proportional ist.

### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass eine lautere Hupe eine Steigerung der Leistung der Solarzelle bedeutet.
- Die Schüler kennen das Strahlenmodell.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Für den zweiten qualitativen Versuch wird zusätzlich eine Lampe benötigt.
- Die Beleuchtungsstärke darf nicht über die Spannung an den Lampen geändert werden, da sich hierdurch das Spektrum ändert und es zu Messfehlern kommen kann.
- Das Beleuchtungsmodul sollte nicht zu lange auf der Solarzelle stehen, da ein Temperaturanstieg der Solarzelle die Messwerte verfälscht.
- Sofern die Erweiterung mit Luxmeter vorhanden ist, bietet es sich an, dieses in den Experimenten zu verwenden. So könnte beispielsweise in Experiment 6.1 die Beleuchtungsstärke an verschiedenen Positionen im Zimmer gemessen werden oder in Experiment 6.2 die Beleuchtungsstärke in verschiedenen Abständen zur Lampe und Sonne gemessen und verglichen werden. Hierbei können typische Werte ermittelt werden. In Experiment 6.3 ist es ebenfalls möglich die Leistung über der Beleuchtungsstärke anstatt der Anzahl der Lampen aufzutragen.

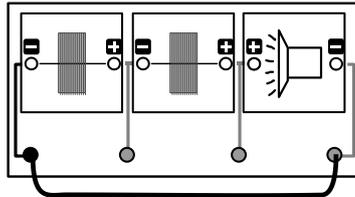


## 6.1 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke 1 (qualitativ)

### Aufgabe

Untersuche das Verhalten der Hupe bei unterschiedlichen Beleuchtungen

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 2 kleine Solarzellen
- leXsolar-Hupenmodul
- 1 Messleitung

### Durchführung

1. Stecke eine Reihenschaltung aus zwei Solarzellen und dem Hupenmodul auf wie im Schaltplan oben dargestellt.
2. Gehe zu der Wand, die dem Fenster gegenüber liegt. Halte den Aufbau vor dich mit den Solarzellen von dir und nähere dich von dort aus langsam dem Fenster.
3. Notiere deine Beobachtungen

Zunächst gibt die Hupe keinen Ton von sich. Ab einem bestimmten Punkt gibt die Hupe immer lautere Geräusche von sich, je mehr man sich dem Fenster nähert.

4. Decke nun einen Teil (z.B. die Hälfte) beider Solarzellen mit deiner Hand zu. Notiere deine Beobachtungen noch einmal

Wenn eine Solarzelle komplett zugedeckt wird, fängt die Hupe nie an zu hupen.

Wenn die Solarzellen nur zum Teil zugedeckt sind, fängt die Hupe später oder gar nicht an, zu hupen.

### Auswertung

1. Ziehe Schlussfolgerungen über die Leistung einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke.

Je größer die Beleuchtungsstärke, desto größer die Leistung der Zelle

2. Ziehe Schlussfolgerungen für die Nutzung realer Solarkraftanlagen.

Solarkraftanlagen sollten so ausgerichtet sein, dass sie möglichst große Beleuchtungsstärken über den Tag abbekommen. Das heißt, sie sollten nach Süden ausgerichtet sein und es sollten keine Objekte vor den Anlagen stehen

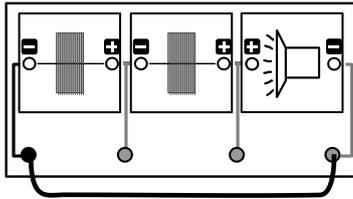


## 6.2 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke 2 (qualitativ)

### Aufgabe

Untersuche das Verhalten der Hupe bei einer nahen und fernen Lichtquelle

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 2 kleine Solarzellen
- leXsolar-Hupenmodul
- 1 Messleitung

Zusätzlich benötigt:  
- 1 Lampe

### Durchführung

1. Stecke eine Reihenschaltung aus den zwei Solarzellen und dem Hupenmodul auf, wie im Schaltplan oben dargestellt.
2. Nähere die Solarzellen einer Lampe (Achte dabei darauf, dass die Solarzellen gleichmäßig beleuchtet werden). Entferne die Solarzellen wieder ein Stück und notiere deine Beobachtungen.

Zunächst gibt die Hupe keinen Ton von sich. Ab einem bestimmten Punkt gibt die Hupe immer lautere Geräusche von sich, je mehr man sich der Lampe nähert.

Führe das gleiche Experiment im Freien mit der Sonne anstelle der Lampe durch. Notiere deine Erwartungen, wenn sich die Solarzellen der Sonne nähern.

Beschreibe das Verhalten der Hupe während des Experiments.

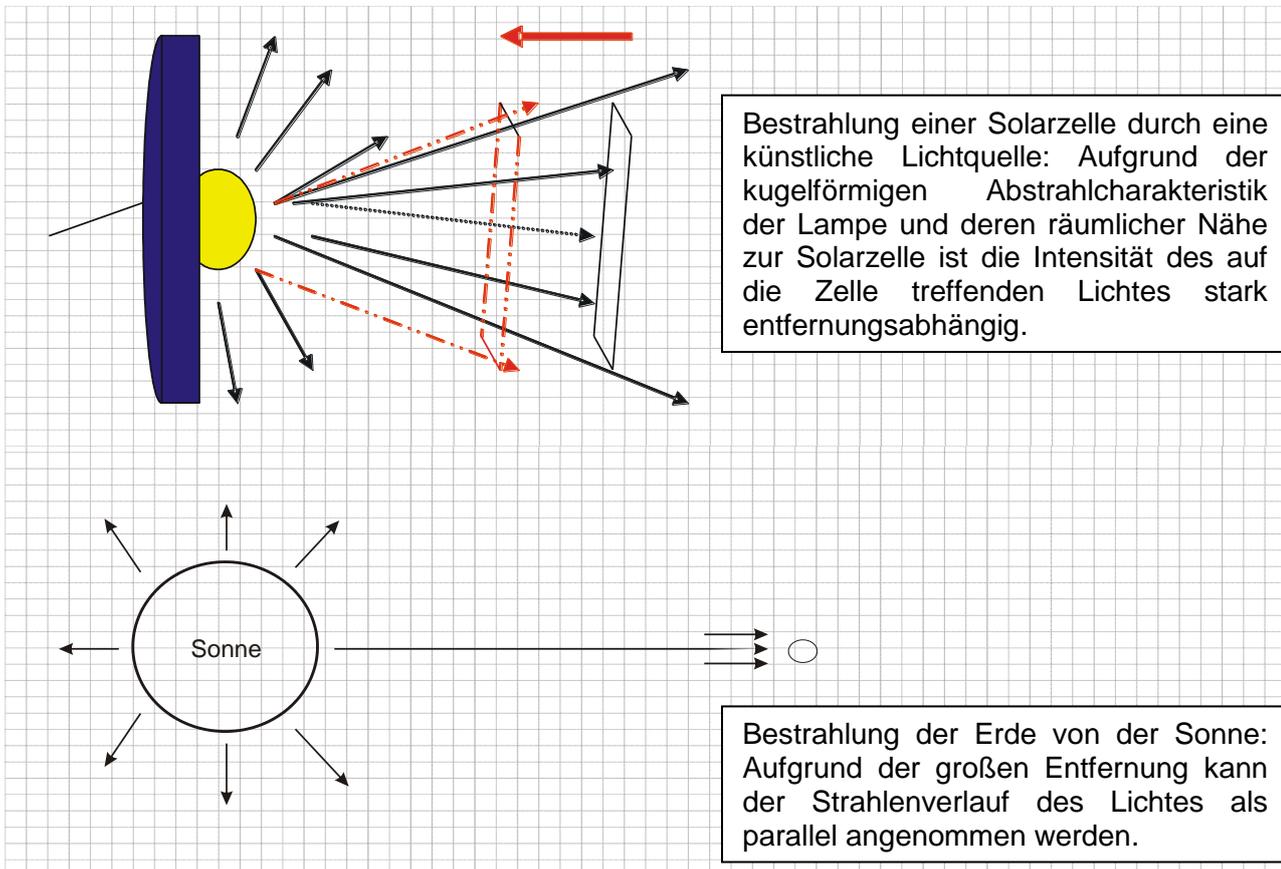
Die Hupe gibt einen Ton von sich, der sich aber mit dem Abstand zur Sonne nicht ändert.



## 6.2 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke 2 (qualitativ)

### Auswertung

Erkläre dieses Verhalten anhand des Lichtstrahlenmodells. Fertige dazu für beide Versuche eine Skizze an!  
Hinweis: Beachte die Entfernung Sonne-Solarzelle im Vergleich zur Entfernung Lampe-Solarzelle!



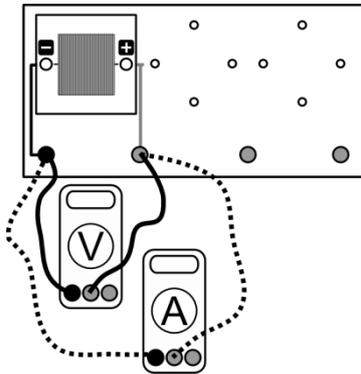


## 6.3 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke 1 (quantitativ)

### Aufgabe

Bestimme die Leistung einer Solarzelle bei unterschiedlich starker Beleuchtung!

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- leXsolar-Beleuchtungsmodul
- 1 große Solarzelle
- 1 Strommessgerät
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 PowerModul (9V)

### Vorbemerkungen

Bei diesem Experiment wird eine Leistung aus der Kurzschlussstromstärke und der Leerlaufspannung berechnet. Diese Leistung ist eine fiktive Leistung und entspricht nicht der Maximalleistung der Solarzelle. Sie wird jedoch verwendet, da die Ermittlung der Maximalleistung ohne technische Hilfsmittel aufwändig ist. Im Rahmen dieses Experiments führt der Vergleich der fiktiven Leistungen zum gleichen Ergebnis, wie der Vergleich der Maximalleistungen.

Die Beleuchtungsstärke darf nicht über die Spannung an den Lampen geändert werden, da sich hierdurch das Spektrum ändert und es zu Messfehlern kommen kann.

Das Beleuchtungsmodul sollte nicht zu lange auf der Solarzelle stehen, da ein Temperaturanstieg der Solarzelle die Messwerte verfälscht.

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Schalte das Beleuchtungsmodul über das PowerModul bei einer Spannung von 9V ein mit einer der vier Lampen ein.
3. Miss nacheinander Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung des Solarmoduls!
4. Wiederhole die Messung mit 2, 3 und 4 Lampen im leXsolar-Beleuchtungsmodul! Erfasse alle Messwerte in einer Tabelle!

### Auswertung

1. Errechne die Leistung des Solarmoduls für jede Lampenanzahl!
2. Zeichne das  $n$ - $P$ -Diagramm ( $n$ ...Anzahl der Lampen)!
3. Benenne den Zusammenhang zwischen Modulleistung und Beleuchtungsstärke.

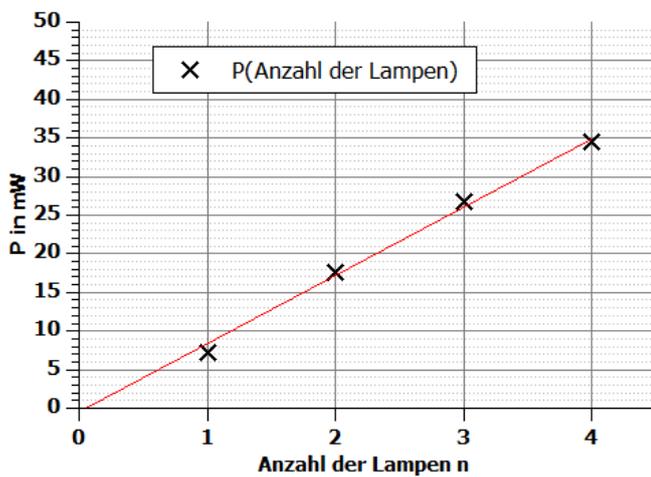


## 6.3 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Beleuchtungsstärke 1 (quantitativ)

### Messwerte

	Beleuchtung mit				
	0 Lampen	1 Lampe	2 Lampen	3 Lampen	4 Lampen
$U_L$ (V)	0,13	0,48	0,51	0,52	0,54
$I_K$ (mA)	0	15	34,5	51,5	63,8
$P=U \cdot I$ (mW)	0	7,2	17,6	26,8	34,5

### Diagramme



### Auswertung

Je höher die Beleuchtungsstärke, desto **größer ist** die Leistung.

Der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Leistung ist **proportional**. Dies erkennt man an der Gerade durch den Ursprung.



## 7. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Temperatur

### Lernziele

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke einer Solarzelle für verschiedene Temperaturen.
- Die Schüler berechnen die Leistung der Solarzelle.
- Die Schüler schließen aus ihren Messwerten, dass die Leistung einer Solarzellen mit steigender Temperatur abnimmt.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Aufnahme einer U-I-Kennlinie bei unterschiedlichen Temperaturen ist sehr schwierig, da die Temperatur sich ständig verändert.
- In der Auswertung sollte darauf eingegangen werden, dass sich die Leerlaufspannung um 0,7%/K sinkt und die Kurzschlussstromstärke um etwa 0,1%/K steigt. Der negative Temperaturkoeffizient der Leerlaufspannung dominiert und sorgt dafür, dass die Maximalleistung um etwa 0,5%/K sinkt.
- In der Realität werden Solarzellen kaum gekühlt, da der Energiebedarf der Kühlung geringer sein muss als der Leistungsanstieg durch die Kühlung.

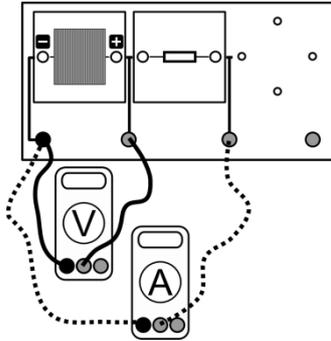


## 7. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Temperatur

### Aufgabe

Nimm die Leistung einer Solarzelle in Abhängigkeit ihrer Temperatur auf!

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- leXsolar-Beleuchtungsmodul
- 1 große Solarzelle
- leXsolar-Widerstandsmodul
- 1 Strommessgerät
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Laborthermometer
- 1 PowerModul (12V)
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Schraube alle 4 Glühlämpchen in das leXsolar-Beleuchtungsmodul. Stelle das Beleuchtungsmodul auf die Solarzelle und schiebe das Thermometer durch die vorgesehene Bohrung, bis es auf der Zelle aufsitzt. Verbinde das Beleuchtungsmodul mit dem PowerModul (12V).
2. Schalte das PowerModul ein! Lies sofort Temperatur, Spannung und Stromstärke ab und trage die Werte in eine Tabelle beim gerade gemessenen Temperaturwert ein!
3. Miss nun die Spannung und Stromstärke ab einer Temperatur von 25°C jeweils alle 5°C ab und trage die Werte in die Tabelle ein. Beende die Messung bei 60°C.

### Auswertung

1. Errechne die jeweilige Leistung  $P$  aus den Messwerten.
2. Beschreibe, wie sich die Spannung, Stromstärke und Leistung in Abhängigkeit von der Temperatur ändert.



## 7. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Temperatur

### Messwerte

$\vartheta$ (°C)		25	30	35	40
$U$ (V)		0,56	0,56	0,55	0,54
$I$ (mA)		1,5	1,5	1,5	1,5
$P$ (mW)		0,84	0,84	0,83	0,81

$\vartheta$ (°C)	45	50	55	60
$U$ (V)	0,53	0,53	0,52	0,51
$I$ (mA)	1,5	1,5	1,4	1,4
$P$ (mW)	0,8	0,8	0,73	0,72

### Auswertung

2.

Mit steigender Temperatur sinken die Spannung deutlich und die Stromstärke geringfügig. Somit sinkt auch die Leistung mit steigender Temperatur.



## 8. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Frequenz des einfallenden Lichts

### Lernziele

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke einer Solarzelle für verschiedene Frequenzen.
- Die Schüler berechnen die Energie eines einfallenden Photons.
- Die Schüler beschreiben anhand ihrer Messwerte, dass die Leistung steigt, je energieärmer das Licht ist.
- Die Schüler erklären die Versuchsergebnisse.

### Vorwissen

- Die Schüler wissen, dass Silizium die Eigenschaft hat, dass energieärmeres Licht tiefer in die Solarzelle eindringt als energiestärkeres.
- Die Schüler wissen, dass es an der Oberfläche der Solarzelle mehr Störstellen gibt als im Inneren.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Filter sind so konzipiert, dass die Intensität bei allen Filtern gleich groß ist.

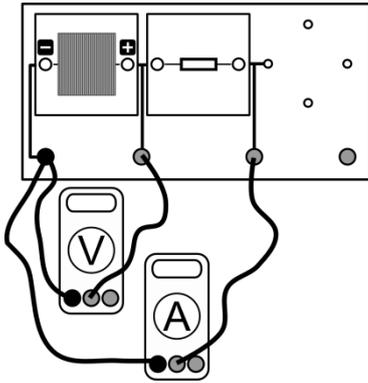


## 8. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Frequenz des einfallenden Lichts

### Aufgabe

Untersuche den Zusammenhang zwischen der Leistung der Solarzelle und der Frequenz des einfallenden Lichtes.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 1 große Solarzelle
- 1 Strommessgerät
- 1 Spannungsmessgerät
- leXsolar-Widerstandmodul
- Satz Farbfilter
- leXsolar-Beleuchtungsmodul
- PowerModul (5V)

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Lege den roten Farbfilter zwischen Beleuchtungsmodul und Solarzelle und schalte das Beleuchtungsmodul bei einer Spannung von 5V ein.
2. Miss die Spannung und die Stromstärke und erfasse die Messwerte in einer Tabelle.
3. Wiederhole die Messung für den blauen und gelben Farbfilter.

### Auswertung

1. Berechne die Energie eines Photons und die Leistung der Solarzelle im jeweiligen Wellenlängenbereich!
2. Vergleiche die Energie der Photonen und die Leistung der Solarzelle. (Hinweis: Die Intensität der jeweiligen Wellenlänge ist bei allen Farbfiltern gleich.)
3. Erkläre diesen Effekt.

### Messwerte

Farbfilter	rot	gelb	blau
$\lambda$	650 ... 800 nm	550 ... 700 nm	400 ... 550 nm
$E_{\text{Photonen}}$ (eV)	1,55...1,91	1,77...2,26	2,26...3,11
$U$ (V)	0,33	0,28	0,27
$I$ (mA)	8,5	7,3	6,9
$P=U \cdot I$ (mW)	2,805	2,044	1,863



## 8. Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Frequenz des einfallenden Lichts

### Auswertung

2.

Je kleiner die Energie des Lichts ist, desto größer ist Leistung der Solarzelle.

---

3.

Die spektrale Empfindlichkeit ist von der Bandlücke  $E_g$  von Silizium (1,1 eV), der Dotierung und der Antireflexionsschichten abhängig. Die Überwindung der Bandlücke ist für jede Wellenlänge möglich. Für gewöhnlich sorgen die Materialeigenschaften jedoch dafür, dass rotes Licht besser absorbiert wird, als blaues. Ein weiterer wichtiger Effekt ist, dass energieärmeres Licht tiefer in die Solarzelle eindringt. Da die Oberfläche relativ gesehen die meisten Störstellen aufweist, trägt das energiereiche blaue Licht weniger zur Leistung bei, als das rote.

---



## 9. Der Diodencharakter der Solarzelle

### Lernziele

#### Die Dunkelkennlinie

- Die Schüler messen die U-I-Dunkelkennlinie der Solarzelle.
- Die Schüler beschreiben die Dunkelkennlinie.
- Die Schüler erklären die physikalischen Vorgänge, die zu der Dunkelkennlinie führen.

#### Der Innenwiderstand in Abhängigkeit von der Sperr- und Durchlassrichtung und dem Abdunklungsgrad

- Die Schüler messen die Spannung und Stromstärke einer Solarzelle, wenn sie abgedunkelt ist, bzw. wenn sie in Sperrichtung oder Durchlassrichtung zu 2 anderen Solarzellen steht.
- Die Schüler berechnen den Innenwiderstand der Solarzelle je nach Konstellation.
- Die Schüler vergleichen die Innenwiderstände in Sperrichtung und Durchlassrichtung bei den 2 Abdunklungsgraden.
- Die Schüler erklären die Innenwiderstände anhand ihrer physikalischen Vorgänge bei den verschiedenen Schaltungen.

### Vorwissen

- Die Schüler kennen den Aufbau der Solarzelle
- Die Schüler kennen die U-I-Kennlinie einer Diode
- Die Schüler kennen die physikalischen Vorgänge, die zu der U-I-Kennlinie der Diode führen.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Experimente haben für den praktischen Gebrauch von Solarzellen wenig Relevanz. Sie beweisen jedoch, dass eine Solarzelle eine Diode ist und können dazu dienen, das Wissen über Halbleiter und Dioden zu festigen.

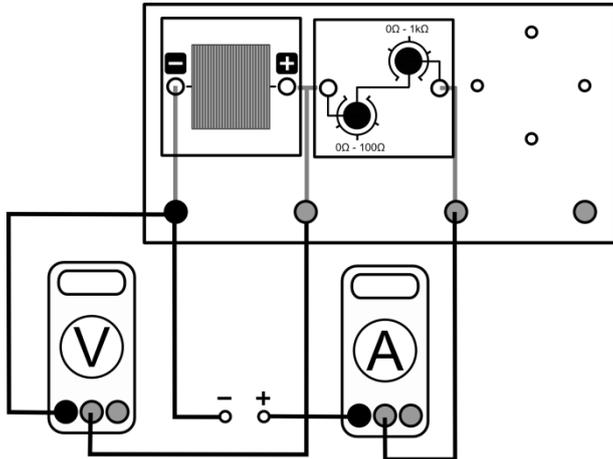


## 9.1 Die Dunkelkennlinie einer Solarzelle

### Aufgabe

Nimm die Dunkelkennlinie der Solarzelle auf!

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 1 große Solarzelle
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Strommessgerät
- Solarzellenabdeckungen (schwarze Plättchen)
- 1 Potentiometermodul
- PowerModul (2V)

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Decke die Solarzelle vollständig ab. Stelle den maximalen Widerstand auf dem Potentiometer ein. Stelle eine Spannung von 2V am PowerModul ein.
2. Stelle durch verschiedene Spannungswerte am PowerModul und durch verschiedene Widerstände am Potentiometer unterschiedliche Spannungen an der Solarzelle ein. Miss zu verschiedenen Spannungen die zugehörige Stromstärke.
3. Tausche die Polarität des PowerModuls und wiederhole die Messung

### Auswertung

1. Zeichne das  $U$ - $I$ -Diagramm der Solarzelle!
2. Beschreibe das Diagramm.
3. Erkläre das Diagramm.



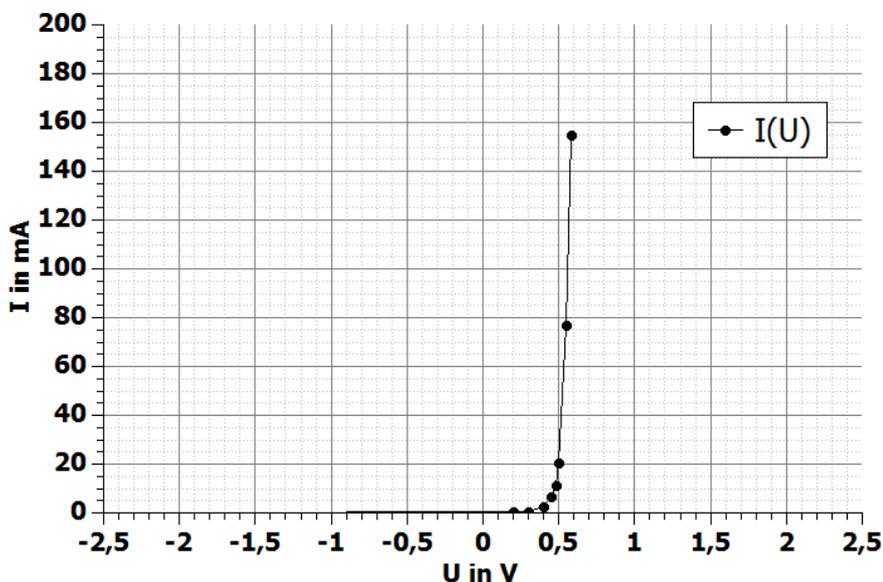
## 9.1 Die Dunkelkennlinie einer Solarzelle

### Messwerte

$U$ (V)	0,2	0,3	0,4	0,45	0,48	0,5	0,55	0,58			
$I$ (mA)	0,3	0,5	2,4	6,8	11,1	20,4	77	155			

$U$ (V)	-0,57	-1	-1,5	-2							
$I$ (mA)	0	0	-0,1	-0,1							

### Diagramme



### Auswertung

1.  
Erst ab einer bestimmten Spannung fließt ein Strom durch die Solarzelle. Bei umgekehrter Polung fließt überhaupt keine Spannung durch die Solarzelle.

2.  
Eine Solarzelle ist eine Halbleiterdiode, deren Aufbau so optimiert ist, dass einfallendes Licht möglichst optimal in Strom umgewandelt wird. Somit besteht sie aus einem n- (Minuspol der Solarzelle) und einem p-dotiertem Gebiet. Im ersten Fall ist die Solarzelle in Durchlassrichtung geschaltet. Ab 0,5V wird die Diffusionsspannung überschritten und die Diode wird leitend. Im zweiten Fall ist sie in Sperrichtung geschaltet und wird nie leitend.

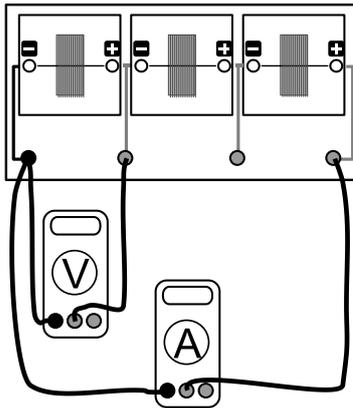


## 9.2 Der Innenwiderstand einer Solarzelle bei Sperr- und Durchlassrichtung bzw. Abdunkelung und Beleuchtung

### Aufgabe

Untersuche den Innenwiderstand einer Solarzelle bei Sperr- und Durchlassrichtung bzw. Abdunkelung und Beleuchtung.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 3 kleine Solarzellen
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Strommessgerät
- 1 Abdeckung für Solarzelle

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Ermittle den Widerstand von Solarzelle 1 bei unterschiedlicher Polung und bei einer Abdunkelung durch die schwarzen Plättchen.
3. Führe die Messungen analog ohne Abdunkelung und bei gleicher Beleuchtung durch! Erfasse alle Messwerte in einer Tabelle!

Hinweis: Ein Polaritätswechsel wird durch Drehung der Zelle um  $180^\circ$  erreicht. Nutze die Solarzellen 2 und 3 als Spannungsquelle zur Widerstandsermittlung!

### Auswertung

1. Beschreibe das Verhalten des Innenwiderstandes bei Sperr- und Durchlassrichtung der Solarzelle. Unterscheide, ob die Zelle abgedunkelt wurde oder nicht.

Zusatz:

2. Erkläre den Unterschied im Hinblick auf den Aufbau und die Funktionsweise einer Diode bzw. Solarzelle!



## 9.2 Der Innenwiderstand einer Solarzelle bei Sperr- und Durchlassrichtung bzw. Abdunkelung und Beleuchtung

### Messwerte

	Ohne Abdeckung		Mit Abdeckung	
$U$ (V)	0,42	-0,49	-1,05	-0,49
$I$ (mA)	8	7,9	0	8
$R=U/I$ ( $\Omega$ )	52,5	62	$\infty$	61,3

### Auswertung

1.

Ohne Abdeckung war der Innenwiderstand bei der Schaltung in Sperrrichtung kleiner als bei der Schaltung in Durchlassrichtung. Mit Abdeckung ist das Verhältnis der Widerstände umgekehrt.

2.

Mit Abdeckung entspricht das Verhalten der Solarzelle einer gewöhnlichen Diode. In Sperrrichtung fließt kein Strom, der Widerstand ist unendlich groß.

Ohne Abdeckung ist das Verhältnis umgekehrt, da hier 3 Spannungsquellen im Stromkreis arbeiten. Ist die Solarzelle in Sperrrichtung geschaltet, sind alle 3 Zellen gleich gepolt und der Strom kann dementsprechend ungehinderter fließen, als wenn die Spannung der Solarzelle den beiden anderen entgegengesetzt wäre. Im letzteren Fall muss erst die Diffusionsspannung der entgegengesetzt gepolten Solarzelle überwunden werden, bis ein Stromfluss entsteht.



## 10. Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle

### Lernziele

Die Solarzellenleistung in Abhängigkeit von der Last.

- Die Schüler messen die Spannung und Stromstärke für 3 verschiedene Verbraucher.
- Die Schüler berechnen die Leistung der Solarzelle und die Widerstände der Verbraucher.
- Die Schüler vergleichen die Leistung in Abhängigkeit vom Verbraucher.
- Die Schüler erkennen, dass ohne weitere Messungen kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Leistung und Widerstand benannt werden kann.

Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle

- Die Schüler messen Spannung und Stromstärke der Solarzelle bei verschiedenen Widerständen.
- Die Schüler berechnen die Leistung für verschiedenen Messwerte.
- Die Schüler zeichnen ihre Messwerte in das U-I- und U-P-Diagramm.
- Die Schüler beschreiben die U-I- und U-P-Kennlinie.
- Die Schüler schließen aus den Messwerten, dass die Leistung der Solarzelle vom angeschlossenen Widerstand abhängt und einen maximalen Wert besitzt (Maximum Power Point (MPP)).
- Die Schüler berechnen den Füllfaktor der Solarzelle.

Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

- Die Schüler messen Spannung und Stromstärke der Solarzelle bei verschiedenen Widerständen und Beleuchtungen.
- Die Schüler berechnen die Leistung für verschiedenen Messwerte.
- Die Schüler zeichnen ihre Messwerte in das U-I- und U-P-Diagramm.
- Die Schüler vergleichen die U-I- und U-P-Kennlinien untereinander und erkennen, dass die U-I-Kennlinie entlang der y-Achse verschoben wird.
- Die Schüler beschreiben, dass der Maximum MPP sich entlang nahezu parallel zur y-Achse verschiebt.
- Die Schüler erklären, dass sich die U-I-Kennlinie entlang der y-Achse verschiebt, da eine geringe Beleuchtung weniger Elektronen-Loch-Paarbildung bedeutet.

### Vorwissen

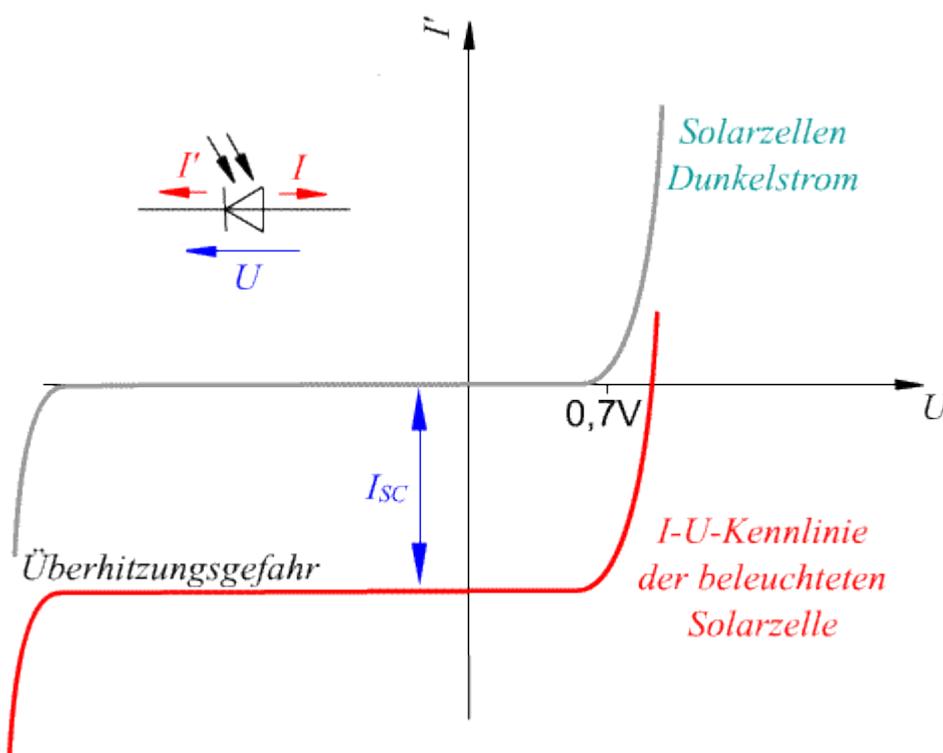
- Die Schüler wissen, dass der Füllfaktor ein Maß für die Effizienz der Solarzelle ist.
- Die Schüler können den Wirkungsgrad bestimmen.



## 10. Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Die Beleuchtungsstärke darf nicht durch das Verändern der Spannung am Beleuchtungsmodul geändert werden, da sich hierdurch auch das Spektrum ändert. Dieses hat ebenfalls einen Einfluss auf die Leistung der Solarzelle.
- Anstelle des Potentiometers kann auch der Kondensator verwendet werden. Bei einer Beleuchtungsspannung von 5V wird der Kondensator durch das Solarmodul so geladen, dass er alle Widerstände kontinuierlich annimmt und die Schüler genügend Zeit haben die Messwerte aufzunehmen. Bei der Verwendung des Kondensators ist darauf zu achten, dass der Minuspol (Pluspol) des Kondensators am Minuspol (Pluspol) der Solarzelle anliegt und dass der Kondensator entladen ist. Da den Schülern eventuell nicht bewusst ist, dass der Kondensator verschiedene Widerstände annimmt, sollten die Schüler neben der Leistung des Solarmoduls auch den Widerstand des Kondensators berechnen.
- In der Auswertung der U-I-Kennlinie bietet es sich an, darauf einzugehen, dass Solarkraftanlagen mit MPP-Trackern ausgestattet sind. Sie sorgen dafür, dass sie immer am MPP arbeitet. Der berechnete Wirkungsgrad entspricht etwa der Hälfte des realen Wertes für polykristallines Silizium (14%-20%). Dies liegt daran, dass der Wirkungsgrad bei geringerer Beleuchtung sinkt und er normalerweise bei einer Bestrahlung von  $1000 \text{ W/m}^2$  bestimmt wird.
- Ebenfalls bietet es sich an, die U-I-Kennlinie der Solarzelle mit der einer Diode zu vergleichen. Misst man die U-I-Kennlinie einer Diode entsteht der Graph von Experiment 9.1. Tauscht man die Diode mit einer Solarzelle in der gleiche Orientierung von p- und n-Übergang aus und nutzt eine Spannungsquelle, die Leistung aufnehmen kann, verschiebt sich der Graph entlang der Ordinate um den Photostrom nach unten (Siehe nachfolgende qualitative Abbildung).



Die U-I-Kennlinie, welche im Experiment 10.2 gemessen wird, befindet sich „umgeklappt“ im 4. Quadranten.

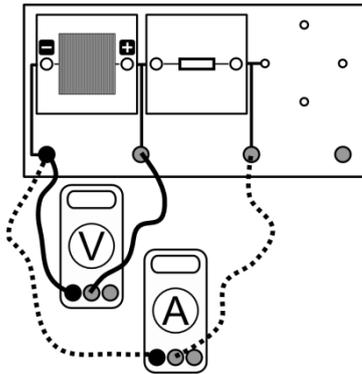


## 10.1 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Last

### Aufgabe

Bestimme die Leistung eines Solarmoduls bei unterschiedlichen Verbrauchern.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- leXsolar-Beleuchtungsmodul
- 1 großes Solarmodul
- 1 Strommessgerät
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Widerstandsmodul
- 1 Hupenmodul
- 1 Motormodul
- 1 PowerModul (9V)

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Schalte das Beleuchtungsmodul bei einer Spannung von 9V ein. Stecke zunächst das Widerstandsmodul auf.
2. Miss die Stromstärke und die Spannung der Solarzelle.
3. Wiederhole die Messung mit dem Hupen- und dem Motormodul. Erfasse alle Messwerte in einer Tabelle.

### Auswertung

1. Berechne die Leistung des Solarmoduls und den Widerstand des Verbrauchers für jeden Verbraucher.
2. Vergleiche die Leistung der Solarzelle bei den verschiedenen Verbrauchern. Ziehe Rückschlüsse zwischen Widerstand und Leistung.

### Messwerte

	Widerstand 33 $\Omega$	Motormodul	Hupe
$U$ (V)	0,61	1,25	1,44
$I$ (mA)	15,5	13,4	2
$P=U \cdot I$ (mW)	9,4	16,8	2,9
$R=U/I$ ( $\Omega$ )	39,4	93,3	720



## 10.1 Die Abhängigkeit der Solarzellenleistung von der Last

### Auswertung

2.

Die Leistung ist trotz gleicher Beleuchtungsstärke bei allen 3 Verbrauchern unterschiedlich.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Leistung und Widerstand kann nicht ohne weitere

Untersuchungen geschlossen werden. Die Messwerte zeigen nicht, dass die Leistung bei besonders

großen oder kleinen Widerständen am höchsten ist. Es muss die Leistung für weitere Widerstände

untersucht werden.

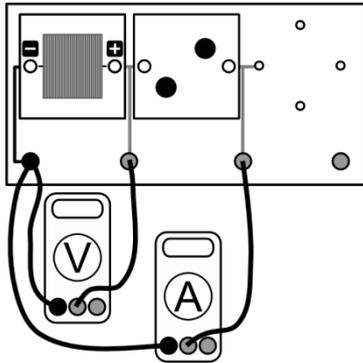


## 10.2 Die U-I-Kennlinie und der Füllfaktor einer Solarzelle

### Aufgabe

Nimm die  $U$ - $I$ -Kennlinie der Solarzelle auf!

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 1 große Solarzelle
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Strommessgerät
- leXsolar-Potentiometermodul
- leXsolar-Beleuchtungsmodul
- 1 PowerModul (5V)

### Durchführung

1. Baue den Versuch wie vorgegeben auf. Schließe das Beleuchtungsmodul an das PowerModul an (5V) und stelle es auf die Solarzelle. Achte darauf, dass alle vier Glühlampen leuchten! Stelle den höchsten Widerstand ein.
2. Gib dir sinnvolle Werte für die Spannung vor und miss für diese jeweils die Stromstärke! Verändere dazu zunächst den  $1\text{k}\Omega$ -Widerstand, danach den  $100\Omega$ -Widerstand!
3. Miss ohne Potentiometer ebenfalls die Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke!
4. Erfasse alle Messwerte in einer Tabelle!

### Auswertung

1. Zeichne das  $U$ - $I$ -Diagramm der Solarzelle!
2. Berechne zu jedem Messpunkt die jeweilige Leistung der Solarzelle und zeichne in das gleiche Diagramm die  $U$ - $P$ -Kennlinie.
3. Beschreibe die Kurven.
4. Zeichne in dein Diagramm die  $U$ - $I$ -Kennlinie eines  $10\Omega$ - und  $100\Omega$ -Widerstands. Erläutere die Bedeutung der Schnittpunkte der Solarzelle-Kennlinie mit den jeweiligen Widerstandskennlinien
5. Ziehe Schlussfolgerungen bezüglich der Leistung einer Solarzelle.
6. Der Füllfaktor  $FF$  ist der Quotient aus dem Produkt der Spannung und Stromstärke bei maximaler Leistung und dem Produkt der Leerlaufspannung und der Kurzschlussstromstärke. Berechne den Füllfaktor.
7. Berechne näherungsweise den Wirkungsgrad der Solarzelle, wenn diese am MPP arbeitet. (Hinweis: Die Kurzschlussstromstärke der Solarzelle beträgt bei einer Bestrahlungsleistung von  $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$   $840 \text{ mA}$ . Beide Größen sind proportional zueinander.)

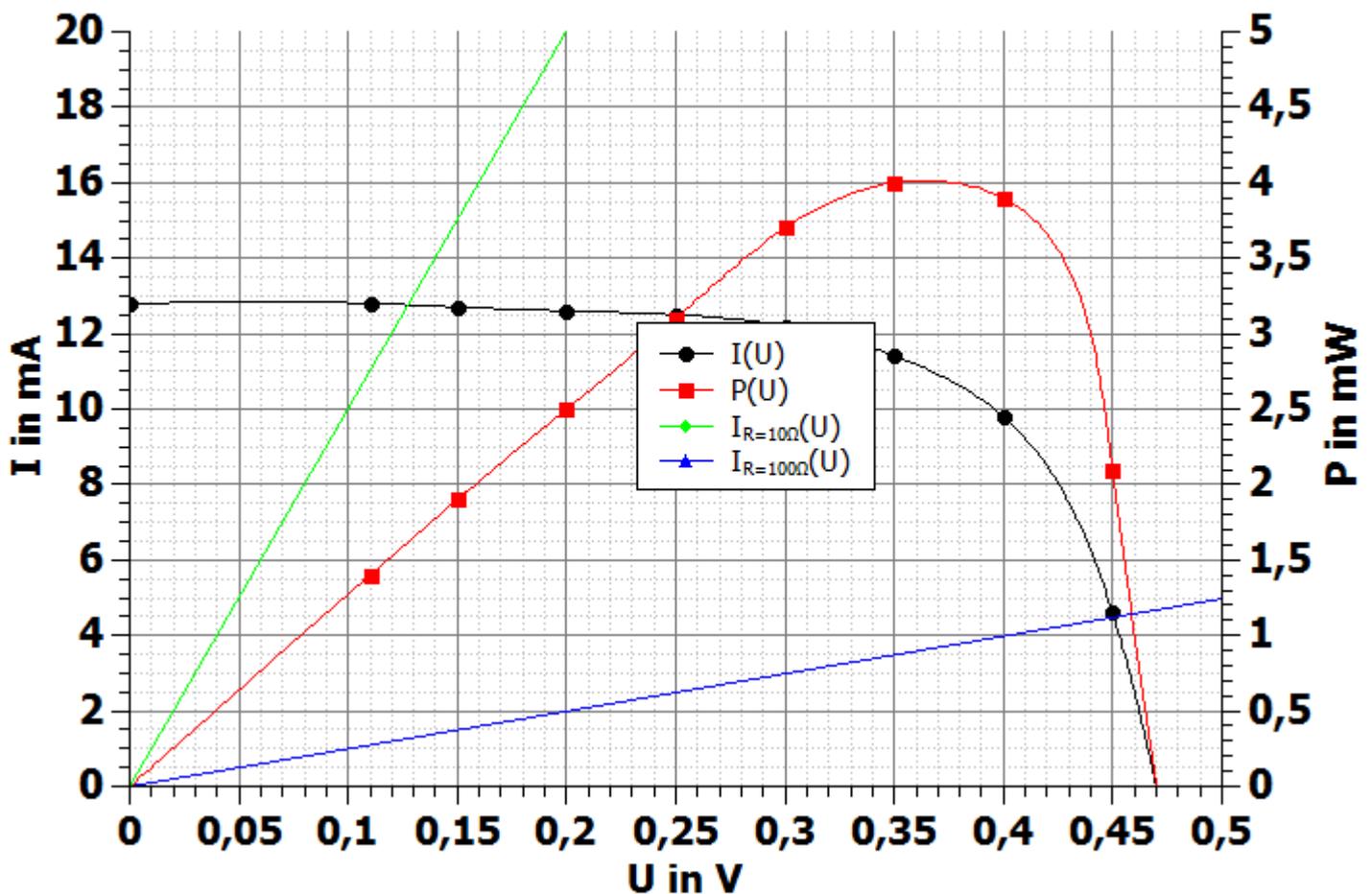


## 10.2 Die U-I-Kennlinie und der Füllfaktor einer Solarzelle

### Messwerte

$U$ (V)	0,47	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,11	0
$I$ (mA)	0	4,6	9,8	11,4	12,2	12,5	12,6	12,7	12,8	12,8
$P=U \cdot I$ (mW)	0	2,1	3,9	4	3,7	3,1	2,5	1,9	1,4	0

### Diagramme



### Auswertung

3.  
Die U-I-Kennlinie zeigt, dass die Stromstärke mit zunehmender Spannung sinkt. Die maximale Spannung und Stromstärke betragen 0,47V beziehungsweise 12,8mA. Die Leistung besitzt bei einer Spannung von 0,35V und einer Stromstärke von 11,4mA ihr Maximum. Mit zunehmenden Abstand zu dieser Spannung sinkt die Leistung bis auf 0.



## 10.2 Die U-I-Kennlinie und der Füllfaktor einer Solarzelle

4.

Der Schnittpunkt der beiden Graphen gibt die Spannung und die Stromstärke wieder, die das Solarmodul an den Widerstand abgibt.

---

5.

Die Leistung einer Solarzelle ist nicht nur von der Bestrahlungsstärke abhängig, sondern auch von dem angeschlossenen Widerstand. Der Widerstand für die Maximalleistung beträgt in diesem Fall  $30,7\Omega$ .

---

6.

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{Leer} \cdot I_{Kurz}}$$

$$FF = \frac{0,35V \cdot 11,4mA}{0,47V \cdot 12,8mA}$$

$$FF = 0,663 = 66,3\%$$

7.

Berechnung der auf die Solarzelle einstrahlenden Leistung

$$P_{in} = \frac{P_{in,1000} \cdot I_{K,exp}}{I_{K,1000}} \cdot A_{Solarzelle}$$

$$P_{in} = \frac{1000 \frac{W}{m^2} \cdot 12,8mA}{840mA} \cdot 0,0036m^2$$

$$P_{in} = 0,0548W = 54,8mW$$

Berechnung des Wirkungsgrades

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{in}}$$

$$\eta = \frac{4mW}{54,8mW}$$

$$\eta = 7,3\%$$

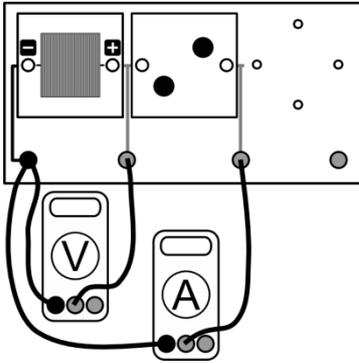


## 10.3 Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

### Aufgabe

Nimm die  $U$ - $I$ -Kennlinie der Solarzelle bei verschiedenen Beleuchtungsstärken auf!

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 1 große Solarzelle
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Strommessgerät
- leXsolar-Potentiometermodul
- leXsolar-Beleuchtungsmodul
- 1 PowerModul (5V)

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanleitung auf. Schließe das Beleuchtungsmodul an das PowerModul an (5V) und stelle es auf die Solarzelle. Achte darauf, dass zunächst nur 1 Glühlampe leuchtet.
2. Stelle den größtmöglichen Widerstand auf dem Potentiometermodul ein.
3. Miss für verschiedene Widerstände die Spannung und die Stromstärke der Solarzelle. Miss ebenfalls die Leerlaufspannung und die Kurzschlussstromstärke.
4. Wiederhole die Messung für 2, 3 und 4 Lampen.
5. Berechne die Leistung zu den verschiedenen Messpunkten.

### Messwerte

#### Mit einer Glühlampe:

$U$ (V)		0,38	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0
$I$ (mA)		0	1	1,7	2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4
$P=U \cdot I$ (mW)		0	0,35	0,5	0,5	0,44	0,35	0,23	0,12	0

#### Mit zwei Glühlampen:

$U$ (V)	0,43	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0
$I$ (mA)	0	2,6	4,9	5,5	5,9	6	6,1	6,1	6,1	6,1
$P=U \cdot I$ (mW)	0	1,04	1,72	1,65	1,48	1,2	0,91	0,61	0,31	0

#### Mit drei Glühlampen:

$U$ (V)	0,46	0,45	0,43	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,1	0
$I$ (mA)	0	1,7	4,2	6,8	8,5	9,1	9,4	9,6	9,7	9,7
$P=U \cdot I$ (mW)	0	0,77	1,81	2,72	2,98	2,73	2,35	1,92	0,97	0



## 10.3 Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

### Messwerte

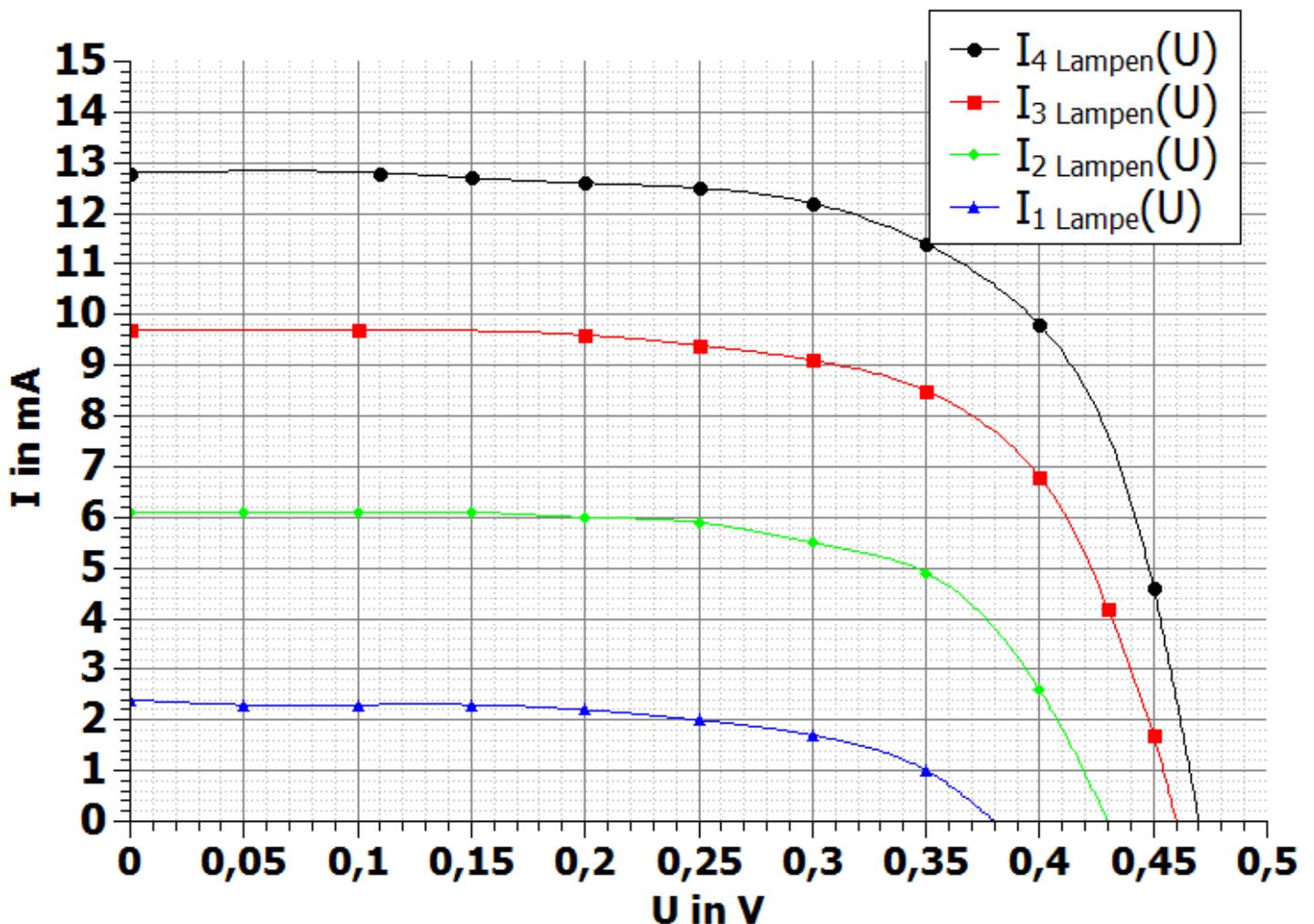
Mit vier Glühlampen:

$U$ (V)	0,47	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,11	0
$I$ (mA)	0	4,6	9,8	11,4	12,2	12,5	12,6	12,7	12,8	12,8
$P=U \cdot I$ (mW)	0	2,1	3,9	4	3,7	3,1	2,5	1,9	1,4	0

### Auswertung

1. Zeichne das  $U$ - $I$ - und  $U$ - $P$ -Diagramm der Solarzelle bei den unterschiedlichen Beleuchtungsstärken.
2. Vergleiche die  $U$ - $I$ -Kennlinien untereinander und erkläre die unterschiedlichen Kurven.
3. Vergleiche die Lage des Punktes maximaler Leistung (Maximum Power Point - MPP).

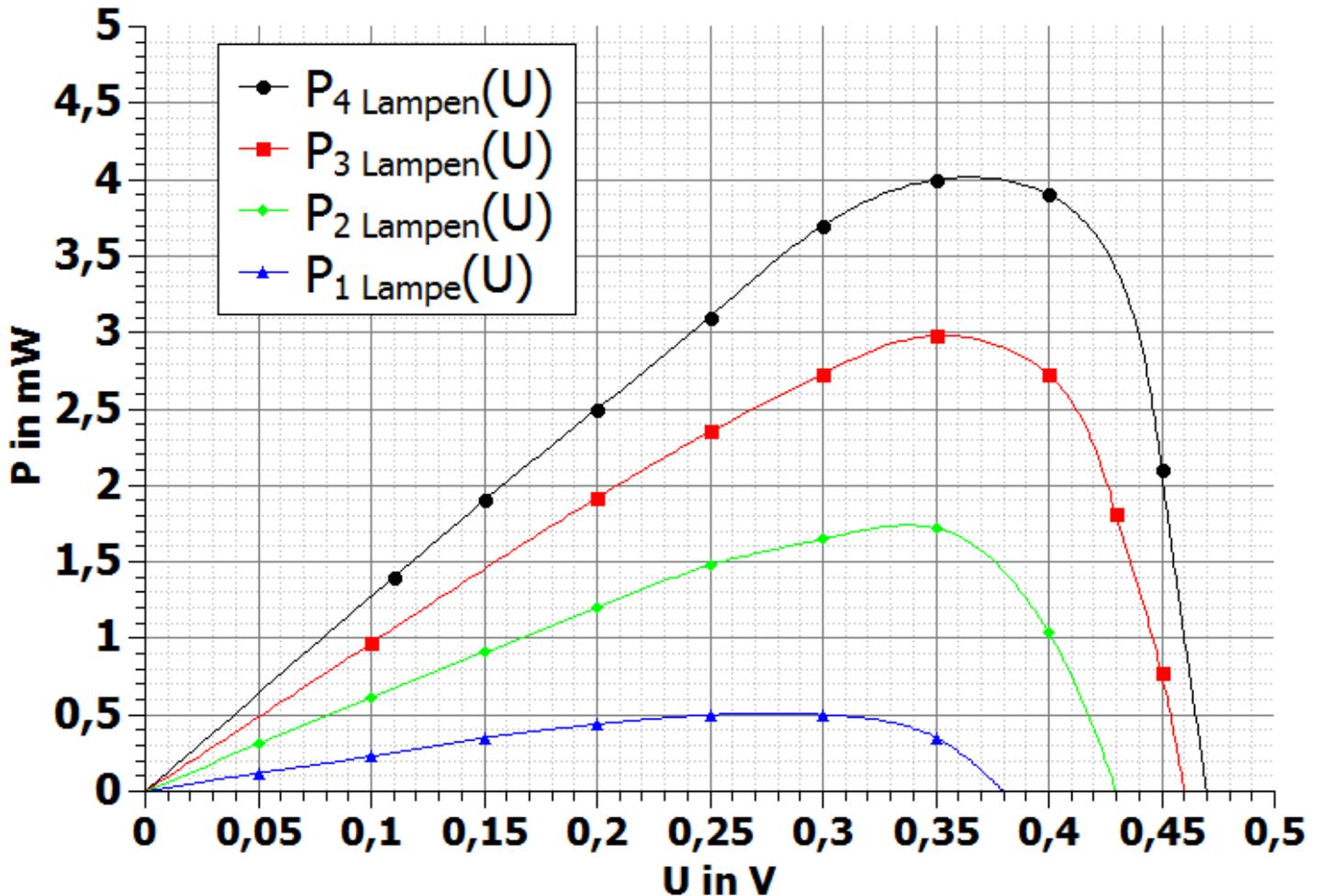
### Diagramme





## 10.3 Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

### Diagramme



### Auswertung

2. Die U-I-Kennlinien werden mit steigender Beleuchtungsstärke entlang der Ordinate nach oben verschoben.

Die Kurzschlussstromstärke steigt deutlich mit steigender Beleuchtungsstärke, während die Leerlaufspannung sich kaum vergrößert.

Die Verschiebung entlang der y-Achse (zu geringeren Strömen) ist dadurch zu erklären, dass weniger Elektronen-Loch-Paare durch ankommende Photonen gebildet werden. Es stehen somit weniger Ladungsträger zur Verfügung.

3. Der MPP verschiebt sich bei steigender Beleuchtungsstärke hauptsächlich entlang der Ordinate zu größeren Leistungen. Die MPP-Spannung verändert sich kaum.



## 11. Das Verhalten von Spannung und Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen

### Lernziele

#### Qualitativer Versuch

- Die Schüler beschreiben die Lautstärke der Hupe bei unterschiedlichen Reihen- und Parallelschaltungen.
- Die Schüler schließen aus ihren Messwerten, dass die Spannung und Stromstärke mit zusätzlichen seriell geschalteten Solarzellen steigt.
- Die Schüler schließen aus ihren Messwerten, dass die Spannung bei Parallelschaltungen nicht steigt.

#### Quantitativer Versuch

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke an einer, zwei und drei Solarzelle(n) in einer Reihen- und in einer Parallelschaltung.
- Die Schüler halten ihre Messwerte in einem Anzahl der Solarzellen-Spannung(Stromstärke)-Diagramm fest.
- Die Schüler erkennen anhand der Messwerte, dass sich die Spannung in einer Reihenschaltung mit jeder weiteren Solarzelle um einen konstanten Wert erhöht und die Stromstärke konstant bleibt.
- Die Schüler erkennen anhand der Messwerte, dass sich die Stromstärke in einer Parallelschaltung mit jeder weiteren Solarzelle um einen konstanten Wert erhöht und die Spannung konstant bleibt.
- Die Schüler formulieren ihre Erkenntnisse in einem mathematischen Gesetz.

### Vorwissen

- Die Schüler können anhand der Lautstärke der Hupe Rückschlüsse auf die Spannung und Stromstärke der Solarzelle ziehen.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Für die besten Messergebnisse sollte die Beleuchtung bei allen Solarzellen gleichmäßig und hoch sein
- Bei der Auswertung bietet es sich an, die Analogie zu Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen (z.B. Batterien) zu ziehen. Des Weiteren ist es möglich zu erwähnen, dass mit der heutigen Technologie Solarzellen nur mit einer begrenzten Fläche gefertigt werden können. 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. Für technische Zwecke sind diese sehr geringen Spannungen aber kaum nutzbar. Deshalb werden mehrere Solarzellen zu Einheiten, sogenannten Modulen zusammengeschaltet. Handelsübliche Module haben meist eine Nennspannung von  $6 \text{ V}$ .

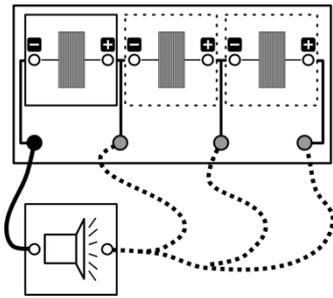


# 11.1 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltungen von Solarzellen (qualitativ)

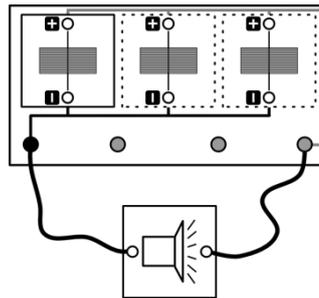
## Aufgabe

Untersuche das Verhalten der Hupe bei verschiedenen Parallel- und Reihenschaltungen und ziehe Rückschlüsse auf die Spannung und Stromstärke.

## Aufbau



Schaltung 1



Schaltung 2

## Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 3 kleine Solarzellen
- Hupenmodul
- Kabel

## Durchführung:

1. Baue zuerst eine Reihenschaltung auf (Schaltung 1). Nutze dabei erst eine, dann zwei und schließlich drei Solarzellen. Vergiss bei der Reihenschaltung nicht, den Leiter in der roten Buchse weiter zu stecken. Male in der Tabelle die zutreffenden Kästchen des Balkens aus.
2. Führe die Untersuchungen auch für die Parallelschaltung (Schaltung 2) durch. Achte während des Versuchs darauf, dass sich die Versuchsbedingungen (z.B. die Helligkeit) nicht ändern.

## Auswertung

	Reihenschaltung				Parallelschaltung			
Eine Solarzelle	<input type="checkbox"/>							
	kein	leises	<	lautes	kein	leises	<	lautes
	Geräusch				Geräusch			
Zwei Solarzellen	<input type="checkbox"/>							
Drei Solarzellen	<input type="checkbox"/>							

Ziehe Rückschlüsse auf die Spannung und Stromstärke.

Bei der Reihenschaltung wurde das Hupengeräusch immer lauter, je mehr Solarzellen vorhanden waren.

Dies lässt darauf schließen, dass die Spannung und Stromstärke gestiegen sind. Bei der Parallel-

schaltung kam es unabhängig von der Anzahl der Solarzellen zu keinen Geräuschen. Somit bleiben

Spannung und Stromstärke zu gering.

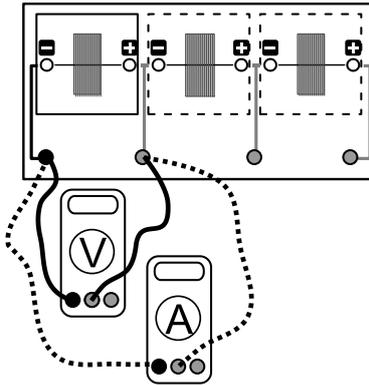


## 11.2 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltungen von Solarzellen (quantitativ)

### Aufgabe

Ermittle, wie sich die Gesamtspannung und die Gesamtstromstärke bei Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen verhalten!

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 3 kleine Solarzellen
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Strommessgerät
- Kabel

### Vorbemerkung

Bei diesem Experiment werden nur Kurzschlussstromstärken bzw. Leerlaufspannungen gemessen. Diese können nicht gleichzeitig gemessen werden.

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend dem Schaltplan mit einer Solarzelle auf.
2. Miss Spannung und Stromstärke an einer Solarzelle (siehe Schaltbild)!
3. Verändere die Schaltung so, dass zwei bzw. drei Solarzellen in Reihe geschaltet sind! Miss die Spannung und Stromstärke der zwei bzw. drei Solarzellen!
4. Führe die Messungen zur Parallelschaltung analog durch! Entwickle hierfür ebenfalls einen Schaltplan unter Beachtung des Schaltplans der leXsolar-Grundeinheit.
5. Erfasse alle Messwerte in einer Tabelle!

### Auswertung

1. Zeichne das  $n$ - $I$ -Diagramm ( $n$ ... Anzahl der Solarzellen) für Reihen- und Parallelschaltung! Zeichne beide Graphen in ein Diagramm!
2. Zeichne das  $n$ - $U$ -Diagramm für Reihen- und Parallelschaltung! Zeichne beide Graphen in ein Diagramm!
3. Formuliere ein Gesetz für den Gesamtstrom und die Gesamtspannung bei Reihen- bzw. Parallelschaltung von Solarzellen!



## 11.2 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltungen von Solarzellen (quantitativ)

### Messwerte

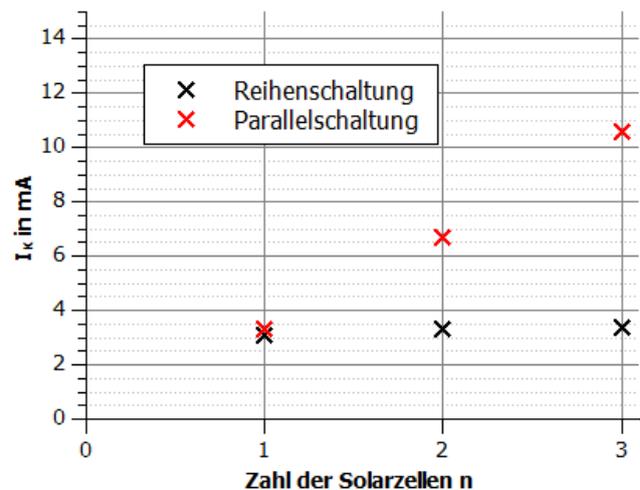
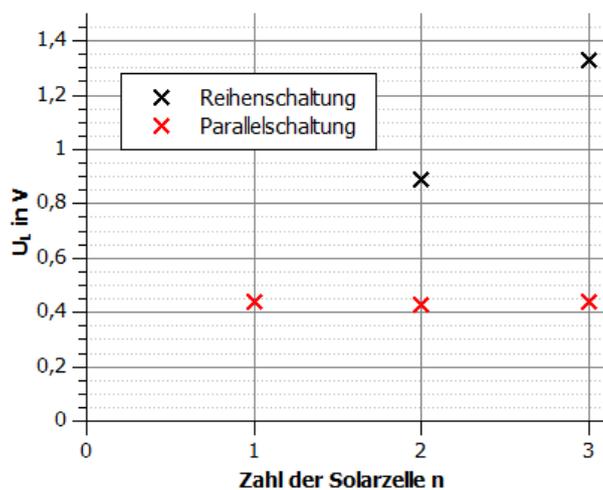
#### Reihenschaltung:

	eine Solarzelle	zwei Solarzellen	drei Solarzellen
$U_L$ (V)	0,44	0,89	1,33
$I_K$ (mA)	3,1	3,3	3,4

#### Parallelschaltung:

	eine Solarzelle	zwei Solarzellen	drei Solarzellen
$U_L$ (V)	0,44	0,43	0,44
$I_K$ (mA)	3,3	6,7	10,6

### Diagramme



### Auswertung

	Verhalten von	
	Spannung	Stromstärke
Reihenschaltung	$U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$I_{ges} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$
Parallelschaltung	$U_{ges} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$	$I_{ges} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$



## 12. Das Verhalten von Spannung und Stromstärke bei der Abschattung von Solarzellen in Reihen- und Parallelschaltung

### Lernziele

#### Qualitativer Versuch: Abschattung in Reihenschaltung

- Die Schüler beschreiben die Verringerung der Lautstärke der Hupe bei der Abschattung einer Solarzelle in einer Reihenschaltung
- Die Schüler erläutern, dass die Abschattung ein relevantes Problem in Form von Schnee oder Laub in der Realität ist.

#### Quantitativer Versuch: Abschattung in Reihenschaltung

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke einer Reihenschaltung in Abhängigkeit davon, ob eine Solarzelle abgedunkelt ist und ob eine Bypassdiode hinzugeschaltet wurde.
- Die Schüler berechnen die Leistung und die prozentuale Abweichung von der Maximalleistung.
- Die Schüler erklären, weshalb die Leistung mit Bypassdiode weniger gesunken ist.

#### Quantitativer Versuch: Abschattung in Parallelschaltung

- Die Schüler messen die Spannung und die Stromstärke einer Parallelschaltung in Abhängigkeit davon, ob keine, eine oder zwei Solarzellen abgedunkelt werden.
- Die Schüler berechnen die Leistung und die prozentuale Abweichung von der Maximalleistung.
- Die Schüler erklären die Leistungswerte.

### Vorwissen

- Die Schüler kennen den Aufbau und die Funktionsweise von Dioden und Solarzellen.

### Vorversuche

- Das Verhalten der Spannung und Stromstärke in Reihen- und Parallelschaltungen von Solarzellen.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Für die besten Messergebnisse sollte die Beleuchtung bei allen Solarzellen gleichmäßig und hoch sein.

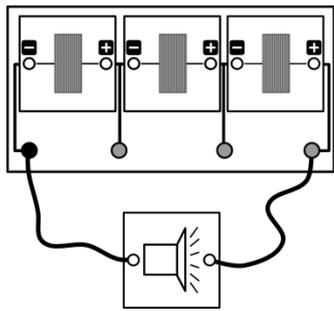


## 12.1 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke bei der Abschattung einer Solarzelle in Reihenschaltungen (qualitativ)

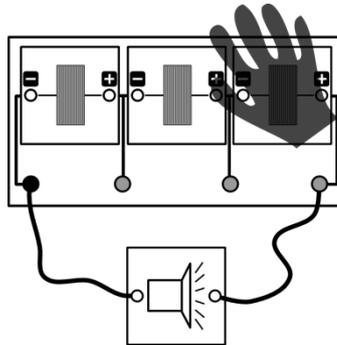
### Aufgabe

Untersuche das Verhalten des Solarmoduls beim Abschatten einer Solarzelle

### Aufbau



Schaltung 1



Schaltung 2

### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 3 kleine Solarzellen
- leXsolar-Glühlampe
- 2 Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch der Schaltung 1 entsprechend des Versuchsaufbaus auf.
2. Lege deine Hand, wie es Schaltung 2 zeigt, auf eine der Solarzellen.
3. Notiere deine Beobachtungen in der Tabelle

### Auswertung

Schaltung 1				Schaltung 2			
kein	leises	<	lautes	kein	leises	<	lautes
Geräusch				Geräusch			

1. Benenne, bei welchem Aufbau die Hupe lauter war.

Die Hupe war beim ersten Aufbau lauter. Im zweiten hat sie überhaupt nicht gehupt.

2. Erläutere, ob dieses Phänomen ein Problem im Alltag ist.

Dieses Phänomen ist im Alltag ein Problem, da beispielsweise Schnee, Staub und Laub, die Solarzellenleistung verringern können.

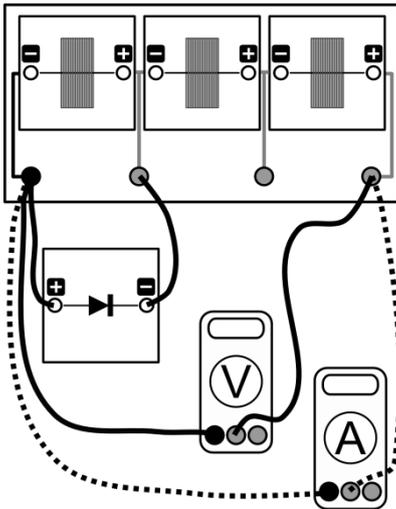


## 12.2 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke bei der Abschattung einer Solarzelle in Reihenschaltungen (quantitativ)

### Aufgabe

Untersuche, wie sich die Gesamtspannung und der Gesamtstrom von drei in Reihe geschalteten Solarzellen ändert, wenn eine der Zellen abgedunkelt wird beziehungsweise an die abgedunkelte Zelle eine Diode angeschlossen wird.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 3 kleine Solarzellen
- leXsolar-Diodenmodul
- 1 Strommessgerät
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Abdeckung für eine Solarzelle (schwarze Plättchen)
- Kabel

### Vorbemerkung

Bei diesem Experiment wird eine Leistung aus der Kurzschlussstromstärke und der Leerlaufspannung berechnet. Diese Leistung ist eine fiktive Leistung und entspricht nicht der Maximalleistung der Solarzelle. Sie wird jedoch verwendet, da die Ermittlung der Maximalleistung ohne technische Hilfsmittel aufwändig ist. Im Rahmen dieses Experiments führt der Vergleich der fiktiven Leistungen zum gleichen Ergebnis, wie der Vergleich der Maximalleistungen.

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung ohne Abdeckung auf der vordersten Solarzelle und Diode auf. Miss die Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke an den drei Solarzellen ohne und mit Diode!
2. Decke nun die vorderste Solarzelle zu und miss erneut die Spannung und die Stromstärke mit und ohne Diode.

### Auswertung

1. Berechne die Leistung und jeweils das prozentualen Absinken der Leistung gegenüber dem Fall, dass sich keine Diode im Stromkreis befindet und keine Solarzelle abgedeckt wird.
2. Erkläre die gemessenen Werte anhand der Funktionsweise der Halbleiterdiode



## 12.2 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke bei der Abschattung einer Solarzelle in Reihenschaltungen (quantitativ)

### Messwerte

	Reihenschaltung von drei Solarzellen			
	alle beleuchtet		eine abgedunkelt	
	(1) Diode ist nicht parallel geschaltet	(2) Diode parallel geschaltet	(3) Diode ist nicht parallel geschaltet	(4) Diode parallel geschaltet
$U_L$ (V)	1,6	1,6	1,5	1,5
$I_K$ (mA)	41,5	41,5	9	40
$P=U \cdot I$ (mW)	66,4	66,4	13,5	60
Absinken der Leistung gegenüber Messung 1	-	0%	79,6%	9,6%

### Auswertung

2.

Im Fall 2 ist die Diode in Sperrrichtung geschaltet. Somit fließt kein Strom durch die Diode und sie könnte ebenso nicht im Stromkreis vorhanden sein. Die Ergebnisse sind somit identisch zu Fall 1.

Im Fall 3 ist Spannung an der abgedunkelten Solarzelle so angelegt, dass sie in Sperrrichtung angelegt ist. Somit wirkt sie als ein sehr großer Widerstand, der kaum einen Stromfluss ermöglicht.

Aufgrund der Polung an der abgedunkelten Solarzelle, ist die Diode in Durchlassrichtung geschaltet. Der Strom der beiden nicht abgedunkelten Solarzellen fließt somit über die Diode. Die Leistung ist geringer, da 2 Zellen eine geringere Gesamtleistung erzeugen, als drei.

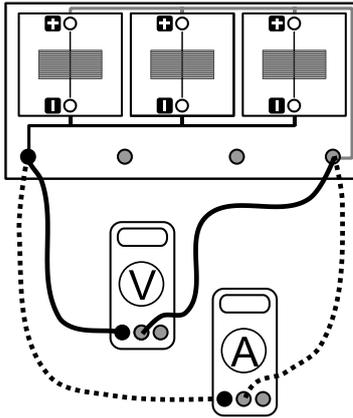


## 12.3 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke bei der Abschattung von Solarzellen in Parallelschaltungen (quantitativ)

### Aufgabe

Wie verändern sich Gesamtspannung und Gesamtstrom von drei parallel geschalteten Solarzellen, wenn eine der Zellen abgedunkelt wird?

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 3 kleine Solarzellen
- 1 Strommessgerät
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Abdeckung für eine Solarzelle (schwarze Plättchen)

### Vorbemerkung

Bei diesem Experiment wird eine Leistung aus der Kurzschlussstromstärke und der Leerlaufspannung berechnet. Diese Leistung ist eine fiktive Leistung und entspricht nicht der Maximalleistung der Solarzelle. Sie wird jedoch verwendet, da die Ermittlung der Maximalleistung ohne technische Hilfsmittel aufwändig ist. Im Rahmen dieses Experiments führt der Vergleich der fiktiven Leistungen zum gleichen Ergebnis, wie der Vergleich der Maximalleistungen.

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Miss nacheinander Leerlaufspannung und Kurzschlussstromstärke.
2. Wiederhole die Messungen bei einer und zwei abgedeckten Solarzellen.

### Messwerte

	Parallelschaltung von drei Solarzellen		
	(1) alle beleuchtet	(2) eine abgedunkelt	(3) zwei abgedunkelt
$U_L$ (V)	0,47	0,46	0,4
$I_K$ (mA)	22	15	6
$P=U \cdot I$ (mW)	10,3	6,9	2,4
Absinken der Leistung gegenüber Messung 1		33%	76,7%



## 12.3 Das Verhalten der Spannung und Stromstärke bei der Abschattung von Solarzellen in Parallelschaltungen (quantitativ)

### Auswertung

1. Berechne, um wie viel Prozent die Leistung beim Abdecken der Solarzellen gegenüber der Anfangsleistung absinkt!
2. Vergleiche das Ergebnis mit dem Effekt bei Reihenschaltung und erkläre den Unterschied!

### Auswertung

2.

Die Verluste durch die Abschattung bei parallel geschalteten Solarzellen sind geringer als bei einer Reihenschaltung. Die Ursache ist, dass bei einer Abschattung nur eine der Solarzellen keinen Strom mehr erzeugt und auch kaum Energie verbraucht. Aufgrund der Parallelschaltung kann der erzeugte Strom der anderen Solarzellen jedoch ungehindert über das Messgerät fließen.

Theoretisch müsste die Leistung mit jeder zusätzlichen abgeschatteten Solarzelle um  $1/3$  sinken, da die Spannung in einer Parallelschaltung konstant bleibt, aber die Gesamtstromstärke die Summe der Einzelstromstärken ist. Im Versuch ist dies bei 2 abgeschatteten Solarzellen nicht der Fall, da ein Teil der Energie in den abgeschatteten Solarzellen verloren geht.



## 13. Simulation eines Inselsystems mit Solaranlage

### Lernziele

- Die Schüler messen die Spannung eines Inselsystems mit und ohne Kondensator während eines simulierten Tages.
- Die Schüler vergleichen und beschreiben den Verlauf der beiden Spannungsmessreihen.
- Die Schüler erklären den Verlauf der beiden Spannungsmessreihen während des Experiments.
- Die Schüler argumentieren anhand ihrer Messergebnisse, dass sich der Motor am nächsten Tag noch drehen wird und der Kondensator schneller wieder voll geladen sein wird. Sie begründen ebenfalls, dass sich der Spannungsverlauf in den folgenden Tagen nicht mehr verändern wird.
- Die Schüler erläutern die Vorteile eines Energiespeichers in Inselsystemen und benennen Vor- und Nachteile für die Verwendung eines Kondensators.

### Vorwissen

- Die Schüler kennen die physikalischen Vorgänge beim Auf- und Entladen eines Kondensators.
- Die Schüler wissen wie sich ein Kondensator verhält, wenn er mit einer Spannungsquelle verbunden ist, die größere bzw. kleinere Spannungen als der Kondensator besitzt.
- Die Schüler wissen, dass eine Kondensator nur wenig Energie aufnehmen kann.
- Die Schüler wissen, dass ein Kondensator schnell Energie aufnehmen kann.

### Vorversuche

- Die U-I-Kennlinie einer Solarzelle

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Für den Versuch wird zusätzlich eine Stoppuhr benötigt.

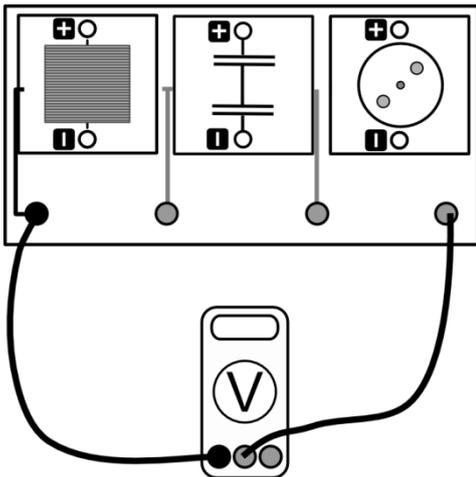


## 8. Simulation eines Inselsystems mit Solaranlage

### Aufgabe

Untersuche das Verhalten der einzelnen Komponenten in einem Inselsystem während eines simulierten Tages.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 1 große Solarzelle
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Kondensatormodul
- 1 Motormodul
- 1 Beleuchtungsmodul
- Kabel

Zusätzlich werden benötigt:

- Stoppuhr

### Vorbemerkung

Während des Experiments wird ein Tag in einem autarken System simuliert, wie sie in abgelegenen Regionen vorkommen. Die Solarzelle, der Kondensator und der Motor simulieren eine einfache Solarkraftanlage, einen Energiespeicher und einen Verbraucher. Im Experiment entsprechen 10s einer Stunde in der Realität. Die Veränderung der Bestrahlungsstärke durch die Sonne wird über die Spannung am Beleuchtungsmodul geregelt. Dabei steht die Beleuchtung bei 3V für den Stand zwischen 2:30 bis 3:30 Uhr, bei 4V für 3:30 bis 4:30 Uhr,... bei 12V für 11:30 bis 12:30 Uhr, bei 11V für 12:30 bis 13:30 Uhr, ... bei 3V für 20:30 bis 21:30 Uhr. Die Simulation beginnt um 3:00 Uhr und endet um 21:00 Uhr.

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf ohne Kondensator auf. Miss die Spannung am Motormodul für alle Beleuchtungsstärken bei einer Spannung zwischen 3V und 12V. Trage die Spannungen in die Messwerttabelle zu den gegebenen Uhrzeiten ein.
2. Schließe den Kondensator für einen kurzen Moment kurz, um ihn vollständig zu entladen. Füge ihn anschließend dem Aufbau hinzu. Simuliere einen Tag und miss die Spannung alle 10 Sekunden. Vergiss nicht die Spannung nach 5s, 15s, 25s,... zu verändern. Schalte das PowerModul nach 180s ab und miss die Zeit wie lange sich der Motor noch dreht. Notiere dir die Zeit und bei welcher Spannung sich der Motor aufhört, zu drehen.



## 8. Simulation eines Inselsystems mit Solaranlage

### Messwerte

$t_{\text{experiment}}$ in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Uhrzeit	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
U in V	0,03	0,1	0,21	0,47	0,5	0,52	0,53	0,54	0,55
$U_{\text{Kondensator}}$ in V	0	0,01	0,03	0,06	0,13	0,21	0,33	0,5	0,54

$t_{\text{experiment}}$ in s	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Uhrzeit	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
U in V	0,55	0,55	0,54	0,53	0,52	0,5	0,47	0,21	0,1	0,03
$U_{\text{Kondensator}}$ in V	0,55	0,55	0,54	0,54	0,52	0,5	0,47	0,45	0,43	0,4

$t = 89\text{s}$

$U = 0,18\text{V}$

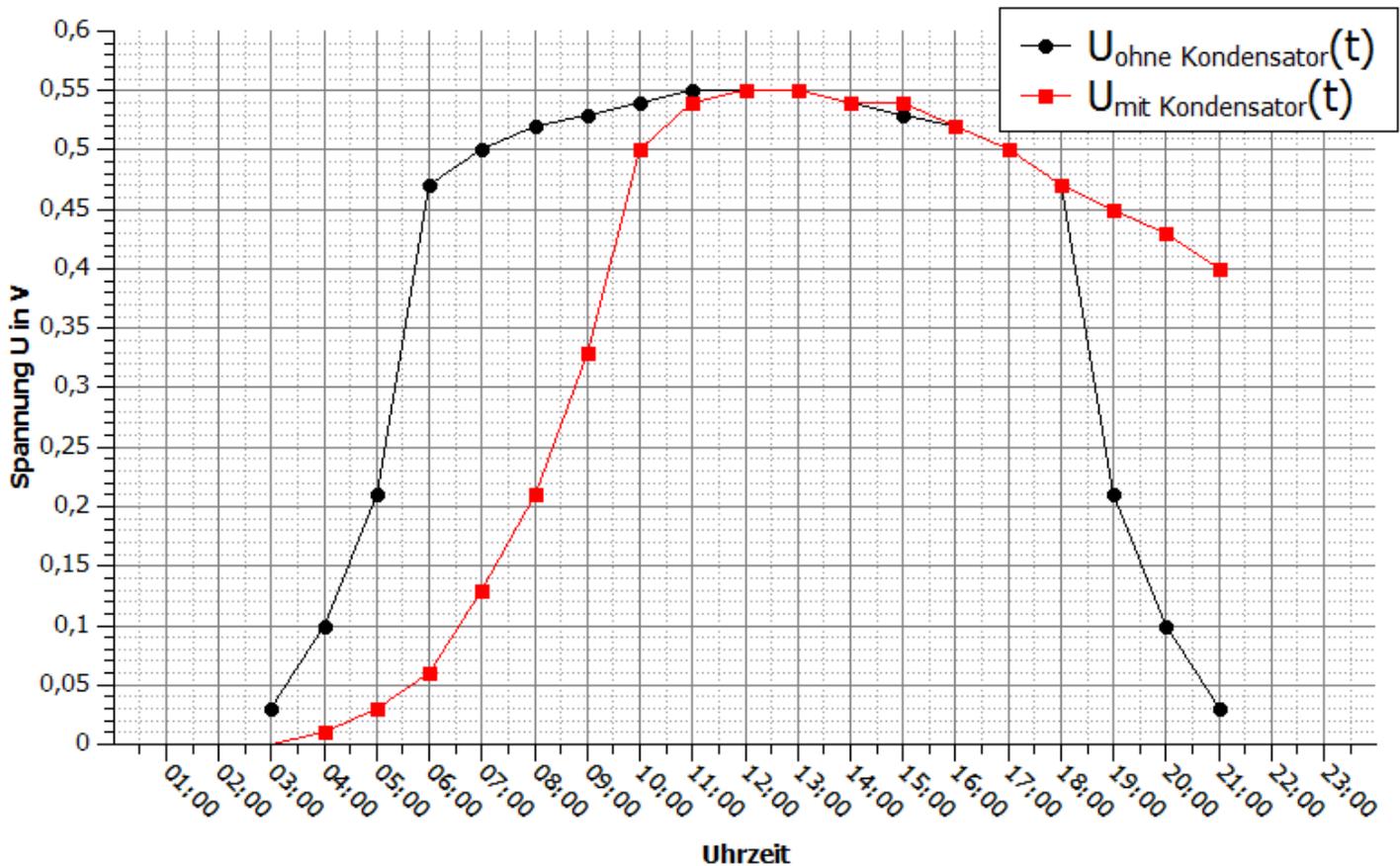
### Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das Diagramm ein.
2. Vergleiche den Verlauf der beiden Messpunktreihen.
3. Erkläre den unterschiedlichen Verlauf.
4. Erläutere, ob der Motor um 3Uhr am Morgen des nächsten Tages sich noch drehen würde. Inwieweit würde sich der Kurvenverlauf für die folgenden Tage ändern.
5. Erläutere den Nutzen eines Energiespeichers in autarken Stromnetzen. Inwieweit ist ein Kondensator geeignet.



## 8. Simulation eines Inselsystems mit Solaranlage

### Auswertung



2.

Bei der Verwendung des Solarmoduls ohne Kondensator steigt zunächst die Spannung, bis sie zwischen 11:00 und 13:00 ihren maximalen Wert von 0,55V erreicht. Von da an sinkt sie wieder. Die Kurve mit Kondensator steigt wesentlich langsamer, erreicht aber auch gegen 12:00 das Maximum von 0,55V. Bis 18:00 fallen die beiden Kurven gleich schnell. Anschließend geht die Spannung ohne Kondensator deutlich schneller zurück als mit dem Energiespeicher.

3.

Mit Kondensator steigt die Spannung deutlich langsamer an, da einige Elektronen der Solarzelle in den Kondensator fließen und diesen zunächst aufladen. Durch den zusätzlichen Widerstand wird der Gesamtwiderstand kleiner und die Spannung, an der die Solarzelle arbeitet, ist kleiner als ohne Kondensator. In der Zeit zwischen 12:00 und 18:00 gibt der Kondensator etwas Energie ab, wenn die Spannung der Solarzelle sinkt. Er kann jedoch nicht unterhalb der Solarzellenspannung fallen. Ab 18:00 versorgt nur noch der Kondensator den Motor, da die Spannung der Solarzelle deutlich darunter liegt. Sie kann jedoch nicht so schnell sinken, da der hohe Widerstand des Motors ein schnelleres Abfließen der Elektronen verhindert.



## 8. Simulation eines Inselsystems mit Solaranlage

4.

Der Motor würde sich um 3 Uhr noch drehen, da er sich nach 60s noch dreht. Die Kurve würde bis ca. 5Uhr noch oberhalb der Spannungskurve ohne Kondensator liegen, da die Spannung oberhalb von 0,18V liegt. Zwischen 5:00 und 6:00 schneiden sich die Kurven. Da die Spannung des Kondensators jedoch höher als am Vortag ist, werden sich die Kurven früher als 12Uhr wieder schneiden. Anschließend werden die Kurven wieder bis 18Uhr nahe beieinander liegen. In den folgenden Tagen wird sich dieser Kurvenverlauf bei gleichen Bedingungen nicht mehr verändern.

5.

Aufgrund von Energiespeichern ist es in Inselsystemen auch in der Zeit, wo regenerative Energiequellen keine Energie bereitstellen möglich, Geräte zu benutzen. Diese Zeiten sind beispielsweise nachts oder bei Windstille, wenn Windkraftanlagen genutzt werden. Kondensatoren eignen sich gut, um schnell große Mengen von Energie zu speichern oder abzugeben. Allerdings haben sie keine besonders große Kapazität und die abgegebene Spannung ist nicht konstant, was den Betrieb von Geräten ohne weitere Komponenten in der Praxis nicht möglich macht.



## 14. Anwendungsexperimente

### Lernziele

Die Wirkungsgradbestimmung mehrerer Energieumwandlungen

- Die Schüler messen die Stromstärke und Spannung des Netzteils und der Solarzelle, die Dauer des Experiments und die Weglänge eines Gewichtsstücks.
- Die Schüler berechnen aus den gemessenen Größen die Leistung einzelner Vorgänge.
- Die Schüler berechnen den Gesamtwirkungsgrad und den Wirkungsgrad des Motors.

Drehrichtung eines Motors

- Die Schüler beschreiben, dass die Polung am Motor unterschiedliche Drehrichtungen verursacht.
- Die Schüler beschreiben, dass der Motor sich ohne Stromversorgung nicht dreht.
- Die Schüler erklären mit Hilfe der Induktion, wie die unterschiedlichen Drehrichtungen zu stande kommen.

Anlauf- und Betriebsstrom eines Motors

- Die Schüler beschreiben, dass der Anlaufstrom größer ist als der Betriebsstrom.
- Die Schüler erklären dieses Phänomen über die Haftreibung und Gleitreibung am Motor.

### Vorwissen

- Die Schüler können die elektrische Leistung und die Hubleistung berechnen.
- Die Schüler können den Wirkungsgrad berechnen.
- Die Schüler kennen die induktiven Vorgänge in einem Motor.
- Die Schüler wissen, dass die Haftreibung größer als die Gleitreibung ist.

### Experimentier- und Nachbereitungshinweise

- Bei der Bestimmung der Stromstärke des Netzteils sollte darauf geachtet werden, dass der Messbereich für 10A gewählt wird.
- Die Versuche dienen zum Üben verschiedener Kompetenzen der Schüler und zur Behandlung anderer physikalischer Themengebiete.

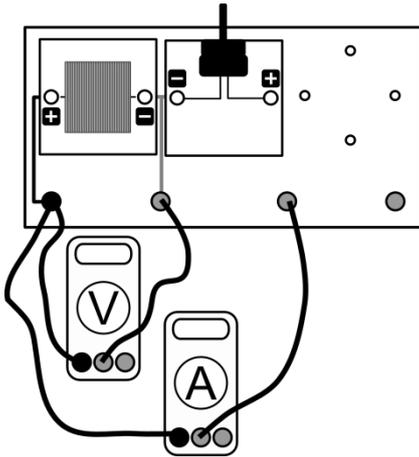


## 14.1 Die Wirkungsgradbestimmung mehrere Energieumwandlungen

### Aufgabe

Ermittle den Wirkungsgrad der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie!

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- leXsolar-Beleuchtungsmodul
- Getriebemotormodul
- 1 großes Solarmodul 1,5V
- 1 PowerModul (12V)
- 1 Massestück 20g
- 1 Strommessgerät
- 1 Spannungsmessgerät
- Stoppuhr, Lineal
- Kabel
- Faden

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Skizze auf, und stelle die leXsolar-Grundeinheit so an eine Tischkante, dass das Massestück an etwa 45cm Faden frei hängt! Lege das Beleuchtungsmodul bei einer Spannung von 12V auf das Solarmodul.
2. Schalte das PowerModul ein und miss die Zeit, die der Motor zum Aufwickeln einer markierten Länge Faden benötigt. Miss gleichzeitig dazu Stromstärke und Spannung an der Solarzelle.
3. Verändere die Schaltung so, dass Strom und Spannung am PowerModul gemessen werden! Wähle am Stromstärkemessgerät den Messbereich für 10A aus. Wiederhole nun den Versuch. Erfasse alle Messwerte in einer Tabelle.

### Auswertung

Berechne die Gesamtwirkungsgrade der Energieumwandlungen:

- a) elektrische Energie Solarzelle > potentielle Energie Gewicht
- b) elektrische Energie Stromversorgungsgerät > Strahlungsenergie Glühlampen > elektrische Energie Solarzelle > potentielle Energie Gewicht



## 14.1 Die Wirkungsgradbestimmung mehrere Energieumwandlungen

### Messwerte

- mit Leistungsbestimmung am Motor

$h$ (cm)	Höhe, um die das Gewicht gehoben wurde	43,5
$t$ (s)	Zeit für Heben um $h$	34
$U$ (V)	Spannung an Solarzelle	1,45
$I$ (mA)	Stromstärke im Stromkreis der Solarzelle	19

- mit Leistungsmessung an den Glühlampen

$h$ (cm)	Höhe, um die das Gewicht gehoben wurde	43,5
$t$ (s)	Zeit für Heben um $h$	34
$U$ (V)	Spannung über dem Beleuchtungsmodul	12,1
$I$ (mA)	Stromstärke im Stromkreis des Beleuchtungsmoduls	390

### Auswertung

Berechnungen:

Leistung Stromversorgungsgerät	Leistung Solarzelle	Hubleistung am Gewicht
$P_{netz} = U_{netz} \cdot I_{netz}$ $P_{netz} = 12,1V \cdot 390mA$ $P_{netz} \approx 4,7W$	$P_{solar} = U_{solar} \cdot I_{solar}$ $P_{solar} = 1,45V \cdot 19mA$ $P_{solar} \approx 27,6W$	$P_{Hub} = \frac{W_{Hub}}{t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{t}$ $P_{Hub} = \frac{0,02kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,435m}{34s}$ $P_{Hub} = 2,5mW$
Wirkungsgrad Leistung der Solarzelle in Hubleistung	Wirkungsgrad elektrische Leistung der Stromversorgungsgeräts in Hubleistung	
$\eta_a = \frac{P_{Hub}}{P_{solar}}$ $\eta_a = \frac{2,5mW}{27,6mW}$ $\eta_a = 9\%$	$\eta_b = \frac{P_{Hub}}{P_{netz}}$ $\eta_b = \frac{2,5mW}{4700W}$ $\eta_b = 0,05\%$	

Ergebnis: Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung elektrische Energie Solarzelle > potentielle Energie Gewicht beträgt 9%.

Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung elektrische Energie Stromversorgungsgerät > Strahlungsenergie > elektrische Energie Solarzelle > potentielle Energie Gewicht beträgt 0,05%.

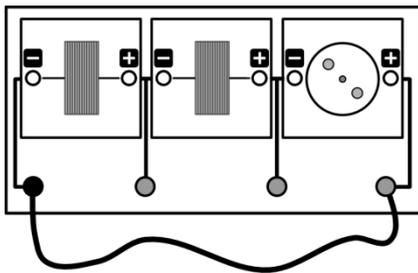


## 14.2 Drehrichtung und Geschwindigkeit eines Motors

### Aufgabe

Untersuche die Drehrichtung und Geschwindigkeit des Motors.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 2 kleine Solarzellen
- 1 Motormodul
- 1 Messleitung

### Durchführung

1. Baue eine Reihenschaltung aus den zwei Solarzellen und dem Motor auf.
2. Halte den Aufbau in eine Lichtquelle bis sich der Motor dreht. Notiere die Drehrichtung des Motors und beobachte die Bewegung der Drehscheibe.
3. Pole die Anschlüsse am Motor um, indem du das Modul um 180° auf der Grundeinheit drehst. Notiere ebenfalls die Drehrichtung.
4. Nimm die Messleitung heraus und beobachte die Bewegung weiterhin.

### Auswertung

Drehrichtung beim ersten Aufbau:

im Uhrzeigersinn

entgegen dem Uhrzeigersinn

Drehrichtung nach Umpolung:

im Uhrzeigersinn

entgegen dem Uhrzeigersinn

1. Beschreibe die Bewegung der Drehscheibe vor und nach dem Herausnehmen der Messleitung.

Zunächst führt die Drehscheibe eine beschleunigte Bewegung aus. Ab einem bestimmten Zeitpunkt ist die Winkelgeschwindigkeit konstant.

Sobald die Messleitung herausgenommen wird, ist der Stromkreis nicht geschlossen und die Drehbewegung wird durch die Reibung bis zum Stillstand abgebremst.

2. Erkläre das Verhalten der Drehrichtung bei unterschiedlichen Polungen.

Aufgrund der umgekehrten Polung fließt der Strom in der anderen Richtung durch den Motor. Hierdurch wird ein entgegengesetztes Magnetfeld erzeugt, dass den magnetischen Rotor in die entgegengesetzte Richtung bewegt.

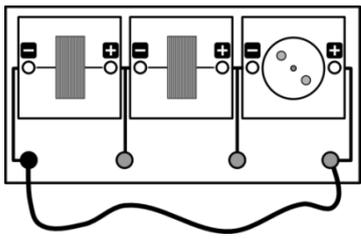


## 14.3 Anlaufstrom und Betriebsstrom eines Motors

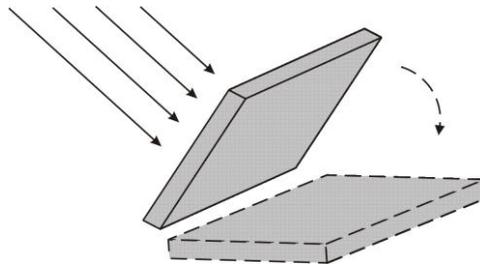
### Aufgabe

Untersuche das Anlaufverhalten des Motors.

### Aufbau



Schritt 1



Schritt 2

### Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- 2 kleine Solarzellen
- Motor
- 1 Messleitung

### Durchführung:

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Halte den Aufbau in die Lichtquelle und warte bis sich der Motor dreht.
3. Kippe den Aufbau wie in Schritt 2 angedeutet langsam von der Lichtquelle weg bis er sich nicht mehr dreht.
4. Kippe die Grundeinheit nun wieder zur Lichtquelle hin, bis sich der Motor wieder bewegt.

### Auswertung

1. Beschreibe die Bewegung des Motors während des Experiments.

Die Drehbewegung verlangsamt sich immer weiter, bis der Motor sich aufhört zu drehen. Wird der Aufbau nun wieder zur Lichtquelle gekippt, fängt der Motor sich nicht sofort wieder an zu drehen. Erst ab einem deutlich kleineren Einfallswinkel als der an dem der Motor sich nicht mehr drehte, fängt der Motor sich wieder an zu drehen

2. Erkläre dieses Verhalten.

Aufgrund der Haftreibung muss zum Starten der Bewegung eine deutlich größere Kraft aufgewendet werden, als aufgrund während der Bewegung (geringere Reibung). Somit wird zum Starten der Bewegung eine deutlich größere Leistung der Solarzellen benötigt, die durch die größere Beleuchtungsstärke erzeugt wird.



A series of horizontal dotted lines spanning the width of the page, providing a template for handwritten notes.



A series of horizontal dotted lines spanning the width of the page, providing a template for taking notes.

leXsolar GmbH  
Strehleener Straße 12-14  
01069 Dresden / Germany

Telefon: +49 (0) 351 - 47 96 56 0  
Fax: +49 (0) 351 - 47 96 56 - 111  
E-Mail: [info@lexsolar.de](mailto:info@lexsolar.de)  
Web: [www.lexsolar.de](http://www.lexsolar.de)