

C. ERNEUERBARE ENERGIEN

C2. Experimente mit Solarmodulen

Autor

Andreas Degenhard – Ursulaschule, Osnabrück

Experimente mit Solarmodulen

Einleitung

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Experimente sind als Schülerversuche im Fach Physik/Technik konzipiert und sollen die Betrachtungen zur Energie in dieser Zusammenstellung von Unterrichtsmaterialien auf experimenteller Ebene ergänzen. Alternativ können die Experimente auch als Leitfaden für eine eigenständige Unterrichtsreihe zu Solarmodulen und damit als vertiefende oder angewandte Betrachtungen zu Halbleitern eingesetzt werden. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich dabei auf einige ausgewählte und grundlegende Experimente, die schließlich auf Leistungs- und Energiebetrachtungen bei Solarmodulen hinführen.

Um eine hohe Schüleraktivität und Motivation für das eigenständige Entdecken und Erforschen technischer Zusammenhänge zu fördern, sind die Schülerversuche so angelegt, dass diese mit einfachen Materialien und grundlegenden Kenntnissen im Bereich elektrischer Messprozesse durchgeführt werden können. Auch soll die Lehrkraft hinsichtlich Durchführung und Vorbereitung der Experimente weitestgehend entlastet werden, so dass möglichst viel Freiraum für interessante Fragestellungen und vertiefende Diskussionen besteht. Zudem wurde bei der Planung dieser Schülerversuche bedacht, die gegebenenfalls entstehenden Kosten für zusätzlich zur vorhandenen Grundausstattung benötigte Materialien gering zu halten. Die hier nachfolgend ebenfalls dokumentierten Versuchsergebnisse sollen somit zeigen, dass solche grundlegenden Experimente in einem kostengünstig gewählten Rahmen durchführbar sind.

Die nachfolgenden Beschreibungen enthalten Hinweise zur Durchführung der Experimente, wobei auch die Versuchsaufbauten und die Versuchsergebnisse dokumentiert sind. Die Reihenfolge der nachfolgenden Abschnitte entspricht dabei einer möglichen Abfolge im Unterricht. Beginnend mit dem Aufbau eines Solarmoduls soll dieses zunächst als Strom- bzw. Spannungsquelle verstanden werden. Nach einer Reihe von Versuchen sollen die Leistungsmessung und sich daraus ergebende Fragestellungen im Fokus der Betrachtungen stehen. Das den Schülerinnen und Schülern zur Verfügung gestellte Material beschränkt sich daher möglicherweise auf das als Kopiervorlage beigefügte Arbeitsblatt, welches die hier beschriebenen Versuche als Arbeitsaufträge mit gegebenenfalls weiterführenden Fragestellungen enthält.

Materialien

Für die Schülerversuche werden überwiegend Materialien verwendet, die an Schulen in der Regel Teil einer Standard-Ausstattung sind. Hierzu zählen Kabel und Messgeräte für elektrischen Strom und Spannung, wobei digitale Ausführungen dieser Messgeräte bei den hier beschriebenen Versuchen sicherlich vorteilhaft, aber nicht zwingend erforderlich sind.

Darüber hinaus werden möglicherweise zusätzliche Materialien benötigt. Diese lassen sich in vier Gruppen unterteilen:

1. Wenn Versuche in der Photovoltaik unabhängig von einer ausreichenden Sonneneinstrahlung durchgeführt werden sollen, bietet sich die Anschaffung einer geeigneten künstlichen Lichtquelle an. Oftmals ist diese jedoch bereits aufgrund anderer Schülerversuche vorhanden. Geeignet sind Halogenlampen oder insbesondere LED-Strahler, wobei bereits eine geringe Leistung zur Durchführung der Versuche ausreicht. In den nachfolgend beschriebenen Versuchsdurchführungen wurde ein LED-Strahler mit einer Leistung von lediglich zehn Watt eingesetzt, was sich als völlig ausreichend in Bezug auf die Versuchsergebnisse erwiesen hat. Ein solcher LED-Strahler hat zudem den Vorteil einer geringen Wärmeentwicklung.

2. Mittlerweile werden günstige Solarmodule zum Experimentieren angeboten. Oftmals geben Hersteller konkret an, dass diese besonders für Solarexperimente geeignet sind und empfehlen diese Produkte bereits ab einem Alter von zwölf Jahren. Manche Solarmodule sind dabei bereits mit Schraubkontakten versehen, so dass Kabelverbindungen auf einfache Weise erfolgen können. Für die hier beschriebenen Experimente wurden Solarmodule verschiedener Hersteller mit überwiegend ähnlichen Ergebnissen getestet.
3. Darüber hinaus sind möglicherweise noch einige wenige Bauteile erforderlich, falls diese nicht vorhandenen Beständen entnommen werden können. Hierzu gehören einfache (zu schraubende) Bananenstecker und Kabel (Doppellitze) gegebenenfalls in den Farben rot und schwarz (Standard). Bei den Kabeln ist auf einen ausreichenden Querschnitt zu achten oder darauf, dass die Litze aus stabilem Draht besteht, da die Kabel an den Schraubverbindungen oftmals abreißen. Darüber hinaus sollten Krokodilklemmen mit Steckverbindung und rote und grüne Leuchtdioden vorhanden sein. Die Abbildung C2.01 zeigt einige bisher beschriebene Bauelemente sowie die Schraubkontakte der hier verwendeten Solarmodule.

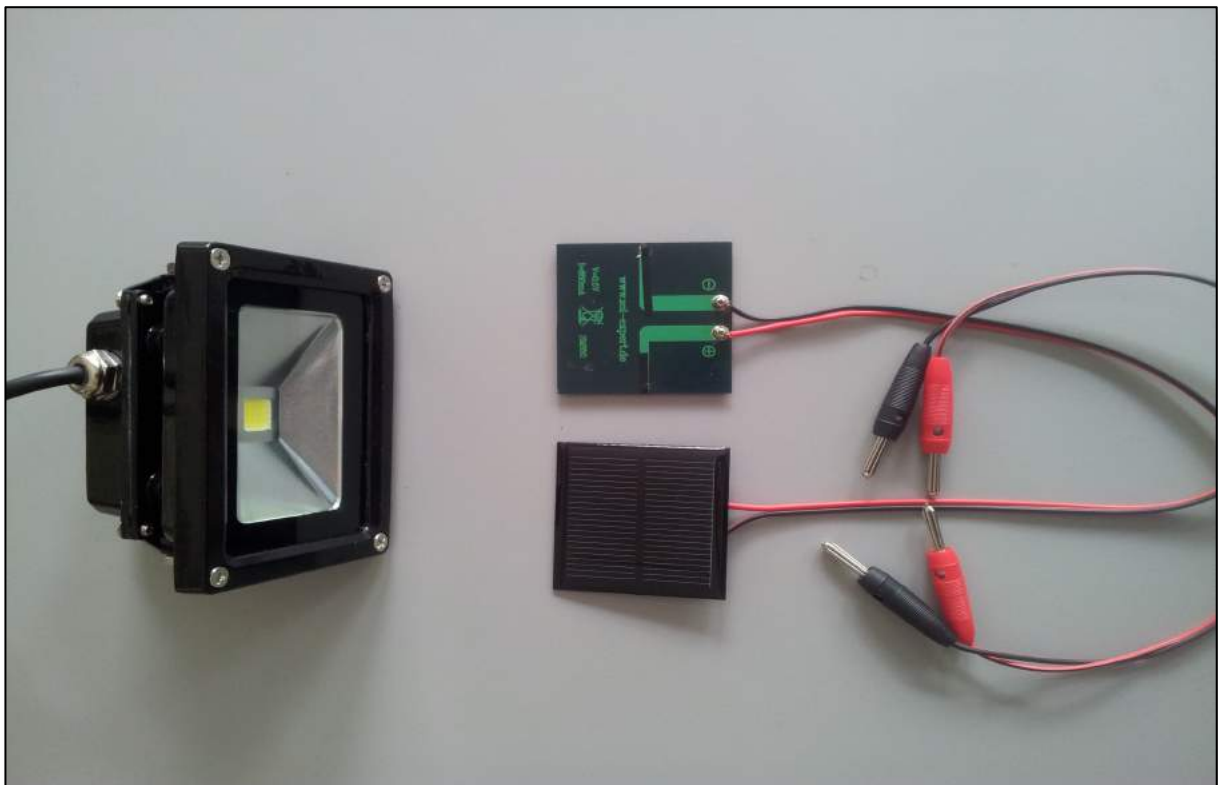


Abbildung C2.01 Die Abbildung zeigt einige hier beschriebene grundlegende Materialien.

4. Um die Leistungsabgabe an einen Verbraucher zu messen, werden Widerstände benötigt. Die Größe der Widerstände richtet sich nach dem verwendeten Solarmodul. Für die nachfolgend verwendeten Solarmodule sind Widerstände der Größenordnung 1 Ohm, 10 Ohm und 100 Ohm ausreichend, wobei deutlich mehr 1 Ohm Widerstände benötigt werden. Diese können dann bequem über Lüsterklemmen miteinander verschaltet werden, um entsprechende Gesamtwidestände zu erreichen (siehe Abbildung C2.02).

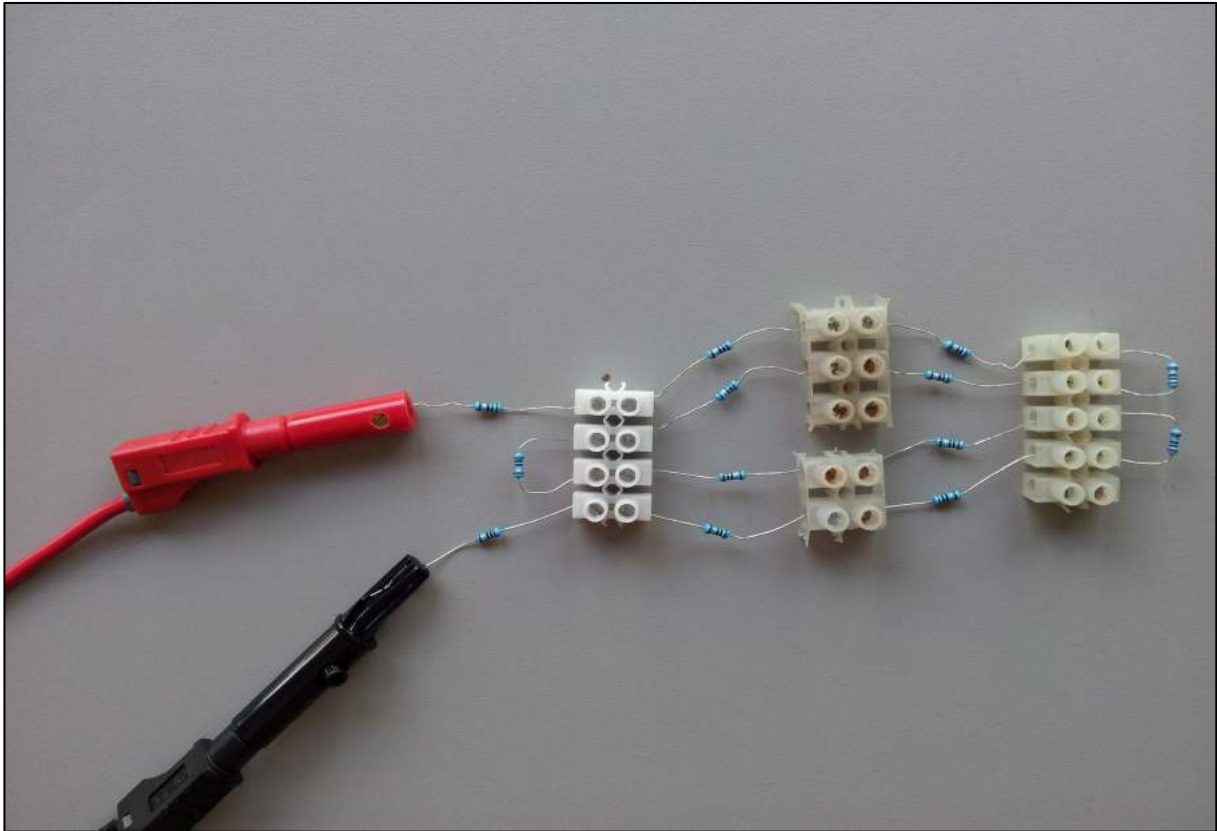


Abbildung C2.02 Die Abbildung zeigt die Verschaltung von Widerständen mit Hilfe von Lüsterklemmen, um unterschiedliche Werte von Gesamtwiderständen abgreifen zu können.

Alternativ kann ein regelbarer Widerstand (Potentiometer) verwendet werden, wobei dann die einstellbaren Widerstandswerte eventuell fest vorgegeben sind. Dadurch wird jedoch das eigenständige Experimentieren durch Vorgabe einer Messreihe eingeschränkt. Zudem ist es nicht immer möglich, die Widerstandswerte den unterschiedlichen Kenngrößen verschiedener Module anzupassen.

Vor dem erstmaligen Benutzen der Solarmodule können diese einmalig von den Schülerinnen und Schülern selbstständig verkabelt und mit den hier beschriebenen Steckern versehen werden. Bei späteren Versuchsreihen müssen die Anschlüsse gegebenenfalls noch einmal überprüft werden. Elektronische Bauteile wie die benötigten Widerstände, Stecker oder Leuchtdioden können in größeren Mengen kostengünstiger bezogen werden. Auch die hier verwendeten Solarmodule wurden in größeren Mengen günstiger angeboten.

Kenngößen

Solarmodule lassen sich über ihre **Leerlaufspannung** und den **Kurzschlussstrom** charakterisieren, die als Kenngößen bezeichnet werden (Mertens 2015). Bei den nachfolgend beschriebenen Versuchen wurden Solarmodule mit einer Leerlaufspannung von ca. 0,5 V und einem Kurzschlussstrom von ca. 850 mA verwendet. Beide Größen werden gemessen, indem das Voltmeter oder das Amperemeter direkt mit den Polen des Solarmoduls verbunden wird.

Die in Schülerübungen gemessenen Werte weichen jedoch zumeist von den Angaben ab. Ein Grund hierfür besteht darin, dass sich die Angaben auf ideale Bedingungen beziehen (Mertens 2015). Insbesondere ist die Beleuchtungsstärke oder die Strahlungsintensität entscheidend. Diese kann beispielsweise durch einen entsprechenden Neigungswinkel variiert werden, wie dies zum Beispiel auf einer optischen Bank oder mit Hilfe eines Stativs, wie in der Abbildung C2.03 gezeigt, zumindest qualitativ realisiert werden kann.

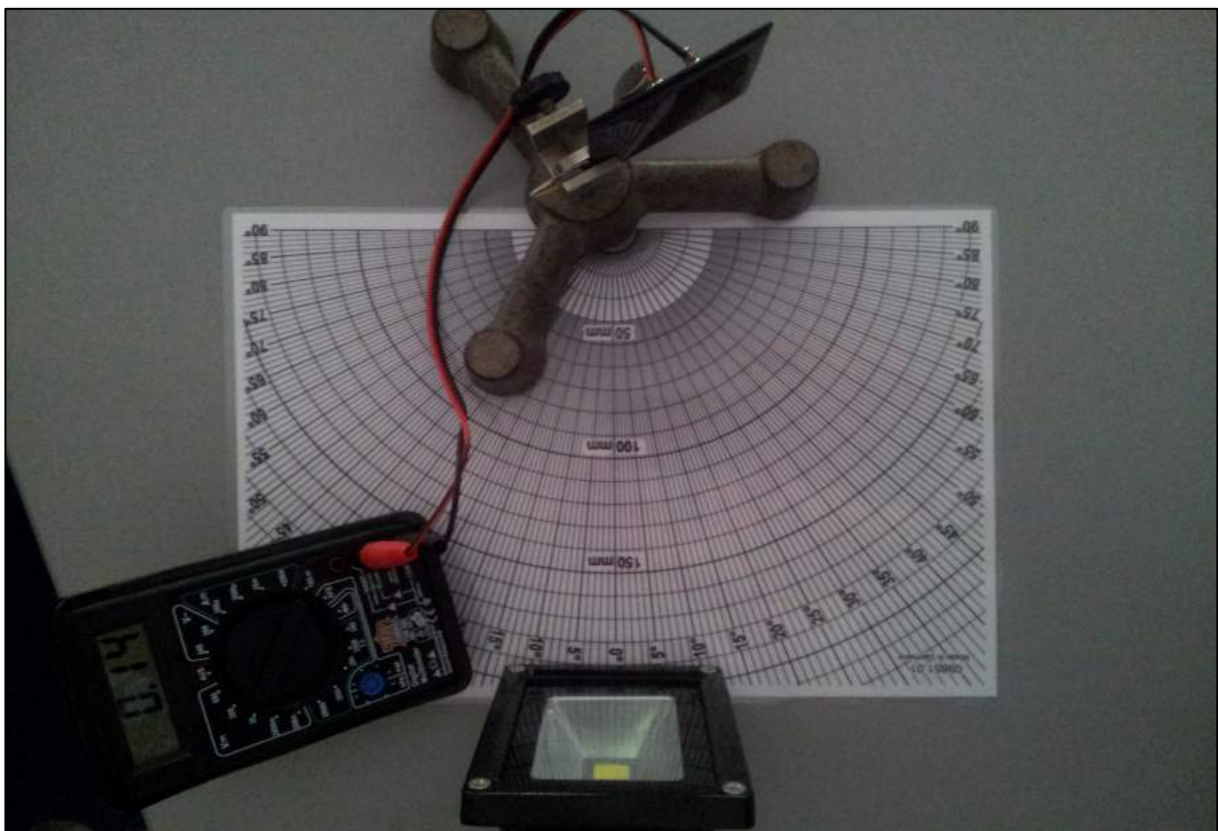


Abbildung C2.03 Die Abbildung zeigt einen Versuchsaufbau zur Messung des Drehwinkels ohne Benutzung einer optischen Bank.

In der Abbildung C2.04 sind bei einer geringen Lichteinstrahlung deutlich größere Änderungen der Spannung erkennbar, so dass eine nicht lineare Abhängigkeit vermutet werden kann. Hingegen deutet der Verlauf beim Kurzschlussstrom in Abbildung C2.04 eher auf eine, zumindest teilweise lineare, Abhängigkeit hin.

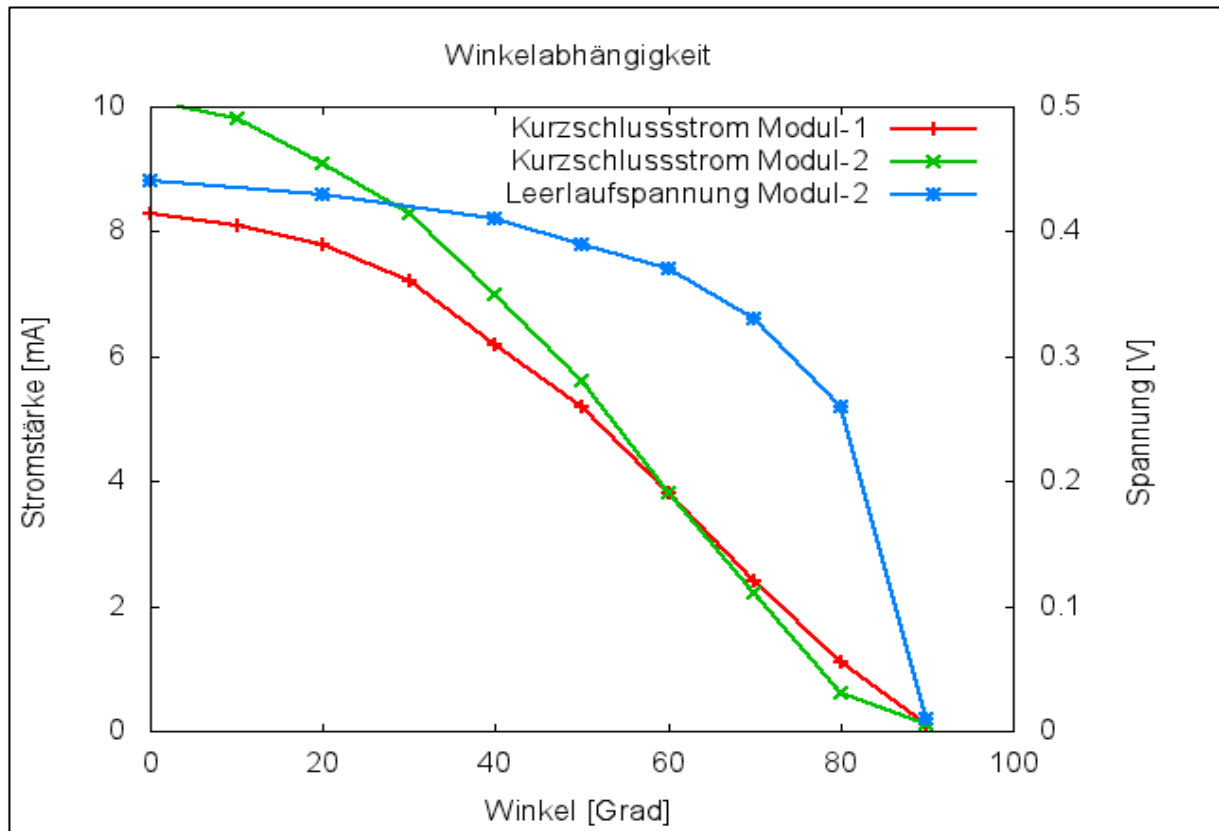


Abbildung C2.04 In der Abbildung sind die gemessenen Kurzschlussströme und Leerlaufspannungen für unterschiedliche Module winkelabhängig dargestellt.

Hinweis

Sowohl die Leerlaufspannung als auch der Kurzschlussstrom sind temperaturabhängig, so dass sich diese während der Messung verändern können.

Eine weitere wichtige Kenngröße ist der Wirkungsgrad η eines Solarmoduls. Da dieser als Quotient aus der maximal abgegebenen elektrischen Leistung P_{aus} dividiert durch die Leistung des einfallenden Sonnenlichts P_{ein} definiert ist, ist die Bestimmung im Schülerexperiment in der Regel schwierig, da die Energie (oder die Bestrahlungsstärke) des einfallenden Sonnenlichts gemessen werden müsste (TU Bergakademie Freiberg o.J).

Um dennoch einen Bezug zu dieser Kenngröße in den Unterricht zu integrieren, können die bislang ermittelten Messdaten wie folgt ausgewertet werden:

Sowohl der bereits definierte Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_{\text{aus}}}{P_{\text{ein}}}$, als auch die Strahlungsintensität $D = \frac{P_{\text{ein}}}{A_{\perp}}$

sind offensichtlich konstant, wobei sich D hier auf die senkrecht zur Strahlungs-Richtung stehende Fläche A_{\perp} bezieht.

Wird die Normale der Fläche A des Solarmoduls entsprechend der oben beschriebenen Anordnung um einen Winkel α gegen die Strahlungsrichtung gedreht, so können sich die Schülerinnen und Schüler leicht den dabei zugrunde liegenden Zusammenhang $A_{\perp} = A \cdot \cos(\alpha)$ erschließen. Durch Umformen und Einsetzen dieser drei hier angegebenen Beziehungen ergibt sich dann entsprechend

$$P_{\text{aus}} = \eta \cdot D \cdot A \cdot \cos(\alpha) \propto \cos(\alpha)$$

Dieser Zusammenhang kann nun durch die oben bereits erhaltenen Daten überprüft werden, indem zur Bestimmung von P_{aus} das Produkt der entsprechenden Werte für die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom gebildet wird, was in der Abbildung C2.05 dargestellt ist.

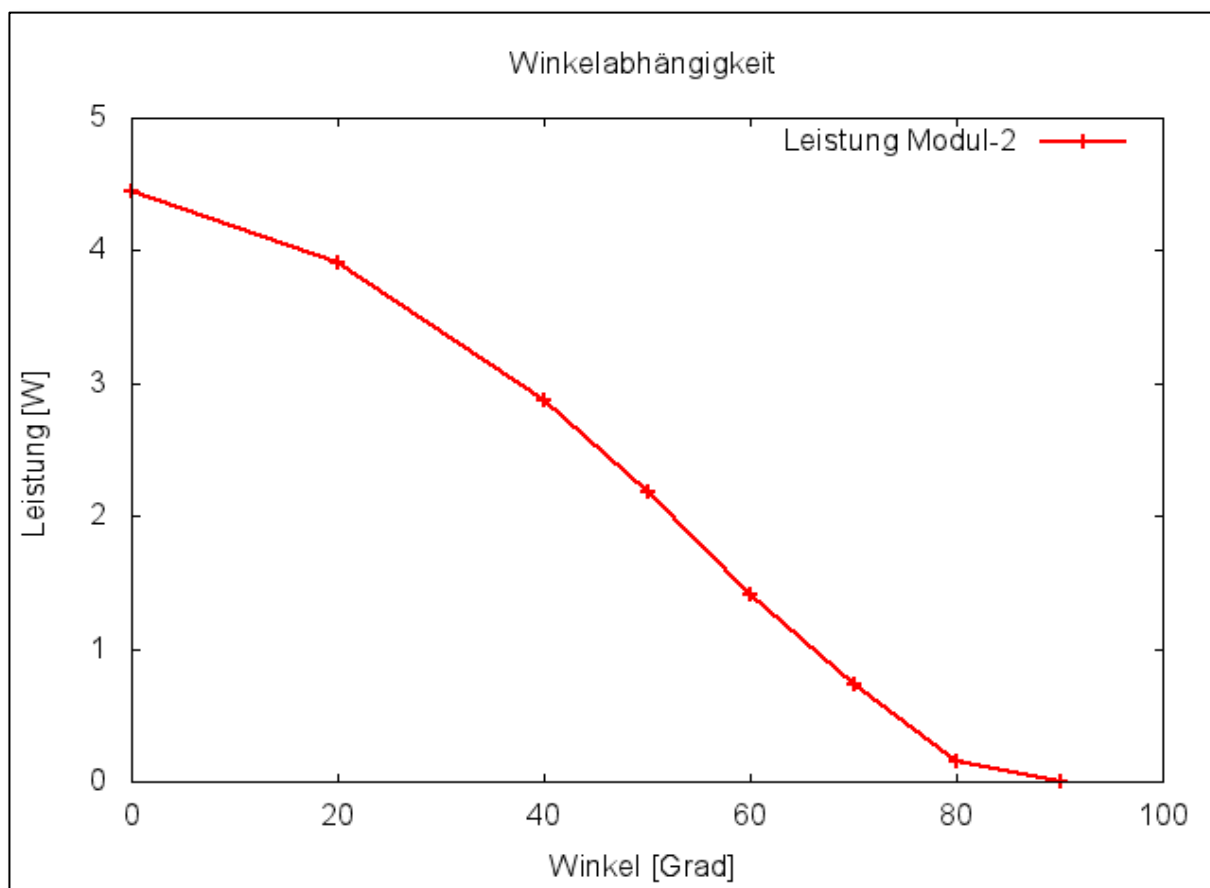


Abbildung C2.05 In der Abbildung ist die gemessene Leistung in Abhängigkeit vom Winkel dargestellt. Der mögliche Verlauf des Graphen einer Cosinus-Funktion ist hier durch geradliniges Verbinden der Messpunkte erkennbar.

Hinweis

Das Produkt aus den entsprechenden Werten von Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung zur Berechnung von P_{aus} entspricht nicht exakt der maximal möglichen Leistung für den betrachteten Winkel. Es ergeben sich hier aber zunächst sinnvolle Näherungswerte. Dies wird in einem nachfolgenden Kapitel zur Leistungsmessung deutlich.

Schaltungen von Solarmodulen

Solarmodule lassen sich, wie auch andere Bauteile, in Reihe und auch parallel schalten (Stempel 2010). An dieser Stelle bietet sich der Vergleich mit herkömmlichen Batterien an, die wie Solarzellen Gleichspannungsquellen darstellen. Ein Unterschied besteht allerdings darin, dass für die Batterie als endlichem Energiespeicher kein Kurzschlussstrom angegeben wird. Demnach addieren sich bei der Reihenschaltung die Leerlaufspannungen, während sich bei der Parallelschaltung die Kurzschlussströme addieren (Stempel 2010). In den Schülerübungen bietet es sich an, diesen Zusammenhang selbstständig zu ermitteln, indem beispielsweise die bisher geringen Messwerte von Strom und Spannung angesprochen werden und eine Zusammenschaltung von Solarmodulen somit sinnvoll erscheint. Um mögliche Hypothesen zu testen, kann dann eine wachsende Anzahl von Modulen verschaltet werden.

Die Abbildungen C2.06 und C2.07 zeigen exemplarisch die Reihen- bzw. die Parallelschaltung von drei Solarmodulen, wobei bei der Parallelschaltung die gleichen Pole miteinander verbunden werden.

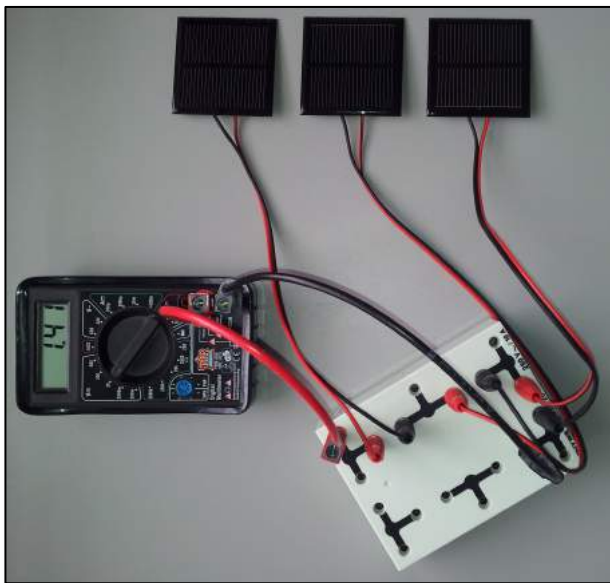


Abbildung C2.06 Die Abbildung zeigt den Versuchsaufbau einer **Reihenschaltung** von drei nahezu baugleichen Solarmodulen.

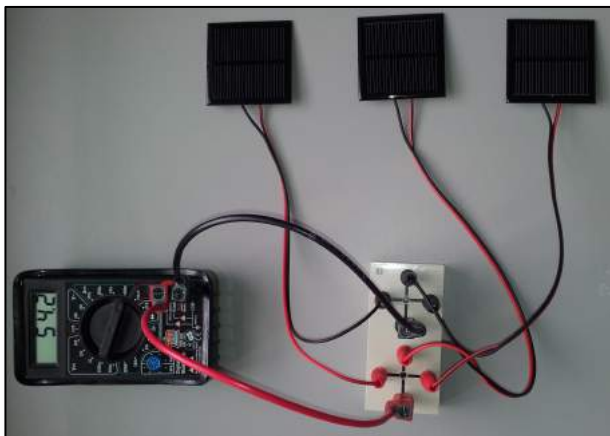


Abbildung C2.07 Die Abbildung zeigt den Versuchsaufbau einer **Parallelschaltung** von drei nahezu baugleichen Solarmodulen.

Eine interessante Anwendung besteht dann beispielsweise darin, jeweils verschiedene Leuchtdioden als Verbraucher in die Schaltung zu integrieren. Dabei kann erkannt werden, dass sowohl eine ausreichende Anzahl an Solarmodulen als auch eine ausreichende Beleuchtungsstärke erforderlich sind, wie die Abbildungen C2.08 und C2.09 sowie die Abbildungen C2.10 und C2.11 dokumentieren, in denen derselbe Versuchsaufbau zugrunde liegt.

Abschließend könnte beispielsweise auch die folgende Erkenntnis formuliert werden:

Um die Nennspannung und Nennleistung eines Verbrauchers (hier der Leuchtdiode) zu erreichen, werden zunächst so viele Solarzellen in Reihe geschaltet, bis die benötigte Spannung erreicht wird. Bis die benötigte Stromstärke erreicht ist, können mehrere solcher Reihen parallel geschaltet werden.

Für Anwendungen auf Dachflächen wird eine unterschiedliche Anzahl von Solarmodulen verschaltet (Stempel 2010). Die Verschaltung von Solarmodulen ist eine Kombination aus Reihen- und Parallelschaltung: Eine Reihenschaltung ist erforderlich, um eine ausreichende Spannung zu erreichen. Hingegen ermöglicht die Parallelschaltung, dass bei einer Verschattung einzelner Solarmodule immer noch Strom fließen kann, wobei sich dann allerdings die Gesamtstromstärke verringert.

Hinweis

An dieser Stelle bietet sich ein Rückgriff auf den Aufbau einer Leuchtdiode an, die ebenfalls ein Halbleiterelement ist und deren Funktionsprinzip dem der Diode angelehnt ist. Insbesondere spiegelt die hier beobachtete Durchlassspannung die entsprechende Energiedifferenz der Bandlücke wieder, welche das Halbleitermaterial charakterisiert und die unterschiedlichen Farben hervorruft.

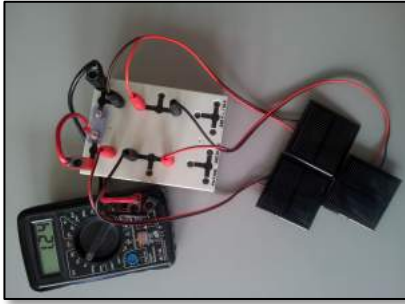


Abbildung C2.08 Die Abbildung zeigt den Spannungsabfall an einer roten Leuchtdiode, der jedoch nicht ausreicht, um die Leuchtdiode zum Leuchten zu bringen.

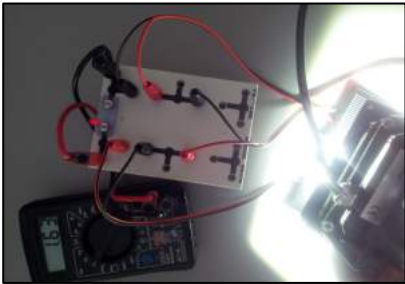


Abbildung C2.09 Die Abbildung zeigt denselben Versuchsaufbau wie in Abbildung C2.08, wobei jedoch die Bestrahlungsstärke mit Hilfe des 10 W-Strahlers erhöht wurde, so dass die Leuchtdiode zu leuchten beginnt.

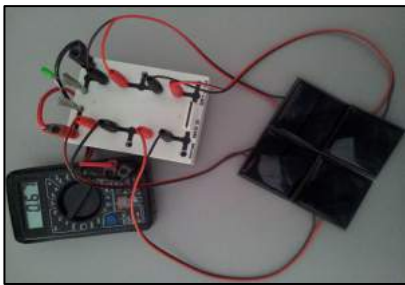


Abbildung C2.10 Die Abbildung zeigt den Spannungsabfall an einer grünen Leuchtdiode, der jedoch nicht ausreicht, um die Leuchtdiode zum Leuchten zu bringen.

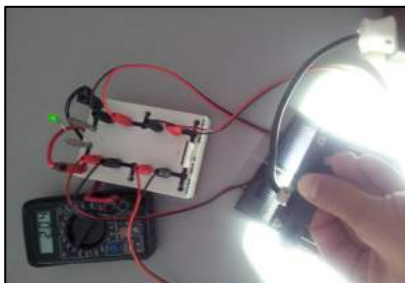


Abbildung C2.11 Die Abbildung zeigt denselben Versuchsaufbau wie in Abbildung C2.10, wobei jedoch die Bestrahlungsstärke mit Hilfe des 10 W-Strahlers erhöht wurde, so dass die Leuchtdiode zu leuchten beginnt.

Leistungsmessung bei Solarmodulen

Die Leerlaufspannung und der Kurzschlussstrom charakterisieren ein Solarmodul ohne angeschlossenen Verbraucher. Darüber hinaus ist es aber entscheidend zu wissen, wie effizient ein Solarmodul arbeitet, d.h. wie viel Energie letztendlich gewonnen werden kann. Zur Ermittlung der dafür erforderlichen Strom-Spannungs-Kennlinie wird ein Verbraucher in der Regel über einen veränderbaren Lastwiderstand dargestellt. Wie bei der Bestimmung der Kenngrößen ist auch die Leistungsmessung bei einem angeschlossenen Verbraucher abhängig von Faktoren wie der Bestrahlungsstärke oder der Temperatur.

In den Schülerversuchen kann wahlweise ein geeignetes Potentiometer oder aber verschiedene Widerstände eingesetzt werden, wie dies im Abschnitt zu Materialien bereits beschrieben wurde. Die zuletzt genannte Möglichkeit ist sicherlich aufwendiger, bietet aber den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, selbst zu erkennen, welche Bereiche der Kennlinie sie ausmessen sollen. Die Abbildungen C2.12 und C2.13 zeigen die Strom-Spannungs-Kennlinien (rot) von zwei baugleichen Solarmodulen bei nahezu konstanter Beleuchtung und Temperatur.

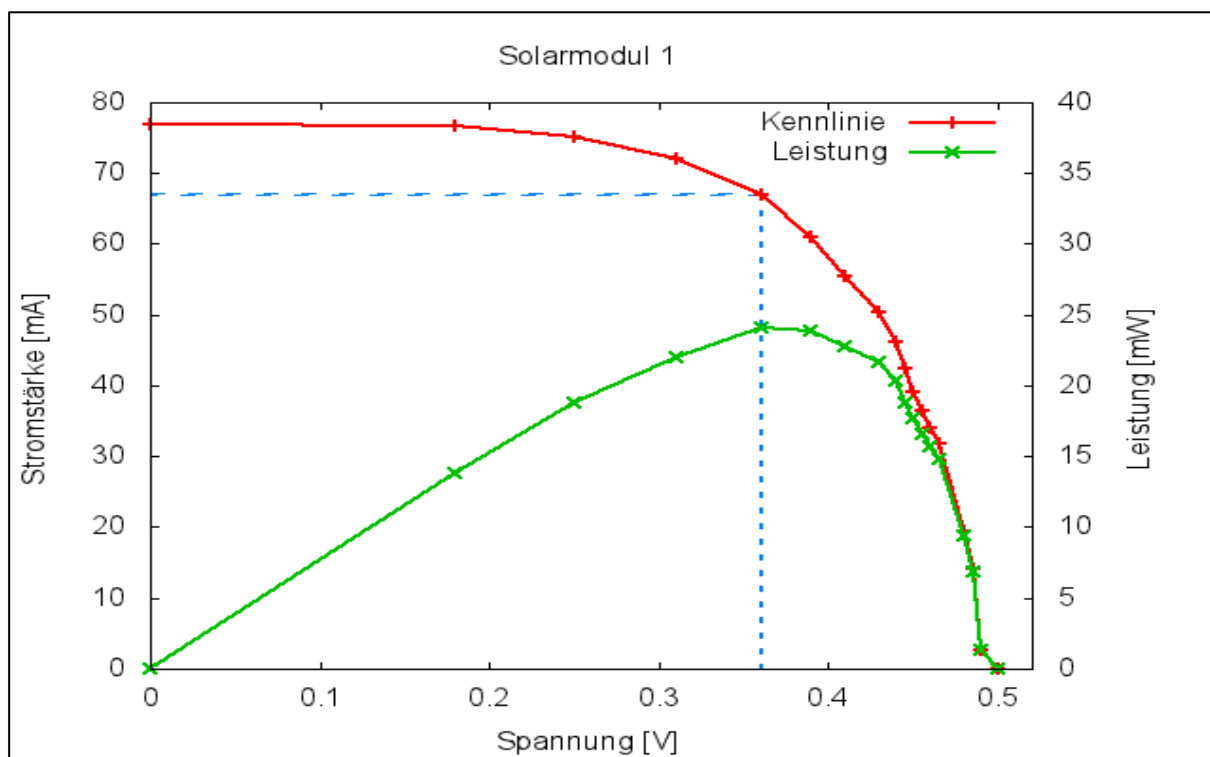


Abbildung C2.12 Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie und der Leistungskurve für ein Solarmodul bei möglichst konstanter Beleuchtungsstärke und Temperatur. Die Bestimmung des Maximum Power Point (MPP) ist durch ein gestricheltes Rechteck dargestellt.

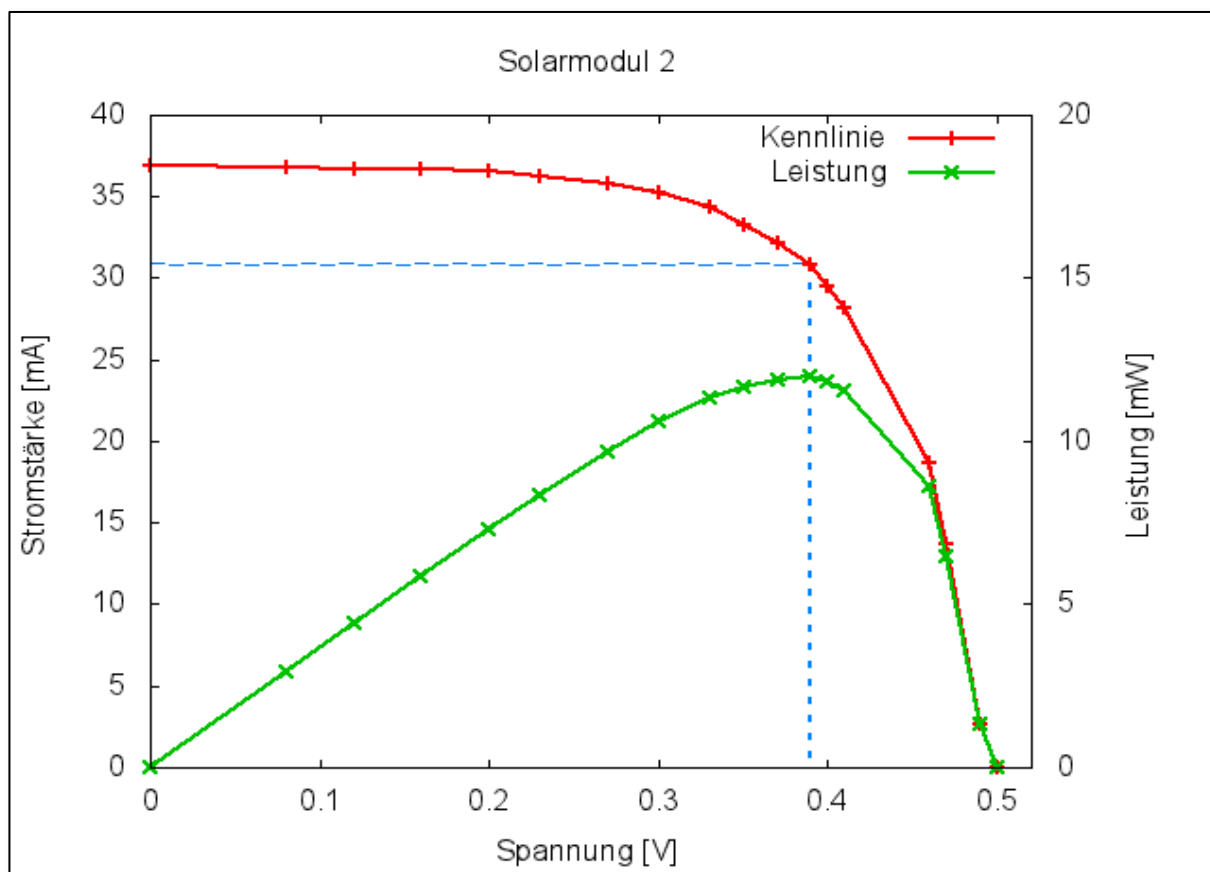


Abbildung C2.13 Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie und der Leistungskurve für ein Solarmodul derselben Baureihe wie in Abbildung C2.12 bei einer möglichst konstanten Beleuchtungsstärke und Temperatur. Die Bestimmung des Maximum Power Point (MPP) ist durch ein gestricheltes Rechteck dargestellt.

Die Leistung, die einem Solarmodul entnommen werden kann, ist das Produkt aus der jeweiligen Stromstärke und Spannung, die am Verbraucher anliegt. In den Abbildungen C2.12 und C2.13 sind auch diese Werte als Kurven (grün) dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass jede Leistungskurve nach einem Anstieg und einem anschließenden Abfall ein eindeutiges Maximum annimmt. Dieser Punkt der maximalen Leistung wird als optimaler Betriebspunkt oder Maximum Power Point (MPP) bezeichnet. Da sich die Lage dieses Punktes aufgrund verändernder Faktoren wie der Beleuchtungsstärke und Temperatur verschiebt, wird bei einem wirtschaftlich genutzten Solarmodul in der Regel das Maximal-Leistungspunkt-Suche-Verfahren (MPP-Tracking) angewendet, um dem Solarmodul immer die maximale Leistung entnehmen zu können.

Hinweis

In der Abbildung C2.14 sind noch einmal ausgewählte Messwerte zur Ermittlung der Kennlinien und Leistungskurven dargestellt und durch die Schaltskizze für den entsprechenden Messaufbau ergänzt. Obgleich die Versuchsbedingungen (insbesondere die Beleuchtungsstärke) für die beiden Solarmodule möglichst nicht verändert wurden, fällt auf, dass die Messreihen der beiden Solarmodule mit Bezug zum selben Widerstand unterschiedlich sind. Insbesondere erreicht ein Solarmodul den MPP bereits bei 4 Ohm mit einem Wert von 24,12 mW. Zudem wird deutlich, dass der anfängliche Bereich der Kennlinie zunächst im Abstand von einem Ohm durchgemessen werden sollte. Nach Erreichen des MPP kann es dann im Hinblick auf die Effizienz des Messprozesses sinnvoll sein, die Abstände zwischen den verschiedenen Widerstandswerten zu erhöhen, wie dies ebenfalls am Ende der Tabelle in der Abbildung C2.14 zu erkennen ist.

Verbraucher	Solarmodul1			Solarmodul 2		
	R [Ohm]	I [mA]	U [V]	P [mW]	I [mA]	U [V]
0	77,0	0,00	0,00	36,9	0,00	0,00
1	76,6	0,18	13,79	36,8	0,08	2,94
2	75,1	0,25	18,78	36,7	0,12	4,40
3	72,0	0,31	22,32	36,7	0,16	5,87
4	67,0	0,36	24,12	36,6	0,20	7,32
5	61,1	0,39	23,83	36,2	0,23	8,33
6	55,4	0,41	22,71	35,8	0,27	9,67
...
33	14,1	0,49	6,91	13,70	0,47	6,44
180	2,7	0,49	1,32	2,70	0,49	1,32

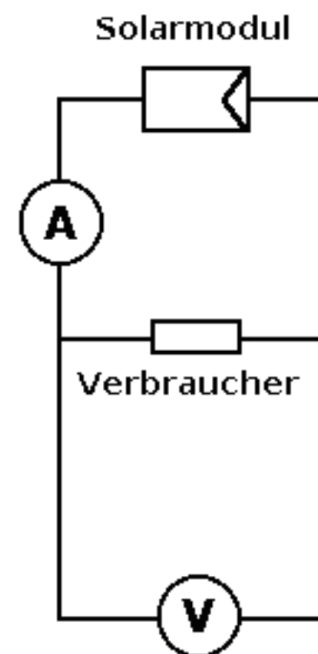


Abbildung C2.14 Die Abbildung stellt ausgewählte Messwerte zur Bestimmung der Kennlinien und Leistungskurven aus den Abbildungen C2.12 und C2.13 in Abhängigkeit vom verwendeten Widerstand (Verbraucher) dar, wobei auch die zugehörige Schaltung schematisch abgebildet ist. Dabei wird der Widerstand R in Ohm, die Stromstärke I in mA, die Spannung U in V und die daraus berechnete Leistung P in mW angegeben.

Um die Abhängigkeit der ermittelten Leistung von der Lichtintensität zu verdeutlichen, können entsprechende Messungen mit und ohne künstliche Lichtquelle (nur Tageslicht) durchgeführt und entsprechend den Darstellungen in den Abbildungen C2.12 und C2.13 miteinander verglichen werden.

Abschließend kann der Füllfaktor als ein mögliches Maß für die Güte des Solarmoduls bestimmt werden. Dieser berechnet sich als Quotient aus dem Wert der Leistung am MPP und dem Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom und ist somit ein dimensionsloses Maß, welches einen Wert kleiner als eins besitzt. Je kleiner der Wert des Füllfaktors ist, desto geringer ist auch der Wirkungsgrad eines Solarmoduls. Der Füllfaktor sollte zumindest 0,5 betragen, während effiziente Solarmodule einen Wert von über 0,8 erreichen. Die ideale Solarzelle wäre somit eine Energiequelle mit konstanter Stromstärke, bis die Leerlaufspannung erreicht ist, und ihre Kennlinie würde entsprechend einem Rechteck mit maximalen Flächeninhalt verlaufen.