

# Handbuch zur Sonnenfängerbox SEKI Station 1

Das Gerätesystem der Lernstation 1 Lernstation 4 ist 2-fach in der Sonnenfängerbox

Lernstation	Experimentiergeräte für 1 Lernstation	Messtechnik und Zubehör	Themenschwerpunkte der Experimente
Lernstation 1  Solarzelle I  <b>1</b>	2 Solarmodule SUSE CM6MS 1 Speichermodul SUSE 4.12 1 Solarmotor SUSE 4.16  von Schule: 1 Overheadprojektor 1 Halogenstrahler 120W Oder Rotlichtlampe	1 Dig. Multimeter 6 Laborkabel mit 4mm Stecker 3x schwarz + 3x rot 1 Zollstock 2m 1 Box mit 2 x 6-Zoll-Solarzellen für Anschauungs- und Lernzwecke 1 Box mit 1 Silizium-wafer für Anschauungs- und Lernzwecke	U,I,P von Solarzellen bei verschiedener Einstrahlung Wirkungsgrad, Bestrahlungsstärke Reihenschaltung, Motor als Generator, Solarspeicher Qualitätsbestimmung von Solarzellen

## Gliederung Handbuch Station 1:

Nr.	Inhalt	Rote Seitenzahlen
1-1	Basisinfo mit didaktischen und methodischen Hinweisen	1-2
1-2	Gerätedateien mit technischen Daten und Sicherheitshinweisen	3-8
1-3	Solardidaktische Grundlagen zu Solarstrahlung, Solarzelle, Solarmodul Infodateien und Arbeitsblätter	9-16
1-4	Experimente zur Solarzelle mit SUSE CM6MS und Zusatzgeräten	17-35

### 1-1 Basisinfo mit didaktischen und methodischen Hinweisen

Elektrische Energiegewinnung aus Sonnenlicht mit Solarzellen gehört zu den wichtigsten nachhaltigen und umweltfreundlichen erneuerbaren Energien und wird für die Zukunft der gesamten Menschheit von großer Bedeutung sein.

Besonders bei der energetischen Umgestaltung- Energiewende- zur klimafreundlichen Energiegewinnung spielt diese Technologie weltweit eine große Rolle.

Eine Solarzelle wandelt direkt die Strahlungsenergie des Lichts in elektrische Energie um. Die Wirkungsgrade der auf dem Markt befindlichen Solarzellen liegen bei ca. 18- 22 %, in der Forschung bis 30%, besondere Zellkonzepte (z.B. Tandemsolarzellen) liefern Wirkungsgrade bis 50%!

Mit den Experimenten der Station 1 wollen wir grundlegende Eigenschaften von Solarzellen in eigenen Experimenten entdecken und anwenden, entweder Outdoor im natürlichen Tageslicht oder Indoor mit dem Licht des Overheadprojektors (auf der Glasplatte) oder eines Halogenstrahlers.

Basisgerät ist das **Solarmodul SUSE CM6MS** mit einer hochwertigen Solarzelle SUSEmod218, 2 Messbuchsen und schaltbarer Solarmotor mit Propeller. Weiterhin gehören ein **Energiespeicher SUSE 4.12** mit 2 Superkondensatoren mit je 5F, und ein zusätzlicher **Solarmotor SUSE 4.16** mit Propeller zu den Experimentiermodulen. Die Experimente bieten Einsteigerversuche oder auch umfangreiche, qualifizierte Experimente zu den technischen und physikalischen Eigenschaften einer Solarzelle.

Die Solarzelle SUSEmod 218 im Modul SUSE CM6MS ist mit 52x52mm der 9. Teil einer Standard- 6- Zoll-Solarzelle mit 156mm Seitenlänge. In der beigefügten Box befinden sich für Anschauungszwecke 2 Standard- Solarzellen 6 Zoll + 2 Solarzellen 52x52mm.

Es ist sinnvoll, vor Beginn der Experimente die solardidaktischen Grundlagen zu studieren, um den Aufbau, die Funktion und die Herstellung einer Solarzelle zu verstehen.

Die betreuende Lehrkraft entscheidet gemeinsam mit der 3er Gruppe den Umfang der zu bearbeitenden Experimente, die Ergebnisse der Versuche sollten im Forum besprochen werden.

Bei Fragen sind wir für Sie da: [info@sundidactics.de](mailto:info@sundidactics.de).

**Vorsicht! Solarzellen und Si- Wafer nicht aus der Box herausnehmen, Solarzellen und Wafer sind extrem zerbrechlich!**

# Handbuch zur Sonnenfängerbox SEKI Station 1

## 1-2 Gerätedateien mit technischen Daten und Sicherheitshinweisen

Auf den nachfolgenden Seiten werden die im Gerätesatz der Station 1 vorhandenen Geräte mit ihren technischen Daten und Sicherheitshinweisen vorgestellt, **bitte die Sicherheitshinweise beachten!**

### Das Gerätesystem der Lernstation 1 Station 1 ist 2-fach in der Sonnenfängerbox

Lernstation 1 Experimentiergeräte	Lernstation 1 Messtechnik + Zubehör	Themen der Experimente
2 Solarmodule SUSE CM6MS 1 Speichermodul SUSE 4.12 1 Solarmotor SUSE 4.16  von Schule: 1 Overheadprojektor zum Experimentieren auf der Glasplatte 1 Halogenstrahler 120W	1 Dig. Multimeter 6 Laborkabel je 50 cm, 4mm Stecker 3x schwarz + 3x rot 1 Zollstock 2m 1 Box mit 4 x 6-Zoll- Solarzellen für Anschauungs- und Lernzwecke 1 Box mit 1 Silizium-wafer für Anschauungs- und Lernzwecke 1 Handbuch in pdf auf USB-stick	U,I,P von Solarzellen bei verschiedener Einstrahlung Wirkungsgrad Bestrahlungsstärke Reihenschaltungen Solarmotor als Generator Solarspeicher Aufbau und Funktion von Solarzellen

Auf den folgenden Seiten werden die einzelnen Geräte in jeweils einer Datei vorgestellt.

- Das Digital- Multimeter wird zum Messen der elektrischen Spannung (Messbereich DC 20V) und der Stromstärke (Messbereich 10A DC) verwendet. Die dazugehörigen Kabel mit Messspitzen werden nicht benötigt, wir verwenden die Laborkabel und stecken diese in die Buchsen der Geräte und die Messbuchsen am Multimeter! Wenn die SchülerInnen mit dem Umgang des Digital- Multimeters nicht vertraut sind, sollten sie vor den Experimenten eingewiesen werden.
- Der Zollstock dient zum Messen des Abstands zwischen Lichtquelle und Solarzelle.



**Photovoltaik-  
System  
SUSE**

**Solarthermiesystem  
Wärme von der Sonne**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung



## Das Solarmodul SUSE CM6MS

**leistungsstarkes Einsteiger- Solarmodul für Photovoltaik- Experimente**  
mit Solarzelle, Solarmotor, Schalter und Messbuchsen Hochwertige Solarzelle 0,65 V / 1025 mA



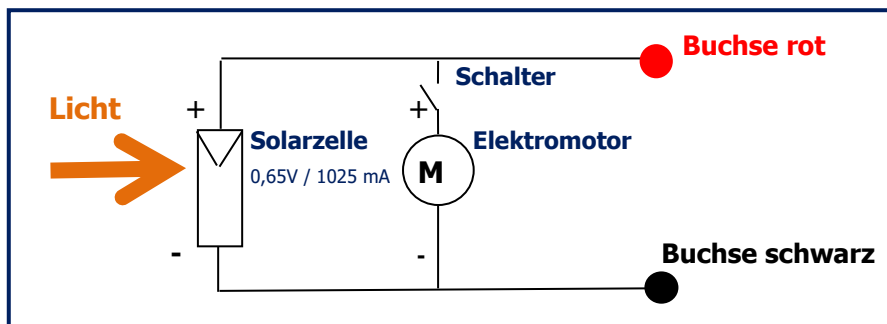
Auf dem dachförmig gebogenen Modulträger aus Plexiglas (Gesamtmaß 160 x 80 mm) erkennt man rechts die Solarzelle (bruchfest eingebettet in das Solarmodul SUSEmod218) mit den Maßen 52 x 52 mm (Solarzelle) und 75 x 75 mm (Solarmodul). Auf der linken Seite befindet sich der Solarmotor mit Propeller, der über den Schalter mit dem Solarmodul verbunden ist. Neben dem Typschild befinden sich 2 Buchsen zum Einstecken von 4mm- Laborkabeln. Hier lassen sich Spannungen und Stromstärken messen oder weitere Geräte anfügen, z.B. zusätzliche Solarmotoren SUSE 4.16, Solar- Energiespeicher SUSE 4.12 oder weitere Geräte SUSE CM6MS in Reihen- oder Parallelschaltung). Mit dem Schalter lässt sich der Elektromotor ein- oder ausschalten. Das Modul eignet sich gut für Photovoltaikexperimente in der GS und den Sekundarstufen I und II.



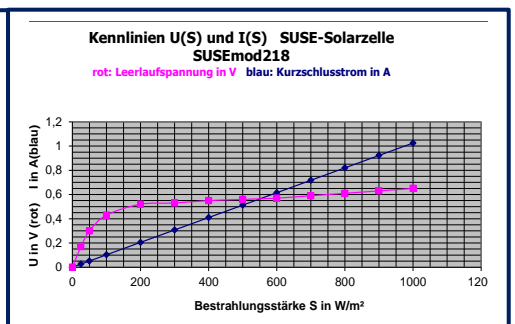
Bei NILS- ISFH wurden hierfür umfangreiche Experimente in verschiedenen Niveaustufen entwickelt. Das Gerät wird als Fertigerät oder Bausatz angeboten, für die handwerkliche Herstellung aus dem Bausatz sind ca. 45 Minuten notwendig.

Der **Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  der Solarzelle** ist ein direktes Maß für die Lichtintensität und proportional zur Bestrahlungsstärke  $S$ , er beträgt bei strahlendem Sonnenschein ( $S = 1000 \text{ W/m}^2$ ) **1025 mA**, die **Leerlaufspannung** der Solarzelle beträgt **0,65 V**.

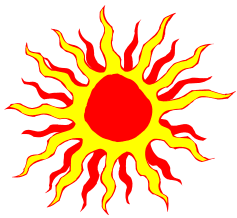
### Die elektrische Schaltung des Solarmoduls



### Die U(S) und die I(S)- Kennlinie



Der Kurzschlussstrom (blaue Kurve) ist proportional zur Lichtintensität  $S$  und erreicht bei  $S = 1000 \text{ W/m}^2$  einen Maximalwert von 1025 mA. Die Leerlaufspannung ist eine e- Funktion, steigt bei geringer Lichtintensität stark an und erreicht mit geringer Steigung den Maximalwert von 0,65 V. Der Wirkungsgrad ist ca. 18%. **Die exakten technischen Daten des Moduls, die Bau- und Experimentieranleitungen finden Sie bei [www.sundidactics.de](http://www.sundidactics.de) im downloadbereich.**



**Photovoltaik-  
System  
SUSE**

**Solarthermiesystem  
Wärme von der Sonne**

**innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung**



## Das Solar- Speicher- Modul SUSE 4.12/4.12USB

Speichermodul mit 2 Goldcap- Kondensatoren 3,3 F oder 5F in Reihenschaltung zum Speichern von elektrischer Energie aus Solarzellen oder Solarmodulen.

**Maximale Spannung U = 5,0 V DC Maximale Speicherenergie 62,5 J bei 5F**

SUSE 4.12/4.12USB



Das **Solar- Speicher- Modul SUSE 4.12** dient zum **direkten Speichern von elektrischer Energie**, die in Solarzellen oder Solarmodulen aus Sonnenlicht gewonnen wird.

Das Speichermodul **SUSE 4.12** kann an 1- 8 Solarzellen (in Reihenschaltung) angeschlossen werden und daran aufgeladen werden. Zwei **Superkondensatoren 5F** in Reihenschaltung speichern die elektrische Energie. Das Modul kann auch von Batterien oder Netzgeräten aufgeladen werden. Die **maximale Ladespannung ist 6,0 V**, die dabei **maximal gespeicherte Energie beträgt bei 5 F 90 J** (nach der Gleichung für die in einem Kondensator gespeicherte Energie  $W = \frac{1}{2} CU^2$ )

**Es darf keine höhere Spannung als 6,0 V angelegt werden, sonst werden die GoldCap- Speicher zerstört.**

Für einen Betrieb bei höheren Spannungen können aber mehrere Speichermodule in Reihe geschaltet werden, 2 Module = 12 V max., 3 Module = 18 V max., usw.

Wird das aufgeladene Speicher- Modul **SUSE 4.12** an einen Solarmotor mit Propeller (z.B. SUSE 4.16) angeschlossen, so **dreht sich der Motor mehrere Minuten** mit der gespeicherten elektrischen Energie weiter, auch LED- Module (z.B. SUSE 4.15) können an das geladene Speichermodul SUSE 4.12 angeschlossen werden und leuchten mehrere Minuten.

Der Aufladevorgang an Solarzellen kann je nach Intensität der Sonnenstrahlung mehrere Minuten betragen, er kann mit einem Amperemeter im Ladestromkreis oder mit einem Voltmeter an den Buchsen kontrolliert werden. Bei strahlendem Sonnenschein dauert die Aufladung ca. 1 Minute.

**Zwischen den Buchsen** befindet sich ein **roter Tastschalter**, wird dieser 3 Sekunden gedrückt, so entladen sich die Superkondensatoren vollständig, vor Auflade- Experimenten sollte das Modul immer entladen werden.

Wird ein Voltmeter beim Aufladevorgang (Messbereich 20 V DC) an die Polklemmen geschaltet, kann der Aufladevorgang beobachtet werden, die Spannung steigt langsam von 0 auf den Wert der Ladespannung.

So lässt sich (wie bei den Schildbürgern) im Freien elektrische Energie mit Solarzellen gewinnen, daran das Modul **SUSE 4.12** aufladen und diese Energie mit dem Modul in einen wenig beleuchteten Innenraum tragen und dort am Solarmotor oder am LED- Modul nutzen. Die Schüler lernen daran, dass sich elektrische Energie aus Solarzellen speichern und transportieren lässt.

Die Variante SUSE 4.12USB dient zum Einsatz im SUNdidactics USB-System, hier dient eine USB- Kupplung zum Anschluss an ein Solarmodul mit USB- Ausgang oder zum Anschluss an den DC-DC-Wandler SUSE 4.17. In der Version 4.12USB ist ein Schutzwiderstand integriert, der den Strom bei Aufladung am Laptop oder PC begrenzt.



**Oben: Das Speichermodul SUSE 4.12**

Links die **rote Buchse +**, rechts die schwarze Buchse – zum Anschluss an ein Solarmodul. Der Tastschalter T in der Mitte dient zum Entladen.

**Unten: Das Speichermodul SUSE 4.12USB**





**Photovoltaik-  
System  
SUSE**

**Solarthermiesystem  
Wärme von der Sonne**

**innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung**



## Der Solar- Elektromotor SUSE 4.16/4.16 USB

### Solar- Elektromotor 0,2–5 V DC mit Propeller und Buchsen oder USB- A- Kabel bei der Version SUSE 4.16 USB

SUSE 4.16



## Der Solarmotor SUSE 4.16

Auf dem dachförmig gebogenen Plexiglasträger (160 x 80 x 3 mm) erkennt man oben den Solarmotor mit dem blauen Propeller, unten befinden sich die beiden Buchsen, an die man Laborkabel mit 4mm-Stecker einstecken kann. Das Gerät ist zum Anschluss an Solarzellen von 1 – 8 Solarzellen in Reihenschaltung geeignet. Wird der Propeller angepustet oder in den Wind gehalten, dient der Motor als Generator und erzeugt elektrische Energie! **Das Modul ist nun eine funktionsfähige Windkraftanlage!**

Verbindet man nun den Motor mit einem LED-Modul 4.15 mit roter LED, so leuchtet diese auf, wenn man durch kräftiges Pusten den Propeller in schnelle Drehungen bringt. Der rote Pol (+) des Motors muss mit dem schwarzen Pol(-) des LED- Moduls verbunden werden und der schwarze Motorpol (-) mit dem roten Pol (+) der LED! Die erzeugte Spannung kann mit dem Multimeter gemessen werden.



Das **Solar- Motor- Modul SUSE 4.16** besteht aus einem Solar- Motor mit einem Propeller auf einem Plexiglasträger für den Betrieb an Gleichspannung von ca. 0,2V – max. 5,0V zum Anschluss an Solarzellen oder Solarmodule. Geeignet für Solar- Experimente in der Grundschule und der Sekundarstufe.

An den beiden Buchsen an der Vorderseite können einzelne Solarzellen oder Reihenschaltungen von 1 bis zu 8 Solarzellen in Reihenschaltung angeschlossen werden, je höher die Solarzellenanzahl, desto schneller dreht sich der Motor. Auch an funktionsfähige Solarzellenbruchstücke kann der Motor angeschlossen werden, seine Drehung zeigt die Funktion!

Der Motor kann auch an Batterien bis max. 4,5 V (Flachbatterie) angeschlossen werden.

**Solarmotor als Generator:** Wird der Propeller durch „Pusten“ oder natürlichen Wind zum Drehen gebracht, erzeugt der Motor als Generator „Strom“, das Gerät ist eine Windkraftanlage, die erzeugte Spannung kann mit einem Multimeter am rot- schwarzen Buchsenpaar gemessen werden, je schneller die Drehzahl ist, desto höher ist die Generator- Spannung (U bis ca. 3 Volt DC!)

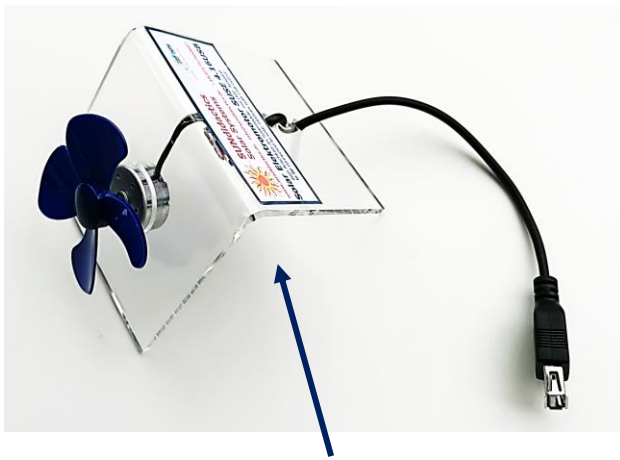
**Schließt man 2 Motoren durch Laborkabelverbindung zusammen** und pustet auf den Propellers des 1. Motors, dann dreht sich der 2. Motor durch die im 1. Motor als Generator erzeugte elektrische Energie, je heftiger man pustet, desto schneller dreht sich der 2. Motor.

**Es darf keine höhere Spannung als 5,0 V angelegt werden, sonst wird der Motor zerstört!**

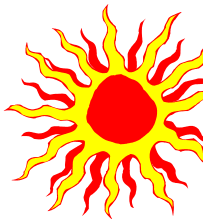
### Die technischen Daten des Solarmotors:

1. Anlaufspannung: ca. 0,2 V = 200 mV
2. Anlaufstrom: ca. 20 mA
3. Spannungsbereich: 0,2 ...5,0 V
4. Durchmesser Gehäuse: 24,2 mm
5. Durchmesser Achse: 2 mm
6. Achslänge: 10 mm
7. Anschlüsse: ca. 70 mm Kabel  
+ rot  
- schwarz

**Maximale Spannung 5,0 V!**



Bei der **Version SUSE 4.16USB** ist (über einen Vorwiderstand) statt der Buchsen ein USB- A-Kabel mit Stecker A eingebaut, so ist der Solarmotor an USB- Systemen zu verwenden, z.B. bei der USB-Mini- Inselanlage oder die der Sonnenfängerbox SEKI.



**SUN**didactics  
**SolarEnergyDidactics**  
**SolarEducation**  
**SolarEngineering**  
**Photovoltaics+Solarthermal**  
**innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung**  
**innovative solar- systems for school, college, technical education**

**NILS ISFH**  
**Kooperationspartner**  
**cooperation partner**  
 Lernwerkstatt NILS-ISFH  
 am Institut für  
 Solarenergieforschung ISFH  
 An- Institut der Leibniz Universität  
 Hannover  
**Solartechnik**  
**Solardidaktik**  
**Solare Wissenschaft**  
*Solar technology Solar didactics*

**Photovoltaik-**  
**System**  
**SUSE**  
**Solartechnik**  
**Experimentiergeräte**  
**Solare Experimente**  
**von der Grundschule**  
**bis zum Abitur**  
*Solar technology*  
*Experimentation devices*  
*Solar experiments*

**BNE**  
**Bildung**  
**für**  
**nachhaltige**  
**Entwicklung**  
*Education*  
*for*  
*Sustainable*  
*Development*

Solardidactic – Solarzellen – Solarmodule – PV- Experimentiergeräte – PV –Experimentieranleitungen – Solarthermie- Experimentiergeräte  
 didaktische Konzepte – Solarberatung – Fortbildung – solare Aus- und Weiterbildung – Solarspielzeug  
*Solardidactics + solar cells + solar modules + photovoltaic experiment devices + solar toys + solar education and training*

## SUNdidactics Solar Systems

**Wolf- Rüdiger Schanz, OStR aD, Schaperbleek 15, D-31139 Hildesheim, Germany**

Phone: +49(0)5121 860730 Fax: +49(0)3222 3706689 Mail: info@sundidactics.de Mobile: +49(0)1757660607 Web: www.sundidactics.de skype: wolfschanz

## Digitales Multimeter

**Für die Solartechnischen Experimente wird ein digitales Multimeter verwendet. Eine Einweisung durch die verantwortliche Lehrkraft ist erforderlich!**

**Bitte beachten Sie die beigelegte Bedienungsanleitung des Herstellers!**

**Die meisten Messungen werden mit folgenden Messbereichen durchgeführt:**

**Spannung: 20V DC oder 200V DC nur beim Solarmodul 20W**

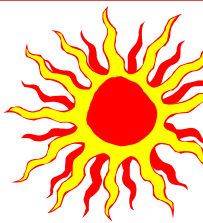
**Stromstärke: 10A DC oder 5A DC, je nach Gerät, selten 200mA DC oder 20mA DC.**

**Das Multimeter erst zum Gebrauch einschalten, nach der Messung ausschalten!**

**Vor dem Bereichswchsel Kabel aus Buchsen entfernen!**

### Sicherheitsvorschriften:

- **Multimeter und Laborkabel nur für solartechnischen Experimente verwenden!**
- **Maximale Stromstärke: 3A**
- **Laborkabel niemals in die Steckdose stecken, Lebensgefahr!!**



**SUN**didactics  
**SolarEnergyDidactics**  
**SolarEducation**  
**SolarEngineering**  
**Photovoltaics+Solarthermal**  
**innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung**  
**innovative solar- systems for school, college, technical education**

**NILS ISFH**  
**Kooperationspartner**  
**cooperation partner**  
 Lernwerkstatt NILS-ISFH  
 am Institut für  
 Solarenergieforschung ISFH  
 An- Institut der Leibniz Universität  
 Hannover  
**Solartechnik**  
**Solardidaktik**  
**Solare Wissenschaft**  
*Solar technology Solar didactics*

**Photovoltaik-System**  
**SUSE**  
**Solartechnik**  
**Experimentiergeräte**  
**Solare Experimente**  
**von der Grundschule**  
**bis zum Abitur**  
*Solar technology*  
*Experimentation devices*  
*Solar experiments*

**BNE**  
**Bildung**  
**für**  
**nachhaltige**  
**Entwicklung**  
*Education*  
*for*  
*Sustainable*  
*Development*

Solardidactic – Solarzellen – Solarmodule – PV- Experimentiergeräte – PV –Experimentieranleitungen – Solarthermie- Experimentiergeräte  
 didaktische Konzepte – Solarberatung – Fortbildung – solare Aus- und Weiterbildung – Solarspielzeug  
*Solardidactics + solar cells + solar modules + photovoltaic experiment devices + solar toys + solar education and training*

## SUNdidactics Solar Systems

**Wolf- Rüdiger Schanz, OStR aD, Schaperbleek 15, D-31139 Hildesheim, Germany**

Phone: +49(0)5121 860730 Fax: +49(0)3222 3706689 Mail: info@sundidactics.de Mobile: +49(0)1757660607 Web: www.sundidactics.de skype: wolfschanz

**Laborkabelset (Messleitungen) mit 2 x 4mm- Stecker für solartechnische Experimente, rot + schwarz**

**Stapelbar = Stecker hat hinterseitige Buchse zum Einstecken weiterer Stecker.**

**Länge 0,5 m.**



**Laborkabel für solartechnische Experimente, Stecker vernickelt**

**Maximale Stromstärke 3 A!**

**Mit den Laborkabeln werden die einzelnen Geräte (Solarmodule, Solarmotor, LED-Module, Solarspeicher...) entsprechend der Anleitungen miteinander verbunden. Dazu werden die Stecker der Laborkabel in die entsprechenden Buchsen der Geräte eingesteckt.**

**Die Minus- Leitungen sind schwarz, die Plus- Leitungen sind rot.**

### **Sicherheitsvorschriften:**

- **Laborkabel nur für solartechnischen Experimente verwenden!**
- **Maximale Stromstärke: 3A**
- **Laborkabel niemals in die Steckdose stecken, Lebensgefahr!!**

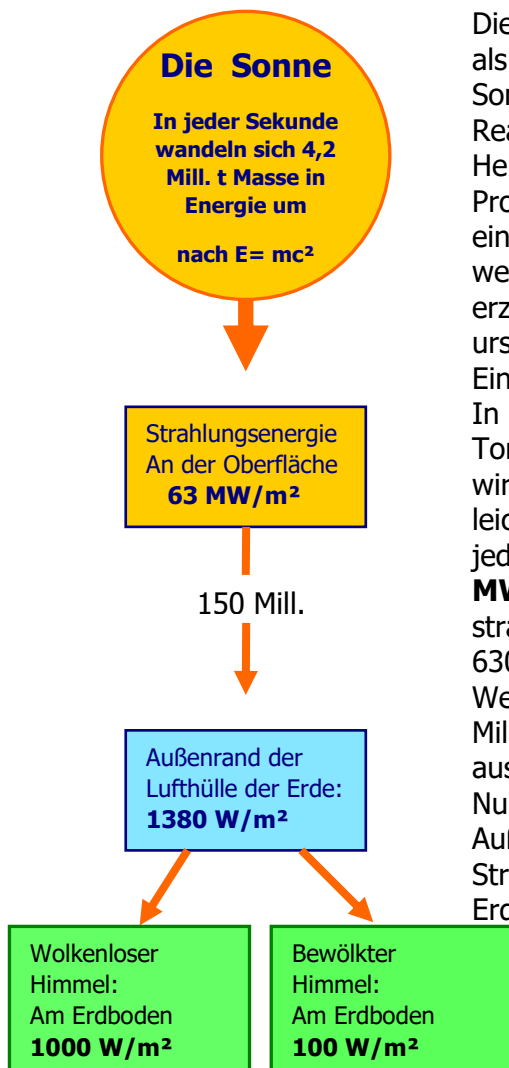
# **Handbuch zur Sonnenfängerbox SEKI Station 1**

## **1-3 Solardidaktische Grundlagen mit 5 Dateien**

- 1. Solarstrahlung**
- 2. Herstellung einer Solarzelle**
- 3. Aufbau und Funktion einer Solarzelle I**
- 4. Aufbau und Funktion einer Solarzelle II**
- 5. Aufbau und Funktion einer Solarzelle III**

Diese Dateien zur Solarstrahlung und zum Aufbau und Funktion einer Solarzelle werden im Schülerlabor NILS- ISFH zum selbstständigen Lernen oder zum MINT- Unterricht eingesetzt.

# Basisinformationen zur Solarstrahlung



## A1 Die Kernfusion im Inneren der Sonne:

Die Sonne ist ein riesiger Kernfusionsreaktor, der seine Energie als Strahlungsenergie in den Weltraum abstrahlt. Im Sonneninnern läuft bei 100 Millionen °C die Proton-Proton-Reaktion ab, dabei fusionieren Deuteriumkerne zu Heliumkernen. Stark vereinfacht kann man diese Proton-Proton-Reaktion als die Verschmelzung von vier Protonen zu einem Heliumkern beschreiben, bei den Zwischenreaktionen werden auch Positronen, Neutrinos und Gammastrahlung erzeugt. Die Masse eines Heliumkerns ist geringer als der ursprünglichen Protonen, die fehlende Masse wurde nach der Einstein- Gleichung  $E = mc^2$  in Energie umgewandelt.

In der Sonne verschmelzen in jeder Sekunde 567 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 562,8 Millionen Tonnen Helium. Somit wird unsere Sonne in jeder Sekunde um 4,2 Millionen Tonnen leichter. Nach Einstein führt das zu einer Energieabstrahlung in jeder Sekunde von  $3,8 \cdot 10^{26}$  J, was eine Abstrahlung von **63 MW** (Megawatt) pro  $1 \text{ m}^2$  bedeutet.  $10 \text{ m}^2$  Sonnenoberfläche strahlen genau so viel Energie ab wie ein Kohlekraftwerk mit 630 MW.

Weil die Erde sehr viel kleiner ist als die Sonne und 150 Millionen km entfernt ist, trifft nur ein sehr kleiner Teil der ausgestrahlten Energie die Erde am Rand ihrer Lufthülle:

Nur noch **1380 W/m<sup>2</sup>**, das ist die **Solarkonstante** am Außenrand der Lufthülle der Erde. Durch Absorption von Strahlung in der Lufthülle ist die Bestrahlungsstärke am Erdboden bei wolkenlosem Himmel **S = 1000 W/m<sup>2</sup>**.

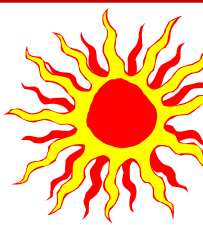
Abb.1: Entstehung und Verlauf der Solarstrahlung

## A2 Die Ausbreitung der Strahlung von der Sonne durch die Lufthülle auf den Erdboden

Am Erdboden kommen bei wolkenlosem Himmel eine Bestrahlungsstärke **S = 1000 W/m<sup>2</sup>** an, die restliche Energie von  $380 \text{ W/m}^2$  wird für chemisch- physikalische Reaktionen in der Atmosphäre benötigt (z.B. in der Ozonschicht). Diesen Messwert  $1000 \text{ W/m}^2$  können wir bei strahlendem Sonnenschein im Sommer präzise messen.

Bei bewölktem Himmel absorbieren die Wolken einen großen Teil der Strahlungsenergie, bei stark bewölktem Wetter kommen z.B. nur noch  $100 \text{ W/m}^2$  auf dem Erdboden an. Auch im Winter erreicht die Bestrahlungsstärke bei strahlendem Sonnenschein den Wert  $1000 \text{ W/m}^2$  nicht, weil der längere Weg des Lichts im Winter durch die Lufthülle Energie absorbiert, der Wert wird maximal  $600 \text{ W/m}^2$ .

Mit den SUSE- Solarzellen oder- Solarmodulen können wir die Bestrahlungsstärke über eine Dreisatzberechnung exakt messen, in den Experimentieranleitungen sind diese Messungen erläutert.



**SUNdidactics**  
**SolarEnergyDidactics**  
**SolarEducation**  
**SolarEngineering**  
**Photovoltaics+Solarthermal**  
**innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung**  
**innovative solar- systems for school, college, technical education**

NILS ISFH  
 Kooperationspartner NILS-ISFH  
 Vertrieb  
 Auslieferung  
 Rechnungsservice  
 Solartechnik  
 Solardidaktik  
 Solare Wissenschaft  
 Sales  
 Delivery  
 Accounting  
 Solar didactics  
 Solar science

**Photovoltaik-System SUSE**  
 Solartechnik  
 Experimentiergeräte  
 Solare Experimente von der Grundschule bis zum Abitur  
 Solar technology  
 Experimentation devices  
 Solar experiments

**BNE**  
 Bildung für nachhaltige Entwicklung  
 Education for Sustainable Development

Solardidactic – Solarzellen – Solarmodule – PV- Experimentiergeräte – PV –Experimentieranleitungen – Solarthermie- Experimentiergeräte  
 didaktische Konzepte – Solarberatung – Fortbildung – solare Aus- und Weiterbildung – Solarspielzeug  
 Solardidactics + solar cells + solar modules + photovoltaic experiment devices + solar toys + solar education and training

**SUNdidactics Solar Systems W.R. Schanz, OstR aD, Hildesheim, Germany**

Phone: +49(0)5121 860730 Fax: +49(0)3222 3706689 Mail: info@sundidactics.de Mobile: +49(0)1757660607 Web: www.sundidactics.de

**Die Herstellung einer Standard- Industrie- Siebdruck- Solarzelle (Grundprinzip)**

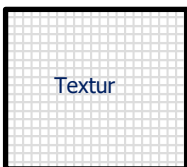
**1. Silizium (Si) -Wafer** p- dotiert mit Bor bei der Herstellung des Wafers



Siliziumscheibe, hochreines Si monokristallin oder polykristallin, Standardmaß 156,75 x 156,75 mm (6 Zoll) Dicke ca. 0,18 mm. In der PV- Industrie werden bereits größere Wafermaße bis 210 mm verwendet! p- Dotierung mit **Bor** (wird bereits in die Schmelze bei der Herstellung eingefügt).

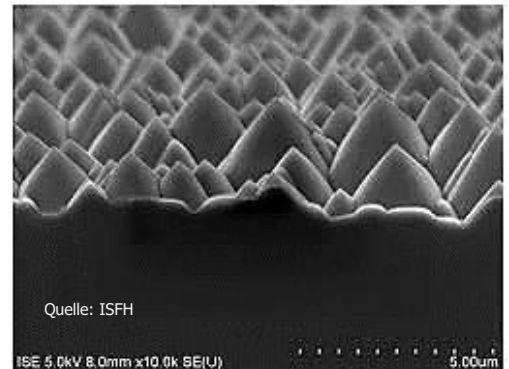


**2. Texturierung mit Lauge**



Die Oberseite wird mit Lauge behandelt, da wird die glatte Oberfläche rau. Auf Grund der Kristallorientierung bilden sich auf einem monokristallinen Wafer Pyramiden einer Höhe von 1 µm – 3 µm aus. Die Textur dient zur Minderung der Lichtreflexion an der Oberfläche. Die Aufnahme rechts mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigt die Textur von der Seite.

pyramidenförmige Texturierung der Wafer- Oberfläche

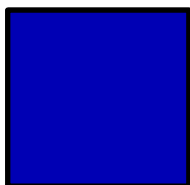


**3. n- Dotierung mit Phosphor (P)**



In einem Ofen strömt bei 900°C - 950°C Phosphoroxychlorid (POCl<sub>3</sub>) über die Oberfläche des Si- Wafers. Die [P]- Atome dringen in die Oberfläche **ca. 0,2 µm** tief ein. Dort bildet sich der **p-n-Übergang**, der für die Ladungstrennung in der Solarzelle wichtig ist.

**4. Beschichtung der Vorderseite mit Antireflexschicht aus Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Siliziumnitrid)**



Im Vakuum wird in einem Plasmaprozess bei ca. 300 °C eine **transparente** ca. 75 nm (= 0,000075 mm) dicke Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> - Schicht aufgebracht, **diese Schicht ist durchsichtig, wir sehen aber blau- schwarz**, sie verhindert die Reflexion des einfallenden Lichts an der Si-Oberfläche, d.h. es taucht möglichst viel Licht in den Si-Wafer ein. Die sichtbare dunkelblaue Farbe ist ein optischer Effekt: siehe „Farben dünner Plättchen“.

**5. Beschichtung der Rückseite mit Antireflexschicht-Stapel**

Im einem Plasmaprozess werden eine ca. 5 – 20 nm dicke Aluminiumoxid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Schicht aufgebracht, auf der wiederum eine 70 – 120 nm dicke Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Schicht aufgebracht wird. Wie auf der Vorderseite ist das Ziel die Passivierung zu verbessern, d.h. die erzeugten Ladungsträger nicht zu verlieren, und gleichzeitig Lichtverluste zu verringern. Im Falle der Rückseite bedeutet das, dass Licht, das auf der Vorderseite in die Solarzelle eintritt an der Rückseite nochmal reflektiert wird, umso ein weiteres Mal durch den Si- Wafer zu wandern und Ladungsträger erzeugen zu können.

## 6. Kontaktöffnung mittels Laserprozess

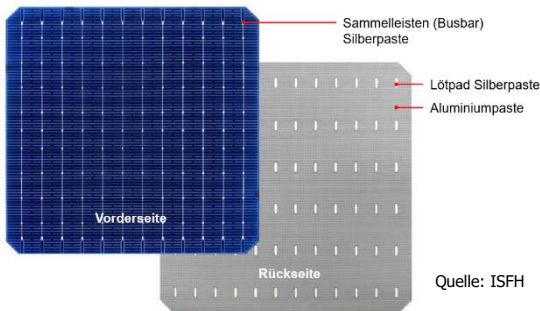
Die dielektrische  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - Schicht auf der Rückseite der Solarzelle wird mit einem Laserprozess geöffnet, d.h. es werden mit einem Laserstrahl die Schichten lokal verdampft. Die Öffnungen sind Punkte mit einem Durchmesser von 20 – 50  $\mu\text{m}$ .

## 7. Beschichtung der Rückseite mit Aluminium und lokalen Silberpads = Pluspol der Solarzelle



Die **Rückseite** der Solarzelle wird im Siebdruckverfahren mit einer dünnen Aluminiumschicht (10 – 20  $\mu\text{m}$ ) überzogen, sie ist der Pluspol der Solarzelle. Weil man Aluminium nicht löten kann, erhält die Rückseite zusätzliche Flächen aus reinem Silber (Löt pads), an die Leiter gelötet werden können.

## 8. Aufbringen des Vorderseitenkontaktgitters aus Silber = Minuspol der Solarzelle



Im Siebdruckverfahren werden sehr dünne parallel verlaufende elektrische Leiter aus Silber aufgedruckt, sowie breitere Leiter als Sammelschiene (Busbars) zum Anlöten elektrischer Leiter.

Die Kontaktfinger müssen sehr dünn sein (20–30  $\mu\text{m}$ ), weil durch Silber kein Licht in die Solarzelle eindringen kann. Die Silberdrucke werden anschließend bei 800–900 °C eingebrannt.

### Nun ist die Solarzelle fertig und einsatzbereit.

Bei strahlendem Sonnenschein ( $S = 1000 \text{ W/m}^2$ ) ist ihre Leerlaufspannung  $U_{oc}$  ca. 0,68 V und die maximale Stromstärke  $I_{sc}$  (Kurzschlussstrom) ca. 10 A, die elektrische Leistung beträgt ca. 5,5 W. Die Kosten liegen aktuell bei 1,3 € (0,25 €/W<sub>p</sub>) durch Massenfertigung, größter Produzent weltweit ist China.

Anschließend werden (meist) 60 Solarzellen in Reihe geschaltet und unter hagelfestem Glas und einem stabilen Aluminium- Rahmen zu einem Solarmodul verbaut, die derzeitigen Leistungen liegen bei ca. 300 – 350 W pro Modul, teilweise schon bis zu 500 W! Viele Solarmodule werden dann auf Dächern oder im Freiland zu großen Solargeneratoren verschaltet, Leistungen bis zu vielen MW.

<p><b>Solarmodul von Solarwatt</b> Leistung ~320 W 60 Solarzellen in interner Reihenschaltung in 6 Reihen mit je 10 Solarzellen.</p>	<p><b>Solarmodul von Hanwha Q Cells ~335 W</b> Reihenschaltung von 60 halben Solarzellen in 2 parallelen Strings.</p>	<p><b>Beispiel eines bifacialen Solarmoduls</b> d.h. Lichteintrag von Vorder- und von Rückseite in das Solarmodul.</p>

Autoren: W.R. Schanz und S. Bordihn, ISFH



**Photovoltaik-  
System  
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem  
Wärme von der Sonne**



**BNE**  
Bildung für  
Nachhaltige  
Entwicklung

## Aufbau und Funktion einer Solarzelle I

Klassenstufen 4-6 Alter 10-12 Jahre

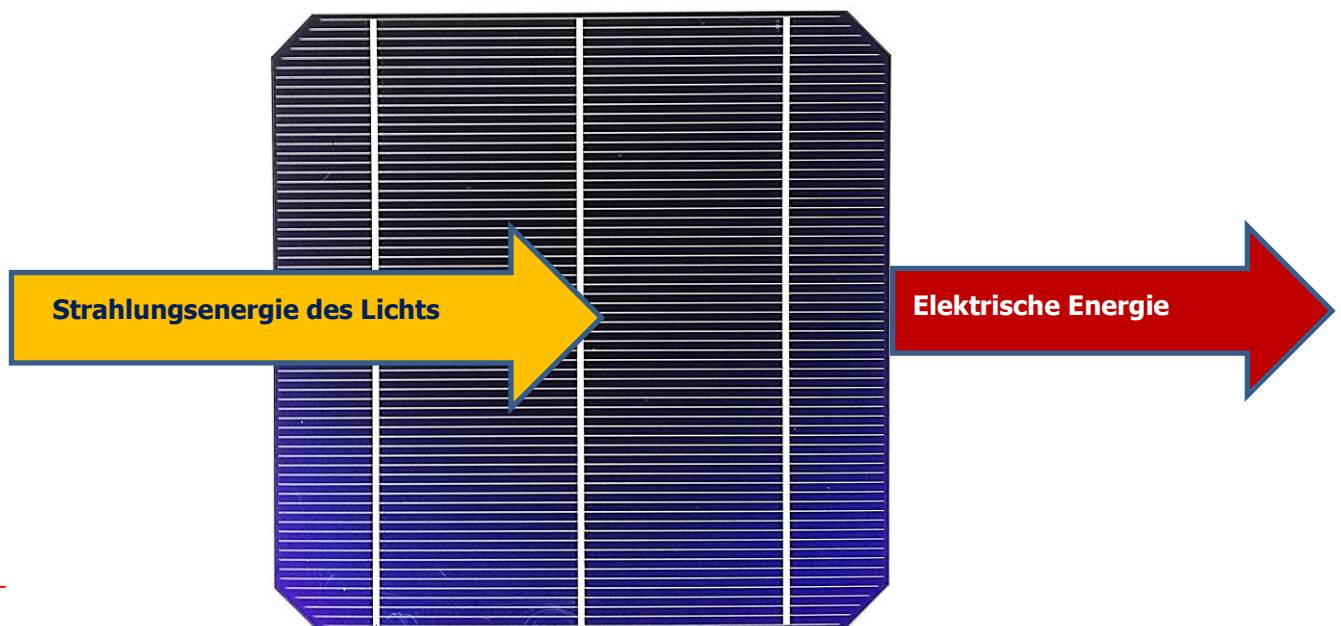


**Eine Solarzelle ist ein Energiewandler, sie wandelt die Strahlungsenergie von Licht in elektrische Energie um.**

Die Verwendung von Sonnenlicht zur Erzeugung von elektrischer Energie ist sehr umweltfreundlich und nachhaltig, es entstehen bei der Energieumwandlung keine Schadstoffe, wie z.B. CO<sub>2</sub>.

**Diese Technik der Energieumwandlung nennen wir Photovoltaik** („Photo“ für Licht, „Voltaik“ für elektrische Energie). Weltweit werden immer mehr Photovoltaikanlagen zur Erzeugung von elektrischer Energie installiert.

**Eine Solarzelle besteht aus einer sehr dünnen Scheibe aus Silizium**, meist ein Quadrat mit der Kantenlänge 156 mm, mit einem Laser kann man sie auch in kleinere Formate mit kleinerer Leistung schneiden.



Wie eine Batterie hat auch eine Solarzelle 2 Pole, **Plus + und Minus -**. Bei einer Batterie sind die Pole wie angezeigt oben und unten. Auch bei der Solarzelle sind die Pole oben und unten, auf der Oberseite, auf die wir im Foto blicken, sind die dünnen Silberleiter der Minuspol der Solarzelle, auf der Unterseite ist der Pluspol.



Eine einzige Solarzelle hat nur eine kleine Leistung, für große Leistungen verschaltet man viele Solarzellen in einem stabilen Rahmen, unter hagelfestem Glas, wie es das Foto links zeigt. Hier sind 60 Solarzellen verschaltet.

Solardidactic – Solarzellen – Solarmodule – PV- Experimentiergeräte – PV –Experimentieranleitungen – Solarthermie- Experimentiergeräte  
 didaktische Konzepte – Solarberatung – Fortbildung – solare Aus- und Weiterbildung – Solarspielzeug  
 Solardidactics + solar cells + solar modules + photovoltaic experiment devices + solar toys + solar education and training

**SUNdidactics Solar Systems**

**W.R. Schanz, OstR aD, Hildesheim, Germany**

Phone: +49(0)5121 860730 Fax: +49(0)3222 3706689 Mail: info@sundidactics.de Mobile: +49(0)1757660607 Web: www.sundidactics.de

## Aufbau und Funktion einer Silizium- Solarzelle II

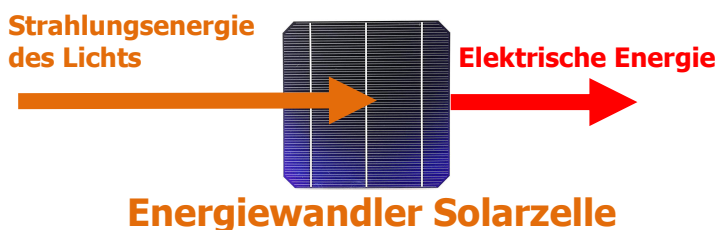
Klassenstufen 7-8 Alter 13-14 Jahre

Funktion Solarzelle II



**Silizium- Solarzellen** bestehen aus dünnen Silizium- Scheiben (Dicke nur 0,2 mm!), sie sind auf der Oberseite dunkelblau- schwarz, hier ist der Minuspol. Die Unterseite ist graue Aluminiumschicht, hier ist ihr Pluspol. Silizium ist ein häufig vorkommender Rohstoff aus Quarzsand ( $\text{SiO}_2$ ).

**Die Solarzelle ist ein Energiewandler und wandelt die Strahlungsenergie des Lichts in elektrische Energie um!**



Solarzellen funktionieren sehr gut beim natürlichen Sonnenlicht und beim Licht von Glüh- oder Halogenlampen, weil deren Licht dem Sonnenlicht ähnlich ist. Das Licht von LED- Lampen ist dem Sonnenlicht nicht ähnlich, hier funktionieren Solarzellen nur sehr schlecht!

Wie eine Batterie hat eine Solarzelle auch 2 Pole, **Plus** und **Minus**.



Der Pluspol ist auf der blauen Oberseite der Solarzelle, der Minuspol auf der grauen Unterseite.

Während eine Mignon- Batterie eine Spannung von 1,5 V besitzt, hat eine Solarzelle eine elektrische Spannung von ca. 0,60 - 0,68 V, abhängig von der Lichtintensität.

Mit den SUSE- Solarmodulen und Lernstationen kannst Du die Spannungen von Solarzellen messen.



Die hier gezeigte Solarzelle hat eine Größe von 156 mm x 156 mm, eine elektrische Spannung von 0,65 V, eine maximale Stromstärke von ca. 9 A und eine Leistung von ca. 5 W, gemessen bei strahlendem Sonnenschein. Bei bedecktem Himmel sind die Werte geringer. Auf der Vorderseite erkennt man das **Vorderseitenkontaktgitter**, es sind dünne elektrische Leiter aus Silber, sie bilden den Minuspol der Solarzelle. An die breiteren Leiter, die Busbars, lassen sich Drähte anlöten. Der Pluspol der Solarzelle ist auf der Rückseite, auch hier sind breitere Silberstreifen zum Anlöten von Drähten. Die dunkelblaue Farbe der Vorderseite ist eine hauchdünne **Antireflexschicht** aus Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), die die Reflexion von Licht an der Oberfläche der Siliziumscheibe verhindert. Eine einzige Solarzelle hat nur eine kleine Leistung, deshalb werden in der Praxis Solarmodule verwendet, diese enthalten viele Solarzellen, meist 60 Stück, die miteinander verschaltet werden und so eine Leistung von 300- 400 W erreichen. Eine hagelfeste Glasplatte deckt die Solarzellen sicher gegen Regen und Hagel ab.

Solardidactic – Solarzellen – Solarmodule – PV- Experimentiergeräte – PV –Experimentieranleitungen – Solarthermie- Experimentiergeräte  
 didaktische Konzepte – Solarberatung – Fortbildung – solare Aus- und Weiterbildung – Solarspielzeug  
 Solardidactics + solar cells + solar modules + photovoltaic experiment devices + solar toys + solar education and training

**SUNdidactics Solar Systems**

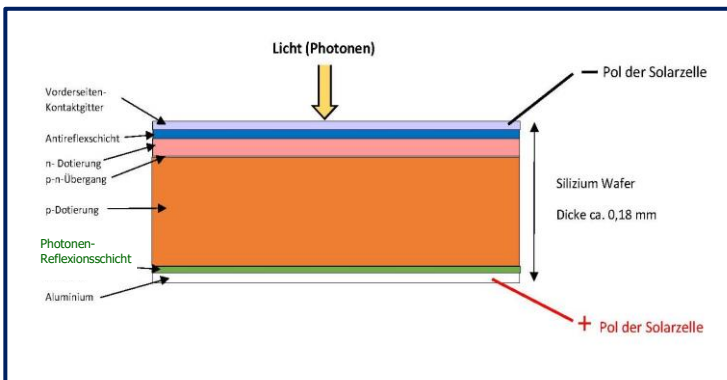
**W.R. Schanz, OStR aD, Hildesheim, Germany**

Phone: +49(0)5121 860730 Fax: +49(0)3222 3706689 Mail: info@sundidactics.de Mobile: +49(0)1757660607 Web: www.sundidactics.de



## Aufbau und Funktion einer Silizium- Solarzelle III

ab Klassenstufe 9 Alter 13+ mit Halbleiterkenntnissen



Eine Solarzelle ist eine großflächige **Silizium-Halbleiterdiode**, die **n- dotierte Schicht ist die Oberseite der Solarzelle**, hier dringt das Licht ein, die blaue Farbe entsteht durch die **durchsichtige (!)** dünne Antireflexschicht. **Die n- dotierte Seite ist der Minuspol der Solarzelle!** Die dünnen Silberleiter des Vorderseiten- Kontaktgitters dienen als elektrische Leiter zur Abnahme des Stroms. Die **p- dotierte Schicht ist die Unterseite der Solarzelle**, an ihrem unteren Rand ist eine weitere Antireflexschicht und eine dünne Aluminiumschicht mit grauer Farbe. Aufgebrachte Silberleiter dienen zum Anlöten von Drähten. Hier ist der **Pluspol der Solarzelle**. **Der innere lichtelektrische Effekt der Ladungstrennung findet am p-n-Übergang statt.** Die Oberseite des Si- Wafers ist texturiert, um Lichtreflexionen zu vermindern.

**Schematischer Aufbau einer Standard- Silizium-Industrie- Solarzelle. Moderne Konzepte, z.B. eine PERC-Solarzelle, haben einen abweichenden, komplizierteren Aufbau.** Größe 6 Zoll: 156,75 mm x 156,75 mm



Das Foto zeigt die Vorderseite einer monokristallinen 6-Zoll-Solarzelle, die dunkelblaue Farbe ist die hauchdünne (75 nm!) Antireflexschicht aus Siliziumnitrid  $Si_3N_4$ . Die weißen Striche sind elektrische Leiter aus reinem Silber, die breiteren 3 Leiter sind die Busbars zur Abnahme des Stroms, hier werden Drähte angelötet. Die Dicke der Solarzelle ist ca. 0,18 mm, den inneren Aufbau aus vielen Schichten zeigt die Grafik oben links:

Die Siliziumscheibe ist oben mit Phosphor n- dotiert, sonst p- dotiert mit Bor. Am p-n-Übergang entsteht ein inneres elektrisches Feld, hier werden die Ladungsträger, Elektronen und Löcher, getrennt. Tritt ein Lichtteilchen (Photon) von oben in die Solarzelle ein und trifft auf ein Si-Atom, schlägt es aus der Hülle ein Elektron heraus, welches wegen des inneren elektrischen Feldes nach oben zum Vorderseitenkontaktgitter wandert, das Loch dagegen wandert zur Aluminiumschicht an der Unterseite der Solarzelle. Eingedrungene Photonen, die kein Si- Atom getroffen haben, werden an der Rückseiten- Reflexionsschicht zurückgespiegelt.

### Die elektrische Spannung $U_{oc}$ einer Solarzelle

Eine Solarzelle liefert im Leerlauf (= Spannung ohne angeschlossenen Verbraucher) eine **typische Spannung von 0,60 – 0,68 V**. Der genaue Wert der **Leerlaufspannung** ist vom Material des Halbleiters, der Dotierung, der Temperatur und der Bestrahlungsstärke  $S$  abhängig, jedoch **unabhängig von der Fläche** der Solarzelle!

### 2. Die elektrische Stromstärke $I_{sc}$

Die maximale elektrische Stromstärke  $I_{sc}$  (= Kurzschlussstrom), die eine Solarzelle liefern kann, hängt von 2 Faktoren ab:

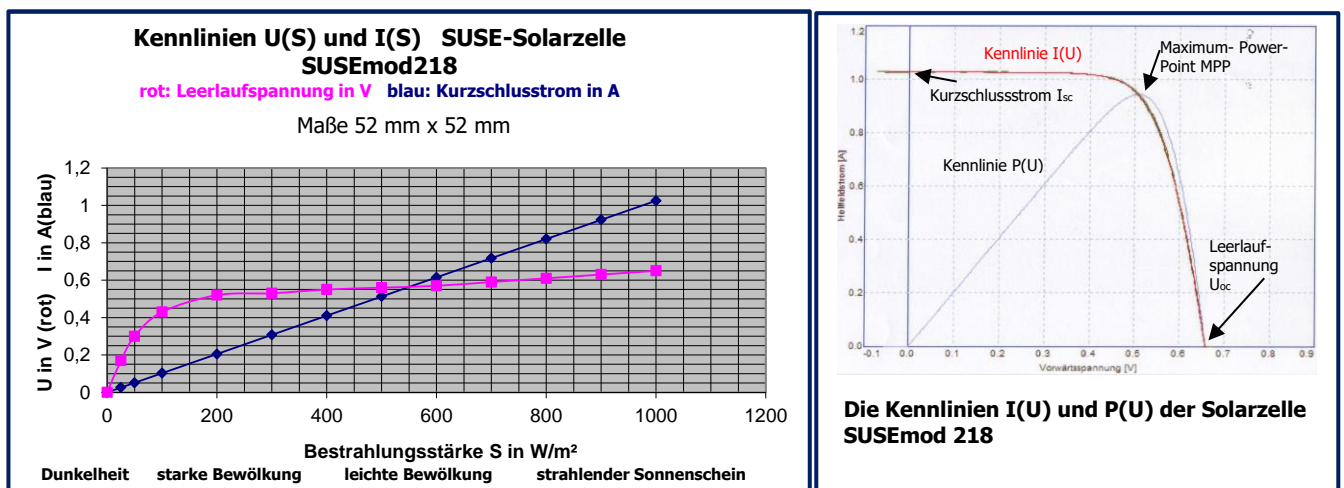
- **Fläche der Solarzelle:** Je höher die Fläche, desto höher ist  $I$  (direkt proportional)!
- **Intensität der auftreffenden Lichtstrahlung:** Je höher die Lichtintensität  $S$ , desto höher ist  $I_{sc}$  (direkt proportional)!
- **Qualität der Solarzelle** (sehr guter Solarzellen:  $I_{sc} = 38 - 42 \text{ mA/cm}^2$ )!

Die **Ursache des elektrischen Stroms** sind die pro Zeiteinheit in der Sperrschicht (p-n-Übergang) **durch einwirkende Lichtquanten entstandenen freien Elektronen**, die aufgrund eines inneren elektrischen Feldes auf die (n- dotierte) Oberseite der Solarzelle diffundieren und von dort über den äußeren Stromkreis auf die (p- dotierte) Unterseite gelangen. Dieser Prozess heißt „**innerer lichtelektrischer Effekt**“, **erklärt durch Einstein 1905**.

Wird der Solarzelle Strom entnommen, sinkt die Spannung  $U$ . Der genaue Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke wird in der  $U - I$ - Kennlinie einer Solarzelle (siehe Seite 2) dargestellt, in der Datei Niveaustufe III erklärt. Die **maximale Leistung** wird nur in einem bestimmten Punkt, d.h. bei einer ganz bestimmten Spannung und Stromstärke erreicht, dieser Punkt heißt **MPP = Maximum Power Point**, wichtig in der Praxis! Der **Wirkungsgrad einer Industrie- Solarzelle** liegt bei ca. **18 – 21 %**, d.h. nur 18– 21% des einfallenden Lichts wird in elektrische Energie umgewandelt. Die Ursachen sind physikalische Faktoren, die hier nicht näher erläutert werden können. Moderne Solarzellenkonzepte erreichen im Labor Wirkungsgrade bis zu 26% bei einer physikalischen Grenze bei Si- Solarzellen von ca. 28%.

Eine weitere Wirkungsgradsteigerung erreicht man mit Stapel- Solarzellen. Hier werden 2 Solarzellen übereinander hergestellt, die elektrisch in Reihe geschaltet sind und für verschiedenen Licht-Spektralbereiche empfindlich sind, die obere Zelle für das grün- violette Licht, die untere Zelle für gelbes, rotes und IR- Licht.

## Die Solarzellen- Kennlinien (Höheres Niveau, ab Kl. 10+)



### Die U(S)- Kennlinie

Die U(S)- Kennlinie zeigt die **Abhängigkeit der Solarzellenspannung (Leerlaufspannung  $U_{oc}$ ) von der Bestrahlungsstärke S des Lichts** (Lichtintensität). Bei Dunkelheit ist keine Spannung vorhanden, schon bei geringer Helligkeit steigt sie stark an und nähert sich dann nur noch langsam steigend dem Wert 0,63 V.

### Die I(S)- Kennlinie

Die I(S)- Kennlinie zeigt die **Abhängigkeit des Kurzschlussstroms  $I_{sc}$  von der Bestrahlungsstärke S** (Lichtintensität). Bei Dunkelheit ist kein Strom vorhanden, mit zunehmender Helligkeit steigt die Stromstärke proportional in Form einer Geraden an und erreicht bei 1000 W/m² den Maximalwert 1000 mA.

Die **I(U)- Kennlinie** zeigt den Zusammenhang zwischen dem Kurzschlussstrom und der Leerlaufspannung bei einer belasteten Solarzelle, die **Kurve P(U)** ist die Leistungskurve mit dem Punkt MPP der maximalen Leistung.

Nur mit einem Laser kann man die großen 6- Zoll- Solarzellen in kleinere Solarzellen zerteilen, die Solarzelle SUSEmod 218 der oberen Kennlinien ist der 9. Teil einer 6- Zoll- Solarzelle.

Zu Dünnschicht- Solarzellen, die einen ganz anderen Aufbau haben, gibt es ein eigenes Infoblatt.

# Handbuch zur Sonnenfängerbox SEKI Station 1

## Die Experimente der Lernstation 1 Alle Geräte 2-fach in der Sonnenfängerbox

Lernstation	Experimentiergeräte für 1 Lernstation	Messtechnik und Zubehör	Themenschwerpunkte der Experimente
Lernstation 1  Solarzelle I	2 Solarmodule SUSE CM6MS 1 Speichermodul SUSE 4.12 1 Solarmotor SUSE 4.16 1 Grundgerät SUSE 4.0 mit Halogenstrahler 120 W von Schule: 1 Overheadprojektor	1 Dig. Multimeter 8 Laborkabel je 50 cm 4mm Stecker 4x schwarz + 4x rot 1 schaltbare 3er-Tischsteckdose 1 Zollstock 1 Box mit 4x 6-Zoll-Solarzellen 1 Box mit Si- Wafer	U,I,P von Solarzellen bei verschiedener Einstrahlung Wirkungsgrad Bestrahlungsstärke Reihenschaltungen Solarmotor als Generator Solarspeicher Aufbau und Funktion von Solarzellen

### 1-4 Experimente mit den Geräten der Station 1

Experimente für 2 Lerngruppen mit je 3 Schülerinnen/Schüler.

Nachfolgend sind die Experimente mit dem Solarmodul SUSE CM6MS aufgeführt, die mit den Zusatzgeräten, Messtechnik und Zubehör durchgeführt werden können. Die betreuende Lehrkraft wählt die für die Lerngruppe passenden Experimente aus.

1. **Einsteigerexperimente mit SUSE CM6MS** Seite 18
2. **Umfangreiche Experimente mit SUSE CM6MS** Seite 21



**Photovoltaik-  
System  
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem  
Wärme von der Sonne**



Name: .....Schule.....Datum.....

**Einsteiger- Experimente  
mit dem Solarmodul SUSE CM6MS**

die ausführliche Versuchsanleitung erhältst Du über den QR- Code

**Lernstation G12**



QR Kurzanleitung DE



QR Versuchsanleitung DE



Nachdem Du das Solarmodul fertiggestellt und getestet hast, kannst Du nun damit einige Experimente zur Photovoltaik durchführen. Eine umfangreiche Versuchsanleitung mit vielen spannenden Experimenten kannst Du über die QR- Codes auf Dein Smartphone laden.

**1. Spannung, Stromstärke, Leistung durch Messungen bestimmen**

Du benötigst dazu ein Multimeter mit 2 Laborkabeln (rot + schwarz) und das Grundgerät SUSE 4.0 (Halogenstrahler 120W).

**Einstellungen am Multimeter** für die Spannungsmessung: 20V DC, schwarzes Minuskabel in Buchse com, rotes Pluskabel in Buchse V, für die Stromstärkemessung 10A DC, schwarzes Minuskabel in Buchse com, rotes Pluskabel in Buchse 10A (im Innenraum Messbereich 20 mA DC verwenden).

Ort der Messung	Spannung U in V Motor eingeschaltet	Spannung U in V Motor ausgeschaltet	Kurzschlussstrom I in A	Leistung P in W $P = U \cdot I \cdot 0,8$
Auf Glasplatte (Mitte) des Overheadprojektors				
40 cm vor Halogenstrahler 120W				
Draußen strahlender Sonnenschein				
Draußen bedeckter Himmel				
Im Innenraum Bei Raumbeleuchtung				

**Was fällt Dir auf? Notiere Deine Beobachtungen zu den Messwerten und zur Drehzahl des Motors sowie weitere Auswertungsideen hier:**

## 2. Die Bestrahlungsstärke S (Lichtintensität) des Lichts bestimmen

Du benötigst dazu ein **Multimeter im Messbereich 10A DC** mit 2 Laborkabeln (rot + schwarz), schalte den Motor für die Messungen aus! Schwarzes Minuskabel in Buchse com, rotes Pluskabel in Buchse 10A DC.

Die **Intensität des Lichts (= Bestrahlungsstärke S in W/m<sup>2</sup>)** kann durch Messung des Kurzschlussstroms bestimmt werden, da dieser direkt proportional zur Bestrahlungsstärke ist. Mit dieser Gleichung lässt sich S aus dem Kurzschlussstrom berechnen:

Ort der Messung	Kurzschlussstrom I in A	Bestrahlungsstärke S in W/m <sup>2</sup>
Auf Glasplatte (Mitte) des Overheadprojektors		
Draußen im Sonnenschein, zur Sonne ausgerichtet		
Draußen bei bedecktem Himmel, nach Süden ausgerichtet		
Draußen im Schatten		

**I in A \* 1000**

S = ----- W/m<sup>2</sup>

**1,025 A**

1,025 A ist der Kurzschlussstrom der Solarzelle bei S = 1000W/m<sup>2</sup>

**Notiere Deine Beobachtungen und Auswertungen hier:**

## 3. Reihenschaltung von Solarzellen

Du benötigst dazu ein Multimeter im Messbereich 20V DC mit 2 Laborkabeln (rot + schwarz), schalte den Motor für die Messungen an und aus! Weitere Laborkabel benötigst Du zum Verbinden mehrerer Module.

Da Solarzellen nur eine geringe Spannung von ca. 0,6 V haben, werden sie in großen Solarmodulen elektrisch in Reihe geschaltet, meist 36 oder 60 oder sogar 72 Zellen. Dadurch erhöht sich die Spannung.

Stelle 2 Solarmodule SUSE CM6MS ins Licht eines Halogenstrahlers und verbinde den Minuspol des Moduls 1 mit dem Pluspol des Moduls 2. Die Gesamtspannung kannst Du nun zwischen dem Pluspol von Modul 1 und dem Minuspol von Modul 2 messen. Trage die Werte in die Tabelle ein und erweitere die Schaltung auf 3 oder 4 Module in Reihenschaltung.

Anzahl der Module	Spannung Modul 1 in V	Spannung Modul 2 in V	Spannung Modul 3 in V	Spannung Modul 4 in V	Gesamtspannung in V
2			XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX	
3				XXXXXXXXXX	
4					

Zusätzlich kannst Du auch einen Solarmotor SUSE 4.16 an die Gesamtspannung anschließen oder ein LED- Modul SUSE 4.15 oder das Radio SUSE 4.36. Evtl. benötigst Du mehr als 4 Solarzellen in Reihenschaltung! Wenn Du Dich für die genauen technischen Daten der Solarzelle interessierst, findest Du sie über den QR- Code hier: →

**Notiere Deine Beobachtungen und Auswertungen hier:**



Mit der **ausführlichen Versuchsanleitung** (siehe QR-Code auf S.1) lassen sich viele interessante Experimente durchführen!

Mit der **ausführlichen Versuchsanleitung** (siehe QR-Code auf S.1) lassen sich viele interessante Experimente durchführen!



**Photovoltaik-System SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem Wärme von der Sonne**



**BNE**  
Bildung für Nachhaltige Entwicklung

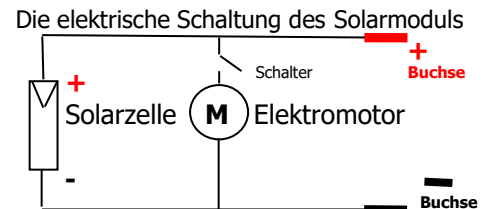
Name:.....Schule:.....Datum:.....

**Experimentieranleitung für das Solarmodul SUSE CM6MS**

**Benötigte Materialien für alle Experimente:** Solarmodul SUSE CM6MS, 1 digitales Multimeter, Laborkabel, Solar- Radio SUSE 4.36, 2 LED- Module SUSE 4.15, Handylader- Modul SUSE 4.17, 4 Solarmotoren SUSE 4.16, Halogenstrahler 120 W mit schaltbarer Tischsteckdose, Overheadprojektor, SUSE Solarfahrzeug 1 oder 4, schwarze Pappe A5, **für SEK II- Experimente:** Kennlinienmodul SUSE 4.55 + Cassy/Vernier Messtechnik  
**Gültig auch für alle weiteren SUSE- Solarmodule mit 1 Solarzelle SUSEmod218 z.B. SUSE 4.3RB oder 5.22**



- |   |          |
|---|----------|
| 1. Info und Energieumwandlung                       | Seite 1  |
| 2. Elektrische Spannung                             | Seite 2  |
| 3. Elektrische Stromstärke                          | Seite 3  |
| 4. Elektrische Leistung                             | Seite 4  |
| 5. Qualität der Solarzelle                          | Seite 4  |
| 6. Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen    | Seite 5  |
| 7. U,I in Abhängigkeit von der Fläche               | Seite 6  |
| 8. Wirkungsgradbestimmung von Solarzellen           | Seite 8  |
| 9. Messung der Bestrahlungsstärke (Lichtintensität) | Seite 8  |
| 10. Experimente mit zusätzlichen Solarmotoren       | Seite 10 |
| 11. Info zur Funktion der Solarzelle                | Seite 11 |
| 12. 26 Test- Fragen zu den Experimenten             | Seite 12 |
| 13. Technische Daten der Solarzelle                 | Seite 13 |



Das Solarmodul SUSE CM6MS

**Weitere Experimente mit Zusatzgeräten:**

- Smartphone- Ladung mit SUSE 4.17 und 15x SUSE CM6MS in Reihenschaltung
- Experimente zur Elektromobilität mit Solarfahrzeug SF4 oder SF1 und 4x SUSE CM6MS
- Anschluss von 2 LED Modulen SUSE 4.15 an 6x SUSE CM6MS in Reihenschaltung
- Radiobetrieb mit SUSE- Solarradio und 6x SUSE CM6MS in Reihenschaltung
- „Falsche“ Reihenschaltung mit 2x SUSE CM6MS

Diese Dateien erhalten Sie bei NILS- ISFH oder Sundidactics

Das **Solarmodul SUSE CM6MS** ist ein **universelles Solarmodul mit einer hochwertigen Solarzelle SUSEMod215 52mm x 52mm in einem Solarmodul** (Kunststoff- Laminat- Modul 75mm x 75mm). An die Buchsen können Laborkabel mit 4mm- Stecker angeschlossen werden, um ein Multimeter oder weitere Geräte anzuschließen, hier können die Solarzellenspannung und der Kurzschlussstrom gemessen werden. Das Solarmodul kann auch von Schülern/Auszubildenden aus einem Bausatz hergestellt werden und kann mit zahlreichen Experimenten zur Demonstration der Photovoltaik (Umwandlung von Lichtstrahlung in elektrische Energie) eingesetzt werden. Mit dem Schalter kann der Solarmotor aus- oder eingeschaltet werden.

**Als Lichtquelle für die Experimente sind möglich:**

- Sonnenlicht/Tageslicht** (strahlender Sonnenschein oder bewölkter Himmel)
- Das Licht auf der Glasplatte eines leistungsstarken **Overhead- Projektors**
- Das Licht eines Scheinwerfers** (Halogenstrahler, Baustrahler 120W)

**Elektrische und mechanische Daten der Solarzelle und des Solarmoduls:**

**Solarzelle:** 52mm x 52mm  
**Solarmodul:** 75mm x 75mm  
**Leerlaufspannung**  $U_{oc}$ : 0,65V  
**Kurzschlussstrom**  $I_{sc}$ : 1025mA  
 bei einer Einstrahlung von  $S = 1000 \text{ W/m}^2$   
 = strahlender Sonnenschein mittags im Sommer

**Ausführliche Daten auf den Seiten 13- 15**

**Didaktische und methodische Hinweise:**

In dieser Anleitung findet sich eine große Anzahl von Experimenten. Die verantwortliche Lehrkraft entscheidet bei der Vorbereitung entsprechend der zur Verfügung stehenden Zeit und dem Vorwissen für bestimmte Experimente dieser Anleitung. Wichtig ist, dass die Schüler/Auszubildenden genügend Zeit für die Experimente und für die Formulierung der Ergebnisse in den orange umrahmten Kästen haben. Die formulierten Antworten sollten im Forum vorgetragen und diskutiert werden. Beratung bei NILS/Sundidactics per email!

1. **Mit dem Solarmodul SUSE CM6MS lassen sich Energie- Umwandlungsprozesse an einem Solarmodul mit Solarzelle, Elektromotor und Propeller demonstrieren. Hierbei laufen mehrere Energieumwandlungsprozesse ab, bearbeite die nachfolgenden „Energiekästen“ und fülle sie mit einem eigenen Text aus.**

**Licht** Energieform

Eigenschaften der Energieform Licht



**Solarzelle** Energiewandler

Energie- Umwandlungsprozess in der Solarzelle



**Elektromotor** Energiewandler

Energie- Umwandlungsprozess im Elektromotor



**Propeller** Energiewandler

Energie- Umwandlungsprozess durch den Propeller

# Die Experimente mit dem Solarmodul SUSE CM6MS

Alle Experimente ohne Solarmotor- Verwendung können auch mit SUSE CM6B durchgeföhrt werden

## 2. Die elektrische Spannung der Solarzelle

### Die Leerlaufspannung $U_{oc}$

$U_{oc}$  ist die elektrische Spannung  $U$  der unbelasteten Solarzelle, es ist kein Gerät an die Solarzelle angeschlossen,  $oc = open\ circuit$ .

Der Wert der Leerlaufspannung ist vom Halbleitermaterial, der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke  $S$ ) und von der Qualität der Solarzelle abhängig.

Moderne Hochleistungs- Solarzellen aus Silizium erreichen Werte von 0,64....0,67V.

Der Wert der Spannung  $U_{oc}$  sollte im Sonnenlicht zwischen 0,60V und 0,64V liegen, bei bedecktem Himmel 0,5V - 0,6V, im Innenraum bei ca. 0,3V, unabhängig von der Fläche! Bei gleicher Bestrahlungsstärke sollten alle Solarzellen etwa die gleiche Spannung haben, der Standard-Test-Wert wäre 0,65 V. Kleine Differenzen sind Qualitätsunterschiede.

Verwende ein Multimeter im Messbereich 20V DC und schlieÙe das Voltmeter mit 2 Laborkabeln polrichtig an die beiden Buchsen der beleuchteten Solarzelle an.

Die Leerlaufspannung hängt nur von der Lichtintensität, vom Material und der Qualität der Solarzelle ab. Bei unserer Solarzelle ist das Material Silizium Si.

### Messungen zur Spannung:

Ort der Messung	Draußen bei Sonnenschein zur Sonne gerichtet oder auf OHProjektor	Draußen bei Sonnenschein im Schatten	Draußen bei bedecktem Himmel	Im beleuchteten Innenraum
Leerlaufspannung $U$ in V mit Solar-Motor				
Leerlaufspannung $U$ in V <small>Motor ausgeschaltet</small>				

## 3. Die maximale Stromstärke der Solarzelle = Kurzschlussstrom

### Der Kurzschlussstrom $I_{sc}$ der Solarzelle sc = short circuit

Im Gegensatz zu anderen Stromquellen (Batterie, Netzgerät...) darf man Solarzellen kurzschließen, der Kurzschlussstrom ist sogar eine sehr wichtige Größe bei Solarzellen. Der Strom fließt hier direkt von Minus der Solarzelle über das Amperemeter zum Pluspol der Solarzelle.

Verwende zur Stromstärkemessung ein Multimeter im Messbereich 10A DC, welches mit Laborkabeln an + und - Buchse der Solarzelle angeschlossen wird  
Nur für Messungen im Innenraum den Messbereich 20mA oder 2mA verwenden!

Der Wert des Kurzschlussstroms ist direkt proportional zur Zellenfläche und zur Lichtintensität /Bestrahlungsstärke, sowie abhängig von der Qualität. Standard-Test-Wert: Bei der Solarzelle dieses Moduls mit den MaÙen 52mm x 26mm ist die Kurzschluss- Stromstärke bei einer Lichtintensität von 1000W/m<sup>2</sup> genau **1,025A = 1025mA**.

### Weitere Messungen:

Ort der Messung	Draußen bei Sonnenschein zur Sonne gerichtet oder auf OHProjektor	Draußen bei Sonnenschein im Schatten	Draußen bei bedecktem Himmel	Im beleuchteten Innenraum
Kurzschlussstrom $I_{sc}$ in A und in mA mit Solar-Motor				
Kurzschlussstrom $I_{sc}$ in A und in mA <small>Motor ausgeschaltet</small>				

Was fällt Dir bei der Spannungs- und Stromstärkemessung auf, notiere hier Deine Beobachtungen und Erklärungen:

#### 4. Die elektrische Leistung der Solarzelle $P_E$ in W (Watt)

$$P_E = U_{oc} \times I_{sc} \times 0,8 = \dots\dots\dots W$$

Keine erneute Messung notwendig, Berechnung mit den beiden bereits bestimmten Messwerten  $U_{oc}$  und  $I_{sc}$

**Vereinfachter Ansatz:** P ist Leerlaufspannung x Kurzschlussstrom x 0,8, **P sollte also im Idealfall bei 1000 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung 0,53 W** sein. Der Faktor 0,8 erklärt sich über die Kennlinie (siehe S.14 unten) und den MPP der Solarzelle und lässt sich dort exakt bestimmen.

Weitere Berechnungen (Motor ausgeschaltet):

Ort der Messung	Draußen bei Sonnenschein zur Sonne gerichtet	Draußen bei Sonnenschein im Schatten	Draußen bei bedecktem Himmel	Im beleuchteten Innenraum
<b>Kurzschlussstrom <math>I_{sc}</math> in A</b> Werte übernehmen				
<b>Spannung <math>U_{oc}</math> in V</b> Werte übernehmen				
<b>Leistung P</b> $U_{oc} \times I_{sc} \times 0,8$ <b>in W</b>				
<b>Leistung P</b> $U_{oc} \times I_{sc} \times 0,8$ <b>in mW</b>				

#### 5. Die Qualität der Solarzelle

= Stromdichte  $j$  in mA/cm<sup>2</sup>

Sehr gut: > 40 mA/cm<sup>2</sup>  
 Gut: 32- 40 mA/cm<sup>2</sup>  
 Mittel: 24- 32 mA/cm<sup>2</sup>  
 Schlecht: < 24 mA/cm<sup>2</sup>  
 Bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m<sup>2</sup> !!

Maximal möglicher theoretischer Wert: 45 mA/cm<sup>2</sup>

Die **Stromdichte  $j$**  (in mA/cm<sup>2</sup>) gibt an, wieviel Stromstärke ein **1 cm<sup>2</sup> großes Stück der Solarzelle** produziert, je mehr, desto besser! **Dazu muss die Einstrahlung genau 1000 W/m<sup>2</sup>**

**betragen** (internationaler Standard- Wert = strahlender Sonnenschein oder OHP- Projektor), denn bei geringerer Einstrahlung  $<1000 \text{ W/m}^2$  ist die Stromdichte  $j$  natürlich auch geringer!

**Kurzschlussstrom in mA**  
 $j = \frac{\text{Kurzschlussstrom in mA}}{\text{Zellenfläche in cm}^2} = \dots \text{ mA/cm}^2$  **bei  $1000 \text{ W/m}^2$  Einstrahlung !**

**Die Stromdichte der verwendeten Zelle ist.....mA/cm<sup>2</sup>**

**Die Qualität der Solarzelle ist.....**  
 Sehr gut – gut – mittel- schlecht

**Art der Solarzelle im Solarmodul:** Bitte Zelltyp umkringeln

**monokristalline Solarzelle** – **polykristalline Solarzelle**

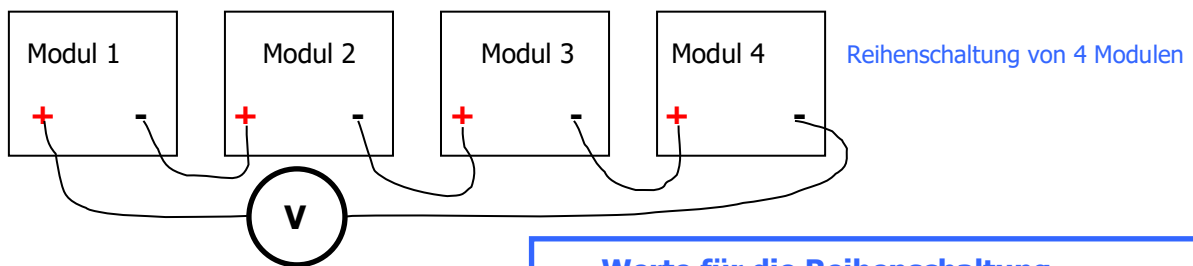
**Erkläre stichpunktartig den unterschiedlichen Aufbau dieser beiden Zelltypen (Internet)**

## 6. Die Reihenschaltung von Solarzellen

Solarzellen lassen sich in beliebiger Anzahl in Reihe schalten, um höhere Spannungen zu erreichen! In der Photovoltaik- Technik werden in den großen Solarmodulen meist 36...72 Solarzellen in Reihe geschaltet.

### Mehrere Module SUSE CM6MS in Reihenschaltung:

Lege die Module ins Sonnenlicht oder (mit der Oberseite nach unten!) auf einen Overheadprojektor und verschalte die Module in Reihe (wie in der Zeichnung dargestellt). Du kannst natürlich auch mehr als 4 Module in Reihe schalten, mit 6 Solarzellen in Reihenschaltung kannst Du schon ein 3V-Radio betreiben! Probiere es aus!



Einzelmodul:	$U_{oc}$ in V	$I_{sc}$ in A
Modul 1:.....		
Modul 2:.....		
Modul 3:.....		
Modul 4:.....		

**Werte für die Reihenschaltung von.....Modulen:**  
 $U_{ges} = \dots \text{ V}$   
 $I_{sc} = \dots \text{ A}$   
**Was fällt auf, beschreibe und erkläre!**

**Zusatzaufgabe zur Parallelschaltung:**

Solarzellen können auch parallel geschaltet werden. Erstelle eine solche Schaltung, führe Messungen durch und vergleiche/erkläre den Unterschied zur Reihenschaltung.

Warum werden in großen professionellen Solarmodulen die Solarzellen nur in Reihe geschaltet?

## 7. Leerlaufspannung $U_{oc}$ , Kurzschlussstrom $I_{sc}$ , Leistung $P$ in Abhängigkeit von der bestrahlten Fläche der Solarzelle

In der Regel wird die gesamte Fläche der Solarzelle vom Licht bestrahlt. In der Praxis kann es aber dazu kommen, dass Solarzellen in Solarmodulen auf Dächern verschattet werden, z.B. durch Schattenwurf von Schornsteinen, Häusern, Bäumen, oder durch aufgefallenes Herbstlaub etc. Dann ändern sich die elektrischen Werte der Solarzelle. Diesen Effekt wollen wir in diesem Experiment untersuchen, indem wir die Solarzelle teilweise durch schwarzen Karton oder Alufolie abdecken.

### Versuchsaufbau:

Wir stellen das Solarmodul SUSE CM6MS auf das Grundgerät SUSE 4.0, genau vor den Schraubstützen, so dass die Solarzelle zum Halogenstrahler zeigt. Diese Position soll während der Experimente unverändert bleiben, den Strahler nur zu den Experimenten anschalten, damit sich die Solarzelle nicht stark erwärmt. An die Buchsen schließen wir ein Multimeter an (Pluskabel rot, Minuskabel schwarz), der Motor wird ausgeschaltet.

### Versuchsdurchführung:

Wir messen die Leerlaufspannung  $U_{oc}$  (im Messbereich 20V DC) und den Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  (im Messbereich 10A DC), berechnen die Leistung  $P$  ( $P = 0,8 \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}$ ) und tragen die Werte in die Tabelle ein. Nun decken wir die Solarzelle mit schwarzer Pappe oder Alufolie genau zur Hälfte ab (bis zum silbernen Mittelstreifen) und messen erneut, anschließend decken wir  $\frac{3}{4}$  (= 75%) der Solarzelle ab und messen die Werte noch einmal.

Abdeckung	Leerlaufspannung $U_{oc}$ in V	Kurzschlussstrom $I_{sc}$ in A	Leistung $P$ in W
keine Abdeckung			
50% abgedeckt			
75% abgedeckt			

**Auswertung: Was fällt Dir bei den Ergebnissen auf? Notiere hier Deine Beobachtungen und Erklärungen:**

Der Wirkungsgrad gibt an, wieviel % der eingestrahlenen Lichtenergie in elektrische Energie umgewandelt wird.

**8. Wirkungsgradbestimmung einer Solarzelle**

Voraussetzung: Overheadprojektor oder Sonnenlicht mit der Bestrahlungsstärke 1000 W/m<sup>2</sup>

1. Umrechnung der Lichtleistung 1000 W/m<sup>2</sup> bzw. 0,1W/cm<sup>2</sup> auf die **wirkliche Fläche** der Solarzelle:

Die Solarzelle hat eine Fläche von 27,04 cm<sup>2</sup>, sie erhält bei 1000 W/m<sup>2</sup> eine Lichtleistung von :..... **W**

2. Die elektrische Leistung (Aufgabe 4) war bei der gemessenen Zelle **P<sub>E</sub>** =.....**W**

3. Wirkungsgrad = elektrische Leistung P<sub>E</sub> : Lichtleistung P<sub>L</sub> \* 100 = Wirkungsgrad in %

Wirkungsgrad=  $\frac{P_E}{P_L} * 100 = \dots\dots\dots\%$

Der Wirkungsgrad der verwendeten Solarzelle ist.....%

**Wirkungsgrade von Solarzellen:**

Monokristalline Zellen: 17- 25 %                      Polykristalline Zellen: 16 – 22 %

Die verwendete Solarzelle war eine.....Zelle.  
Monokristalline / polykristalline

Ihr gemessener Wirkungsgrad war:.....  
sehr gut ---gut---mittel---schlecht

**9. Messungen der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) in W/m<sup>2</sup>**

Mit der hier verwendeten kalibrierten Solarzelle kann die Lichtintensität des Lichts genau bestimmt werden, da der Kurzschlussstrom proportional zur Lichtintensität = Bestrahlungsstärke S ist.

1000 W/m<sup>2</sup> ist die Intensität der Lichtstrahlung der Sonne bei wolkenlosem Himmel im Sommer und ist internationaler Standard- Messwert für Solarzellen.

Kurzschlussstrom I<sub>sc</sub> der Solarzelle bei einer Bestrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup>

I<sub>sc</sub>= .....1,025.....A = .....1025.....mA

**Messung der Bestrahlungsstärke S von Licht (Lichtintensität) in W/m<sup>2</sup>:**

Da der Kurzschlussstrom I<sub>sc</sub> einer Solarzelle proportional zur Bestrahlungsstärke S ist, gilt:

$\frac{I_{sc}}{1000 \text{ W/m}^2}$	=	$\frac{I_{mess}}{S_x}$	oder nach S <sub>x</sub> umgestellt:	$S_x = \frac{I_{mess} \text{ (in A)} * 1000}{1,025A}$
-------------------------------------	---	------------------------	--------------------------------------	---

Dabei ist:                      I<sub>sc</sub>      in A                      der kalibrierte Kurzschlussstrom bei 1000 W/m<sup>2</sup> = **1,025 A**  
    I<sub>mess</sub>    in A                      der gemessene Kurzschlussstrom bei der Bestrahlungsstärke S<sub>x</sub>  
    S<sub>x</sub>      in W/m<sup>2</sup>                      die Bestrahlungsstärke der Lichtstrahlung im Experiment

### Messungen im Freien und bei Lichtquellen:

Lichtstrahlung	Kurzschlussstrom $I_{sc}$ in A	Bestrahlungsstärke $S_x$ in $W/m^2$
Strahlender Sonnenschein direkt zur Sonne gemessen		
Strahlender Sonnenschein im Schatten gemessen		
Bedeckter Himmel		
Sehr trübes Wetter		
Auf der Platte eines Overheadprojektors		
10 cm <b>über der Platte</b> eines Overheadprojektors		
40 cm vor Halogenlampe 35 W (Strahler SUSE 5.16)		
40 cm vor Halogenstrahler 120 W		
Im Innenraum Zum Fenster hin ausgerichtet		
Im Innenraum Zur Decke hin ausgerichtet		

**Was fällt Dir bei den Experimenten auf, erläutere hier:**

## 10. Experimente mit zusätzlichen Solarmotoren

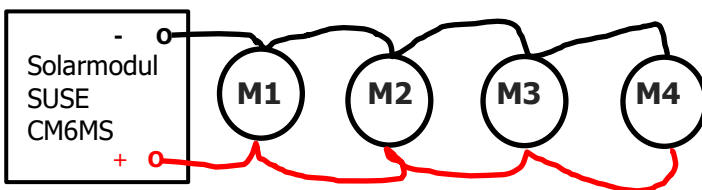


Für dieses Experiment sind 4 zusätzliche Solarmotoren SUSE 4.16 erforderlich.

Die Leistung der Solarzelle ist bei Bestrahlung mit Sonnenlicht, bei leicht bedecktem Himmel oder bei Bestrahlung mit Halogenlicht so groß, dass sie neben dem eingebauten Elektromotor auch weitere Elektromotoren antreiben kann. Diese kann man in **Parallel- oder in Reihenschaltung** an die Solarzelle schalten.

### 10.1 Parallelschaltung mit max. 4 zusätzlichen Motoren M1- M4:

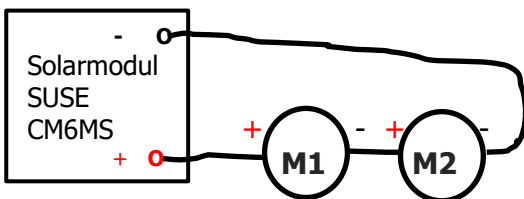
Richte die Solarzelle zur Sonne aus oder bestrahle sie mit Halogenlicht. Schalte den Solarmotor ein. Verbinde die rote Buchse des Solarmoduls mit der roten Buchse des Solarmotors und beide schwarze Buchsen mit je einem Laborkabel (rot bzw. schwarz). Teste, ob beide Motoren laufen! Ergänze einen weiteren Motor, indem in die Buchse im roten Kabel ein weiteres rotes Kabel zur roten Buchse des 2. zusätzlichen Motors und schwarz mit schwarz verbunden wird. Teste wiederum. Führe das Experiment weiter, bis 4 zusätzliche Motoren angeschlossen sind.



Parallelschaltung von 4 zusätzlichen Motoren

### 10.2 Reihenschaltung mit max. 4 zusätzlichen Motoren M1- M4:

Richte die Solarzelle zur Sonne aus oder bestrahle sie mit Halogenlicht. Schalte den Solarmotor ein. Baue folgende Schaltung auf:

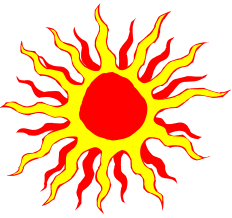


Teste diese Schaltung! Wenn sich die Motoren drehen, kannst Du M3 und M4 in Reihenschaltung ergänzen. Teste auch diese Version!

**Notiere Deine Beobachtungen und Ergebnisse hier, erkläre die Unterschiede der Ergebnisse zwischen Parallel- und Reihenschaltung.**

**Zusatzfrage** (niveauvoll) unter Verwendung der technischen Daten der Solarzelle:

Wieviele Motoren kann man im strahlenden Sonnenschein in Parallel- und Reihenschaltung anschalten, wenn jeder Motor 0,4 V/40mA benötigt?



**Photovoltaik-  
System  
SUSE**

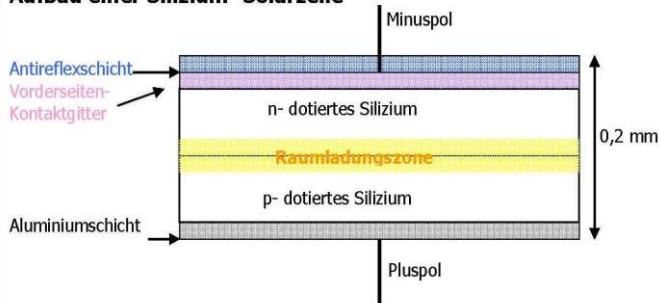
innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem  
Wärme von der Sonne**



## Aufbau und Funktion einer Silizium- Solarzelle (Niveaustufe 2- SEKI)

### Aufbau einer Silizium- Solarzelle



Eine Solarzelle ist eine großflächige Silizium- Halbleiterdiode, die **n- dotierte Schicht ist die Oberseite der Solarzelle**, hier dringt das Licht ein, die blaue Farbe entsteht durch die **durchsichtige (!) dünne Antireflexschicht. Die n- dotierte Seite ist der Minuspol der Solarzelle!** Die dünnen Silberleiter dienen als elektrische Leiter zur Abnahme des Stroms. Die **p- dotierte Schicht ist die Unterseite der Solarzelle**, sie ist normalerweise hauchdünn mit Aluminium beschichtet und sieht daher grau aus. Aufgedruckte Silberleiter dienen zum Anlöten von Drähten. Unten ist der **Pluspol der Solarzelle. Der innere lichtelektrische Effekt der Ladungstrennung findet am p-n- Übergang statt.** Weitere Erklärungen im NILS- ISFH- PV- Handbuch auf DVD.

## 11. Wie funktioniert eine Solarzelle?

### Niveaustufe II

#### 1. Elektrische Spannung U Leerlaufspannung $U_{oc}$

Eine Solarzelle liefert im Leerlauf (= Spannung ohne angeschlossenen Verbraucher) eine **typische Spannung von 0,6 – 0,65 V**. Der genaue Wert der **Leerlaufspannung  $U_{oc}$**  ist vom Material des Halbleiters, der Dotierung, der Temperatur und der Bestrahlungsstärke  $S$  abhängig, jedoch **unabhängig von der Fläche** (Größe) der Solarzelle.

#### 2. Elektrische Stromstärke I Kurzschlussstrom $I_{sc}$

Die **maximale elektrische Stromstärke  $I_{sc}$  (=Kurzschlussstrom)**, die eine Solarzelle generieren kann, hängt von 3 Faktoren ab:

- **Fläche der Solarzelle:** Je größer die Fläche, desto höher ist  $I$  ( $I_{sc}$  ist proportional zur Fläche)!
- **Intensität der auftreffenden Lichtstrahlung:** Je höher die Lichtintensität  $S$ , desto höher ist  $I$  (proportional)!
- **Qualität der Solarzelle** (sehr gute Solarzellen:  $I_{sc} = 35 - >40 \text{ mA/cm}^2!$ )

Die **Ursache des Stroms** sind die pro Zeiteinheit in der Sperrschicht (p-n-Übergang ) **durch einwirkende Lichtquanten entstandenen freien Elektronen**, die aufgrund eines inneren elektrischen Feldes auf die (n- dotierte) Oberseite der Solarzelle diffundieren und von dort über den äußeren Stromkreis auf die (p- dotierte) Unterseite gelangen. Dieser Prozess heißt **„innerer lichtelektrischer Effekt“**, erklärt durch Einstein 1905.

Wird der Solarzelle Strom entnommen, sinkt die Spannung  $U$ . Der genaue Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke wird in der  $U - I$  - Kennlinie einer Solarzelle dargestellt, in der Datei Niveaustufe III erklärt. Die **maximale Leistung** wird nur in einem bestimmten Punkt, d.h. bei einer ganz bestimmten Spannung und Stromstärke erreicht, dieser Punkt heißt **MPP = Maximum Power Point**, wichtig in der Praxis! Der **Wirkungsgrad einer Solarzelle** liegt bei ca. **16 – 22 %**, d.h. nur 16 – 22% der Energie des einfallenden Lichts wird in elektrische Energie umgewandelt.

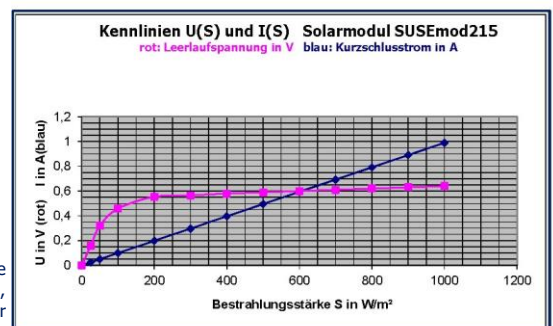


**Rechts:** Die  $U(S)$ - Kennlinie (rot) und die  $I(S)$ - Kennlinie (blau) der SUSE- Solarzelle SUSEmod4.

Die Bestrahlungsstärke  $S$  ist die Lichtintensität in Watt pro  $\text{m}^2$ , 0 bedeutet absolute Dunkelheit, 1000 bedeutet strahlender Sonnenschein bei tiefblauem Himmel im Sommerhalbjahr.

**Oben links:** Die **Oberseite** der SUSE- Solarzelle 52x52 mm mit einer Dicke von ca. 0,2 mm. Die blaue Färbung ist die (durchsichtige!) Antireflexschicht, die hellen Linien (reines Silber!) sind elektrische Leiter, das Vorderseitenkontaktgitter ist der Minuspol der Solarzelle. Am breiten Streifen können Zellverbinder oder Kabel angelötet werden. Unter der blauen Schicht erkennt man die Silizium – Kristalle.

**Oben rechts:** Die **Unterseite** der SUSE- Solarzelle 52x52 mm. Die graue Schicht ist die metallische Rückseite, reines Aluminium, der Pluspol der Solarzelle. Da Aluminium nicht gelötet werden kann, ist ein Silberstreifen zum Anlöten von Zellverbindern/Anschlusskabeln aufgebracht.



**Einfach**  
**Mittel**  
**Niveaufull**

## 25 Fragen zum Solarmodul und zu den Experimenten

1. Aus welchem Material bestehen Solarzellen?
2. Welche Energieumwandlung findet in einer Solarzelle statt?
3. Warum sind Solarzellen auf der Vorderseite blau und auf der Rückseite grau?
4. Was bedeuten die vielen dünnen Linien auf der Vorderseite der Solarzelle?
5. Wo sind die elektrischen Pole der Solarzelle?
6. Wie groß ist die elektrische Spannung der Solarzelle SUSEmod215 bei Bestrahlung mit Sonnenlicht bei strahlendem Sonnenschein? ( $S = 1000 \text{ W/m}^2$ ) oder bei bedecktem Himmel ( $S = 200 \text{ W/m}^2$ )?
7. Um eine größere Spannung zu erhalten, schaltet man 8 Solarzellen in Reihenschaltung. Zeichne diese Schaltung und gib die Spannung an, wenn diese Reihenschaltung von strahlendem Sonnenschein bestrahlt wird.
8. Wie dick ist eine Solarzelle (Angabe in mm und in  $\mu\text{m}$ )?
9. Was versteht man unter „Kurzschlussstrom“? Warum darf man eine Solarzelle kurzschließen, einen Akku dagegen niemals?
10. Wie kann man durch Messungen die Qualität einer Solarzelle bestimmen?
11. Wie kann man mit der Solarzelle des Solarmoduls SUSE CM6MS die Lichtintensität (= Bestrahlungsstärke  $S$ ) bestimmen?
12. Bei grauem, bewölkten Himmel messen Sie mit SUSE CM6MS einen Kurzschlussstrom von  $I = 50 \text{ mA}$ . Wie groß ist die Lichtintensität (Bestrahlungsstärke) des Tageslichts?
13. Wie groß ist der Wirkungsgrad der Solarzelle SUSEmod215 ?
14. Eine große, quadratische 6-Zoll-Solarzelle (6 Zoll = 156 mm) hat im strahlenden Sonnenschein eine Leerlaufspannung von 0,62 V und einen Kurzschlussstrom von 9,0 A. Nun wird sie mit dem Laser in 9 gleiche Quadrate mit einer Kantenlänge von 52 mm geschnitten. Wie groß sind Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom einer kleinen Solarzelle?
15. Eine ganze Schulklasse mit 30 Schülern verschaltet ihre Module CM6MS in einer Reihenschaltung und stellt diese in den strahlenden Sonnenschein. Wie groß sind Spannung und Kurzschlussstrom der Reihenschaltung?
16. Sie wollen mit den selbstgebauten Solarmodulen ein Smartphone laden. Dieses Gerät benötigt eine Ladespannung von 5 V. Wie müssen Sie vorgehen, zeichnen Sie eine Schaltung und erklären Sie die Methode!
17. Wie groß sind Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom und elektrische Leistung der Solarzelle SUSEmod215 bei bewölktem Himmel mit  $S = 500 \text{ W/m}^2$ ?
18. Quadratische Solarzellen werden heute im Maß 6 Zoll hergestellt. Wie groß ist die Seitenlänge in mm?
19. 10 gleiche Solarzellen werden parallel geschaltet. Welche Wirkung hat diese Schaltung?
20. Welches Element wird häufig zur n-Dotierung, welches zur p-Dotierung verwendet?
21. Eine Solarzelle in einem Solarmodul auf einem Dach wird durch ein aufgefallenes Blatt zu 70% abgedeckt. Wie wirkt sich das auf ihre Spannung/Stromstärke/Leistung aus?
22. Die Solarzelle von Aufgabe 21 ist in Reihenschaltung mit 59 weiteren Solarzellen verbunden. Wie wirkt sich die 70%- Abdeckung auf die weiteren Solarzellen aus?
23. Von welchen Faktoren hängt die Größe des Kurzschlussstroms einer Solarzelle ab?
24. Von welchen Faktoren hängt die Leerlaufspannung einer Solarzelle ab?
25. Wenn sich Solarzellen auf einem Dach im Sommer auf  $50^\circ\text{C}$  erwärmen, welche Folgen hat das für  $U$ ,  $I$ ,  $P$ ?

# SUSEmod218- ein leistungsstarkes, hocheffizientes robustes Solarmodul



## Das Solarmodul SUSEmod218

Im Innern erkennt man die mit Epoxidharz-Resin beschichtete monokristalline Si-Solarzelle, links ein quadratisches Element, rechts ein Eckstück mit abgeschrägter Ecke, charakteristisch für Monokristalline Solarzellen.

Modulmaße: 75 x 75 mm

Solarzellenmaße: 52 x 52 mm

Das neu konzipierte **Sundidactics Solarmodul SUSEmod218** ist die Weiterentwicklung des bisher verwendeten Moduls SUSEmod215. Das Solarmodul **SUSEmod218** enthält eine monokristalline Hochleistungssolarzelle der Abmessungen 52mm x 52mm x 0,18mm. Die Solarzelle ist bruchsicher eingebettet in ein Kunststoffplättchen der Größe 75 x 75 mm. Die Oberseite über der Solarzelle ist hochtransparent und mit Kunststoff vergossen Material: Epoxid/Resin. Auf der Rückseite sind 2 Lötkontakte zum Anlöten der Plus- und Minusleiter (Schalt draht). Das Solarmodul kann rückseitig mit doppelseitigem Klebeband oder mit Klebstoff auf glatte Oberflächen aufgeklebt werden.

**Modul:** Kunststoffträger quadratisch 75 x 75 x 2,6 mm mit hochtransparenter Oberfläche, sehr robust.

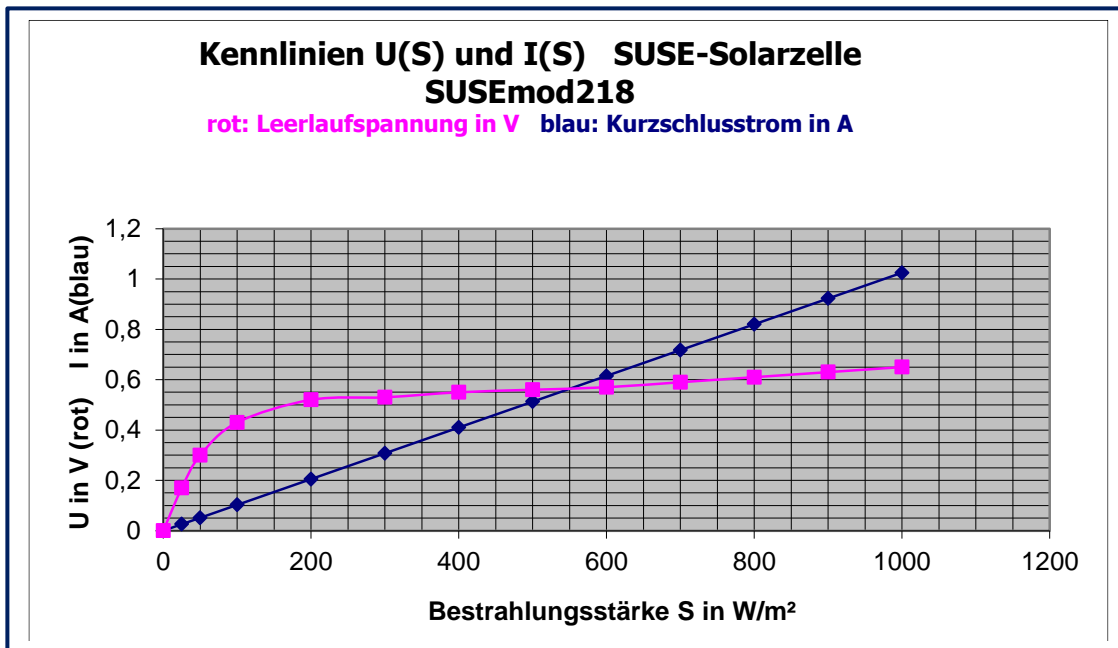
**Solarzelle:** Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

## Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup>, T = 25°C, AM = 1,5 Toleranz 2 %

Physikalische Größe	Symbol	Zahlenwert	Physikalische Einheit	Bemerkungen
Maße der Solarzelle	s	52 x 52 x 0,18	mm	Quadratische Zelle, 1/9 6-Zoll-Zelle
Fläche	A	27,04	cm <sup>2</sup>	1/9 einer 6 Zoll Solarzelle
Leerlaufspannung	U <sub>oc</sub>	0,656	V	Typisch für Silizium
Kurzschlussstrom	I <sub>sc</sub>	1,025	A	Proportional zur Lichtintensität S
Spannung im MPP	U <sub>MPP</sub>	0,507	V	Spannung im (MPP) <small>Maximum Power Point</small>
Kurzschlussstrom im MPP	I <sub>MPP</sub>	0,942	A	Kurzschlussstromstärke im MPP
Elektrische Leistung	P	0,477	W	Bei S = 1000 W/m <sup>2</sup> , AM 1,5, 25°C
Wirkungsgrad	η	19,1	%	Qualitätsmerkmal
Füllfaktor	FF	71	%	FF ist ein Qualitätsmerkmal
Stromdichte	j	38,15	mA/cm <sup>2</sup>	j ist ein Qualitätsmerkmal
Temperaturverhalten der Leerlaufspannung U <sub>oc</sub>	ΔU <sub>oc</sub>	- 0,36	% /K	Die Spannung mindert sich bei Erwärmung um 0,36% pro 1K
Temperaturverhalten des Kurzschlussstroms I <sub>sc</sub>	ΔI <sub>sc</sub>	+ 0,06	% /K	Der Kurzschlussstrom vergrößert sich um 0,06 % pro 1K
Serieller Widerstand	R <sub>ser</sub>	0,097	Ω	Serieller Widerstand der Solarzelle Widerstand des Si und der Leiter
Shuntwiderstand	R <sub>shunt</sub>	64,82	Ω	Parallelwiderstand der Solarzelle durch interne Kurzschlüsse im Si

## Die Kennlinien der Solarzelle im Modul SUSEmod218

1. **Abhängigkeit von Leerlaufspannung  $U_{oc}$  und Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke  $S$  in  $W/m^2$ )**

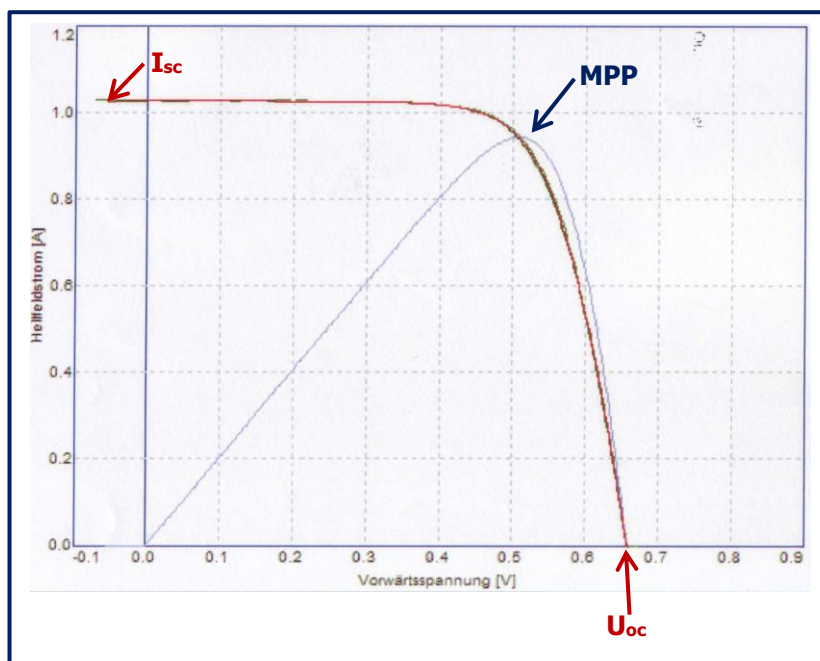


Die **Leerlaufspannung  $U_{oc}$**  (e- Funktion!) ist 0 bei totaler Dunkelheit, erhöht sich stark bei niedrigen Bestrahlungsstärken und wächst dann nur noch langsam bis zum Maximalwert 0,65 V bei  $1000 W/m^2$  (strahlender Sonnenschein bei blauem Himmel, Solarzelle zur Sonne hin ausgerichtet).

Der **Kurzschlussstrom  $I_{sc}$**  ist eine Ursprungsgerade und wächst linear von 0 bei totaler Dunkelheit auf  $1,025 A$  bei  $1000 W/m^2$ .

2. **Die I(U) und die P(U) - Kennlinien der Solarzelle SUSEmod218 bei  $S = 1000 W/m^2$ ,  $T = 25^\circ C$ , AM 1,5**

aufgenommen im Kennlinienlabor des ISFH



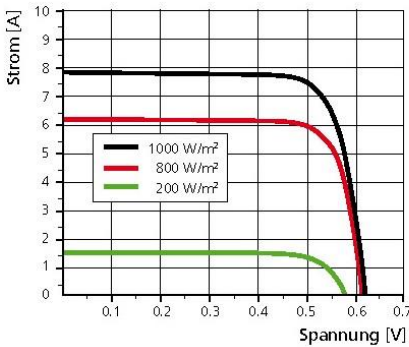
Die **I-U-Kennlinie** zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von  $1000 W/m^2$  und einer Temperatur von  $25^\circ C$ . Der Schnittpunkt mit der x- Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung  $U_{oc}$ , der Schnittpunkt mit der y- Achse (I- Achse) ist der Kurzschlussstrom  $I_{sc}$ .  
 Die **P-U-Kennlinie** ist die Leistungskurve, ihr Maximum ist der **Maximum- Power- Point MPP** der Solarzelle. Das ist Punkt der maximalen Leistungsabgabe der Solarzelle.

Mit dem **Photovoltaik- Messmodul SUSE 5.15** können diese Kurven experimentell aufgenommen werden.

**3. Weitere Daten** (für die ganze Solarzelle 156 x 156 mm!), für die Solarzelle 52x 52mm im Modul SUSEmod218 muss die Stromstärke bei 3.1 und 3.3 durch 9 geteilt werden!

**3.1 Intensitätsabhängigkeit**

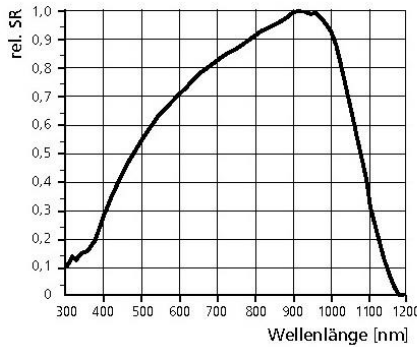
IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

**3.2 Spektrale Empfindlichkeit**

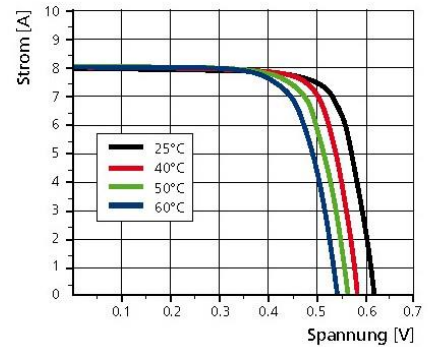
Spektrale Empfindlichkeit



Kennlinie der spektralen Empfindlichkeit.

**3.3 Temperaturabhängigkeit**

IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Temperaturen.

Der **linke Graph 3.1** zeigt die **Intensitätsabhängigkeit** der **I(U)- Kennlinien** in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke S des eingestrahelten Lichts. (1000 W/m<sup>2</sup> entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosen Himmel, 0 W/m<sup>2</sup> ist absolute Dunkelheit).

Der **mittlere Graph 3.2** zeigt die **spektrale Empfindlichkeit** in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts, die maximale Empfindlichkeit liegt bei ca. 950 nm im nahen Infrarot. Die Ursache ist der Bandabstand von Silizium bei ca. 1,1 eV, der dazu führt, dass Lichtquanten im Bereich 950 nm die genau passende Quantenenergie haben und optimal für den inneren lichtelektrischen Effekt geeignet sind. Für Licht kürzerer Wellenlänge ist die Quantenenergie zu hoch, der nicht nutzbare überschüssige Teil der Quantenenergie wird über kinetische Energie der freigesetzten Elektronen als thermische Energie in das Kristallgitter abgegeben, was zu Verlusten führt. Daraus ergibt sich, dass für Experimente mit Si – Solarzellen Glühlampen- oder Halogenlampenlicht besonders gut geeignet ist, da sie hohe Anteile IR- Licht haben. Weißes LED- Licht ist weniger geeignet, da es kaum rotes bzw. IR- Licht enthält.

Der **rechte Graph 3.3** zeigt die **I(U)- Kennlinie** in **Abhängigkeit von der Temperatur**, man erkennt, dass die Leerlaufspannung sinkt, wenn die Temperatur steigt, der Kurzschlussstrom steigt nur sehr gering bei Temperaturerhöhung (j ist die Stromdichte = Kurzschlussstrom in mA pro cm<sup>2</sup> Zellenfläche). Das bedeutet auch, dass die elektrische Leistung P der Solarzelle bei Temperaturerhöhung sinkt.

Die Leerlaufspannung  $U_{oc}$  einer Solarzelle: 
$$U_{oc} = \frac{kT}{e} * \ln \left( 1 + \frac{I_{sc}}{I_s} \right)$$

Kurzschlussstrom einer Solarzelle:  $I_{sc} = c * S$  c = const.

c ist abhängig von der Fläche und der Qualität der Solarzelle und kann experimentell Bestimmt werden.

<p><math>U_{oc}</math> = Leerlaufspannung in V  <math>k</math> = Boltzmann- Konstante in J/K  <math>T</math> = absolute Temperatur in K  <math>e</math> = elektrische Elementarladung in As  <math>I_{sc}</math> = Kurzschlussstrom in A  <math>I_s</math> = Sättigungsstrom in Sperrrichtung (Dunkelstrom) in A  <math>S</math> = Bestrahlungsstärke S in W/m<sup>2</sup></p>
--