

Handbuch zur Sonnenfängerbox SEKI Station 2

Das Gerätesystem der Lernstation 2

Alle Geräte 2-fach in der Sonnenfängerbox

Lernstation	Experimentiergeräte für 1 Lernstation	Messtechnik und Zubehör für 1 Lernstation	Themen der Experimente
Lernstation 2 Solarzelle II 2	1 Solarmodul SUSE 4.33 1 Speichermodul SUSE 4.12 5 Solarmotoren SUSE 4.16 von Schule: 1 Overheadprojektor zum Experimentieren auf der Glasplatte von Schule: 1 Overheadprojektor zum Experimentieren auf der Glasplatte von Schule: 1 Halogenstrahler 120W oder Rotlichtlampe	1 Dig. Multimeter 10 Laborkabel mit 4mm Stecker 5x schwarz + 5x rot 1 Zollstock 2m 1 Handbuch in pdf in Box Station 1	U,I,P von Solarzellen bei verschiedener Einstrahlung Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen und von Motoren Speicherung von elektrischer Energie in Superkondensator

Gliederung Handbuch Station 2:

Nr.	Inhalt	Rote Seitenzahlen
2-1	Basisinfo mit didaktischen und methodischen Hinweisen	1-2
2-2	Gerätedateien mit technischen Daten und Sicherheitshinweisen	3-12
2-3	Solardidaktische Grundlagen zu Solarstrahlung, Solarzelle, Solarmodul Infodateien und Arbeitsblätter	13-20
2-4	Experimente zur Solarzelle mit SUSE 4.33,4.16,4.12 und Zusatzgeräten	21-35

2-1 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.

Auch die Mobilität erlebt einen großen Wandel vom Verbrennungsmotor, Benzin oder Diesel hin zum Elektromotor als Antriebsquelle. Fahren mit einem E- Auto ist energetisch nur sinnvoll und nur dann umweltfreundlich und nachhaltig, wenn die elektrische Energie zum Laden der Akkus aus erneuerbaren Energiequellen stammt.

Ein E- Auto, welches mit Strom aus einem Kohlekraftwerk getankt wird, erzeugt zwar selbst keine Abgase, dafür entstehen die Abgase beim Kohlekraftwerk, nicht nachhaltig, nicht umweltfreundlich!

In den großen Solarmodulen auf Dächern oder im Freiland (Leistung 300....500 W) werden die Solarzellen (meist 60 Solarzellen) in Reihenschaltungen betrieben, diese Technik studieren wir in Lernstation 2.

Mit den Experimenten der Station 2 experimentieren wir mit dem Solarmodul **SUSE 4.33 mit 3 Solarzellen**, die wir mit Verbindungssteckern in Reihe oder mit Laborkabeln parallel schalten können. Weiterhin können wir bis zu **5 Solarmotoren SUSE 4.16** entweder in Reihe oder parallel an das Solarmodul SUSE 4.33 schalten und hierbei die physikalischen Gesetzmäßigkeiten entdecken.

Mit dem **Speichermodul SUSE 4.12** können wir die mit dem Solarmodul erzeugte elektrische Energie in einem Superkondensator (2x 5F in Reihenschaltung) speichern und wieder an einen oder mehrere Solarmotoren als „Verbraucher“ abgeben.

Die Experimente können wir draußen im natürlichen Tageslicht durchführen oder im Fachraum mit einem Overheadprojektor als Lichtquelle (Das Solarmodul wird mit den Solarzellen nach unten auf die Glasplatte gelegt, bitte darauf achten, dass alle 3 Solarzellen bestrahlt werden. Alternativ können wir das Solarmodul SUSE 4.33 mit einem Halogenstrahler 120 W oder einer Rotlichtlampe im Abstand von ca. 40 cm bestrahlen.

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.

Handbuch zur Sonnenfängerbox SEKI Station 2

2-2 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 2

Alle Geräte 2-fach in der Sonnenfängerbox

Lernstation 2 Experimentiergeräte	Lernstation 2 Messtechnik + Zubehör	Themen der Experimente
1 Solarmodul SUSE 4.33 1 Speichermodule SUSE 4.12 5 Solarmotoren SUSE 4.16 von Schule: 1 Overheadprojektor zum Experimentieren auf der Glasplatte von Schule: 1 Overheadprojektor zum Experimentieren auf der Glasplatte von Schule: 1 Halogenstrahler 120W oder der Rotlichtlampe	1 Dig. Multimeter 10 Laborkabel mit 4mm Stecker 5x schwarz + 5x rot 1 Zollstock 1 Handbuch in pdf	U,I,P von Solarzellen bei verschiedener Einstrahlung Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen und von Motoren Speicherung von elektrischer Energie in Superkondensator

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, Sicherheitsbestimmungen vorgeben!**
- Der Zollstock dient zum Messen des Abstands zwischen Lichtquelle und Solarzelle, bitte 40cm Abstand nicht unterschreiten!



**Photovoltaik-
System
SUSE**

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung



Das Solarmodul SUSE 4.33



Solarmodul 1,95 V/ 1025 mA mit 3 Solarzellen in Reihenschaltung mit Verbindungssteckern
Besonders geeignet für den schülerzentrierten experimentellen Unterrichtseinsatz in den Klassenstufen 5-13



Das nebenstehende Foto zeigt das Solarmodul **SUSE 4.33** auf einem transparenten Plexiglasträger.

Im Bild wird die Modulspannung 1,76 V (= Summenspannung der 3 Solarzellen) an einem leicht bedeckten Tag gemessen.

Die Reihenschaltung der 3 Solarzellen mit den roten Verbindungssteckern mit Messbuchse auf der Rückseite des Plexiglasträgers ist gut zu erkennen, für Experimente mit 1 oder 2 Zellen oder für Parallelschaltungen lassen sich die Stecker leicht herausziehen.

Das Gerät ist auf einem Plexiglasträger 400 x 100 x 5 mm aufgebaut und um 75° abgewinkelt.

Dadurch lässt sich das Gerät im Freien für eine Sommerposition (Sonne steht steil) und eine Winterposition aufstellen (Sonne steht tief am Himmel).



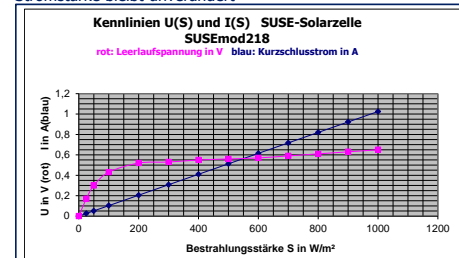
Das Solarmodul **SUSE 4.33V** ist ein hochwertiges **1,95 V/ 1,025 A/ 1,5 W- Solarmodul** mit 3 Solarzellen, die mit 2 Verbindungssteckern in steckbarer Reihenschaltung verbunden sind.

Werden die Stecker gezogen können auch Messungen an Einzelzellen oder an Parallelschaltungen durchgeführt werden. Das Modul liefert bei 1000 W/m² Einstrahlung und 25°C eine **Leerlaufspannung von 1,95 V** und eine **Kurzschlussstromstärke von 1025 mA** bei S = 1000 W/m², AM 1,5 und T = 25°C. Die 3 Solarzellen haben jeweils einen individuellen + und - Anschluss (rote bzw. schwarze Buchse). Die Verbindungsstecker haben ebenfalls Messbuchsen für 4-mm-Laborstecker zur einfachen Messung bei Reihenschaltungen.

Mit diesem Modul können elektrische Geräte (Radio...) betrieben werden, die 1,5 V Spannung benötigen. Die Module können zur Spannungserhöhung mit weiteren Modulen beliebig miteinander in Reihe geschaltet werden. Mit der umfangreichen Experimentieranleitung lassen sich eine Vielzahl von Experimenten zur Solarzelle und Photovoltaik- Systemtechnik durchführen.

Kennlinien einer Solarzelle im Modul SUSE 4.33

In der Reihenschaltung addieren sich die Spannungen, die Stromstärke bleibt unverändert



Die **Leerlaufspannung** (e- Funktion!) ist 0 bei totaler Dunkelheit, erhöht sich stark bei niedrigen Bestrahlungsstärken und wächst dann nur noch langsam bis zum Maximalwert 0,64 V bei 1000 W/m² (strahlender Sonnenschein bei blauem Himmel im Sommer, Solarzelle zur Sonne hin ausgerichtet).

Der **Kurzschlussstrom** ist eine Ursprungsgerade und wächst linear von 0 bei totaler Dunkelheit auf 1,025 A bei S = 1000 W/m² (strahlender Sonnenschein im Sommer).

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 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

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!)

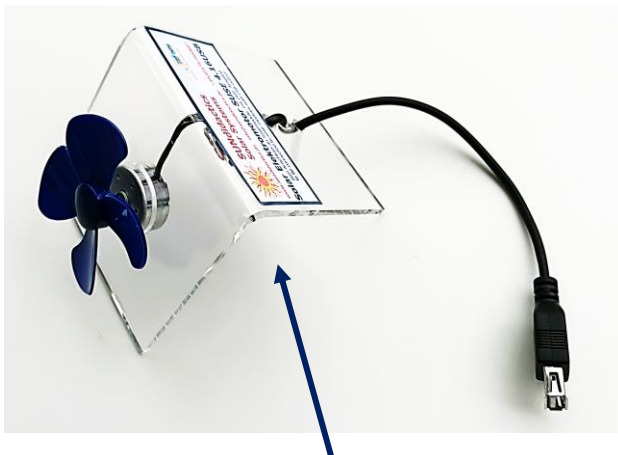
Schließt man 2 Motoren durch Laborkabelverbindung zusammen und pustet auf den Propellers des 1. Motors, dann dreht sich der 2. Motor durch die im 1. Motor als Generator erzeugte elektrische Energie, je heftiger man pustet, desto schneller dreht sich der 2. Motor.

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: 0,25,0 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.

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 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

Das Solar- Speicher- Modul SUSE 4.12/4.12USB

SUSE 4.12/4.12USB



Speichermodule mit 2 Superkondensatoren 5F in Reihenschaltung
zum Speichern von elektrischer Energie aus Solarzellen oder Solarmodulen.
Maximale Spannung U = 5,4 V DC Maximale Speicherenergie 36,45 J bei 2x 5F
Maximale Speicherkapazität 13,5 As = 3,75 mAh

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

Das Speichermodule **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 5,4 V**, die dabei **maximal gespeicherte Energie beträgt bei 5 F 36,45 J** (nach der Gleichung für die in einem Kondensator gespeicherte Energie $W = \frac{1}{2} CU^2$)

Es darf keine höhere Spannung als 5,4 V angelegt werden, sonst werden die Superkondensatoren zerstört.

Für einen Betrieb bei höheren Spannungen können aber mehrere Speichermodule in Reihe geschaltet werden, 2 Module = 10,8 V max., 3 Module = 16,2 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 Speichermodule 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 Schilddürgern) 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 Speichermodule 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 Speichermodule SUSE 4.12USB



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 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

SUSEmod218- ein leistungsstarkes + hocheffizientes + robustes Solarmodul



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 0,19mm. 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.

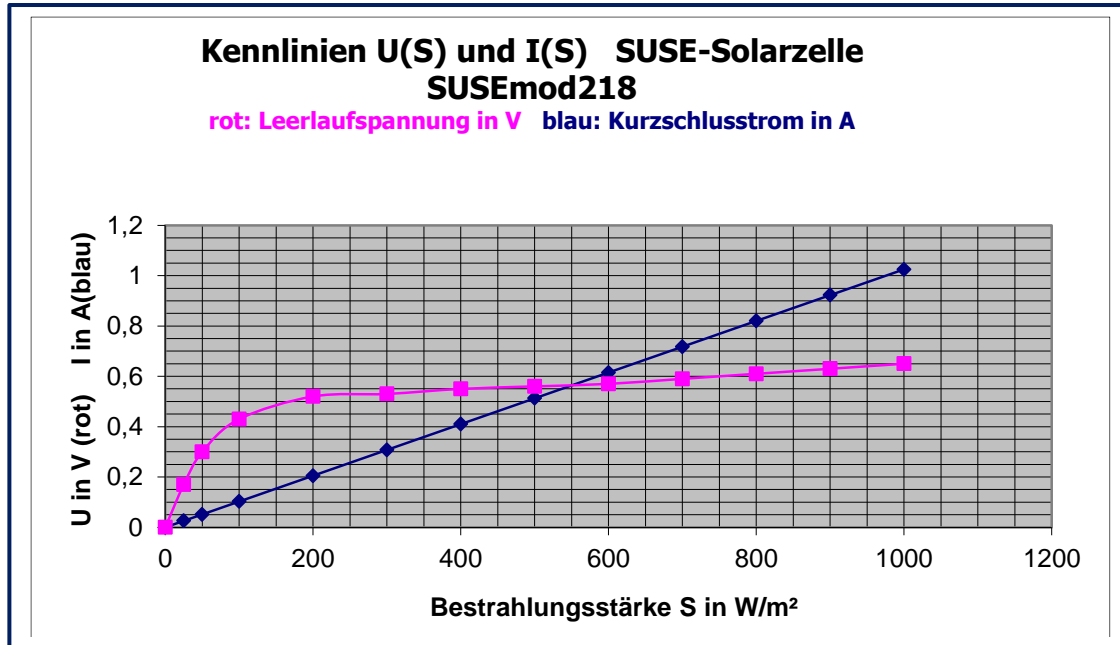
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN- Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung. Dicke der Zelle 190 µm

Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/m², 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 ²	1/9 einer 6 Zoll Solarzelle
Leerlaufspannung	U _{oc}	0,656	V	Typisch für Silizium
Kurzschlussstrom	I _{sc}	1,025	A	Proportional zur Lichtintensität S
Spannung im MPP	U _{MPP}	0,507	V	Spannung im (MPP) Maximum Power Point
Kurzschlussstrom im MPP	I _{MPP}	0,942	A	Kurzschlussstromstärke im MPP
Elektrische Leistung	P	0,477	W	Bei S = 1000 W/m ² , AM 1,5, 25°C
Wirkungsgrad	η	19,1	%	Qualitätsmerkmal
Füllfaktor	FF	71	%	FF ist ein Qualitätsmerkmal
Stromdichte	j	38,15	mA/cm ²	j ist ein Qualitätsmerkmal
Temperaturverhalten der Leerlaufspannung U _{oc}	ΔU _{oc}	- 0,34	% /K	Die Spannung mindert sich bei Erwärmung um 0,34% pro 1K
Temperaturverhalten des Kurzschlussstroms I _{sc}	ΔI _{sc}	+ 0,03	% /K	Der Kurzschlussstrom vergrößert sich um 0,03 % pro 1K
Temperaturverhalten der Leistung	ΔP _{max}	+ 0,43	% /K	Der Leistung verringert sich um -0,43 % pro 1K
Serieller Widerstand	R _{ser}	0,097	Ω	Serieller Widerstand der Solarzelle Widerstand des Si und der Leiter
Shuntwiderstand	R _{shunt}	64,82	Ω	Parallelwiderstand der Solarzelle durch interne Kurzschlüsse im Si

Die Kennlinien der Solarzelle im Modul SUSEmod218

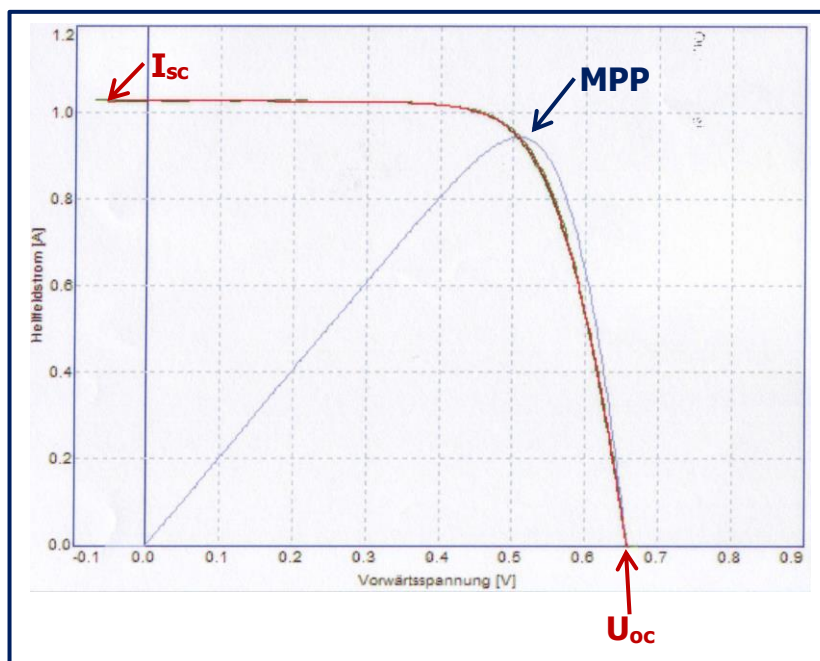
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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



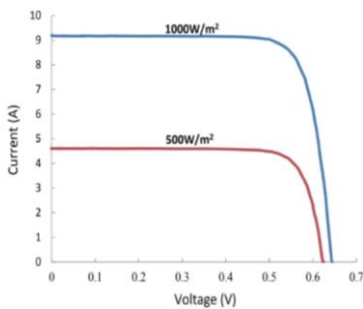
Die **$I-U$ -Kennlinie** zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 und einer Temperatur von $25^\circ C$. Der Schnittpunkt mit der x- Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung U_{oc} , 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**

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 Curve

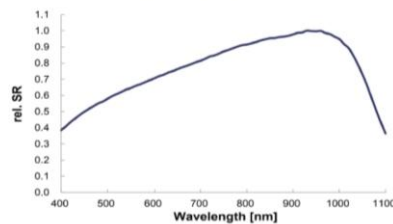


IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

Spektrale Empfindlichkeit

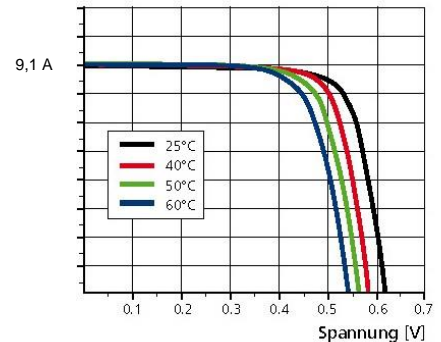
Spectral Response(SR)



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 eingestrahlten Lichts. (1000 W/m² entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosen Himmel, 0 W/m² 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 cm² 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: $I_{sc} = c * S$ $c = \text{const.}$

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

U_{oc} = Leerlaufspannung in V
 k = Boltzmann- Konstante in J/K
 T = absolute Temperatur in K
 e = elektrische Elementarladung in As
 I_{sc} = Kurzschlussstrom in A
 I_s = Sättigungsstrom in Sperrrichtung (Dunkelstrom) in A
 S = Bestrahlungsstärke S in W/m²



SUNdidactics

**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 A830L in der Sonnenfängerbox SEKI-2023 Anwendung und Sicherheitsvorschriften!

Multimeter A830L

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

Bitte beachten Sie die beigefügte Bedienungsanleitung des Herstellers!

Die meisten Messungen werden mit folgenden Messbereichen durchgeführt:

Spannung: 20V DC (oder 200V DC bei Solarmodulen mit 36 Solarzellen, ab 10W aufwärts)

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

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

Messungen mit den Laborkabeln mit Bananenstecker durchführen!

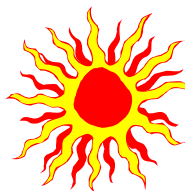
Vor dem Bereichswchsel Kabel aus Buchsen entfernen, sonst könnten interne Sicherungen durchbrennen!!



Sicherheitsvorschriften, unbedingt beachten!

- **Gerät erst nach Einweisung durch Lehrkraft verwenden**
- **Messungen nur mit Laborkabeln durchführen**
- **Multimeter und Laborkabel nur für die solartechnischen Experimente der Sonnenfängerbox verwenden!**
- **Laborkabel niemals in die Steckdose stecken, Lebensgefahr!!**
- **Die beigefügten Messkabel mit Messspitzen werden nicht benötigt, nicht an Schülerinnen/Schüler ausgeben, Verletzungsgefahr durch die Spitzen!**

Zum Einlegen der 9V- Batterie den Batteriekasten auf der Rückseite mit Kreuzschlitzschraubendreher öffnen und Batterie 9V polrichtig einlegen, Batteriekasten wieder schließen und zuschrauben!



SUNdidactics

**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 oder 1 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!!**

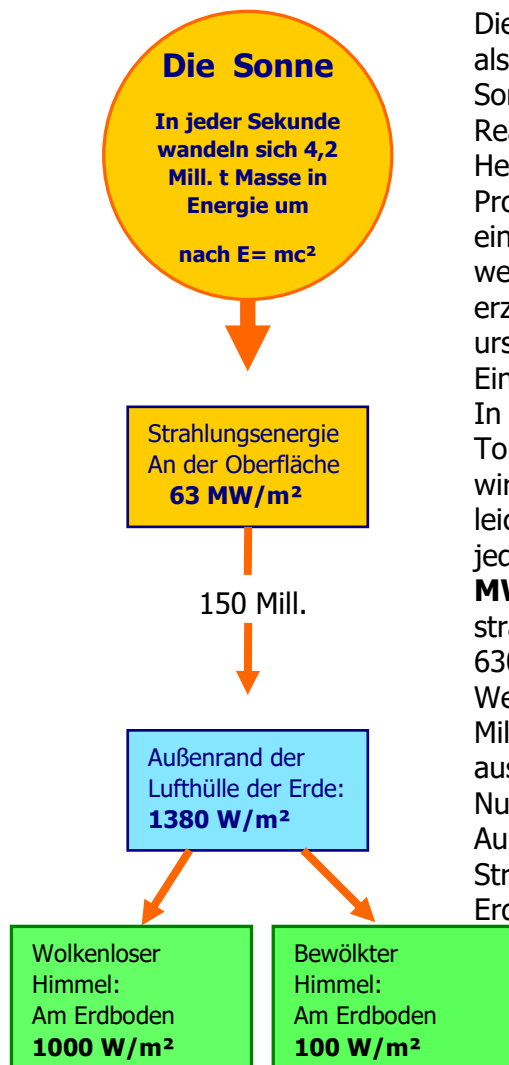
Handbuch zur Sonnenfängerbox SEKI Station 2

2-3 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 Sonneninneren 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 m² bedeutet. 10 m² 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/m²**, 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/m²**.

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/m²** an, die restliche Energie von 380 W/m² wird für chemisch- physikalische Reaktionen in der Atmosphäre benötigt (z.B. in der Ozonschicht). Diesen Messwert 1000 W/m² 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 W/m² auf dem Erdboden an. Auch im Winter erreicht die Bestrahlungsstärke bei strahlendem Sonnenschein den Wert 1000 W/m² nicht, weil der längere Weg des Lichts im Winter durch die Lufthülle Energie absorbiert, der Wert wird maximal 600 W/m².

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

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

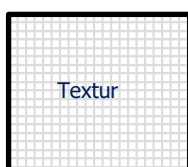
1. Silizium (Si) -Wafer p- dotiert mit Bor bei der Herstellung des Wafers



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).

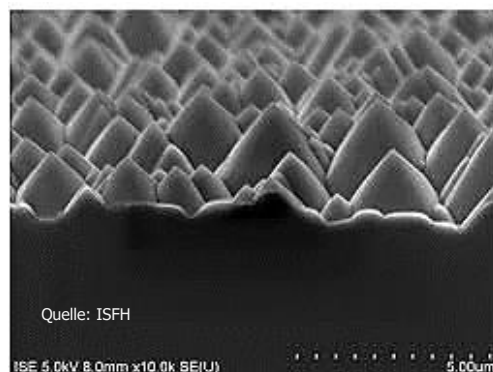


2. Texturierung mit Lauge

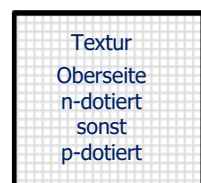


Die Oberseite wird mit Lauge behandelt, da wird die glatte Oberfläche rau. Auf Grund der Kristallorientierung bilden sich auf einem monokristallinen Wafer Pyramiden einer Höhe von 1 µm – 3 µm aus. Die Textur dient zur Minderung der Lichtreflexion an der Oberfläche. Die Aufnahme rechts mit einem Rasterelektronenmikroskop (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_3) 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_3N_4 (Siliziumnitrid)



Im Vakuum wird in einem Plasmaprozess bei ca. 300 °C eine **transparente** ca. 75 nm (= 0,000075 mm) dicke Si_3N_4 - 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_2O_3 - Schicht aufgebracht, auf der wiederum eine 70 – 120 nm dicke Si_3N_4 -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

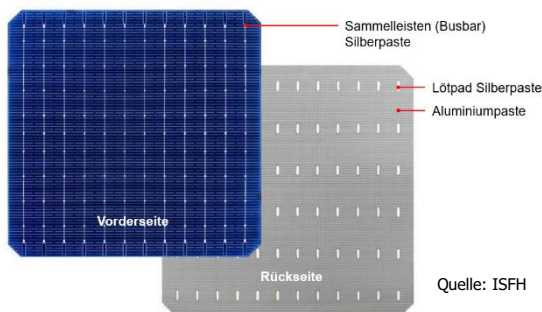
Die dielektrische Al_2O_3 - Schicht auf der Rückseite der Solarzelle wird mit einem Laserprozess geöffnet, d.h. es werden mit einem Laserstrahl die Schichten lokal verdampft. Die Öffnungen sind Punkte mit einem Durchmesser von 20 – 50 μm .

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 μm) überzogen, sie ist der Pluspol der Solarzelle. Weil man Aluminium nicht löten kann, erhält die Rückseite zusätzliche Flächen aus reinem Silber (Lötpads), 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 μm), weil durch Silber kein Licht in die Solarzelle eindringen kann. Die Silberdrucke werden anschließend bei 800–900 $^{\circ}\text{C}$ 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_p) 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.

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

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



**Photovoltaik-
System
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Begabungsförderung
in Hannover und Region
www.mint-hannover-region.de

BNE
Bildung für
Nachhaltige
Entwicklung

Aufbau und Funktion einer Solarzelle I

Klassenstufen 4-6 Alter 10-12 Jahre

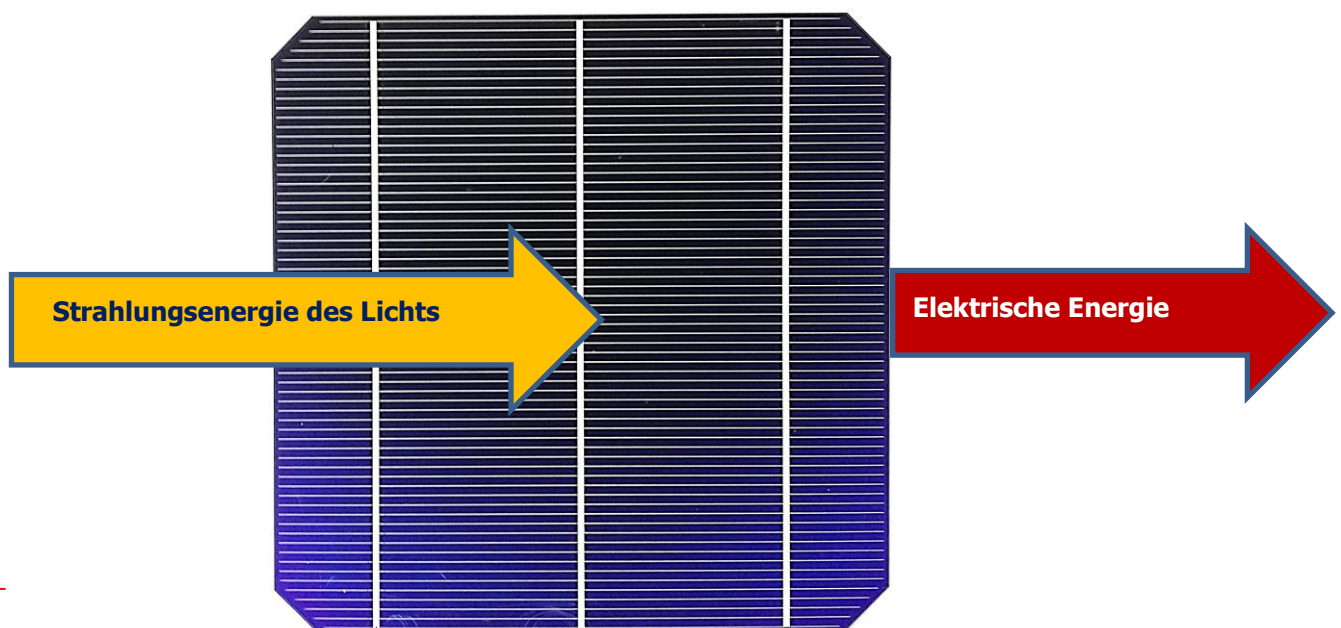


Eine Solarzelle ist ein Energiewandler, sie wandelt die Strahlungsenergie von Licht in elektrische Energie um.

Die Verwendung von Sonnenlicht zur Erzeugung von elektrischer Energie ist sehr umweltfreundlich und nachhaltig, es entstehen bei der Energieumwandlung keine Schadstoffe, wie z.B. CO₂.

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.

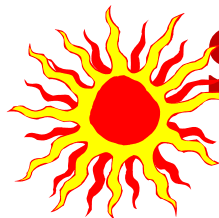
Eine Solarzelle besteht aus einer sehr dünnen Scheibe aus Silizium, meist ein Quadrat mit der Kantenlänge 156 mm, mit einem Laser kann man sie auch in kleinere Formate mit kleinerer Leistung schneiden.



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.



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
Rechnungsservice
Solartechnik
Solardidaktik
Solare Wissenschaft

Cooperation NILS-ISFH
Sales
Delivery
Accounting
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

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

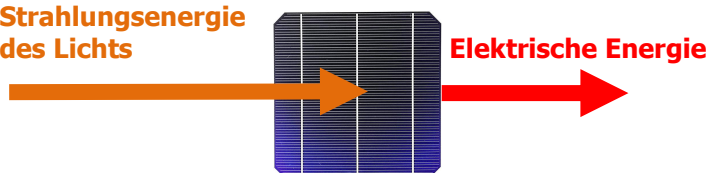
Funktion Solarzelle II



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 (SiO_2).

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

Strahlungsenergie
des Lichts



Energiewandler Solarzelle

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 (Si_3N_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

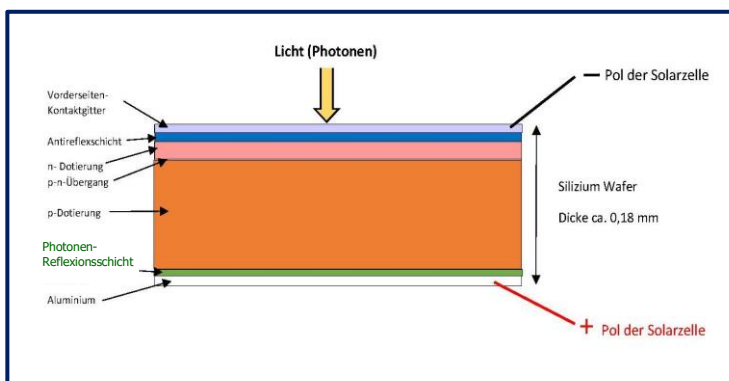
Phone: +49(0)5121 860730 Fax: +49(0)3222 3706689 Mail: info@sundidactics.de Mobile: +49(0)1757660607 Web: www.sundidactics.de

Funktion Solarzelle III



Aufbau und Funktion einer Silizium- Solarzelle III

ab Klassenstufe 9 Alter 13+ mit Halbleiterkenntnissen



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

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.



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. Eindringene 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:

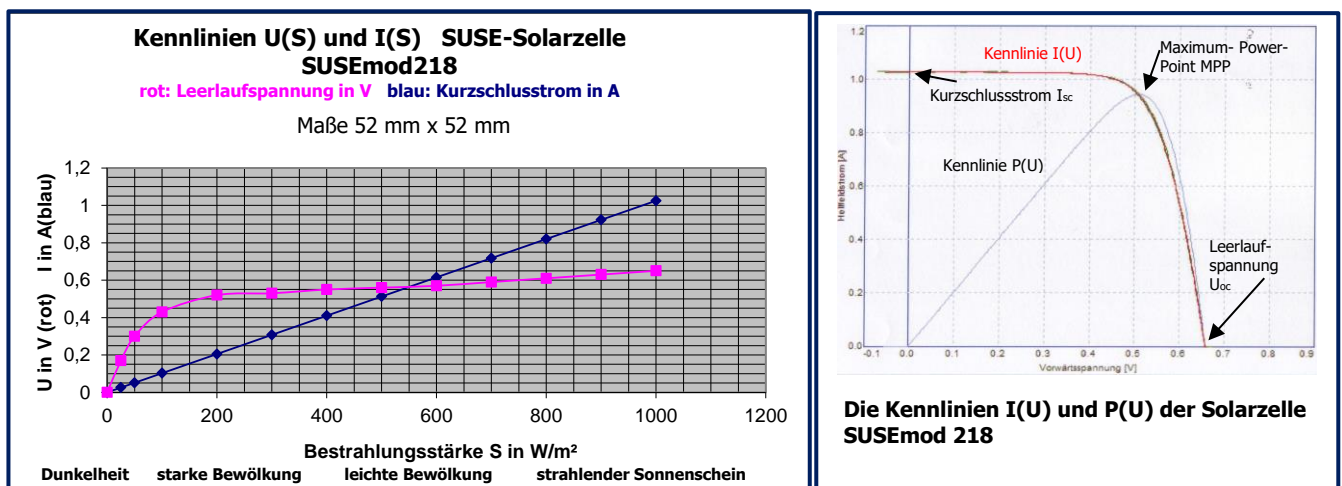
- **Fläche der Solarzelle:** Je höher die Fläche, desto höher ist I (direkt proportional)!
- **Intensität der auftreffenden Lichtstrahlung:** Je höher die Lichtintensität S , desto höher ist I_{sc} (direkt proportional)!
- **Qualität der Solarzelle** (sehr guter Solarzellen: $I_{sc} = 38 - 42 \text{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

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 $1000 W/m^2$ 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 2

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

Lernstation	Experimentiergeräte für 1 Lernstation	Messtechnik und Zubehör für 1 Lernstation	Themen der Experimente
Lernstation 2 Solarzelle II	1 Solarmodul SUSE 4.33 1 Speichermodul SUSE 4.12 5 Solarmotoren SUSE 4.16 von Schule: 1 Overheadprojektor zum Experimentieren auf der Glasplatte von Schule: 1 Overheadprojektor zum Experimentieren auf der Glasplatte von Schule: 1 Halogenstrahler 120W oder Rotlichtlampe	1 Dig. Multimeter 10 Laborkabel je 50 cm 4mm Stecker 5x schwarz + 5x rot 1 Zollstock 1 Handbuch in pdf	U,I,P von Solarzellen bei verschiedener Einstrahlung Reihen- und Parallelschaltung von Solarzellen und von Motoren Speicherung von elektrischer Energie In Superkondensator

2-4 Experimente mit den Geräten der Station 2

Experimente für 2 Lerngruppen mit je 3 Schülerinnen/Schüler.

Nachfolgend sind die Experimente mit SUSE 4.33 aufgeführt, die mit den Zusatzgeräten, Messtechnik und Zubehör durchgeführt werden können. Die betreuende Lehrkraft wählt die für die Lerngruppe passenden Experimente aus.

Zusätzlich zu den beigegeführten Experimentieranleitungen lassen sich mit den Geräten der Station viele weitere Photovoltaik- Experimente planen und durchführen, hier sind der Kreativität der Lerngruppe oder der betreuenden Lehrkraft keine Grenzen gesetzt!



**Photovoltaik-
System
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Begabungsförderung
in Hannover und Region
www.mint-hannover-region.de

BNE
Bildung für
Nachhaltige
Entwicklung

Experimente SUSE 4.33



Experimente mit dem Solarmodul SUSE 4.33

Name(n):

Experimentiergerät:

SUSE 4.33

Experimente mit dem Solarmodul

SUSE 4.33

**Solarmodul mit 3 Solarzellen
mit Verbindungssteckern mit
integrierter Messbuchse**

geeignet für die Klassenstufen 8-12

14 Seiten

Notwendige Zusatzgeräte:

Digital- Multimeter mit 2 Laborkabeln,
8 weitere Laborkabel,
Taschenrechner,
Overheadprojektor als Lichtquelle,
5-6 Solarmotoren SUSE 4.16,
Grundgerät SUSE 4.0 oder
Halogenstrahler 120W oder
Rotlichtlampe
Zollstock zur Abstandsmessung



- 1 Gerätebeschreibung (Kurzfassung)**
- 2 Lernziele**
- 3 Betrieb als 1,8 V– Solarmodul für elektrische Geräte mit 1,5 V Spannung
(Radio, Spielzeuggeräte.....)**
- 4 Experimente zur Reihenschaltung von Solarzellen**
- 5 Experimente zur Parallelschaltung von Solarzellen**
- 6 Experimente zur Bestimmung des Zellwirkungsgrades und des
Modulwirkungsgrades**
- 7 Experimente zur Reihenschaltung mehrerer Solarmodule SUSE 4.33V**
- 8 Experimente mit Solarmotoren an SUSE 4.33**
- 9 Anhang: Technische Daten für die verwendeten Solarzellen SUSEmod218**

Natürlich können Sie mit jeder der 3 Solarzellen des Moduls SUSE 4.33 alle Experimente zu einer Solarzelle (Experimentieranleitungen zum Solarmodul SUSE CM6MS) durchführen.

1 Gerätebeschreibung Kurzfassung

Das Solarmodul **SUSE 4.33** ist ein hochwertiges 1,95 V - 1,6 W -Solarmodul mit 3 Solarzellen, die mit abziehbaren Verbindungssteckern in Reihenschaltung verbunden sind. In Reihenschaltung liefert

das Modul (bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2) eine **Leerlauf- Spannung von 1,95 V** und eine **Kurzschluss- Stromstärke von 1,025 A**.

Jede Solarzelle hat 2 eigene elektrische Anschlüsse (jeweils eine **rote(+)** und eine **schwarze (-)** Buchse), die Gesamtspannung kann (bei **gesteckten Verbindungssteckern!**) zwischen der ersten roten Buchse oben und der letzten schwarzen Buchse unten abgenommen werden.

Mit diesem Modul können elektrische Geräte, die mit einer Spannung von 1,5 V (Radio, Spielzeuggeräte...) betrieben werden, sowie eine Vielzahl von Experimenten zur Solarzelle und Photovoltaik- Systemtechnik durchgeführt werden. Durch Reihenschaltung mehrerer Module kann die Gesamtspannung in 1,86 V –Schritten erhöht werden, so kann mit 5 Modulen ein Handylader SUSE 4.17, mit 8 Modulen **SUSE4.33** z.B. ein Autoradio, eine Stereoanlage oder ein anderes 12-V- Gerät betrieben werden.

Durch den 75° -Winkel kann das Gerät im Winterhalbjahr und beim Betrieb mit Halogenlampen aufrecht gestellt werden (**Position 1**), im Sommerhalbjahr bei hochstehender Sonne wird das Gerät im Freien zur Sonne ausgerichtet flach auf den Boden oder auf einen Tisch gelegt .(**Position 2**).



Position 1
Winter
Sonne tiefstehend



Position 2
Sommer
Sonne hochstehend

2 Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler können in diesen Experimenten durch eigenes Experimentieren

- Die Gesetzmäßigkeiten der Reihenschaltung von Solarzellen kennenlernen
- Die Intensität der Sonnenstrahlung messen und berechnen können
- Die Gesetzmäßigkeiten der Parallelschaltung von Solarzellen kennenlernen
- Die Abhängigkeit von Spannungen und Stromstärken von der Stärke der Solarstrahlung kennenlernen
- Die Gesetzmäßigkeiten der Reihenschaltung mehrerer Module kennenlernen
- Die Leistung eines Solarmoduls bestimmen können
- Die Berechnung des Zell- und Modulwirkungsgrades durchführen können
- Die U-I- Modulkennlinie aufnehmen und den MPP bestimmen können

3 Betrieb als 1,5 - 1,95 V – Solarmodul für elektrische Geräte mit ca. 1,5 V Spannung (Radio, Spielzeuggeräte....)

Das Solarmodul **SUSE 4.33** ist optimal für den Betrieb von elektrischen Geräten mit 1,5 V Spannung geeignet. Schließen Sie den + und den - Anschluss des Solarmoduls (rot- schwarzes Buchsenpaar bei gesteckten Verbindungssteckern!) an Ihr Gerät an, es wird bei Sonnenlicht, aber auch bei bedecktem Himmel gut funktionieren. Für den Betrieb in der Nacht, wenn das Modul keine elektrische Energie liefert, können Sie tagsüber (parallel zum Betrieb des Gerätes) einen Akku mit aufladen. Das **Solarmodul SUSE 4.33** kann auch als **Solartankstelle** für das **SUSE Solarfahrzeug 4** verwendet werden.

4 Experimente zur Reihenschaltung von Solarzellen

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

Zur Erhöhung der Spannung werden in den von der Industrie hergestellten Solarmodulen eine große Zahl (häufig 36 oder 72 Zellen) von Solarzellen in Reihe geschaltet. Dabei addieren sich die Einzelspannungen der Zellen zur Modulspannung, die Stromstärke bleibt bei der Reihenschaltung identischer Solarzellen gleich.

Eine Solarzelle hat typischerweise bei Bestrahlung mit Licht eine Spannung von ca. 0,6 – 0,65 V. Schaltet man nun **mehrere Solarzellen hintereinander, addieren sich die Spannungswerte, die Stromstärke ändert sich bei der Reihenschaltung nicht.**

Mit SUSE 4.33 lassen sich alle relevanten Experimente zu Solarmodulen experimentell bestimmen.

(Ausnahme: Die Zellen werden mit unterschiedlicher Lichtintensität bestrahlt, dann bestimmt die schwächste Zelle die Stromstärke bei der Reihenschaltung)

Zeichnen Sie hier die Reihenschaltung von 3 Solarzellen:

...und nun geht's ans Experimentieren

Experiment 4.1:

Wir messen die **Leerlaufspannung U_{oc}** (Das ist die elektrische Spannung einer Solarzelle im Leerlauf ohne angeschlossenen Verbraucher) und den **Kurzschlussstrom I_{sc}** (das ist der Strom, den die Solarzelle- im Kurzschluss über ein Strommessgerät gemessen- liefert) aller 3 einzelnen Solarzellen des Moduls bei 4 verschiedenen Lichtquellen (1: Grundgerät **SUSE 4.0** oder Halogenstrahler 120 W, 2: 500 W-Halogenstrahler, 3: Overheadprojektor, 4: Draußen im Sonnenlicht)

Ziehen Sie für diese Messungen die 3 Verbindungsstecker heraus !!

Messen Sie von jeder Zelle einzeln die **Leerlaufspannung U_{oc}** (Messbereich des Voltmeters: 20 V DC) und den **Kurzschlussstrom I_{sc}** (Messbereich des Amperemeters: 2A oder 10 A DC). (Solarzellen darf man problemlos kurzschließen, der Kurzschlussstrom ist eine wichtige Messgröße, er ist proportional zur Zellenfläche und zur Bestrahlungsstärke (Lichtintensität)).

Tragen Sie die Messwerte in die nachstehende Tabelle ein.

Solarzelle Nr.	1 oben	2 Mitte	3 unten	Bemerkungen
Leerlaufspannung U_{oc} in V	Tragen Sie in die nachstehenden Tabellenfelder die Leerlaufspannung U_{oc} ein			
Auf Grundgerät SUSE 4.0 oder Halogenstrahler 120W				
50 cm vor 500 W-Strahler				
Auf Overhead-Projektor				
Im Freien bei Sonnenlicht				

Im Freien bei bedecktem Himmel				
Kurzschlussstrom I_{sc} in A	Tragen Sie in die nachstehenden Tabellenfelder die Kurzschlussstromstärke I_{sc} ein			
Solarzelle Nr.	1 oben	2 Mitte	3 unten	Bemerkungen
Auf Grundgerät SUSE 4.0 oder Halogenstrahler 120W				
50 cm vor 500 W-Strahler				
Auf Overhead-Projektor				
Im Freien bei Sonnenlicht				
Im Freien bei bedecktem Himmel				

Experiment 4.2:

Mit dem Kurzschlussstrom einer Solarzelle lässt sich einfach die Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) des Lichts der Solarstrahlung oder des Lichts von Lichtquellen bestimmen, gemessen in W/m^2

So bestimmen Sie über den Kurzschlussstrom einer Solarzelle (oder in Reihenschaltung aller 3 Zellen) die **Bestrahlungsstärke S** (= Lichtintensität) des Lichts am Ort der Solarzelle:

$$\text{Bestrahlungsstärke } S \text{ (in } W/m^2) = \frac{I_{sc} \text{ (in A)} \times 1000}{1,025 \text{ A}} = \dots\dots\dots W/m^2$$

Welches Ergebnis entdecken Sie bei den Experimenten? Formulieren Sie hier:

Experiment 4.3: Suchen Sie sich eine der 4 Lichtquellen aus.

Verbinden Sie nun mit dem Verbindungsstecker Zelle 1 mit Zelle 2 und messen Sie U_{oc} und I_{sc} !

1+2:

$U_{oc} = \dots\dots\dots V$ $I_{sc} = \dots\dots\dots A$

Verbinden Sie nun Zelle 1 mit 2 und 3 und messen Sie U_{oc} und I_{sc} :

1+2+3:

$U_{oc} = \dots\dots\dots V$

$I_{sc} = \dots\dots\dots A$

Reihenschaltung von Solarzellen

Verbindungsstecker gesteckt, messen Sie in den Buchsen der Verbindungsstecker

Bestrahlungsstärke S in W/m^2 :	Leerlaufspannung U_{oc} in V	Kurzschlussstrom I_{sc} in A
$S = \dots\dots\dots$		
Zelle 1		
Zellen 1 + 2		
Zellen 1+2+3		

Wenn Sie möchten, können Sie das Experiment auch mit den weiteren 3 Lichtquellen durchführen.

Welche Gesetzmäßigkeit fällt Ihnen auf? Formulieren Sie das Ergebnis hier

Experiment 4.4:

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

Die **Reihenschaltung** von Solarzellen hat **einen entscheidenden Nachteil**. Wenn auch nur **eine** Zelle einer Reihenschaltung durch Abschattung (durch ein darauf gefallenes Blatt, Schmutz, ein darauf sitzender Vogel.....) abgedeckt ist und dadurch keine oder nur ungenügende Spannung/Stromstärke liefert ist das Gesamtmodul außer Betrieb bzw. geschwächt, da das schwächste Glied der Kette den Gesamtertrag bestimmt.

Sind mehrere Solarmodule in Reihe geschaltet, kann **eine einzige abgeschattete Solarzelle einen ganzen Solargenerator lahmlegen**.

Das Experiment:

Stecken Sie alle Verbindungsstecker und stellen Sie das Modul vor eine der Lichtquellen des Experiments 4.2.

Messen Sie die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom:

$U_{oc} = \dots\dots\dots V$

$I_{sc} = \dots\dots\dots A$

Decken Sie nun eine Zelle mit schwarzer Pappe o.ä. lichtundurchlässig ab und messen Sie wiederum Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom:

$U_{oc} = \dots\dots\dots V$

$I_{sc} = \dots\dots\dots A$

Was fällt Ihnen auf, begründen Sie Ihr Ergebnis hier:

5 Experimente zur Parallelschaltung von Solarzellen

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

Durch Parallelschaltung von Solarzellen bleibt die Spannung konstant, die abgegebene Stromstärke addiert sich jeweils, so dass sich höhere Stromstärken erreichen lassen. Diese Theorie gilt jedoch nur unter der Bedingung, dass die Bestrahlungsstärke und die Leerlaufspannung aller Solarzellen gleich groß sind, sonst entstehen interne Ströme zwischen den Zellen und die Gesetzmäßigkeit der Addition der Stromstärken gilt nicht mehr genau.

Experiment 5.1:

- Ziehen Sie alle Verbindungsstecker**
- Befestigen Sie das Modul vor/auf den Lichtquellen (siehe Tabelle) und verbinden Sie mit je einem kurzen roten Kabel den Pluspol von Zelle 1 (rote Buchse) mit dem Pluspol von Zelle 2 (rote Buchse) , mit einem zweiten schwarzen Kabel die beiden Minuspole der Zellen (jeweils schwarze Buchsen).
- Messen Sie nun wie bei den vorherigen Experimenten die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom.
- Schalten Sie nun schrittweise die 3. Zelle mit kurzen Kabeln parallel dazu, messen Sie jeweils Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom und tragen Sie die Werte in die Tabelle ein:

Parallelschaltung von Solarzellen

Strahlungsleistung S in W/m^2 : $S = \dots\dots\dots$	Leerlaufspannung U_{oc} in V	Kurzschlussstrom I_{sc} in A
Zelle 1		
Zellen 1 + 2		
Zellen 1+2+3		

Wenn Sie möchten, können Sie das Experiment auch mit den weiteren 3 Lichtquellen durchführen.

Welche Gesetzmäßigkeit fällt Ihnen auf? Formulieren Sie das Ergebnis hier:

6 Experimente zur Bestimmung der Leistung, des Zellwirkungsgrades und des Modulwirkungsgrades

vereinfachte Berechnungsmethode

Für Planung großer Photovoltaikanlagen auf Gebäuden oder im Freiland ist die Kenntnis der elektrischen Leistung und des Wirkungsgrades der Solarzellen im Modul oder des ganzen Solarmoduls sehr wichtig.

Die **Leistung P** (in W_{Watt}) gibt die aktuelle elektrische Leistung des Solarmoduls SUSE 4.33 bei der aktuellen Bestrahlungsstärke des Lichts an, sie ist natürlich bei strahlendem Sonnenschein viel höher als bei bedecktem oder trübem Himmel. Die maximale Leistung bei strahlendem Sommersonnenschein bei blauem Himmel ist die maximale mögliche Leistung des Moduls, sie wird P_p genannt, der Index p heißt peak = Spitzenleistung, z.B. lautet die technische Angabe 5 W_p.

Experiment 6.1: Messung der aktuellen Leistung P

Stellen Sie das Modul ins Freie in Richtung Sonne oder im Innenraum vor eine Lichtquelle und messen Sie:

1. Mit dem Multimeter im 20-V- Bereich die Leerlaufspannung U_{oc} der 3 Zellen in Reihenschaltung:

$U_{oc} = \dots\dots\dots V$

2. Mit dem Multimeter im 10A- Bereich den Kurzschlussstrom I_{sc} :

$I_{sc} = \dots\dots\dots A$

Die elektrische Leistung P des Moduls ergibt sich nun aus dem Produkt: $U_{oc} * I_{sc} * 0,8$

Der Faktor 0,8 ergibt sich aus der I-U- und der P-U-Kennlinie!

Berechnung der elektrischen Leistung P:

$P = \dots\dots\dots V * \dots\dots\dots A * 0,8 = \dots\dots\dots W$

Experiment 6.2: Bestimmung der maximalen Leistung des Moduls P_p :

Die maximale Leistung des Moduls bei $S = 1000 \text{ W/m}^2$ können wir aus den Solarzellendaten errechnen:

$P_p = 1,95 \text{ V} * 1,025 \text{ A} * 0,8 = 1,599 \text{ W}$ pro Solarzelle also 0,533 W.

Wenn wir bei strahlendem Sonnenschein im Sommer die Modulfläche genau senkrecht zur Sonne ausrichten und P durch Messungen bestimmen, erhalten wir relativ genau diesen theoretisch bestimmten Wert.

Der Wirkungsgrad gibt an, wie viel % des einfallenden Lichts in elektrische Energie umgewandelt wird, er liegt bei Standard- Solarzellen im Bereich zwischen 17 - 22 %, je nach Solarzellentyp.

Experiment 6.3: Bestimmung des Solarzellen- Wirkungsgrades η (eta)

Der Wirkungsgrad η gibt an, wie viel % des Sonnenlichts in elektrische Energie umgewandelt wird.

1. Wir stellen das Modul ins Sonnenlicht oder ins Licht einer Lichtquelle (Halogenstrahler oder Grundgerät SUSE 4.0) und messen wie in Experiment 4.2 beschrieben über den Kurzschlussstrom die Bestrahlungsstärke S des Lichts in W/m²:

A **S =W/m²** diesen Wert rechnen wir in W/cm² um, indem wir durch 10 000 teilen, da 1 m² 10 000 cm² hat:

B **S =W/cm²**

Beispiel: bei 1000 W/m² wären es 0,1 W/cm², d.h. das Licht bestrahlt jeden cm² einer Solarzelle mit 0,1 W.

2. Die Fläche unserer Solarzelle ist 27,04 cm², wenn wir also diese Fläche mit dem Wert B multiplizieren, erhalten wir die Leistung des Lichts, mit dem die gesamte Zelle bestrahlt wird, in unserem Beispiel wären es 27,04 cm² * 0,1 W/cm² = **2,7 W**, das wäre die Lichtleistung P_L auf die Zelle, aus dieser Lichtleistung wird in der Solarzelle elektrische Leistung produziert.

C **Gemessene Lichtleistung P_L =.....W** in unserem Beispiel P_L = 2,7 W

Nun bestimmen wir wie in Experiment 6.1 dargestellt aus dem Kurzschlussstrom und der Leerlaufspannung mal 0,8 die aktuelle elektrische Leistung P_E einer Solarzelle:

D **Gemessene elektrische Leistung P_E =.....W** in unserem Beispiel 0,533 W

Setzen wir nun D und C ins Verhältnis und multiplizieren diesen Wert mal 100 erhalten wir den Wirkungsgrad η :

E **Wirkungsgrad η = $\frac{\text{Elektrische Leistung } P_E (0,533W)}{\text{Lichtleistung } P_L (2,7 W)} * 100 = \dots\dots\dots\%$**

In unserem Beispiel wären es 0,533 W / 2,7 W = 0,177 * 100 = **19,7 %**. Das wäre der Wirkungsgrad der Solarzelle, es werden also 19,7 % des Sonnenlichts in elektrische Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad der 3 Solarzellen untereinander unterscheidet sich nur minimal.

Der Modulwirkungsgrad:

Um den Modulwirkungsgrad zu bestimmen, müsste man als Fläche die gesamte Modulfläche verwenden, also auch die nicht aktiven Plexiglasflächen und erhält dann natürlich einen niedrigeren Wert. Der Modulwirkungsgrad eines ganzen Solarmoduls ist also umso höher, je dichter die Solarzellen gepackt sind und umso weniger leere Flächen um die Solarzellen herum vorliegen.

7 Experimente zur Reihenschaltung mehrerer Solarmodule SUSE 4.33

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

Schaltet man zur Spannungserhöhung in Reihenschaltung mehrere Solarmodule hintereinander, erhält man einen Solargenerator. Dazu verbindet man den Pluspol von Gerät 1 mit dem Minuspol von Gerät 2. Die Gesamtspannung liegt dann zwischen Minuspol Gerät 1 und Pluspol Gerät 2.

Das jedes Solarmodul SUSE 4.33 ca. 1,95 V Spannung liefert, können wir durch Reihenschaltung schrittweise die Spannung in 1,95 V-Stufen erhöhen.

Mit 7 Modulen erhält man mit der Spannung 13,65 V eine Spannung, die für 12 V-Geräte optimal geeignet ist (Autoradio, Handyladegerät.....etc), schalten Sie das Gerät an die Reihenschaltung von 4 Modulen (Minuspol von Modul 1 und Pluspol von Modul 7), es wird gut funktionieren!

Experiment 7.1:

Nehmen Sie 4 Module SUSE 4.33 und stellen Sie diese nebeneinander ins Sonnenlicht oder ca. 40 cm vor das Licht eines 500 W- Bau-Strahlers. Achten Sie beim Experimentieren mit Halogenstrahlern darauf, dass die Module gleichmäßig ausgeleuchtet werden. **Alle Verbindungsstecker müssen gesteckt sein.**

Schalten Sie nun Modul 1 mit Modul 2 in Reihe, indem Sie den Minuspol von Modul 1 mit dem Pluspol von Modul 2 mit einem Kabel verbinden.

Die Summenspannung liegt nun zwischen den Pluspol des Moduls 1 und Minuspol des Moduls 2. Tragen Sie die Werte in die Tabelle ein und führen Sie das Experiment mit entsprechender Zuschaltung der Module 3 + 4 fort.

Reihenschaltung von Solarmodulen

(Bestrahlungsstärke $S = \dots\dots\dots \text{W/m}^2$) Messung siehe Experiment 4.1

Reihenschaltung der Module	Gesamt-Leerlaufspannung U_{oc} in V	Kurzschlussstrom I_{sc} in A
1+2		
1+2+3		
1+2+3+4		

Welche Gesetzmäßigkeit fällt Ihnen auf? Formulieren Sie das Ergebnis hier :

Experimentelle Lernstationen zur Solarenergie

Photovoltaik, Solarstrahlung, Solarthermie, Optoelektronik

Experimente der Lernwerkstatt NILS- ISFH für Unterricht, Ausbildung, Workshops, Projekttag, Praktika

Durchführung im Sonnenlicht/Tageslicht im Freien oder mit Halogenstrahlern im Innenraum

Niveaustufen: 1 (einfach) 2(mittel) 3(hoch)

Experiment 8

Wie viele Solarmotoren kann man an das Solarmodul SUSE 4.33 anschließen?

Verwendete Bauteile: 1 Grundgerät SUSE 4.0, 1 schaltbare 3er- Tischsteckdose, 1 Solarmodul SUSE 4.33, 12 Laborkabel 1m (6x schwarz, 6x rot) 1 Multimeter VC 150 o.ä., 6 Solarmotoren SUSE 4.16, Taschenrechner

Hinweise zum Experiment:

Du kannst das Experiment auf einem Tisch draußen im Sonnenlicht oder im Innenraum mit dem Halogenstrahler durchführen. Das natürliche Tageslicht oder der Halogenstrahler des Grundgeräts SUSE 4.0 bestrahlt das Solarmodul SUSE 4.33, hier entsteht aus der Lichtstrahlung elektrische Energie, 6 Solarmotoren sind hier in Reihe geschaltet, verwende die Anschlüsse rot (+ der 1. Solarzelle) und schwarz (- der 3. Solarzelle).

Versuchsdurchführung 1:

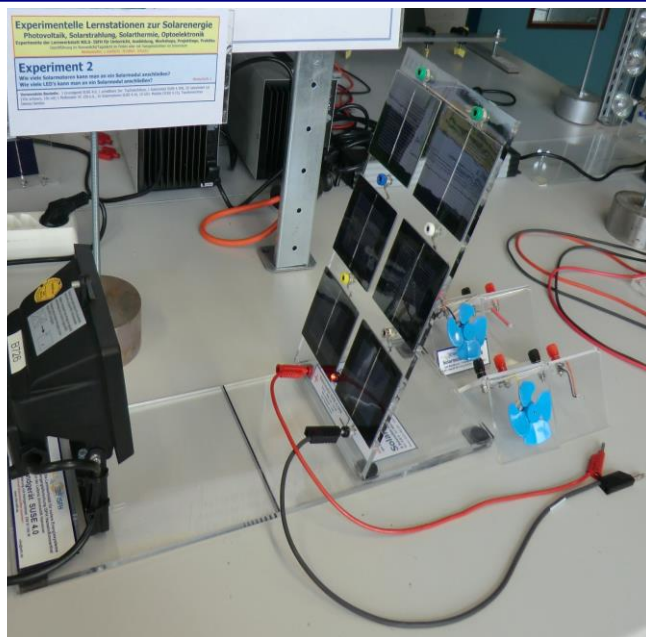
Schließe 1 Solarmotor an das Solarmodul an, wenn er sich schnell dreht kannst Du einen 2. Solarmotor dazu anschließen, mache immer so weiter. Teste, wie viele Solarmotoren das Solarmodul antreiben kann. Die Art der elektrischen Schaltung kannst Du Dir selbst überlegen (Parallel- oder Reihenschaltung).

Versuchsdurchführung 2:

Verwende die LED- Module statt der Motoren, führe das Experiment erneut durch! Achte auf die korrekte Polung

Versuchsdurchführung 3:

Schließe Motoren und LED- Module gleichzeitig an das Solarmodul an und beobachte!



Aufbau des Experiments: Auf der Grundplatte SUSE 4.0 steht das Solarmodul SUSE 4.3RB, rechts dahinter 2 Solarmotoren SUSE 4.16
Statt SUSE 4.3 RB kann auch SUSE 4.33 verwendet werden

Notiere die Ergebnisse hier, erkläre und zeichne Deine verwendete elektrische Schaltung:

Notiere die Ergebnisse hier, erkläre und zeichne Deine verwendete elektrische Schaltung:

Profi- Fragen:

1. Wie könnte man durch elektrische Messungen und Berechnungen die maximale Anzahl der Motoren oder der LEDs berechnen? Du kannst Deine Idee mit einem Multimeter bestätigen! **Erkläre hier:**

1. Ist es ein Unterschied, ob die Motoren in Parallel- oder in Reihenschaltung an das Solarmodul angeschlossen werden? Teste diese Varianten experimentell!

Im Gerät SUSE 4.33 wird die Solarzelle SUSEmod218 verwendet, hier sind die technischen Daten:

Die Solarzelle selbst ist bruchsticher in ein Modul eingebettet.



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

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 bruchsticher 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.

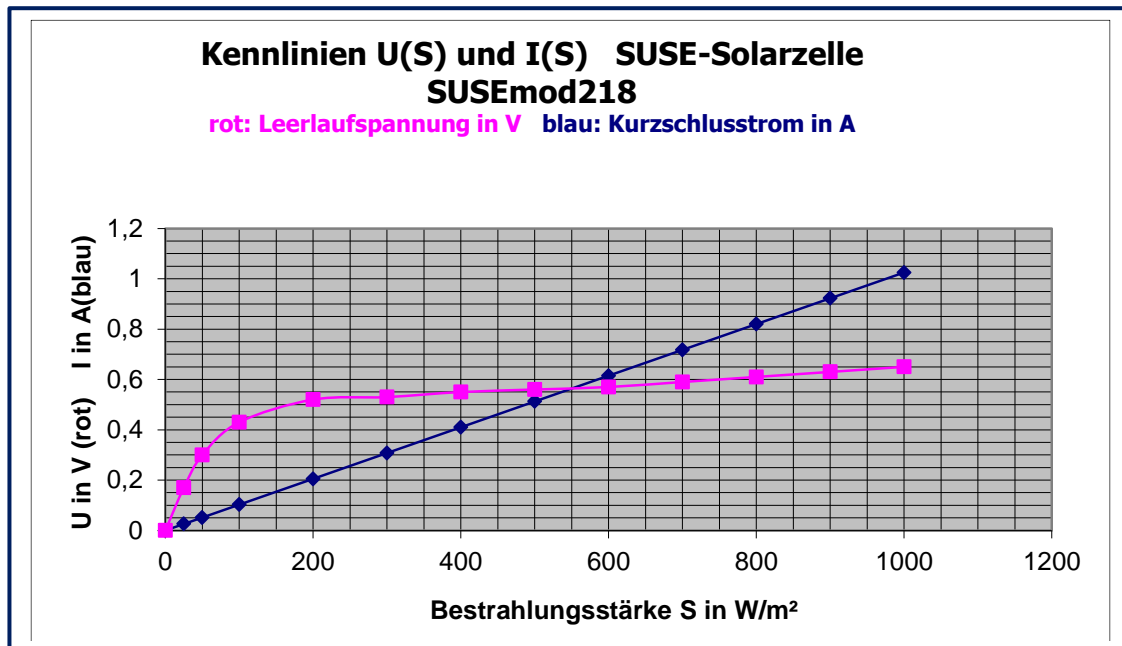
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/m², 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 ²	1/9 einer 6 Zoll Solarzelle
Leerlaufspannung	U _{oc}	0,656	V	Typisch für Silizium
Kurzschlussstrom	I _{sc}	1,025	A	Proportional zur Lichtintensität S
Spannung im MPP	U _{MPP}	0,507	V	Spannung im (MPP) Maximum Power Point
Kurzschlussstrom im MPP	I _{MPP}	0,942	A	Kurzschlussstromstärke im MPP
Elektrische Leistung	P	0,477	W	Bei S = 1000 W/m ² , AM 1,5, 25°C
Wirkungsgrad	η	19,1	%	Qualitätsmerkmal
Füllfaktor	FF	71	%	FF ist ein Qualitätsmerkmal
Stromdichte	j	38,15	mA/cm ²	j ist ein Qualitätsmerkmal
Temperaturverhalten der Leerlaufspannung U _{oc}	ΔU _{oc}	- 0,36	% /K	Die Spannung mindert sich bei Erwärmung um 0,36% pro 1K
Temperaturverhalten des Kurzschlussstroms I _{sc}	ΔI _{sc}	+ 0,06	% /K	Der Kurzschlussstrom vergrößert sich um 0,06 % pro 1K
Serieller Widerstand	R _{ser}	0,097	Ω	Serieller Widerstand der Solarzelle Widerstand des Si und der Leiter
Shuntwiderstand	R _{shunt}	64,82	Ω	Parallelwiderstand der Solarzelle durch interne Kurzschlüsse im Si

Die Kennlinien der Solarzelle im Modul SUSEmod218

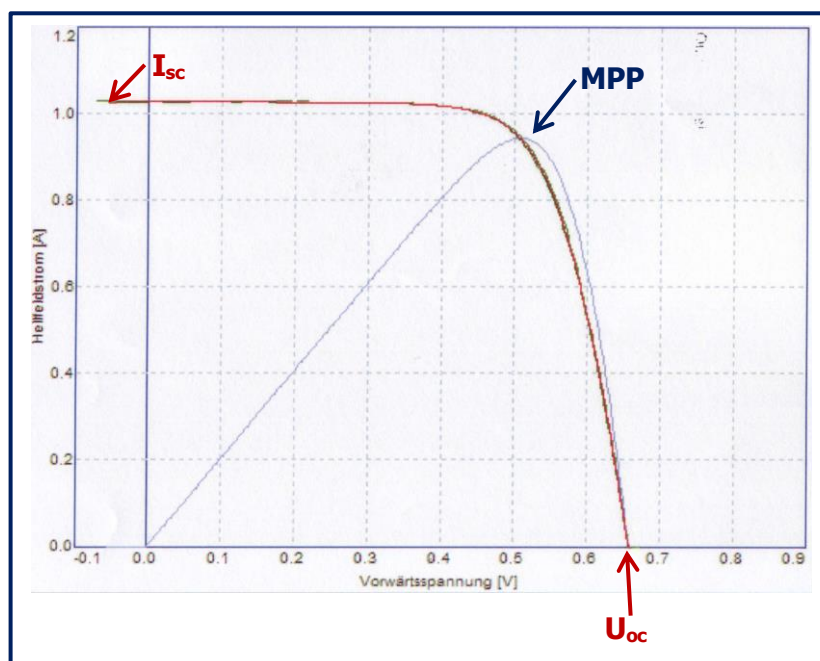
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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 .

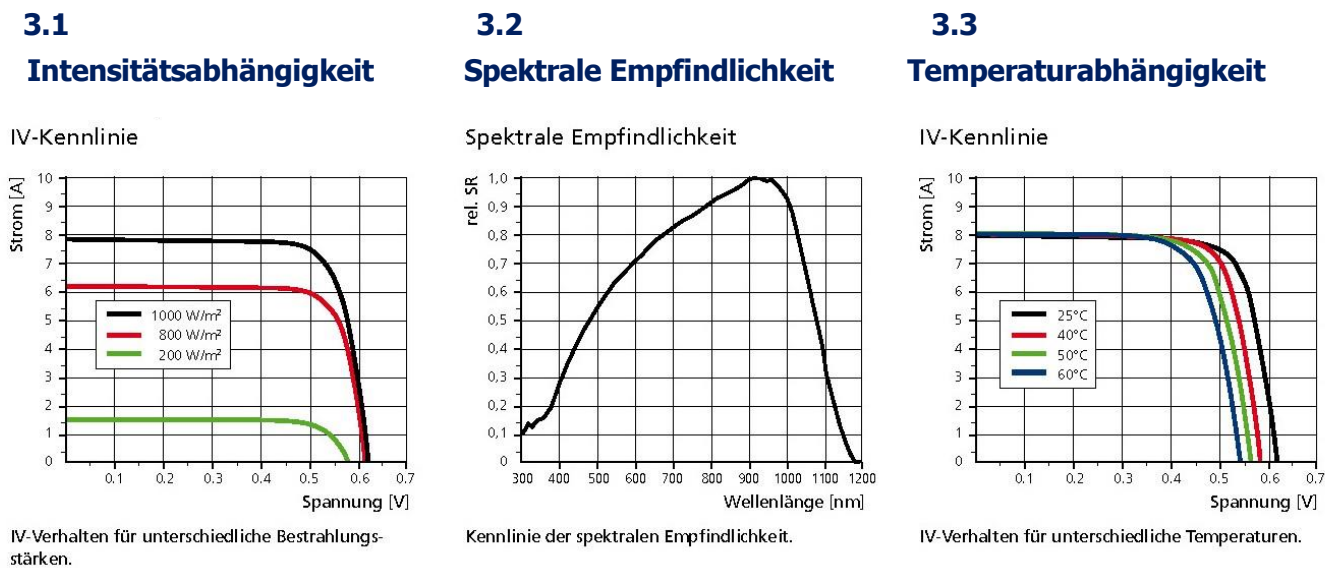
2. Die $I(U)$ und die $P(U)$ - Kennlinien der Solarzelle SUSEmod218 bei $S = 1000 W/m^2$, $T = 25^\circ C$, AM 1,5
aufgenommen im Kennlinienlabor des ISFH



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.

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!



Der **linke Graph 3.1** zeigt die **Intensitätsabhängigkeit** der **I(U)- Kennlinien** in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke *S* des eingestrahlichten Lichts. (1000 W/m² entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosen Himmel, 0 W/m² 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 cm² Zellenfläche). Das bedeutet auch, dass die elektrische Leistung *P* der Solarzelle bei Temperaturerhöhung sinkt.

Die Leerlaufspannung *U_{oc}* einer Solarzelle:

$$U_{oc} = \frac{kT}{e} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_s} \right)$$

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.

U_{oc}= Leerlaufspannung in V
k = Boltzmann- Konstante in J/K
T = absolute Temperatur in K
e = elektrische Elementarladung in As
I_{sc}= Kurzschlussstrom in A
I_s = Sättigungsstrom in Sperrrichtung (Dunkelstrom) in A
S = Bestrahlungsstärke *S* in W/m²