

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
 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 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

Handbuch zur Lernstation SEKII-1 Version 2021

Jg. 11- 13 (SchülerInnen 17 - 20 Jahre) Gy, IGS, KGS, BBS

Lernstation für schülerzentrierte Experimente für 3 SchülerInnen in der Arbeitsgruppe



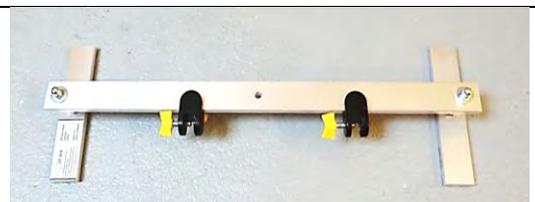
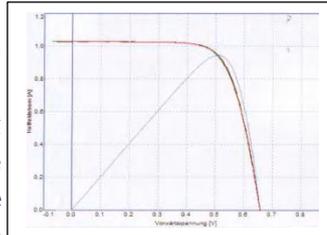
Die Lernstation SEKII-1-2021 enthält Photovoltaik- Experimentiergeräte für eine Arbeitsgruppe von 3 SchülerInnen für SEKII- Experimente zur Solarenergie, zur Photovoltaik und Halbleiterphysik. Mit den Anleitungen können qualifizierte Experimente selbständig durchgeführt werden.

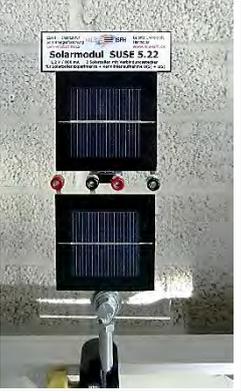
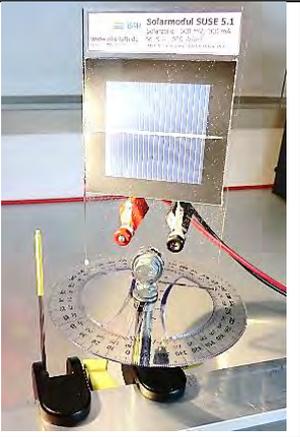
Neben dem gelieferten Material sind aus der Sammlung der Schule erforderlich:

1. Netzgerät 12 V DC, >3A zum Betrieb der Halogenleuchte SUSE 5.16
2. Schulübliche Muffen für die optische Bank (Leybold- oder Phywe- Muffe)
3. Optional: Messinterface z.B. CassyLab, Vernier o.ä. zur Aufnahme von Kennlinien

Netzgerät und Muffen sind nicht im Lieferumfang!

Info und Beratung: info@sundidactics.de 0175-7660607

Gerät	Kurzbeschreibung	Foto
1. Optische Bank SUSE 5.0-Alu	Robuste optische Bank aus Aluminium zum Aufbau und Durchführung der Experimente Die Muffen zeigen den Einsatz auf der optischen Bank, sie sind nicht im Lieferumfang	
2. Halogenstrahler SUSE 5.16 Experimentierleuchte	Halogenstrahler 12V/35 W auf Stativfuß zum Einsatz auf der optischen Bank mit Muffe. Mit der Experimentierleuchte werden die Solarzellen bestrahlt, um Messungen und Experimente durchzuführen. Das Dach über dem 35W-Reflektorstrahler schützt vor zufälligen Berührungen der heißen Lampe. Zum Betrieb ist ein Netzgerät 12V (DC oder AC) mit 2 Laborkabeln erforderlich, I > 3A! Der Reflektorstrahler kann vertikal geschwenkt werden.	
3. Kennlinienmodul SUSE 5.15	Mit dem Kennlinienmodul lassen sich die I-U- und die P-U-Kennlinie aufnehmen und den Wirkungsgrad und den MPP einer Solarzelle zu bestimmen. Hier der Einsatz eines automatischen Messinterfaces z.B. CassyLab o.ä. sinnvoll. Automatisch werden damit beim Drehen des Potentiometers eine große Anzahl Messwerte aufgenommen und graphisch dargestellt.	 I-U- Kennlinie und P-U- Kennlinie 

<p>4. Solarmodul SUSE 5.22</p>	<p>Mit dem 2-Solarzellen-Modul SUSE 5.22 lassen sich Experimente zu den physikalischen Eigenschaften von Solarzellen im Freien oder auf der optischen Bank durchführen, mit Multimetern oder mit einem Mess-Interface. Das Modul enthält 2 identische Solarzellen, mit einem Verbindungsstecker lassen sich die beiden Solarzellen in Reihe schalten. Mit diesem Modul lassen sich zahlreiche Experimente zur Einzelsolarzelle und zur Reihen- und Parallelschaltung durchführen. Das Modul wird mit einer Muffe auf der optischen Bank befestigt.</p>	
<p>5. Solarmodul (Winkelmodul) SUSE 5.1alpha</p>	<p>Mit dem Solarmodul lassen sich die Abhängigkeiten von U, I, P vom Einstrahlungswinkel auf der optischen Bank messen. Mit der Kreiswinkelscheibe kann die Solarzelle stufenlos mit genauer Winkelablesung gedreht werden, so dass sich genaue Messwerttabellen U(alpha), I(alpha) und P(alpha) und mathematische Funktionen erstellen lassen. Der gelbe Stift markiert die 0- Grad- Position.</p>	
<p>6. Solar- Speichermodul SUSE 4.12</p>	<p>Das Speichermodul enthält 2 Superkondensatoren mit je 5F (in Reihenschaltung) und kann die elektrische Energie der Solarzellen speichern. Bei 5V DC lässt sich eine Energie von 62,5 J speichern. Es können Auf- und Entladevorgänge beobachtet und gemessen werden. Wird der Solarmotor SUSE 4.16 als elektrische Last angeschlossen, dauert die Entladung über 15 Minuten!</p>	
<p>7. Solarmotor SUSE4.16</p>	<p>Der Solarmotor SUSE 4.16 kann an Solarzellen oder an das Speichermodul SUSE 4.12 angeschlossen werden, er dient auch bei der Messung von Entladevorgängen als elektrische Last. Am Solarmodul bei 1,3 V Spannung (5.22 in Reihenschaltung) fließen ca. 60 mA bei hoher Propellerdrehzahl. Der Motor kann auch als Generator verwendet werden, pustet man auf den Propeller entsteht eine Generatorspannung von ca. 1....3 V DC, damit lässt sich auch der Solarspeicher 4.12 aufladen.</p>	
<p>8. Zubehör 1x Digital- Multimeter zur Durchführung der Messungen mit 2 Messleitungen mit Messspitzen. 4x Laborkabel 50 cm, 4mm- Büschelstecker, 2x rot und 2x schwarz 1x Handbuch auf USB- stick mit solardidaktischen Grundlagen: Solarstrahlung, Halbleiterphysik, Solarzelle, Gerätedateien und Experimentieranleitungen + Vorlesung Solartechnik von Dr. Goslich ISFH 1 Box mit 2 Solarzellen und 1 Silizium- Wafer für Anschauungszwecke</p>		
<p>Gliederung des Handbuchs: 1. Basisinfo und didaktisch/methodisches Konzept Seite 1 2. Grundlagenwissen Solarstrahlung und Photovoltaik Seite 4 3. Gerätebeschreibungen Seite 18 4. Experimente Seite 36</p>		

Lernstation SEKII-1 Didaktisch- methodisches Konzept

Das Gerätesystem der Lernstation SEKII-1 wurde für den naturwissenschaftlichen Unterricht in der Sekundarstufe II entwickelt, sinnvoll wäre der Einsatz in den Jahrgängen 12 + 13, wenn Grundlagen der Wellenphysik und Quantenphysik im Unterricht behandelt wurden. Die Experimente können in 2er oder 3er Gruppen selbständig durchgeführt werden, sinnvoll wäre eine Behandlung der theoretischen Grundlagen vor oder während der experimentellen Unterrichtsphase.

1. Aufbau der Experimente

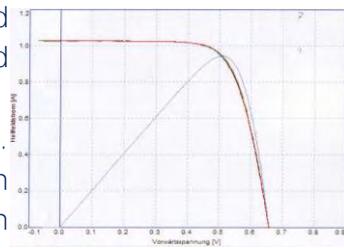
Die Experimente werden auf der optischen Bank SUSE 5.0a α aufgebaut, dazu werden aus der nat.wiss. Sammlung pro optischer Bank 3 Muffen benötigt, mit denen die Stativstangen der Geräte an der optischen Bank befestigt werden.

Als Lichtquelle dient der 35W- Halogen- Reflektorstrahler in der Halogenleuchte SUSE 5.16, hierzu wird noch ein Netzgerät aus der nat.wiss. Sammlung benötigt, 12V AC oder DC, $I_{\max} > 3A$.

2. Kurzinfo zu den Versuchsgeräten

Im Kapitel 2 des Handbuches finden sich die ausführlichen Gerätebeschreibungen der Versuchsgeräte!

Mit dem Kennlinienmodul SUSE 5.15 lassen sich die I-U- und die P-U- Kennlinie aufnehmen, damit können Wirkungsgrad und MPP (Maximum Power Point) einer Solarzelle bestimmt werden. Hier der Einsatz eines automatischen Messinterfaces z.B. CassyLab o.ä. sinnvoll. Automatisch werden damit beim Drehen des Potentiometers eine große Anzahl Messwerte aufgenommen und graphisch dargestellt. Damit wird die Auswertung sehr erleichtert und präzisiert.

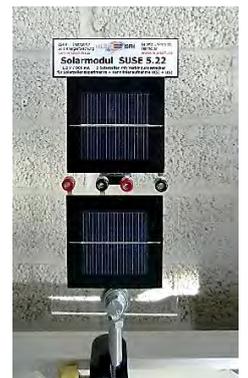


I(U)- Kennlinie (rot) und P(U)-Kennlinie (blau) mit dem MMP im Maximum



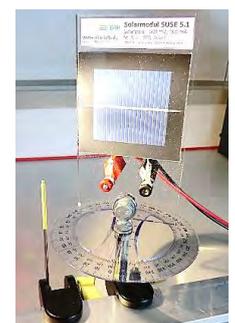
Mit dem Solarmodul SUSE 5.22 lassen sich umfangreiche Experimente zu den Eigenschaften und zur Funktion einer einzelnen Solarzelle durchführen, ebenso die Reihen- und Parallelschaltung von 2 Solarzellen. Wie auf dem Foto ersichtlich ist, können beide Solarzellen mit einem Verbindungsstecker (rückseitig) oder mit einem Schalter in Reihe geschaltet werden.

Weiterhin dient dieses Solarmodul als Basis für die Auf- und Entladungsexperimente mit dem Kondensator- Speichermodul SUSE 4.16 (2x 5F Superkondensator) und dem Solarmotor SUSE 4.16. Auch hier wäre ein automatisches Messsystem mit CassyLab o.ä. sinnvoll, es geht aber auch händisch mit Multimetern.



Das Solarmodul SUSE 5.1alpha dient zur Messung der Winkelabhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} , Kurzschlussstrom I_{sc} und Leistung P einer Solarzelle bei unterschiedlichen Einfallswinkeln. Die Ergebnisse führen zu mathematischen Funktionen und zum Verständnis von Montagen von Photovoltaikanlagen auf Dächern mit unterschiedlichen Ausrichtungen zur Sonne.

Zu jedem Versuchsgerät gibt es in Kapitel 3 umfangreiche Versuchsanleitungen, die betreuende Lehrkraft und die SuS- Gruppe entscheiden über den zeitlichen und inhaltlichen Umfang der Experimente und ihrer Auswertung.





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



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
 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 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

Handbuch zur Lernstation SEKII -1 Version2021

Jg. 11- 13 (SchülerInnen 17 - 20 Jahre) Gy, IGS, KGS, BBS

Lernstation für schülerzentrierte Experimente für 3 SchülerInnen in der Arbeitsgruppe

Grundlagenwissen Solarstrahlung und Photovoltaik

In diesem Kapitel finden sich Dateien zum Selbststudium oder zur Bearbeitung im nat.wiss. Unterricht zu den Themen Solarstrahlung, Funktion einer Solarzelle, Funktion von Solarmodulen und Herstellung einer Solarzelle.

rote Seitenzahlen!

1. Solarstrahlung I	Seite 5
2. Solarstrahlung II	Seite 6
3. Solarstrahlung III	Seite 7
4. Solarstrahlung nach Monaten in D 2020	Seite 8
5. Solarstrahlung Karte D 2019	Seite 9
6. Funktion Solarzelle II	Seite 10
7. Funktion Solarzelle III	Seite 11
8. Funktion Solarzelle IV	Seite 13
9. Funktion Solarmodule	Seite 15
10. Herstellung einer Solarzelle	Seite 16

Zusätzliche Materialien zur Ergänzung und Vertiefung können Sie bei info@sundidactics.de anfordern.

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 m^2 bedeutet. 10 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^2 , 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 $S = 1000 \text{ W/m}^2$.

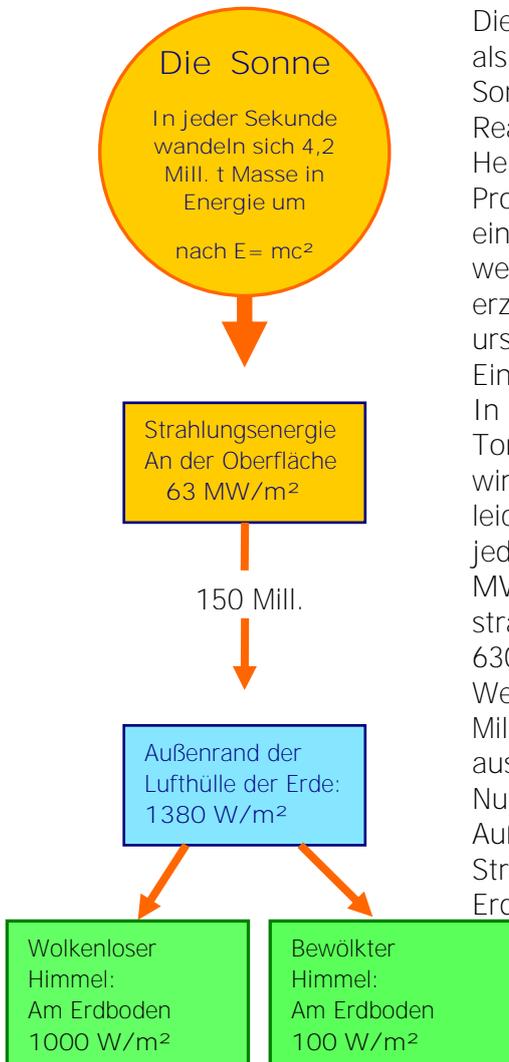


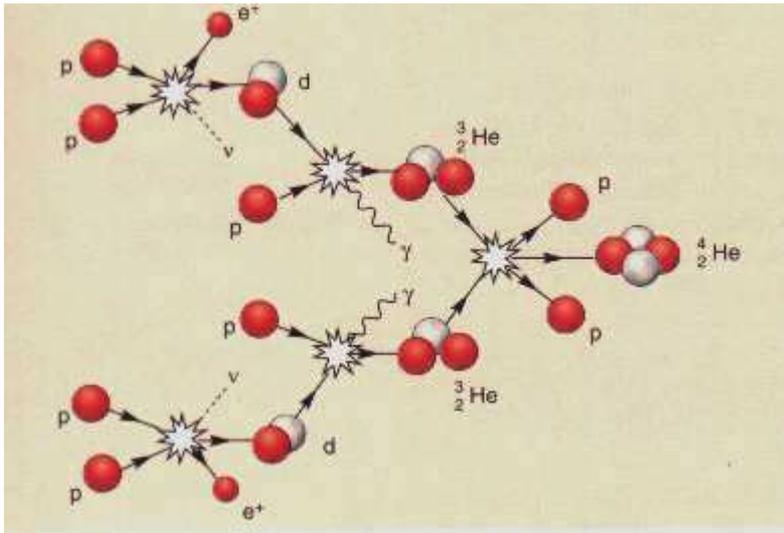
Abb. 1: Entstehung und Verlauf der Solarstrahlung

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

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

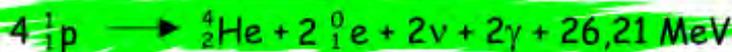
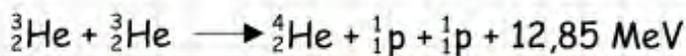
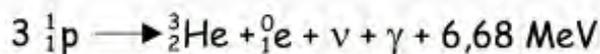
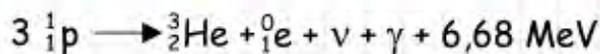
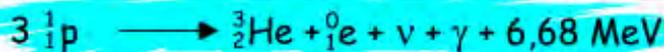
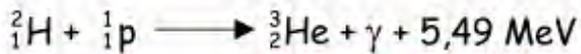
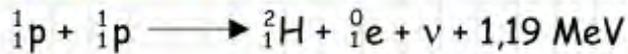
Bei bewölktem Himmel absorbieren die Wolken einen großen Teil der Strahlungsenergie, bei stark bewölktem Wetter kommen z.B. nur noch 100 W/m^2 auf dem Erdboden an. Auch im Winter erreicht die Bestrahlungsstärke bei strahlendem Sonnenschein den Wert 1000 W/m^2 nicht, weil der längere Weg des Lichts im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



Kernfusion - Sonne 1

Proton-Proton-Kette



γ = Gamma- Strahlung p = Proton ν = Neutrino ${}^0_1\text{e}$ = Positron H = Wasserstoff He = Helium

Bei jeder Fusionsreaktion von 4 Protonen zu einem He4- Kern entsteht eine Energie von 26,21 MeV als Strahlungsenergie (Thermische Strahlung und weitere Strahlungsarten) Pro Fusionsakt wird also eine Energie von 26,21 MeV in Form von Strahlungsenergie frei

MeV = MegaElektronVolt ist eine Energiemaßeinheit in der Kernphysik, $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ Joule

Die Kernfusion in der Sonne = die Entstehung der Sonnenstrahlung

Man weiß, dass unsere Erde seit etwa 4,5 Milliarden Jahren existiert. Da sich auf der Erde seit ca. 3 Milliarden Jahren Leben zu immer höheren Lebensformen entwickelt hat, kann man annehmen, dass die Leuchtkraft der Sonne während dieser Zeit ungefähr konstant geblieben ist. Noch vor 150 Jahren nahm man an, dass die Sonne ein riesiger Ofen sei. Die Annahme, auf der Sonne würde Steinkohle verbrannt, konnte jedoch nicht die Abstrahlung von Wärme und Helligkeit über Milliarden von Jahren erklären.

Kernfusion im Inneren der Sonne:

Eine Kernverschmelzung ist das Zusammenfügen von leichten Kernen zu schwereren, wobei große Energiemengen freigesetzt werden. Die Sonne bezieht ihre Strahlungsenergie aus einem solchen Vorgang, welcher Proton-Proton-Reaktion heißt. Da verschmelzen sich Deuteriumkerne zu Heliumkernen bei Temperaturen um 100 Millionen °C. Dieser Fusionsprozess erfolgt nicht von selbst, da beide Wasserstoffkerne positiv geladen sind und sich somit abstoßen. Bei solch hohen Temperaturen, wie sie im Sonneninneren sind, sind die Atome vollständig ionisiert und somit die Elektronen nicht mehr an die Atomkerne gebunden. Alle Teilchen können sich frei bewegen, wodurch die Bewegungsenergie in der Sonne so groß ist, dass die Protonen sich stark nähern und fusionieren. Diesen Zustand der Materie bezeichnet man als Plasma.

Wenn zwei Kerne mit großer Geschwindigkeit (>1000 km/s) aufeinander zufliegen werden die Abstoßungskräfte ebenfalls überwunden. Diese Geschwindigkeit erhalten Teilchen bei hohen Temperaturen wie etwa in der Sonne bei 100 Millionen° C. Stark vereinfacht kann man diese Proton-Proton-Reaktion als die Verschmelzung von vier Protonen zu einem Heliumkern beschreiben. Bei den verschiedenen Zwischenstadien werden Positronen, Neutrinos und Gammastrahlung erzeugt. Das Positron ist ein Elementarteilchen, das die gleiche Masse hat wie ein Elektron, jedoch eine positive Elementarladung trägt. Das Neutrino ist ein neutrales Elementarteilchen. Bis heute konnte man noch nicht nachweisen, dass das Neutrino eine Masse hat. Im Vergleich zur Masse des Elektrons wäre sie jedenfalls sehr klein. Die Neutrinos tragen einen geringen Teil der Energie aus der Sonne weg.

In jeder Sekunde fusionieren 564 Millionen Tonnen Wasserstoff (kerne) in 560 Millionen Tonnen Helium(kerne). Die fehlenden 4 Millionen Tonnen Masse wandeln sich nach Einsteins Theorie $E = mc^2$ in Energie um.

Heute ist klar, dass die Kernenergie die ergiebigste Energiequelle ist. Schon 1905 erkannte Albert Einstein, dass in der Masse der Stoffe eine riesige Energie gespeichert ist. Er stellte in seiner Relativitätstheorie die Beziehung $E=mc^2$ auf, wobei E die Energie, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit ist.

$W = 3,8 \times 10^{26}$ J. Diese Energie wird in jeder Sekunde Form von Strahlung freigesetzt.

Durch diesen Prozess verändert die Sonne ihre chemische Zusammensetzung. Der Heliumanteil nimmt zu, der Wasserstoffanteil nimmt ab. Diese Veränderung wird als Teil der Sonnenentwicklung angesehen. Der Heliumanteil im Sonneninneren zeigt das Alter der Sonne. Die Sonne strahlt bereits seit 4,5 Milliarden Jahren und hat ungefähr die Hälfte ihres Vorrates an Wasserstoff verbraucht. Der Wasserstoffvorrat reicht also noch Milliarden von Jahre.

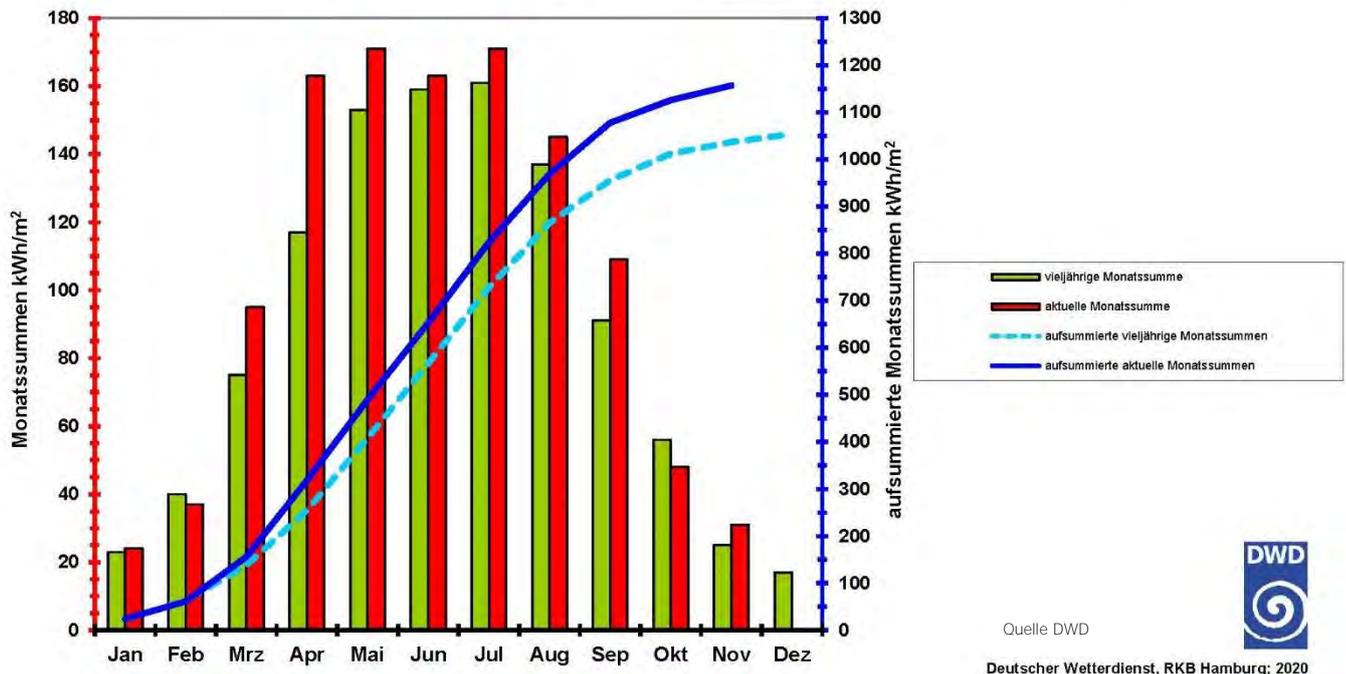
In dieser Gleichung kommt ein Zusammenhang zum Ausdruck, der für das Verständnis einer Reihe von Naturerscheinungen grundlegend ist: Masse und Energie sind einander äquivalent. In der Sonne verschmelzen in jeder Sekunde 567 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 562,8 Millionen Tonnen Helium. Somit wird unsere Sonne in jeder Sekunde um 4,2 Millionen Tonnen leichter. Dieser Massedefekt wandelt sich in Energie um, die als Strahlungsenergie in den Weltraum hinaus abgestrahlt wird: **So entstehen die Sonnenstrahlen !**

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

Jahresgang der Globalstrahlung 2020 im Vergleich zum langjährigen Mittel 1981 - 2010 (deutschlandweites Flächenmittel)



Die Grafik zeigt die eingestrahelte Strahlungsenergie der Solarstrahlung in Deutschland in kWh pro 1m² (Mittelwert über alle Regionen) nach Monaten. Die roten Säulen sind die Messwerte aus 2020, die grünen Säulen die langjährigen Mittelwerte (die Dezembermesswerte lagen zur Drucklegung noch nicht vor).

Die **blaue Linie** ist die Addition der Monatssummen, für das Jahr 2020 wird der Wert bei ca. 1200 kWh/m²/a liegen. Nimmt man für den Wert dieser Energie den aktuellen Strompreis von 30 ct./kWh, so hat die **Solarenergienstrahlung pro 1m² im Jahr einen Wert von 360 €!**

Die **blau gestrichelte Linie** zeigt das langjährige Mittel, Jahressumme ca. 1150 kWh/m²/a, 2020 war also ein gutes Jahr, ein positiver Aspekt des sonst so problematischen Klimawandels!

Ein Problem der Solarenergie ist die sehr unterschiedliche Einstrahlung zwischen Sommer- und Winterhalbjahr im Faktor 1:8, von Januar bis Juli!

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

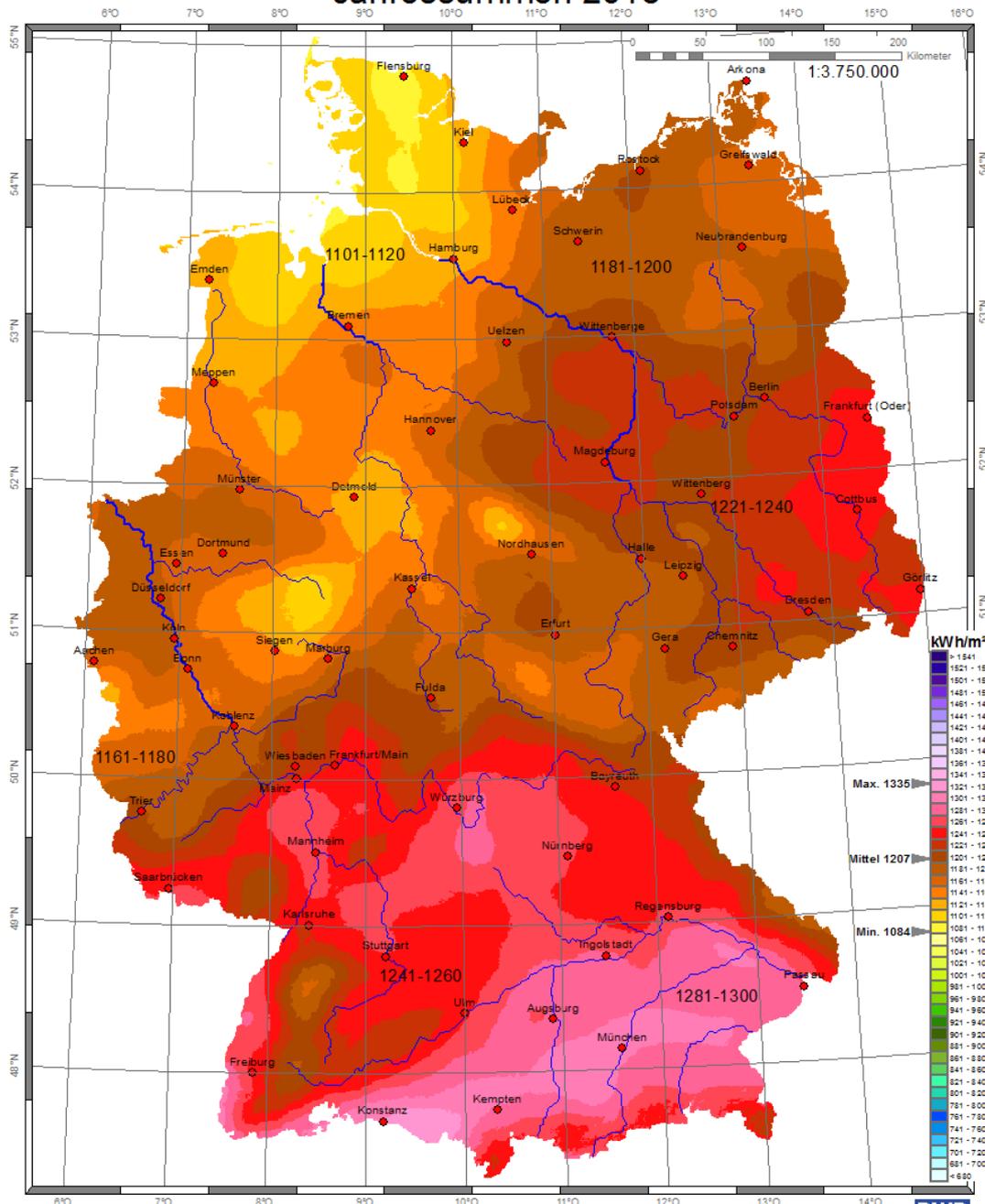
SUNdidactics Solar Systems Hildesheim, Germany

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

Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland

Basierend auf Satellitendaten und Bodenwerte aus dem DWD-Messnetz

Jahressummen 2018





Photovoltaik-
System
SUSE

Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung



Aufbau und Funktion einer Silizium- Solarzelle II

Klassenstufen 7-8 Alter 13-14 Jahre



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!



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
Solar didactics + solar cells + solar modules + photovoltaic experiment devices + solar toys + solar education and training

SUNdidactics Solar Systems

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

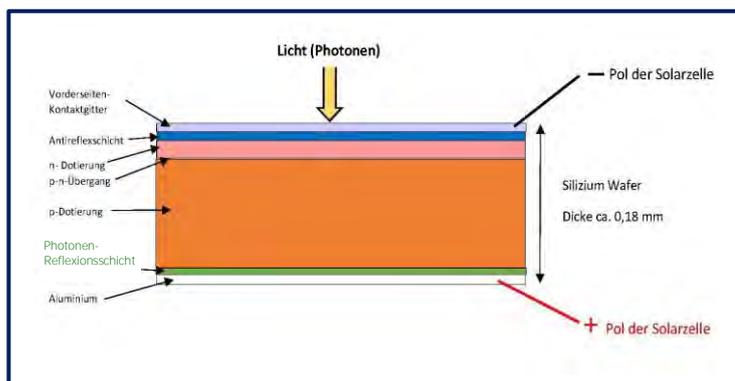
Phone: +49(0)5121 860730 Fax: +49(0)3222 3706689 Mail: info@sundidactics.de Mobile: +49(0)1757660607 Web: www.sundidactics.de

Funktion Solarzelle III



Aufbau und Funktion einer Silizium- Solarzelle III

ab Klassenstufe 9 Alter 13+ mit Halbleiterkenntnissen



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:

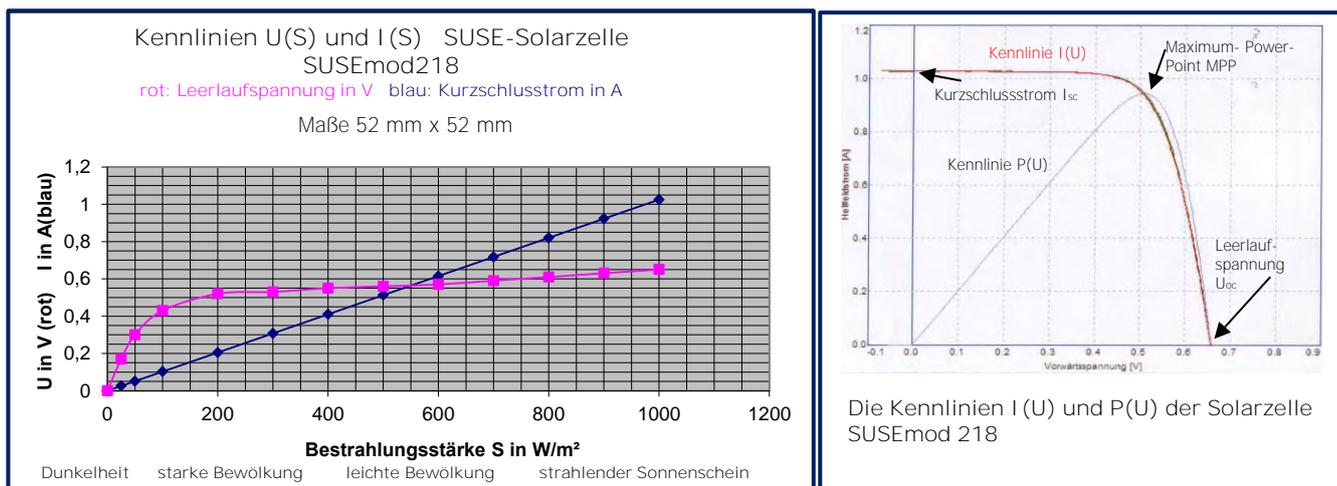
- Fläche der Solarzelle: Je höher die Fläche, desto höher ist I (direkt proportional)!
- Intensität der auftreffenden Lichtstrahlung: Je höher die Lichtintensität S , desto höher ist I_{sc} (direkt proportional)!
- Qualität der Solarzelle (sehr guter Solarzellen: $I_{sc} = 38 - 42 \text{ mA/cm}^2$)!

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.

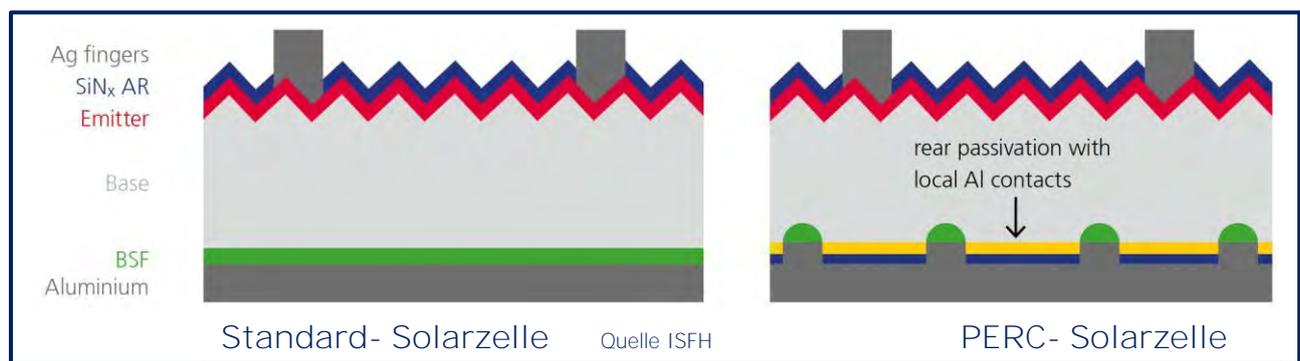
Solardidactic – Solarzellen – Solarmodule – PV- Experimentiergeräte – PV –Experimentieranleitungen – Solarthermie- Experimentiergeräte
 didaktische Konzepte – Solarberatung – Fortbildung – solare Aus- und Weiterbildung – Solarspielzeug
Solardidactics + solar cells + solar modules + photovoltaic experiment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

Funktion der Solarzelle IV

PERC ein neues Solarzellenkonzept für hohen Wirkungsgrad >21%!



Ag fingers	Linienförmige Leiter an der Solarzellenoberseite aus reinem Silber, aufgebracht im Siebdruckverfahren- Minuspol der Solarzelle
SiNx AR	Antireflexschicht aus Siliziumnitrid, verursacht das tiefdunkelblaue Aussehen der Solarzellenoberfläche
Emittter	Dünne n- dotierte Schicht (Dotierung mit Phosphor)
Base	p- dotierte Schicht (Dotierung mit Bor)
BSF	Back Surface Field – E- Feld an der Rückseite
Aluminium	Rückseite der Solarzelle, Pluspol der Solarzelle

Etwa 80% der heutzutage weltweit industriell produzierten Solarzellen verwenden multikristalline oder monokristalline Silizium Wafer in Kombination mit einem relativ einfachen Herstellungsprozess mit siebgedruckten Metallkontakten. Dabei wird der Aluminium Kontakt vollflächig auf den Si Wafer gedruckt und beim Feuern ein Aluminium Back-Surface-Field (Al-BSF) ausgebildet, welches die Zell-Wirkungsgrade auf 18% – 20% limitiert. Derzeit stellt die weltweite PV Industrie die Produktion auf „**Passivated Emitter and Rear Cell**“ (PERC) Solarzellen um, bei denen die Zellrückseite mit einer dielektrischen Schicht, z.B. AlO_x/SiN_y , beschichtet ist und die Al Schicht den Si Wafer nur noch lokal kontaktiert. Damit werden weltweit typische Wirkungsgrade von 20%-22% erreicht.

Die Arbeitsgruppe Industrielle Solarzellen hat im SolarTeC Technikum des ISFH einen industrietypischen PERC Referenzprozess implementiert mit monokristallinen $156 \times 156 \text{ mm}^2$ großen Silizium Wafern und Wirkungsgraden bis 21,5% mit einer sehr geringen Streuung des Wirkungsgrades von nur $\pm 0,15\%$. Dabei werden im SolarTeC Technikum des ISFH industrietypische Produktionsanlagen für die Herstellung der PERC Solarzellen eingesetzt. Ausgehend von diesem industriellen PERC Referenzprozess entwickelt die Arbeitsgruppe verbesserte Herstellungsprozesse mit dem Ziel, den Wirkungsgrad der PERC Solarzellen weiter zu steigern bei möglichst gleichbleibenden oder sogar niedrigeren Herstellungskosten. Die Entwicklungsarbeiten erfolgen dabei überwiegend in Zusammenarbeit mit Anlagenbauern, Materialherstellern und Zellherstellern, um eine schnelle Überführung der neuen Prozesse in die Produktion zu ermöglichen. Zudem steht der PERC Referenzprozess der PV Industrie für Dienstleistungsaufträge zur Verfügung.

Feinlinien Siebdruckmetallisierung

Die Vorderseite der Solarzellen wird typischerweise mittels Siebdruck von Silberpasten kontaktiert. Die Arbeiten fokussieren sich insbesondere darauf, die Breite der Fingerkontakte zu verringern, um somit die Abschattung der Zelle zu verringern und den Wirkungsgrad zu steigern bei gleichzeitig verringertem Silberverbrauch. Aktuell steht hierbei die Verbesserung des Standardsiebdruckprozesses im Vordergrund sowie die Optimierung von Print-on-Print- und Schablonendruck-Verfahren mit Fingerbreiten kleiner 30 µm.

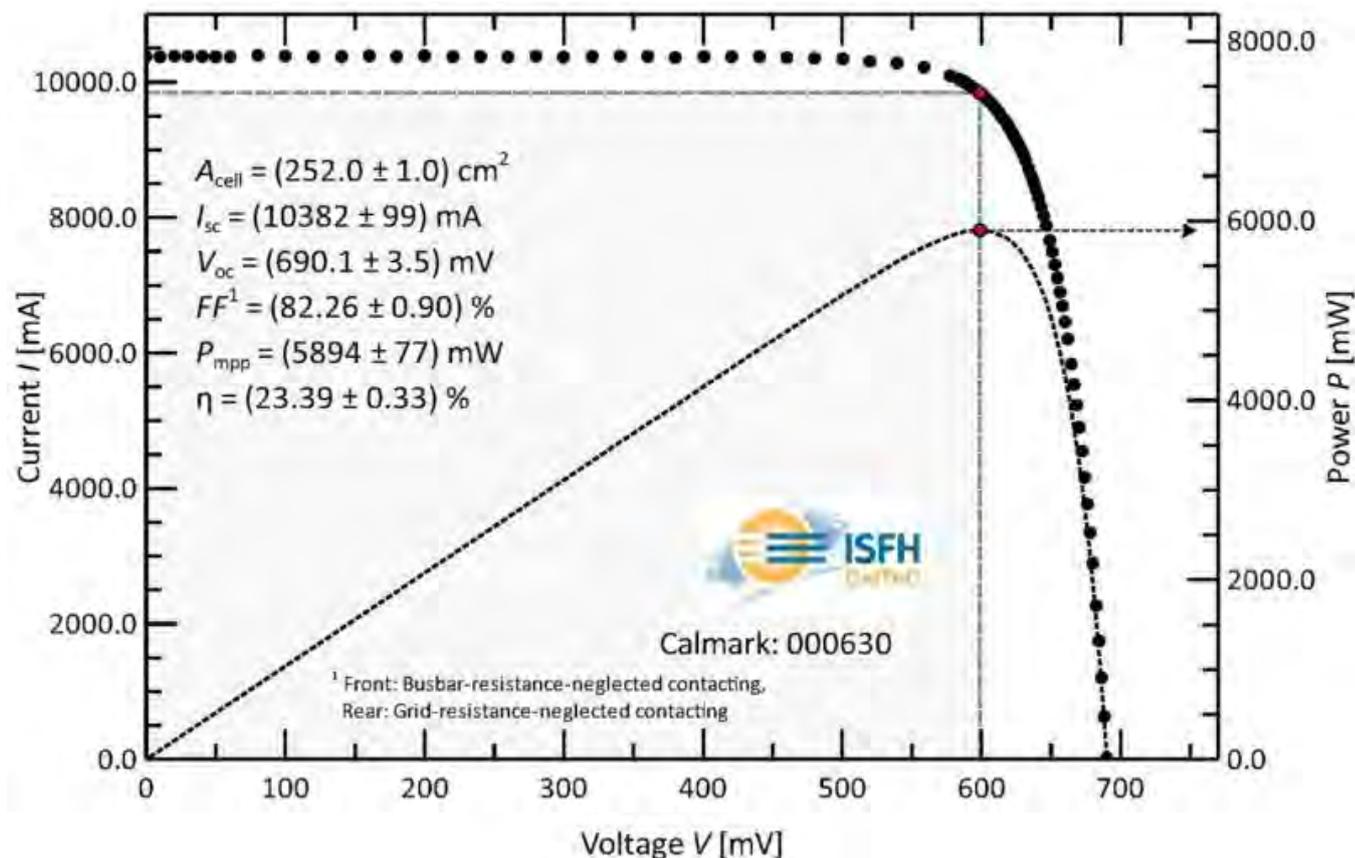
Selektiver Emitter

Für den Solarzellenwirkungsgrad ist es vorteilhaft, den Strom sammelnden Emitter auf der Vorderseite in verschiedenen Bereichen unterschiedlich stark zu dotieren, um somit einerseits einen guten elektrischen Kontakt der Metallfinger zu ermöglichen und andererseits die Ladungsträgerrekombination in den Zwischenfingerbereichen zu minimieren. In der Gruppe Produktionsprozesse werden verschiedene Herstellungsvarianten eines solchen selektiven Emitters entwickelt und auf den PERC Prozess angewendet.

Bifaziale PERC+ Solarzellen

Bei heutigen industriellen PERC Solarzellen wird die Rückseite vollflächig mit Aluminium bedruckt. Das am ISFH entwickelte PERC+ Zellkonzept verwendet dagegen ein Aluminium Fingergrid auf der Rückseite, welches justiert zur Laserkontaktöffnung mittels Siebdruck aufgebracht wird. Das Al Fingergrid ermöglicht bifaziale Anwendungen, also die Lichtabsorption von der Zellvorder- und Zellrückseite, welches bei geeigneter Aufständigung den Energieertrag von Solarkraftwerken um etwa 5% bis 10% steigern kann. Zudem verringert das Al Fingergrid den Al Pastenverbrauch und verbessert die elektrischen Kontakteigenschaften. In Zusammenarbeit mit mehreren Industriepartnern werden die Herstellprozesse weiterentwickelt, um das vielversprechende PERC+ Zellkonzept in die Industrie zu überführen. Quelle: ISFH

I (U) und P(U)- Kennlinie einer PERC- Solarzelle mit 23,39% Wirkungsgrad Quelle: ISFH



Aufbau und Funktion von Solarmodulen I

Das nebenstehende Foto zeigt ein 300 Watt- Solarmodul der Firma Solarwatt aus Dresden. Es enthält 60 Solarzellen in interner Reihenschaltung, es hat etwa die Größe einer Tür. Die einzelnen Solarzellen haben das Maß 15,6 cm x 15,6 cm. Die verschalteten Solarzellen liegen zwischen 2 Laminatfolien unter einer Solarglasplatte (hohe Lichtdurchlässigkeit und hohe Stabilität z.B. gegen Hagelschlag). Die Rückseite ist meist eine Kunststoffplatte oder eine Glasplatte, alles komplett eingefasst mit einem stabilen Aluminiumrahmen.

Auf der Rückseite befindet sich eine Anschlussbox mit 2 Anschlusskabeln, der **Plusanschluss** (der 1. Solarzelle) und der **Minusanschluss** (der 60. Solarzelle).

Die Spannung ist ca. 40 Volt, die maximale Stromstärke ca. 9A.

Solarmodule gibt es mit unterschiedlicher Solarzellenzahl und Solarzellengröße im Leistungsspektrum zwischen 5W500W.

Das mittlere Foto zeigt das SUSE- Solarmodul SUSE 4.52 mit einer Leistung von 10W, Größe ca. DINA4.

Hier sind 18 kleinere Solarzellen in interner Reihenschaltung verbaut, die Gesamtspannung ist ca. 11V, die maximale Stromstärke 1,2 A.

Für leistungsstarke Anlagen auf Dächern oder im Freiland werden viele Solarmodule (bis mehreren tausend Stück!) miteinander verschaltet, so dass sich hohe elektrische Leitungen bis in den MW- Bereich ergeben. Diese Anlagen nennt man „Solargenerator“.

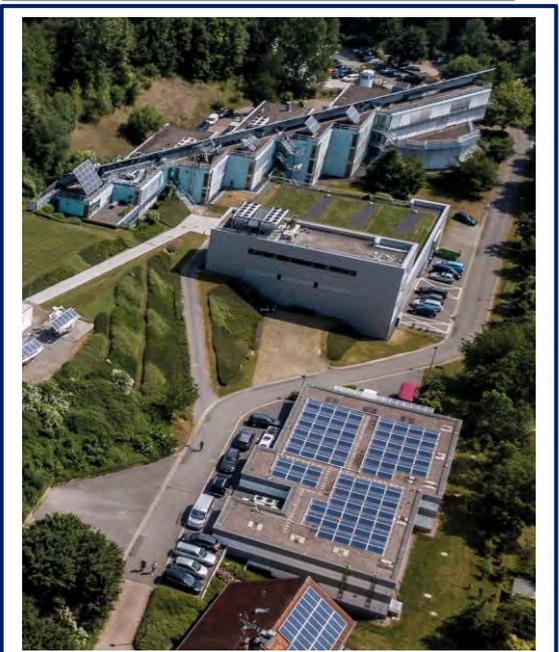
Das Foto unten rechts zeigt Solargeneratoren auf den Dächern mehrerer ISFH- Gebäude mit einer Gesamtleistung von ca. 40 kW. Da die Solarmodule Gleichstrom produzieren, muss der Strom in einem Wechselrichter in den hier üblichen Netz- Wechselstrom mit 50Hz umgewandelt werden. Auf dem Foto unten ist eine Freiland- Anlage in Brandenburg mit tausenden Solarmodulen zu sehen, sie liefert eine elektrische Leistung von ca. 145 MW. Der Solarstrom ist sehr preiswert, bei großen Anlagen liegen die Kosten bei ca. 4- 5 Cent/kWh.

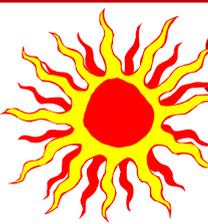


300W Solarmodul Quelle: Solarwatt



10W Solarmodul SUSE 4.52





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
Solar didaktik
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)

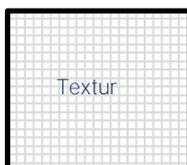
1. Silizium (Si) -Wafer p- dotiert mit Bor bei der Herstellung des Wafers



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).

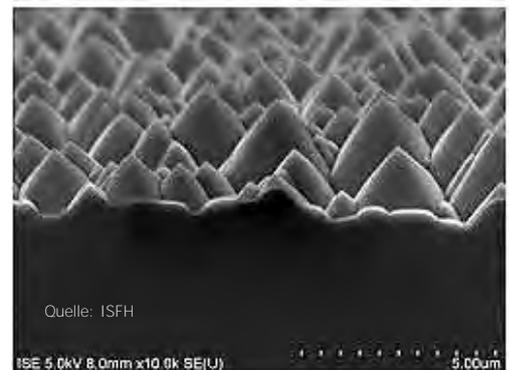


2. Texturierung mit Lauge



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 dient zur Minderung der Lichtreflexion an der Oberfläche. Die Aufnahme rechts mit 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

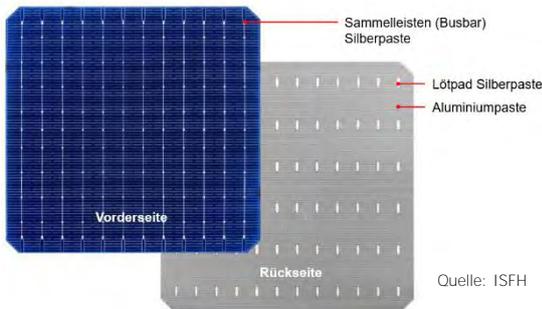
Die dielektrische Al_2O_3 - Schicht auf der Rückseite der Solarzelle wird mit einem Laserprozess geöffnet, d.h. es werden mit einem Laserstrahl die Schichten lokal verdampft. Die Öffnungen sind Punkte mit einem Durchmesser von 20 – 50 μm .

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 (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 μm), 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_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.

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

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

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

Die Geräte der Lernstation SEKII-1 Version2021

Jg. 11- 13 (Schüler 17 - 20 Jahre) Gy, IGS, KGS, BBS

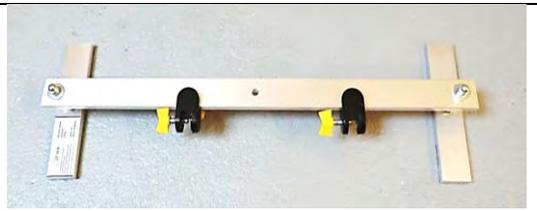
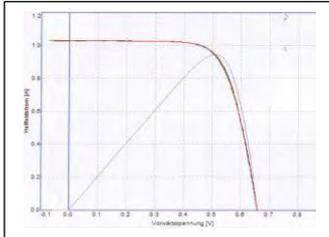
Lernstation für schülerzentrierte Experimente für 3 SchülerInnen in Arbeitsgruppe

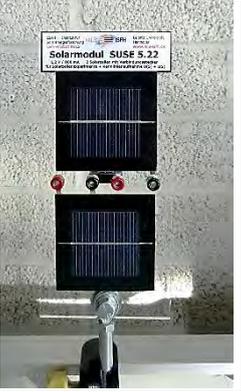
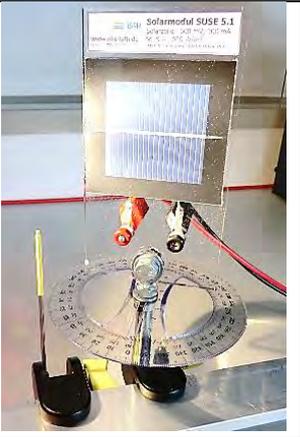
Die Lernstation SEKII-1-2021 enthält Photovoltaik- Experimentiergeräte für eine Arbeitsgruppe von 3 SchülerInnen für SEKII- Experimente zur Solarenergie, zur Photovoltaik und Halbleiterphysik. Mit den Anleitungen können qualifizierte Experimente selbständig durchgeführt werden.

Neben dem gelieferten Material sind aus der Sammlung der Schule erforderlich:

1. Netzgerät 12 V DC, >3A zum Betrieb der Halogenleuchte SUSE 5.16
2. Schulübliche Muffen für die optische Bank (Leybold- oder Phywe- Muffe)
3. Optional: Messinterface z.B. CassyLab, Vernier o.ä. zur Aufnahme von Kennlinien

Netzgerät und Muffen sind nicht im Lieferumfang!

Gerät	Kurzbeschreibung	Foto
1. Optische Bank SUSE 5.0-Alu	Robuste optische Bank aus Aluminium zum Aufbau und Durchführung der Experimente Die Muffen zeigen den Einsatz auf der optischen Bank, sie sind nicht im Lieferumfang	
2. Halogenstrahler SUSE 5.16 Experimentierleuchte	Halogenstrahler 12V/35 W auf Stativfuß zum Einsatz auf der optischen Bank mit Muffe. Mit der Experimentierleuchte werden die Solarzellen bestrahlt, um Messungen und Experimente durchzuführen. Das Dach über dem 35W-Reflektorstrahler schützt vor zufälligen Berührungen der heißen Lampe. Zum Betrieb ist ein Netzgerät 12V (DC oder AC) mit 2 Laborkabeln erforderlich, I > 3A! Der Reflektorstrahler kann vertikal geschwenkt werden.	
3. Kennlinienmodul SUSE 5.15	Mit dem Kennlinienmodul lassen sich die I-U- und die P-U-Kennlinie aufnehmen und den Wirkungsgrad und den MPP einer Solarzelle zu bestimmen. Hier der Einsatz eines automatischen Messinterfaces z.B. CassyLab o.ä. sinnvoll. Automatisch werden damit beim Drehen des Potentiometers eine große Anzahl Messwerte aufgenommen und graphisch dargestellt.	 

<p>4. Solarmodul SUSE 5.22</p>	<p>Mit dem 2-Solarzellen-Modul SUSE 5.22 lassen sich Experimente zu den physikalischen Eigenschaften von Solarzellen im Freien oder auf der optischen Bank durchführen, mit Multimetern oder mit einem Mess-Interface. Das Modul enthält 2 identische Solarzellen, mit einem Verbindungsstecker lassen sich die beiden Solarzellen in Reihe schalten. Mit diesem Modul lassen sich zahlreiche Experimente zur Einzelsolarzelle und zur Reihen- und Parallelschaltung durchführen. Das Modul wird mit einer Muffe auf der optischen Bank befestigt.</p>	
<p>5. Solarmodul (Winkelmodul) SUSE 5.1alpha</p>	<p>Mit dem Solarmodul lassen sich die Abhängigkeiten von U, I, P vom Einstrahlungswinkel auf der optischen Bank messen. Mit der Kreiswinkelscheibe kann die Solarzelle stufenlos mit genauer Winkelablesung gedreht werden, so dass sich genaue Messwerttabellen U(alpha), I(alpha) und P(alpha) und mathematische Funktionen erstellen lassen. Der gelbe Stift markiert die 0- Grad- Position.</p>	
<p>6. Solar- Speichermodul SUSE 4.12</p>	<p>Das Speichermodul enthält 2 Superkondensatoren mit je 5F (in Reihenschaltung) und kann die elektrische Energie der Solarzellen speichern. Bei 5V DC lässt sich eine Energie von 62,5 J speichern. Es können Auf- und Entladevorgänge beobachtet und gemessen werden. Wird der Solarmotor SUSE 4.16 als elektrische Last angeschlossen, dauert die Entladung über 15 Minuten!</p>	
<p>7. Solarmotor SUSE4.16</p>	<p>Der Solarmotor SUSE 4.16 kann an Solarzellen oder an das Speichermodul SUSE 4.12 angeschlossen werden, er dient auch bei der Messung von Entladevorgängen als elektrische Last. Am Solarmodul bei 1,3 V Spannung (5.22 in Reihenschaltung) fließen ca. 60 mA bei hoher Propellerdrehzahl. Der Motor kann auch als Generator verwendet werden, pustet man auf den Propeller entsteht eine Generatorspannung von ca. 1....3 V DC, damit lässt sich auch der Solarspeicher 4.12 aufladen.</p>	

Zubehör: 1 Digital- Multimeter zur Durchführung der Messungen mit 2 Messleitungen mit Messspitzen.
4 Laborkabel 50 cm, 4mm- Büschelstecker, 2x rot und 2x schwarz
1 Handbuch auf USB- stick mit solardidaktischen Grundlagen (Solarstrahlung, Halbleiterphysik, Solarzelle), Gerätedateien und Experimentieranleitungen.
1 Box mit 2 Solarzellen und 1 Silizium- Wafer für Anschauungszwecke

Auf den folgenden Seiten werden die Geräte und Zubehörelemente ausführlich dargestellt.



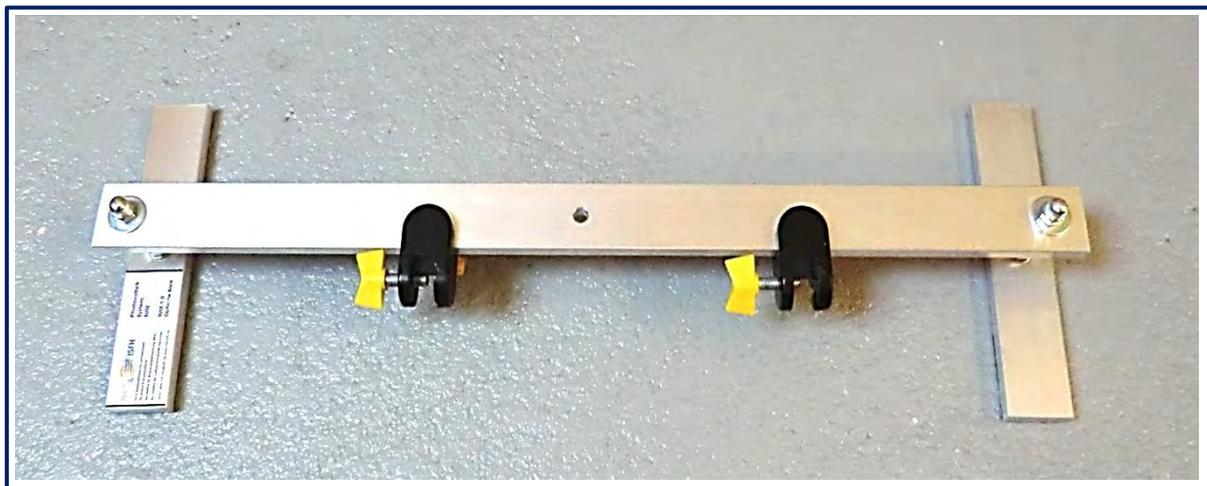
Photovoltaik-
System
SUSE

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne



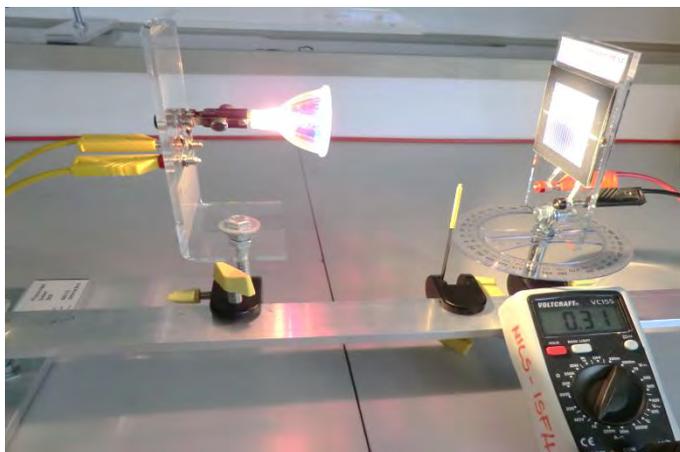
Optische Bank 5.0alu für PV- Experimente für die Experimentiergeräte der SUSE 5.xx Serie (SEK II)



Das Foto zeigt die optische Bank 5.0alu.

Die Länge ist 450 mm, die Breite der Füße 200 mm. Der Träger ist ein robustes und stabiles Aluminiumprofil 30 x 6 mm. Die optische Bank ist besonders für Photovoltaik- Schüler- Experimente in der Sekundarstufe II geeignet.

Mit schulüblichen Doppelmuffen (nicht im Lieferumfang!) können Geräte der SUSE 5.xx- Serie mit M8- Gewindestangen auf der Bank befestigt werden.



Auf dem nebenstehenden Foto ist ein Versuchsaufbau auf der optischen Bank zu sehen, links die Halogen- Experimentierleuchte SUSE 5.16, rechts das Solarmodul SUSE 5.1alpha mit Winkelskala und Messstift.



Photovoltaik-
System
SUSE

Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung



BNE
Bildung für
Nachhaltige
Entwicklung

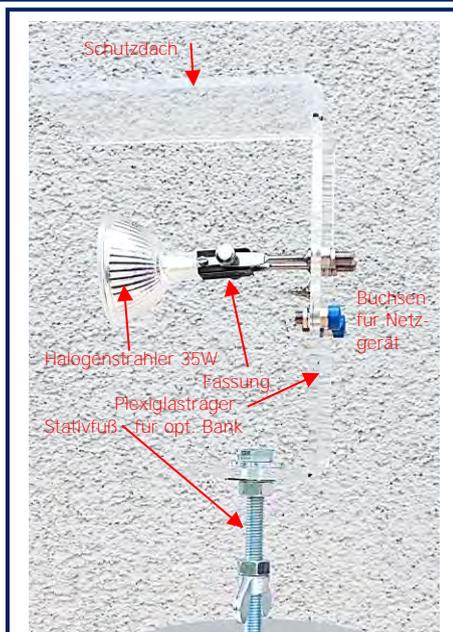
Das Halogenlampen- Modul SUSE 5.16

Optischer Strahler mit Reflektor- Halogenlampe

U=12V P=35 W für Photovoltaik- Experimente mit Solarzellen auf der optischen Bank SUSE 5.0alu oder auf anderen schulüblichen optischen Bänken



SUSE 5.16



Das Halogenlampen- Modul SUSE 5.16 dient als Lichtquelle für Photovoltaik- Experimente mit dem System SUSE 5.xx auf der optischen Bank SUSE 5.0alu.

Es besteht aus einem zweifach um 90° gebogenen Plexiglassträger mit 4mm Stärke.

Am Gerätefuß ist der 80mm- Schraubstutzen befestigt, mit dem das Modul auf der optischen Bank SUSE 5.0alu oder jeder anderen schulüblichen Bank befestigt werden kann. Auch an sonstigen Stativsystemen kann der Schraubstutzen befestigt werden.

Das „Dach“ dient zum Schutz vor zufälliger Berührung der heißen Halogenlampe. Auf der Rückseite sind 2 Buchsen zum Anschluss an ein Netzgerät mit 12 V/>4A angebracht. Für den Anschluss genügen handelsübliche Laborkabel, die für eine Stromstärke von 4A zugelassen sind.

Die Halogenlampenfassung passt für handelsübliche 12 V- Halogen-Reflektorstrahler mit 35 W. Sie kann vertikal geschwenkt werden, um die Solarzellen präzise auszuleuchten.



Foto links:

Das Halogenlampenmodul im Einsatz auf der optischen Bank SUSE 5.0 für Messungen mit dem Solarmodul SUSE 5.1alpha. Das Schutzdach über dem Reflektorstrahler schützt vor zufälliger Berührung

Sicherheitsvorschriften

- Vorsicht, die Lampe wird im Betrieb heiß! Verbrennungsgefahr bei Berührung!
- Lampe nur zum Experimentieren einschalten!
- Nur zum Bestrahlen von Solarzellen verwenden, minimaler Abstand kurzfristig 25 cm!
- Lampe nach Experiment sofort ausschalten, nicht unbeobachtet in Betrieb lassen!
- Keine brennbaren Materialien bestrahlen!
- Spannung maximal 12,0 – 13,8 V AC oder DC verwenden!

Maximale Spannung: 12,0 V - 13,8 V DC/AC

Es können handelsübliche Halogenreflektoren verwendet werden die Fassung ist geeignet für Halogen- Reflektorstrahler mit 12V/20 W oder 12V/35W. LED- Reflektorlampen sind für Solarzellenexperimente wegen des „falschen“ Lichtspektrums ungeeignet.

Zum Versand wird der Halogenstrahler aus Sicherheitsgründen noch nicht eingesetzt, vor Erstgebrauch einsetzen und Madenschrauben fest anziehen!

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 Solarmodul SUSE 5.15

SUSE 5.15 ist ein spezielles Kennlinien- Solarmodul für folgende Experimente:

- Aufnahme der I (U) und der P(U)- Kennlinie (Hellkennlinie) einer Solarzelle
- Aufnahme der I (U) Kennlinie (Dunkelkennlinie) einer Solarzelle
- Bestimmung der Maximum- Power- Point (MPP) einer Solarzelle
- Bestimmung **des Wirkungsgrades η einer Solarzelle**



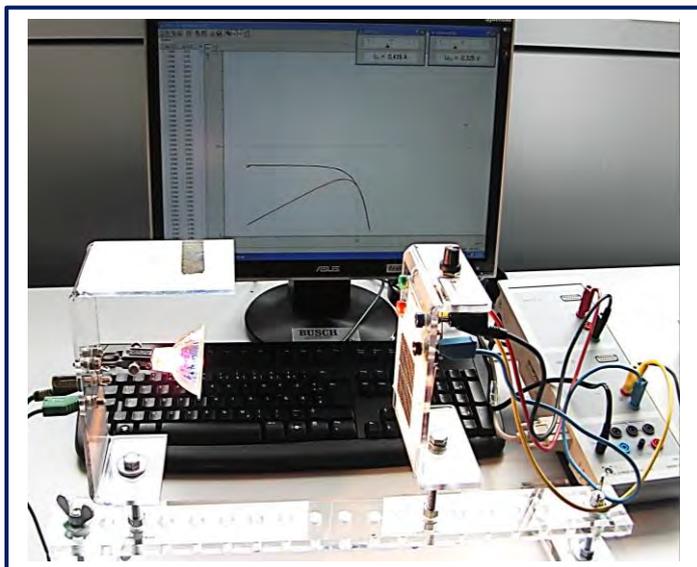
Das Photovoltaik- Experimentiergerät SUSE 5.15 ist ein Spezialgerät für Experimente zur Aufnahme der Hellkennlinie I(U)-Kennlinie, P(U) - Kennlinie und Bestimmung des MPP (Maximum- Power- Point) und des Wirkungsgrades einer Solarzelle sowie zur Aufnahme der Dunkelkennlinie (Diodenkennlinie) der Solarzelle.

Im Sonnenlicht oder in Verbindung mit einer 12 V- Halogenlampe 35/50 W (SUSE 5.16) oder anderer geeigneter Lichtquellen können U-I-Kennlinien und Kennlinienscharen sowie die MPP- Kurven P(U) für verschiedene Bestrahlungsstärken S experimentell bestimmt werden.

Mit der abgedunkelten Zelle kann die Dunkelkennlinie aufgenommen werden und bei Bestrahlung die Verschiebung der Dunkelkennlinie in den 4. Quadranten beobachtet werden.

Die Messungen lassen sich mit Multimetern, mit einem Oszilloskop oder unter Verwendung eines computergesteuerten Messwertsystems (CassyLab o.ä.) mit hoher Genauigkeit schnell PC- gesteuert durchführen.

Foto rechts: In der Mitte des Gerätes befindet sich die Solarzelle SUSEmod218 (0,65 V/1025 mA), darüber das schwarz- rote Buchsenpaar zur Messung der Solarzellenspannung, das grün- blaue Buchsenpaar zur Messung des Laststroms, ganz oben das Last- Potenziometer mit dem schwarzen Drehknopf. Die Leitungsführung erfolgt mit 1,5mm² dicken Cu- Leitern, um die ohmschen Widerstände zu minimieren!



Linkes Foto:

Messaufbau mit dem Kennlinienmodul SUSE 5.15 auf einer optischen Bank mit dem Halogenstrahler SUSE 5.16. Zur automatischen Messung wird hier das Interface CassyLab eingesetzt.

Auf dem Bildschirm erkennt man in schwarz die I(U)- Kennlinie und in rot die P(U)- Kennlinie mit dem MPP (Maximum- Power- Point) im Maximum der roten Kurve. Die Experimente können auch **im „Handbetrieb“** mit 2 Multimetern oder mit einem Mess- Interface (z.B. CassyLab) durchgeführt werden. Das Gerät ist mit dem Stativfuß 8 mm für den Einsatz auf einer optischen Bank SUSE 5.0 oder für jede schulübliche optische Bank konstruiert. Für die Experimente gibt es eine umfangreiche Versuchsanleitung und Lernstationen SEKII.

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 Solarmodul SUSE 5.22

Solarmodul mit 2 identischen Solarzellen in steckbarer Reihenschaltung für Experimente zur Kennlinienaufnahme $U(S)$ und $I(S)$, Reihen- und Parallelschaltung besonders geeignet für den experimentellen Unterricht in den Jahrgängen 10 - 13



Das Photovoltaik- Experimentiergerät SUSE 5.22 besteht aus 2 identischen Solarzellen (0,6 V / 1025 mA) mit jeweils eigenen + und – Anschlussbuchsen (Solarzelle 1: + rot, - schwarz; Solarzelle 2 + grün, - blau). Die Solarzellen können einzeln getrennt oder mit einem Verbindungs- Schalter in Reihenschaltung verwendet werden. SUSE 5.22 ist speziell für Experimente mit der optischen Bank SUSE 5.0 oder schulüblichen Stativsystemen in der gymnasialen Oberstufe ab Klassenstufe 10 geeignet.

Mit SUSE 5.22 lassen sich folgende Experimente im Freien im Sonnenlicht oder im Labor bei Bestrahlung mit Licht einer Halogenlampe (z.B. SUSE 5.16) durchführen:

- Physikalische Messungen an einer Solarzelle, Bestimmung aller relevanten Messdaten.
- Bestimmung der Bestrahlungsstärke S des Lichts aus dem Kurzschlussstrom der Solarzelle.
- Physikalische Messungen an einer Reihenschaltung oder an einer Parallelschaltung von zwei Solarzellen.
- Gleichzeitige Messung von Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom bei verschiedenen Bestrahlungsstärken (Lichtintensität), um die gegenseitige Abhängigkeit und die Kennlinien experimentell zu ermitteln.

Mit diesen Experimenten lassen sich experimentell ermittelte Graphen zur Abhängigkeit des Solarzellenspannung, des Kurzschlussstroms und der Solarzellenleistung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke S des Lichts erstellen.

Um Kabelschatten bei den Experimenten zu vermeiden, sollen die Laborkabel immer von der Rückseite gesteckt werden, die Buchsen sind beidseitig nutzbar!

Maße: Plexiglasträger 220 x 100 x 5 mm, Stativstange M8, Länge ca. 80 mm

Auf den Folgeseiten finden sich die technischen Daten der verwendeten Solarzelle SUSEmod218. In der Reihenschaltung ist die Gesamtspannung 1,3 V, der Kurzschlussstrom bleibt unverändert.



Foto oben:

Das Solarmodul SUSE 5.22 mit den beiden identischen Solarzellen SUSEmod218. Jede Solarzelle hat ein eigenes Buchsenpaar rot/schwarz (obere Zelle) bzw. grün/blau (untere Zelle). In der Mitte zwischen den Buchsen befindet sich der Schalter S , wird S nach rechts geschaltet, sind die beiden Solarzellen in Reihenschaltung verbunden. Die Summenspannung liegt dann zwischen rot + und blau -. Unten befindet sich die Stativstange M8 zur Befestigung mit einer Muffe auf einer optischen Bank.

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 speziell für Sundidactics Solar Systems konzipierte und gefertigte 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.

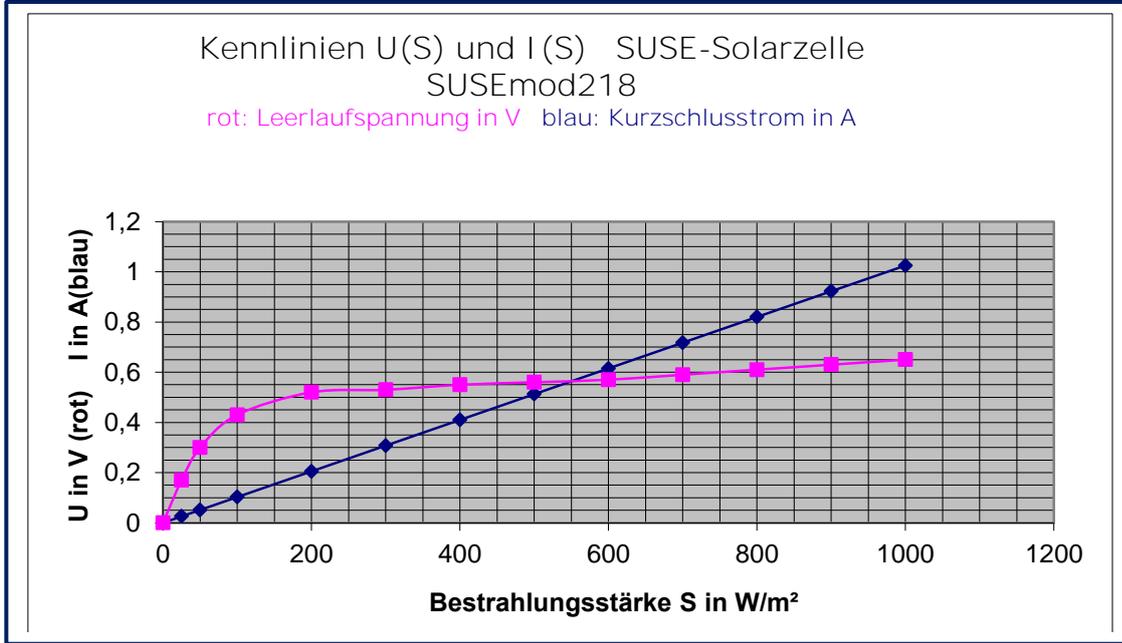
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch Siliziumnitrid-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

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 hochwertige Silizium- Solarzellen
Kurzschlussstrom	I _{sc}	1,025	A	Proportional zur Lichtintensität S
Spannung im MPP	U _{MPP}	0,507	V	Spannung im (MPP) <small>Maximum Power Point</small>
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

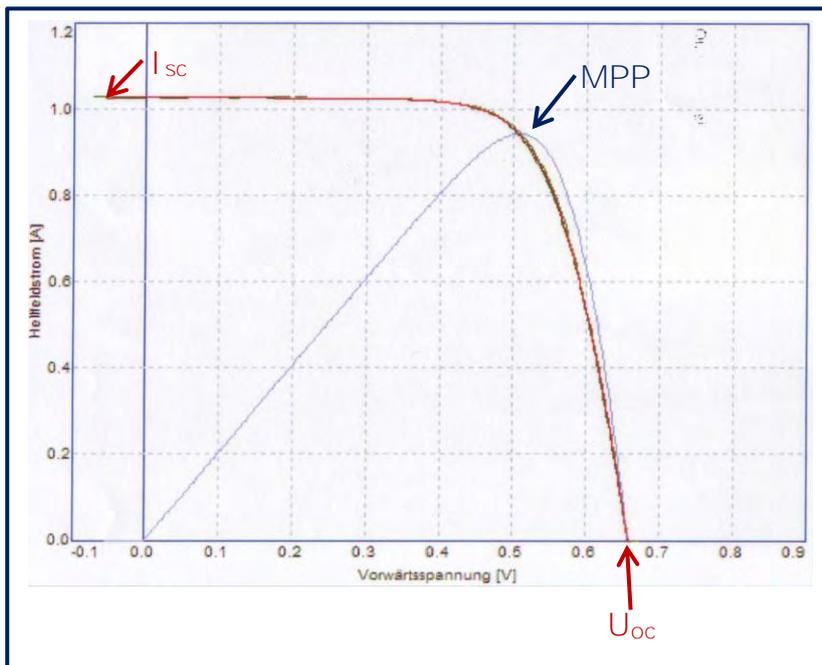
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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 (AM = Airmass)
aufgenommen im Kennlinienlabor des ISFH



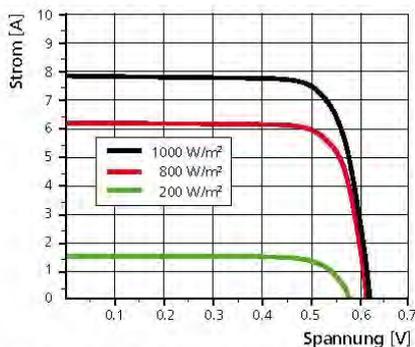
3. Weitere Daten (für die ganze Solarzelle 156 x 156 mm!), für die Solarzelle 52x 52mm im Modul SUSEmod218 muss die Stromstärke bei 3.1 und 3.3 durch 9 geteilt werden!

3.1 Intensitätsabhängigkeit

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

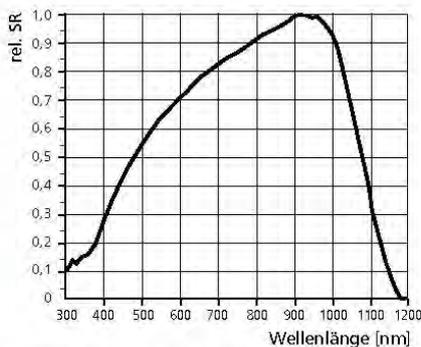
3.3 Temperaturabhängigkeit

IV-Kennlinie



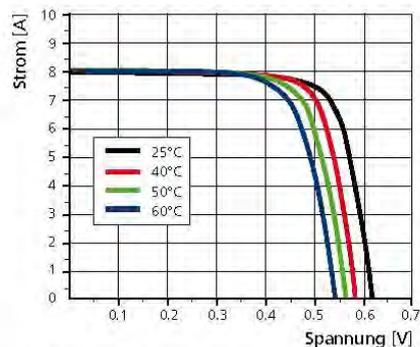
IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

Spektrale Empfindlichkeit



Kennlinie der spektralen Empfindlichkeit.

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

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



Photovoltaik-
System
SUSE

Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne

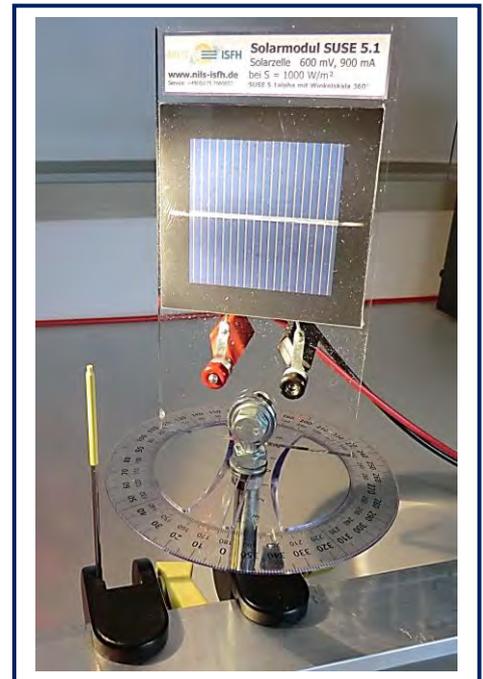
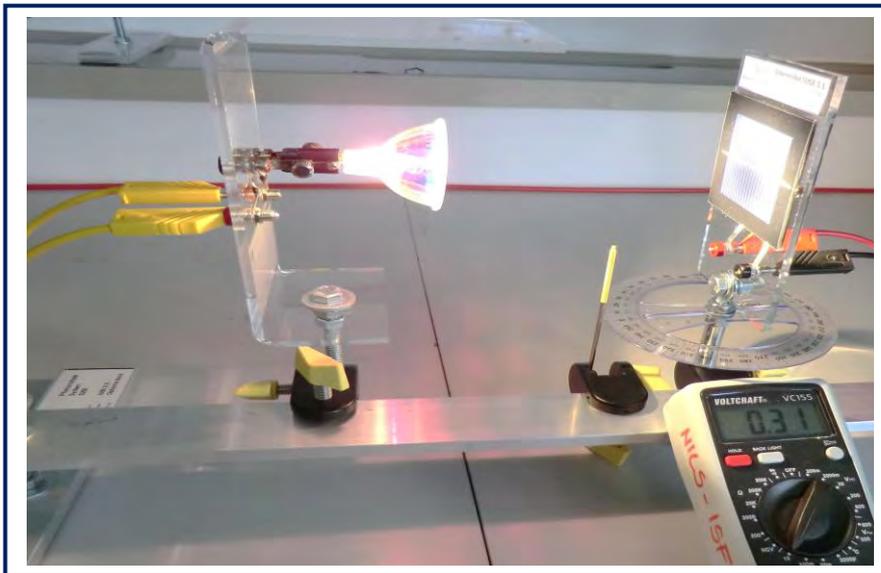
innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung



BNE
Bildung für
Nachhaltige
Entwicklung

Das Solarmodul SUSE 5.1alpha

Solarmodul mit Solarzelle 0,6 V/ 900mA mit Stativstange und Winkelskala 360° drehbar gelagert, zur Messung der Winkelabhängigkeit von U,I,P



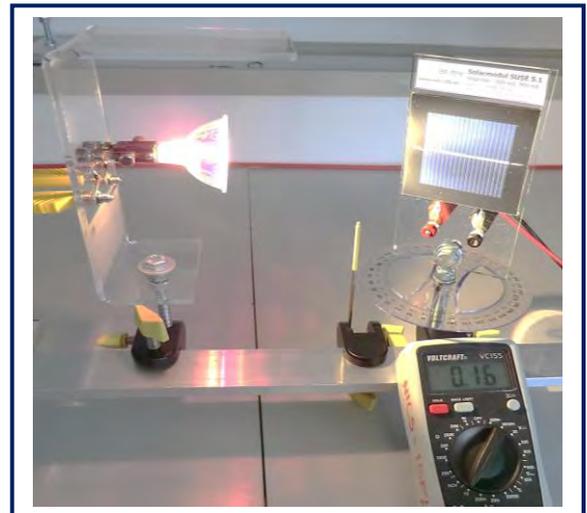
Das Foto oben rechts zeigt das Solarmodul SUSE 5.1alpha auf der optischen Bank SUSE 5.0. Auf der oberen Seite befindet sich die Solarzelle SUSEmod2 mit 2 Anschlussbuchsen, darunter die Winkelscheibe 360°, das Modul ist drehbar gelagert auf einer Stativstange 8 mm. An dem Metallstab (Messspitze) links (mit gelber Spitze) kann die Winkelposition zur einfallenden Lichtstrahlung an der Winkelscheibe abgelesen werden.

Im Bild oben ist der Messaufbau dargestellt. Auf der optischen Bank SUSE 5.0 befinden sich von links aus gesehen der Halogenstrahler SUSE 5.15 und rechts das Solarmodul SUSE 5.1alpha mit der gelben Messspitze.

Mit dem Multimeter wird der Kurzschlussstrom gemessen, hier im Beispiel $I = 0,31$ A. Zur Messung der Leerlaufspannung U wird lediglich das Messgerät umgeschaltet. Nun kann das Modul in Winkelschritten gedreht werden und Messwertpaare I bzw. U vom Winkel können abgelesen werden.

Gleichzeitig kann der zu erwartende Wert auch theoretisch berechnet werden, die Abhängigkeit hat eine \cos - Funktion, bei einer Drehung um 60° halbiert sich die Stromstärke.

Diesen Effekt zeigt das rechte Bild: I reduziert sich auf die Hälfte (0,16 A, vorher 0,31 A). Die Leistung P lässt sich aus U und I berechnen: ($P = U_{oc} * I_{sc} * 0,8$). Auf den Folgeseiten finden sich die technischen Daten der verwendeten Solarzelle.



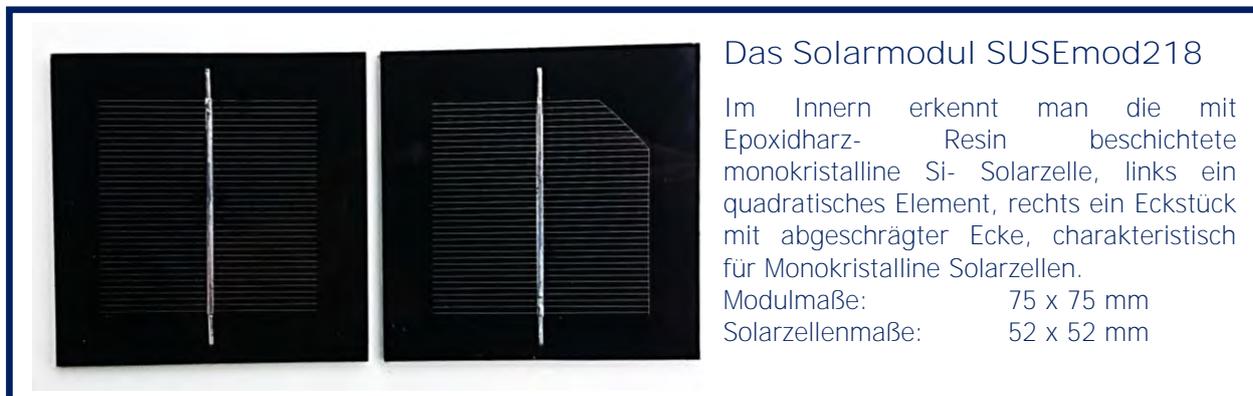
Experimentieranleitung →



Zum Gerät gehört die Experimentieranleitung sux51alpha, kann über den nebenstehenden QR- Code geöffnet werden.

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.

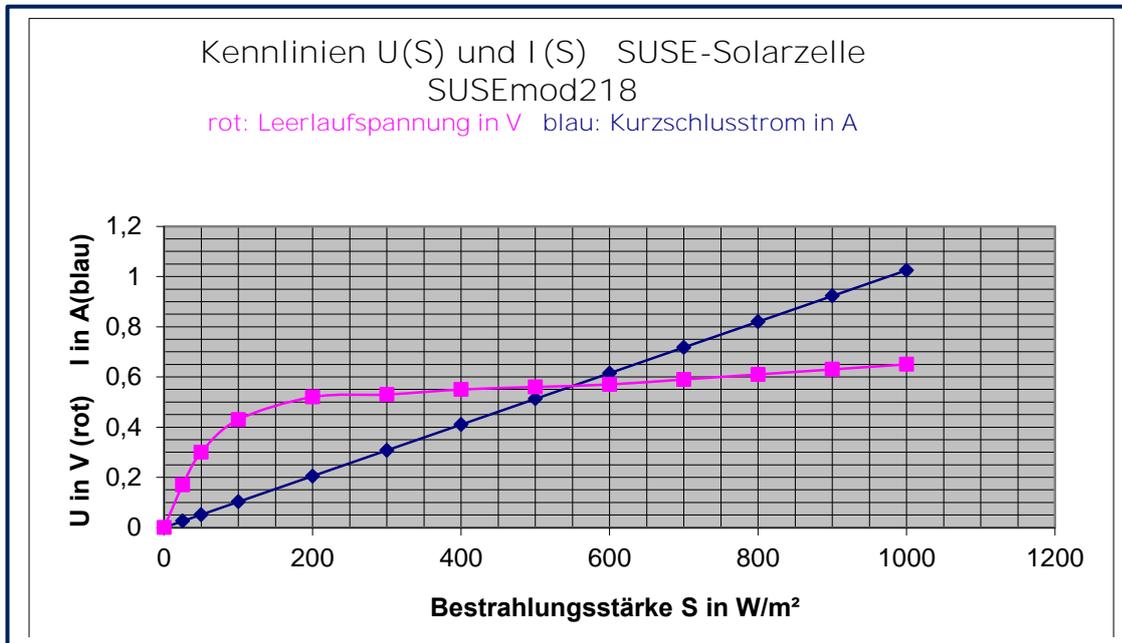
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/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) <small>Maximum Power Point</small>
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

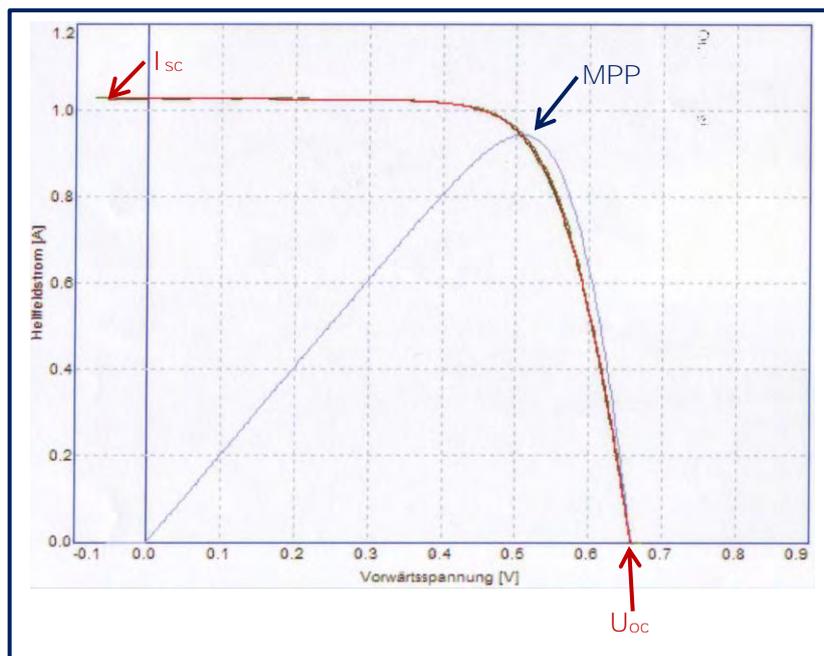
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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



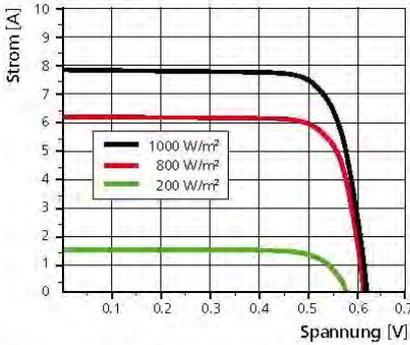
Die I-U-Kennlinie zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 und einer Temperatur von 25°C. Der Schnittpunkt mit der x- Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung U_{oc} , der Schnittpunkt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

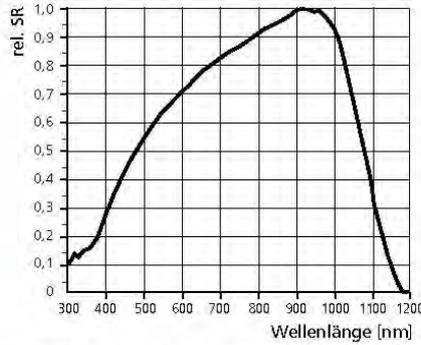
IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

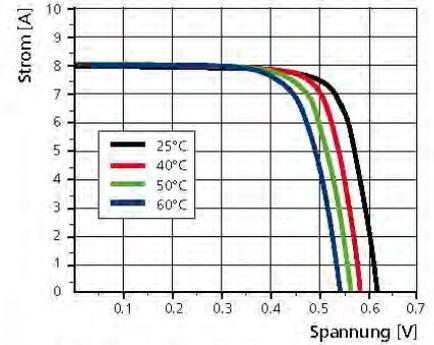
Spektrale Empfindlichkeit



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 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 Sperrichtung (Dunkelstrom) in A
 S = Bestrahlungsstärke S in W/m²



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 $U = 5,0 \text{ V DC}$ 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!)**

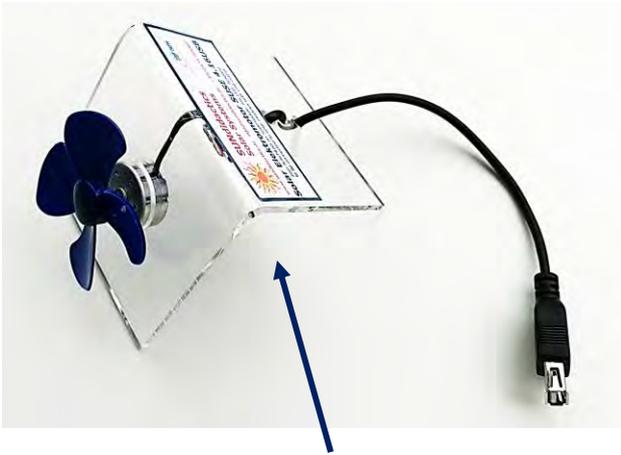
Schließt man 2 Motoren durch Laborkabelverbindung zusammen und pustet auf den Propellers des 1. Motors, dann dreht sich der 2. Motor durch die im 1. Motor als Generator erzeugte elektrische Energie, je heftiger man pustet, desto schneller dreht sich der 2. Motor.

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

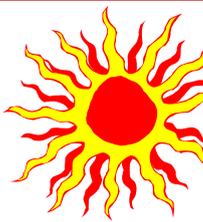
Die technischen Daten des Solarmotors:

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.



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



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

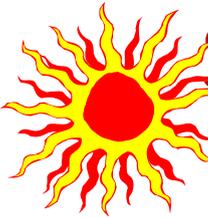
Stromstärke: 10A DC oder 5A DC, je nach Gerät, selten 200mA DC oder 20mA DC.

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

Vor dem Bereichswechsel Kabel aus Buchsen entfernen!

Sicherheitsvorschriften:

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



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



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

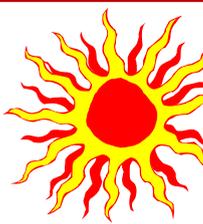
Maximale Stromstärke 3 A!

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!!



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



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
 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 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

Handbuch zur Lernstation SEKII -1 Version2021

Jg. 11- 13 (SchülerInnen 17 - 20 Jahre) Gy, IGS, KGS, BBS

Lernstation für schülerzentrierte Experimente für 3 SchülerInnen in der Arbeitsgruppe

Die Experimente

Mit den Geräten der Lernstation SEKII -1 lassen sich umfangreiche Experimente zur Photovoltaik und zur Funktion von Solarzellen durchführen:

- | | |
|---|---------------------------|
| | <i>rote Seitenzahlen!</i> |
| 1. Experimente mit dem Kennlinienmodul SUSE 5.15 | Seite 37 |
| 2. Experimente mit dem Solarmodul SUSE 5.22 | Seite 50 |
| 2.1 Experimente mit SUSE 5.22: Verschattung mit CassyLab | Seite 65 |
| 2.2 Experimente mit SUSE 5.22: Abschwächung des Lichts mit e-Funktion | Seite 71 |
| 2.3 Experimente mit SUSE 5.22: Kondensator Auf- und Entladung | Seite 75 |
| 3. Experimente mit dem Solarmodul SUSE 5.1alpha | Seite 78 |

Die Experimente werden in der Regel auf der optischen Bank durchgeführt, einige Teilexperimente werden aber auch draußen im Freien im natürlichen Sonnen- bzw. Tageslicht durchgeführt.

Vorsicht beim Umgang mit den Halogenstrahlern, die Lampen sind heiß, Verbrennungsgefahr!

Lampen nur zum Experimentieren einschalten!



Photovoltaik-
System
SUSE

Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne



BNE
Bildung für
Nachhaltige
Entwicklung

Experimente mit dem Kennlinien- Solarmodul

SUSE 5.15

Niveaustufe 3 Klassenstufe 10 - 13

Experimente mit dem Solarmodul

Experimentiergerät:

SUSE 5.15

SUSE 5.15

Solarmodul
für qualifizierte
Photovoltaik- Experimente
zur
Kennlinienaufnahme
Hellkennlinie $I(U)$, $P(U)$, MPP
Dunkelkennlinie $I(U)$
exakte Wirkungsgradmessung
und genaue
Füllfactormessung einer Solarzelle

Zusatzgeräte optional:

- Optische Bank SUSE 5.0
- Halogenstrahler SUSE 5.16 - 12V / 35 W
- Netzgerät 12 V/ >3A
- 2 digitale Multimeter
- >4 Laborkabel
- PC- Interface (z.B. Cassy)
- PC oder Laptop
- Oszilloskop für die Dunkelkennlinie
- Taschenrechner

13 Seiten

Datei: sux515



Das Solarmodul SUSE 5.15

- 1 Gerätebeschreibung SUSE 5.15
- 2 Physikalisch- technische Grundlagen
- 3 Experimente mit SUSE 5.15
- 4 Technische Daten

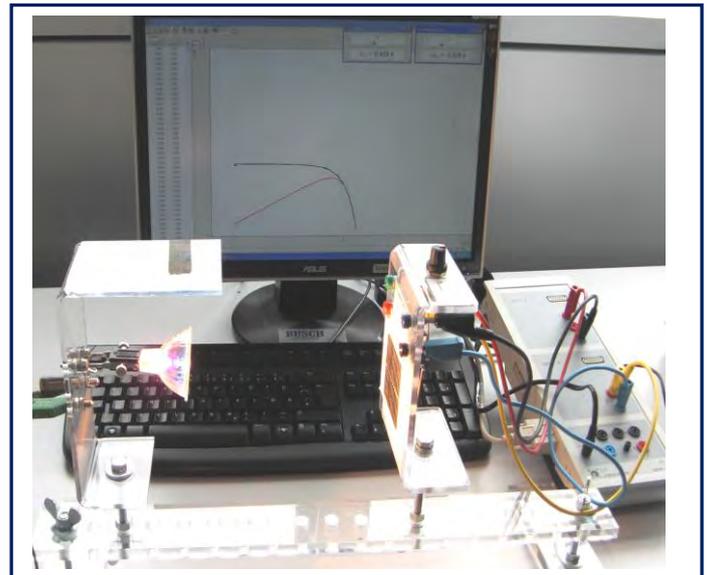


Foto rechts: Messplatz mit SUSE 5.15 zur Kennlinienaufnahme mit PC + Interface CassyLab. Auf der optischen Bank SUSE 5.0 befinden sich links der Halogenstrahler 5.15, in der Mitte das Modul 5.15, ganz rechts CassyLab. Auf dem Bildschirm sind die Kennlinien $I(U)$ in schwarz + $P(U)$ in rot dargestellt. Das Maximum der roten Kurve ist der Maximum- Power- Point MPP.

1. Gerätebeschreibung für das Solarmodul SUSE 5.15

Das Photovoltaik- Experimentiergerät SUSE 5.15 ist ein Spezialgerät für Experimente zur Aufnahme der Hellkennlinie I(U)-Kennlinie, P(U) - Kennlinie und Bestimmung des MPP (Maximum- Power- Point), des Wirkungsgrades einer Solarzelle, des Füllfaktors sowie zur Aufnahme der Dunkelkennlinie (Diodenkennlinie) der Solarzelle.

Im Sonnenlicht oder in Verbindung mit einer 12 V- Halogenlampe 35/50 W (SUSE 5.16) oder anderer geeigneter Lichtquellen können U-I-Kennlinien und Kennlinienscharen sowie die MPP- Kurven P(U) für verschiedene Bestrahlungsstärken S experimentell bestimmt werden.

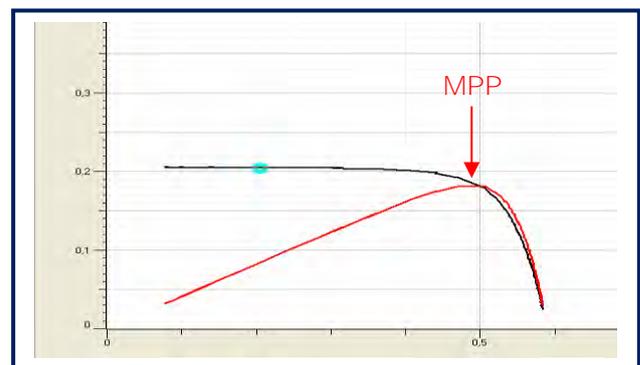
Mit der abgedunkelten Zelle kann die Dunkelkennlinie aufgenommen werden und bei Bestrahlung die Verschiebung der Dunkelkennlinie in den 4. Quadranten beobachtet werden.

Weiterhin können mit der Solarzelle dieses Gerätes alle Experimente des SUSE- Systems 5.2 mit einer Solarzelle (>40 Experimente) durchgeführt werden.

Die Messungen lassen sich mit Multimetern, mit einem Oszilloskop oder unter Verwendung eines computergesteuerten Messwertsystems (CassyLab o.ä.) mit hoher Genauigkeit schnell PC- gesteuert durchführen.

Das Gerät ist mit dem Stativfuß 8 mm für den Einsatz auf einer optischen Bank SUSE 5.0 oder für jede schulübliche optische Bank) konstruiert. Die Experimente werden in der Anleitung sux515 beschrieben.

Mit SUSE 5.15 aufgenommene I(U)- Kennlinie (schwarz) und P(U)- Kennlinie (rot) mit dem MPP im Maximum



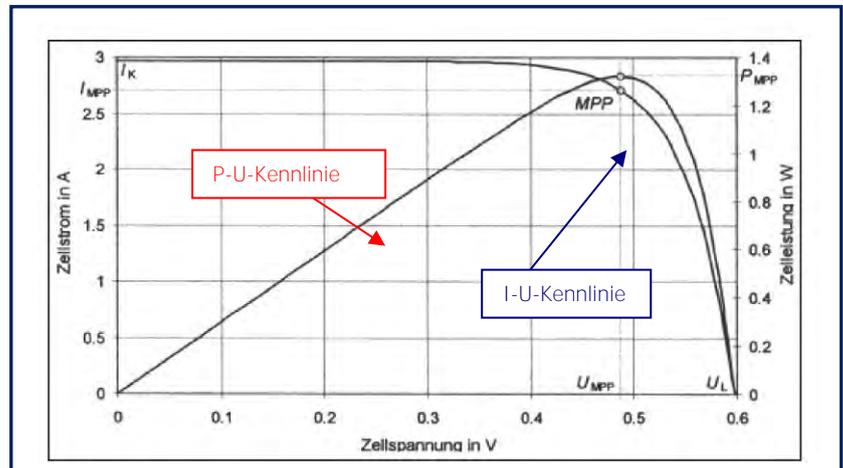
Experimente und Ziele:

- Die I-U- Kennlinie (Hellkennlinie) einer Solarzelle punktweise aufnehmen, als Graph zeichnen und erklären können
- Die I-U- Kennlinie (Hellkennlinie) einer Solarzelle punktweise aufnehmen und mit Excel auswerten, graphisch darstellen und erklären können
- Die Leistungskurve = P-U- Kennlinie einer Solarzelle aus den manuell gewonnen Messdaten der I-U- Kennlinie graphisch erstellen und erklären können
- Die Leistungskurve = P-U- Kennlinie einer Solarzelle aus den manuell gewonnen Messdaten der I-U- Kennlinie mit Excel graphisch darstellen und erklären können
- Die Hellkennlinie und die Leistungskurve mit einem PC- gesteuerten Interface (z.B. CassyLab) aufnehmen und erklären können
- Die Dunkelkennlinie (Diodenkennlinie I-U) manuell punktweise aufnehmen und erklären können
- Die Dunkelkennlinie (Diodenkennlinie I-U) manuell punktweise aufnehmen, mit Excel darstellen und erklären können
- Die Dunkelkennlinie (Diodenkennlinie I-U) mit einem Oszilloskop aufnehmen und erklären können
- Die Verschiebung der Dunkelkennlinie in -y-Richtung bei Beleuchtung mit dem Oszilloskop darstellen und erklären können
- Den Maximum- Power- Point MPP einer Solarzelle aus den Messdaten bestimmen und erklären können
- **Den Solarzellenwirkungsgrad η im MPP aus den Messdaten bestimmen, erklären und beurteilen können**
- Den Füllfaktor FF einer Solarzelle als Qualitätsmerkmal aus den Messdaten bestimmen, erklären und beurteilen können
- Die Bestrahlungsstärke S des Lichts (Lichtintensität) aus den Messdaten berechnen und die Messmethode erklären können
- Kennlinienscharen bei verschiedener Bestrahlungsstärke mit Excel oder CassyLab aufnehmen, darstellen und erklären können

2 Physikalisch – technische Grundlagen

Die I-U- und P-U- Kennlinien von Solarzellen erlauben eine Analyse der elektrischen Funktion einer Solarzelle und deren Qualität und Wirkungsgrad. In der Wissenschaft und Technik werden diese **Analyseverfahren „Charakterisierung“ von Solarzellen bezeichnet**. Jede Solarzelle ist eine beleuchtete Halbleiterdiode, daher ist die Kenntnis der Kennlinien einer Halbleiterdiode zum Verständnis der Solarzellen- Kennlinien von großer Bedeutung.

Das nebenstehende Diagramm zeigt die typische I-U- Kennlinie und die daraus gewonnene P-U-Kennlinie einer Standard- Solarzelle bei einer Bestrahlungsstärke von $S = 1000 \text{ W/m}^2$. Wird die Solarzelle nicht durch eine Last belastet (Widerstand), so liegt der Leerlauf- Fall vor, d.h. es kann an der Solarzelle die Leerlaufspannung U_L gemessen werden, da kein Strom entnommen wird, ist $I = 0$. Dieser Fall ist im rechten unteren Ende des Diagramms zu erkennen, hier liegt die typische Leerlaufspannung $0,6 \text{ V}$ vor.



Wird die Solarzelle kurzgeschlossen mit einem Widerstand 0Ω , so liegt der Kurzschlussfall vor.

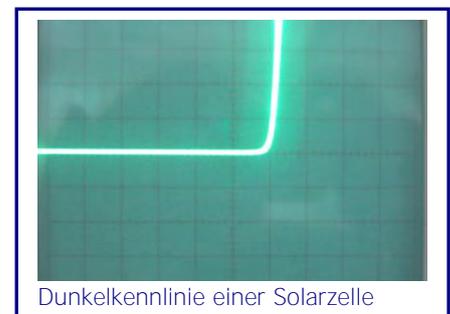
Hier fließt die maximal mögliche Stromstärke I_K . Dieser Punkt ist oben links im Diagramm bei $I = 3 \text{ A}$ und $U = 0 \text{ V}$. Der Kurzschlussstrom einer Solarzelle ist proportional zur Lichtintensität = Bestrahlungsstärke S , gemessen in W/m^2 . Bei der SUSE- Solarzelle ist der Kurzschlussstrom bei 1000 W/m^2 $0,9 \text{ A}$.

Schließt man nun ein Potentiometer mit $R = 10 \Omega$ an die Solarzelle und verändert man durch Drehen R von 0Ω auf 10Ω , durchläuft man die komplette Kennlinie von oben links nach unten rechts. Die dazugehörigen Messpunkte lassen sich manuell oder mit einem PC- Interface aufnehmen.

Berechnet man nunmehr aus jedem U-I- Wertepaar das Produkt $U \cdot I =$ Leistung P und stellt dieses über der Spannung dar, erhält man die Leistungskurve $P(U)$, die P-U- Kennlinie mit dem typischen Maximum, dem Maximum- Power- Point MPP. An diesem Punkt MPP gibt die Solarzelle die maximale elektrische Leistung ab, hier muss sie bei Photovoltaikanlagen in der Praxis immer betrieben werden! Diese Steuerung macht der MPP- Tracker des Wechselrichters einer Photovoltaik- Anlage.

Die Dunkelkennlinie einer Solarzelle entspricht ihrer normalen I-U- Diodenkennlinie und kann bei abgedunkelter Solarzelle mit einer äußeren angelegten einstellbaren Spannungsquelle entweder manuell punktweise, mit einem Oszilloskop oder mit einem PC- Interface- System aufgenommen werden.

Aufgrund der sehr großen Halbleiterfläche im Vergleich zu einer normalen Si- Diode ist der Sperrstrom im Sperrbereich erheblich größer und kann Werte bis in den mA- Bereich annehmen.



Dunkelkennlinie einer Solarzelle

3 Experimente mit dem Kennlinienmodul SUSE 5.15

- Experimentserie 1: Manuelle Aufnahme der Hellkennlinie und der Leistungskurve
- Experimentserie 2: Aufnahme der der Hellkennlinie und der Leistungskurve mit PC- Interface
- Experimentserie 3: **Bestimmung des MPP, des Wirkungsgrades η und des Füllfaktors FF**
- Experimentserie 4: Aufnahme der Dunkelkennlinie manuell, mit PC- Interface und mit einem Oszilloskop

3.1 Experimentserie 1: Manuelle Aufnahme der Hellkennlinie und der Leistungskurve

3.1.1 Aufbau des Experiments:

Sie können das Experiment im Sonnenlicht (bei unbewölktem Himmel) oder im Licht einer Halogenlampe durchführen, empfohlen wird der Aufbau auf der optischen Bank SUSE 5.0 mit SUSE 5.16 mit 35 W Kaltspiegel-Halogenlampe

Wie im Foto auf S. 1 erkennbar, wird auf der optischen Bank der Halogenstrahler aufgebaut, in ca. 20 cm Entfernung das Modul SUSE 5.15, der Halogenstrahler soll frontal die Solarzelle beleuchten. Die Messkabel werden immer von der Modulrückseite gesteckt, um zufällige Kabelschatten auf der Solarzelle zu vermeiden. Der Halogenstrahler soll nur zu den Messungen eingeschaltet werden, um eine Erwärmung der Solarzelle (die zu einer Leistungsminderung führt) zu vermeiden.

3.1.2 Vorversuch: Messung der Intensität (Bestrahlungsstärke S) des einfallenden Lichts

Richten Sie die Solarzelle senkrecht zum einfallenden Licht aus und schließen Sie an das rot – schwarze Buchsenpaar ein Amperemeter im Messbereich 10 A an. Sie messen nun den zur Lichtintensität S proportionalen Kurzschlussstrom I_{Mess} der Solarzelle.

Die Lichtintensität S der einfallenden Strahlung berechnet sich nun nach der Gleichung:

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

3.1.3: Hauptversuch: punktweise manuelle Aufnahme der I(U)-Kennlinie

Gleiche Lichtintensität wie im Vorversuch verwenden !!

- A Schließen Sie an das rot- schwarze Buchsenpaar ein Spannungsmessgerät (DVM) im Messbereich 2 V an und messen Sie die Leerlaufspannung U_{oc} der Solarzelle.

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

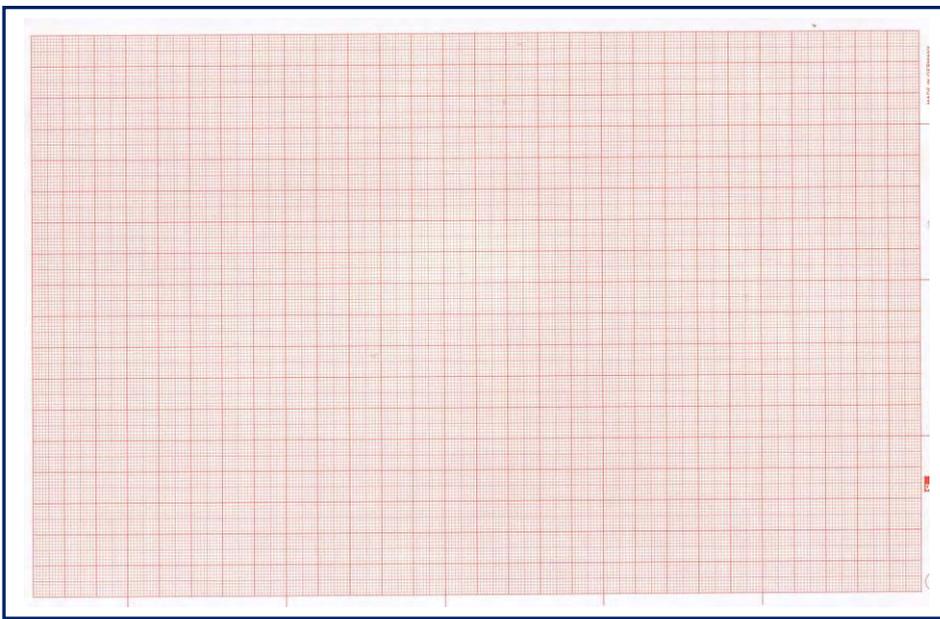
- B Schließen Sie an das grün- blaue Buchsenpaar ein Strommessgerät (DVM) im Messbereich 10 A an. Drehen Sie nun das Potentiometer an den Linksanschlag. Messen Sie nun die Zellenspannung U und den Strom I und tragen Sie die Werte in die Tabelle ein. Verändern Sie nun das Potentiometer in kleinen Schritten und messen Sie jeweils U und I. Tragen Sie die Werte in die oberen beiden Zeilen der Messwerttabelle ein. Berechnen Sie das Produkt, bei der letzten Messung muss das Potentiometer bis zum anderen Anschlag gedreht worden sein. Messen Sie besonders im U- Bereich 0,45...0,65 V möglichst mehrfach und genau!

- C Berechnen Sie mit den gemessenen Werten für jedes U-I- Wertepaar die Leistung $P = U * I$ (Leistung) und tragen Sie dieses in die 3. Tabellenzeile ein.

Messwerttabelle 1 **Lichtintensität S =W/m²**

U in V															
I in A															
P in W															

Die Messwerte können nun auf mm-Papier graphisch dargestellt werden: I(U) und P(U). Sie können die Messwerte aber auch mit einem geeigneten Tabellenverarbeitungsprogramm (excel o.ä.) verarbeiten und graphisch darstellen/ ausdrucken.



mm- Papier für die Zeichnung:

x- Achse = Spannung U

4 Kästchen = 0,1 V

y- Achse 1: Stromstärke I

y- Achse 2: Leistung P

bitte nach eigenen Entwürfen passend einteilen!

Wenn Sie den Graphen $P(U)$ zeichnen, ist das Maximum der Kurve der MPP, der Punkt der maximalen Leistungsabgabe der Solarzelle.

Um die Kennlinienschaar für verschiedene Lichtintensitäten zu erhalten, muss das Experiment nun mit verschiedenen Lichtintensitäten durchgeführt werden, am einfachsten durch Veränderung des Abstands zur Lichtquelle. Bitte jedes Mal vorher die Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) wie im Vorversuch messen.

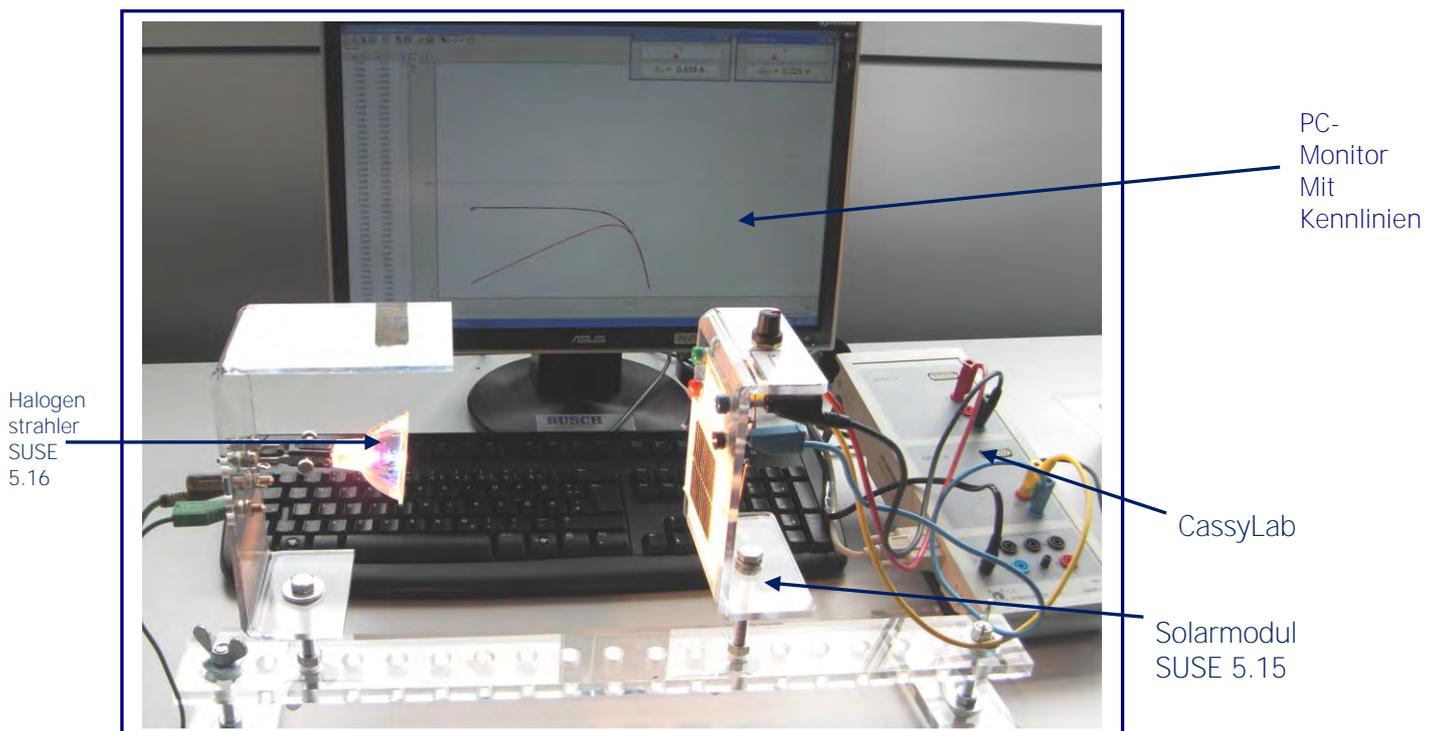
Achtung, nicht zu nah an die Lichtquelle herangehen ! (wenn sich die Solarzelle zu stark erwärmt, sinkt die Leerlaufspannung U_{oc} . Die Zelle sollte höchstens handwarm sein. Günstig ist es, die Zelle zwischen den Messungen mit Alufolie abzudecken oder die Lampe abzuschalten!

3.2 Experimentserie 2:

Aufnahme der der Hellkennlinie und der Leistungskurve mit PC- Interface

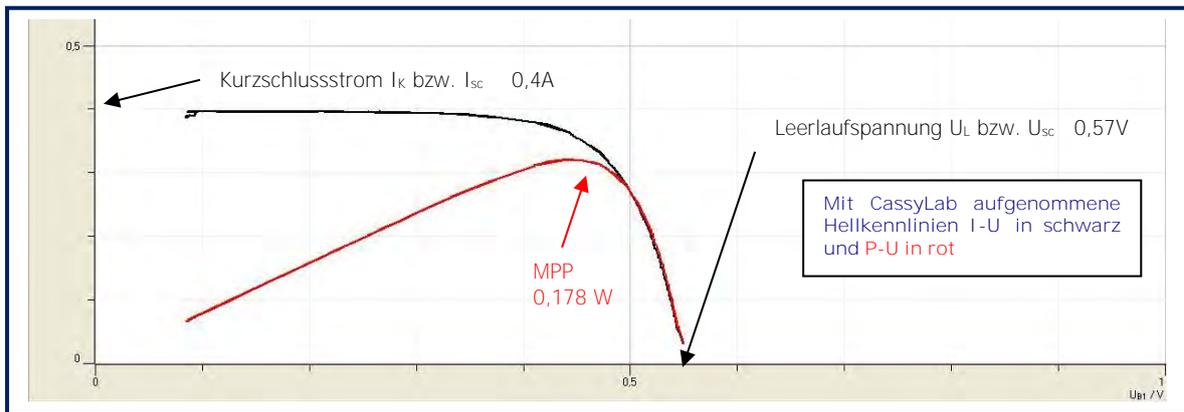
Mit einem PC- Interface, z.B. CassyLab oder ähnliche Systeme, lassen sich die Kennlinien sehr viel schneller und genauer aufnehmen.

Am nachfolgenden Foto eines solchen Messplatzes soll der Aufbau und die Durchführung des Experiments beschrieben werden.



Auf einer optischen Bank werden von links nach rechts aufgebaut: Halogenlampen- Modul SUSE 5.16, angeschlossen an ein Netzgerät 12,0V/>3A, in ca. 20 cm Abstand von der Vorderkante des Halogenstrahlers das Kennlinienmodul SUSE 5.15. Daneben wird das PC- Interface gestellt, welches mit dem PC oder Notebook verbunden ist. Hinter dem Versuchsaufbau befindet sich der Monitor des Rechners.

Der Spannungs- Anschluss von SUSE 5.15 (rot- schwarzes Buchsenpaar) wird an den Eingang B des Interface angeschlossen, der Stromstärkeanschluss (grün- blaues Buchsenpaar) an den Eingang A. Nach dem Öffnen des Messprogramms und den Basiseinstellungen wird die Messung gestartet und das Potentiometer 1-mal von einem Anschlag zum anderen Anschlag langsam und gleichmäßig durchgedreht. Dabei nimmt das Messsystem mehrere 100 Messwerte auf, die als Tabelle dargestellt wird und zeichnet automatisch die beiden Graphen I-U (schwarz) und P-U (rot), die auf dem Monitor gut zu erkennen sind und in der nachfolgenden Grafik dargestellt sind. In der oberen rechten Ecke des Bildschirms erkennt man die analogen Messgeräte zur Darstellung von U,I,P.



Durch einen Mausklick auf einen Punkt der Kurve wird automatisch das entsprechende Wertepaar der Tabelle markiert und umgekehrt. Diese Grafik wird im Folgenden zur Auswertung weiter verwendet.

3.3 Experimentserie 3:

Bestimmung des MPP, des Wirkungsgrades η und des Füllfaktors FF

3.3.1 **Bestimmung des MPP, des Wirkungsgrades η und des Füllfaktors FF bei manueller Kennlinienaufnahme**

3.3.1.1 Bestimmung des MPP

Aus der Tabelle und der Zeichnung auf S. 5 lässt sich bei den Messwerten bzw. beim Graphen für die Leistung P der Maximalwert einfach ermitteln, dieser Wert ist der Maximum- Power- Point MPP. Die Spannung der Solarzelle im MPP und die Stromstärke im MPP kann ebenfalls aus Graph/ Tabelle ermittelt werden.

Bestimmung des MPP:.....W

Spannung im MPP U_{MPP}:.....V

Stromstärke im MPP I_{MPP}:.....A

3.3.1.2 Bestimmung des Solarzellen- **Wirkungsgrades η**

Nur aus dem MPP lässt sich der Solarzellenwirkungsgrad exakt bestimmen. Der Wirkungsgrad η gibt an, wie viel % der Primärenergie (Energie der einfallenden Lichtstrahlung) in elektrische Energie umgewandelt wird. Er liegt bei Standard- Industrie- Solarzellen je nach Solarzellentyp bei ca. 18- 21%. In Forschung und Entwicklung wird an Wirkungsgraden von >22% gearbeitet. Solarzellen mit >24% Wirkungsgrad sind inzwischen produktionsreif (ISFH- Weltmeister- Solarzelle 26 %!!)

A Methode der Wirkungsgradbestimmung:

Wir setzen die von der Solarzelle erzeugte elektrische Leistung im MPP ins Verhältnis zur eingestrahlten Leistung P_L des Lichts, multiplizieren mit 100 und erhalten so den Wirkungsgrad in %.

B Durchführung der Wirkungsgradbestimmung:

Nach der bereits vorgestellten Gleichung gilt:

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

Bestimmen wir aus dem Kurzschlussstrom der Messung die Bestrahlungsstärke S des Lichts in W/m^2 , sie gibt an, wieviel Licht-Leistung P_L auf 1 m^2 eingestrahlt wird. Diesen Wert berechnen wir für die Fläche der Solarzelle ($24,5 \text{ cm}^2$):

$$P_L \text{ auf die Fläche der Solarzelle: } \frac{S \text{ (in W/m}^2\text{)} * 27,04}{10\,000} = \dots\dots\dots \mathbf{W (1)}$$

Wir haben nun die Licht- Leistung P_L bestimmt, die auf die Fläche der Solarzelle einstrahlt, sie liegt in der Größenordnung bis zu $2,7 \text{ W}$ bei strahlendem Sonnenschein mit 1000 W/m^2 auf der optischen Bank erreichen wir ca. $S = 300 \text{ W/m}^2$.

Nun entnehmen wir aus unseren Messungen die elektrische Leistung im MPP:

$$P_{E,MPP} = \dots\dots\dots \mathbf{W (2)}$$

Setzen wir beide ins Verhältnis und multiplizieren den Quotienten $*100$, ergibt sich der Wirkungsgrad in %:

$$\text{Wirkungsgrad } \eta \text{ in \%: } \frac{P_E * 100}{P_L} = \dots\dots\dots \mathbf{\% (3)}$$

Bei einer präzisen Messung sollte der Wert zwischen 15% und 16% liegen. Gleichmäßiges Ausleuchten der Solarzelle ist Bedingung für eine hohe Qualität des Experiments.

3.3.2 Bestimmung des MPP, des Wirkungsgrades η und des Füllfaktors FF bei Kennlinienaufnahme mit PC- Interface

Diese Methode ist identisch mit der manuellen Auswertung 5.3.1, es werden lediglich die Messwerte aus der automatischen Interface- Messung verwendet, die Auswertung wird etwas genauer, da die Messwerte präziser sind als die manuell aufgenommen Messungen.

3.3.3 Bestimmung des Füllfaktors FF

Der Füllfaktor FF einer Solarzelle ergibt sich aus dem Quotienten der blauen Fläche und der gelben Fläche. Die blaue Fläche A_{blau} ist das Rechteck, welches seine rechte obere Ecke am Koordinatenpunkt $U_{\text{MPP}}/I_{\text{MPP}}$ hat und durch diese Messwerte bestimmt wird:

$$A_{\text{blau}} = U_{\text{MPP}} * I_{\text{MPP}}$$

Das gelbe Rechteck bestimmt sich aus Leerlaufspannung der Solarzelle U_L und dem Kurzschlussstrom der Solarzelle I_K :

$$A_{\text{gelb}} = U_L * I_K$$

Zusammengefasst ergibt sich für die Berechnung des Füllfaktors FF:

$$FF = \frac{U_{\text{MPP}} * I_{\text{MPP}}}{U_L * I_K} * 100 \text{ in \%}$$

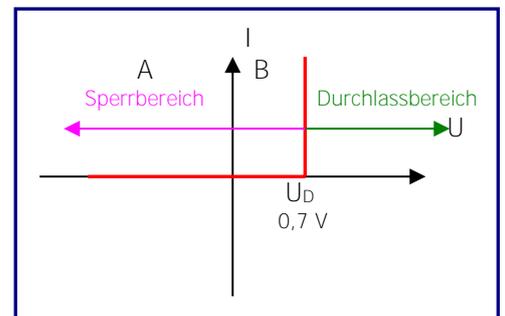
Berechnen Sie FF für Ihr Experiment: $FF = \dots * 100 = \dots \%$

Der Füllfaktor sollte >60% sein, je höher der Wert, umso höher ist die Qualität der Solarzelle!

3.4 Experimentserie 4:

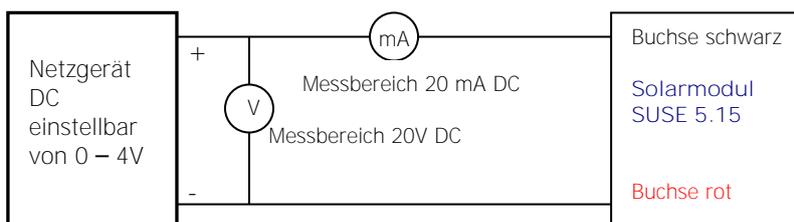
Aufnahme der Dunkelkennlinie manuell, mit PC- Interface und mit einem Oszilloskop

Die Dunkelkennlinie einer Solarzelle ist die normale I-U Kennlinie einer Si- Diode mit Sperr- und Durchlassbereich (siehe nebenstehende Skizze) Hierzu muss die Solarzelle durch Einschlagen in schwarze Pappe abgedunkelt werden. Im Durchlassbereich unterscheidet sich die Solarzelle als Diode nicht von einer normalen Si- Diode, im Sperrbereich zeigt sich ein **wesentlich höherer Sperrstrom (ca. 1... 5 mA gegenüber μA bei Si-Dioden)**, da die Solarzelle eine wesentlich höhere Fläche hat als eine gewöhnliche Si- Diode. Man kann diese Dunkelkennlinie wiederum manuell, mit PC- Interface oder mit einem Oszilloskop aufnehmen.



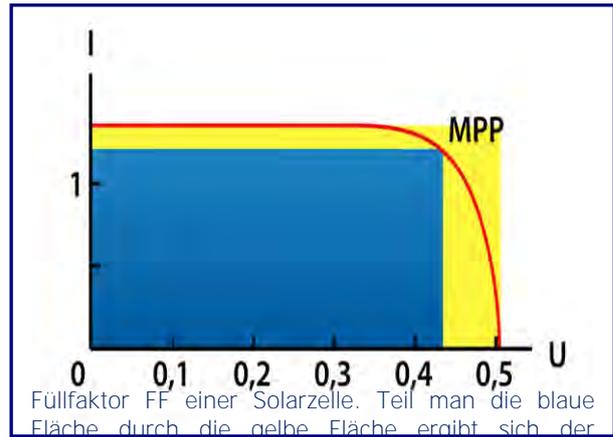
3.4.1 Manuelle Aufnahme der Dunkelkennlinie

Zur Aufnahme der Dunkelkennlinie ist folgende elektrische Schaltung notwendig:



A Negativer Bereich der Kennlinie A

Mit dieser Schaltung führt man die Messung der Kennlinie im negativen Spannungsbereich durch. Die Spannung U des Netzgerätes wird langsam von 0 bis 5 V erhöht, die dazugehörigen Stromstärkewerte abgelesen und in die Tabelle eingetragen:

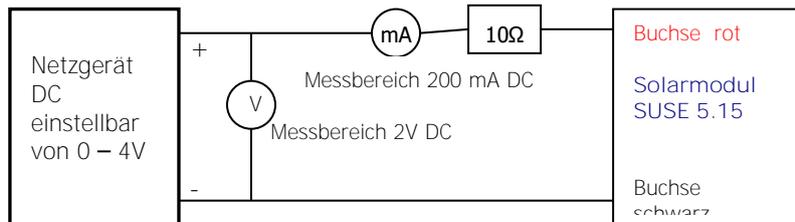


Füllfaktor FF einer Solarzelle. Teil man die blaue Fläche durch die gelbe Fläche ergibt sich der Füllfaktor FF, ein wichtiges Qualitätsmerkmal für eine Solarzelle.

U in V	0	-0,5	-1,0	-1,5	-2,0	-2,5	-3,0	-3,5	-4,0
I In mA									

B Positiver Bereich der Kennlinie B

Die Schaltung wird umgebaut:



Mit dieser Schaltung führt man die Messung der Kennlinie im positiven Spannungsbereich durch. Die Spannung U des Netzgerätes wird langsam von 0 bis 1 V erhöht, die dazugehörigen Stromstärkewerte abgelesen und in die Tabelle eingetragen. Bei Stromstärken < 20 mA kann man den Messbereich 20 mA verwenden.

U in V	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
I In mA									

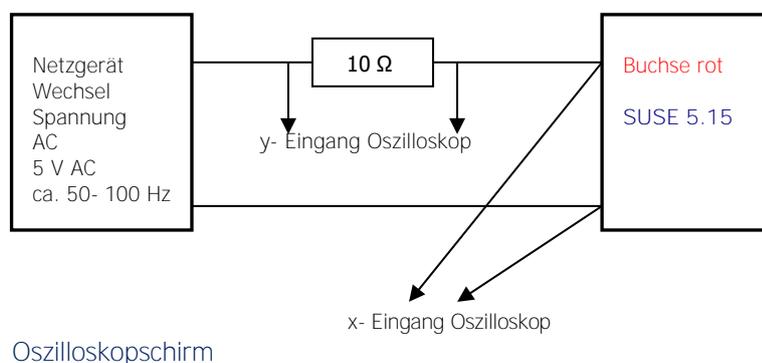
Mit den Messwerten der beiden Tabellen kann man den Graphen der Dunkelkennlinie auf mm- Papier zeichnen.

3.4.2 Aufnahme der Dunkelkennlinie mit PC- Interface:

Diese Methode ist identisch mit der manuellen Auswertung 5.4.1, es werden lediglich die Messwerte aus der automatischen Interface- Messung verwendet, die Auswertung wird etwas genauer, da die Messwerte präziser sind als die manuell aufgenommenen Messungen, das System zeichnet den Graphen automatisch.

3.4.3 Aufnahme der Dunkelkennlinie mit Oszilloskop:

Hierzu verwenden wir folgende elektrische Schaltung:

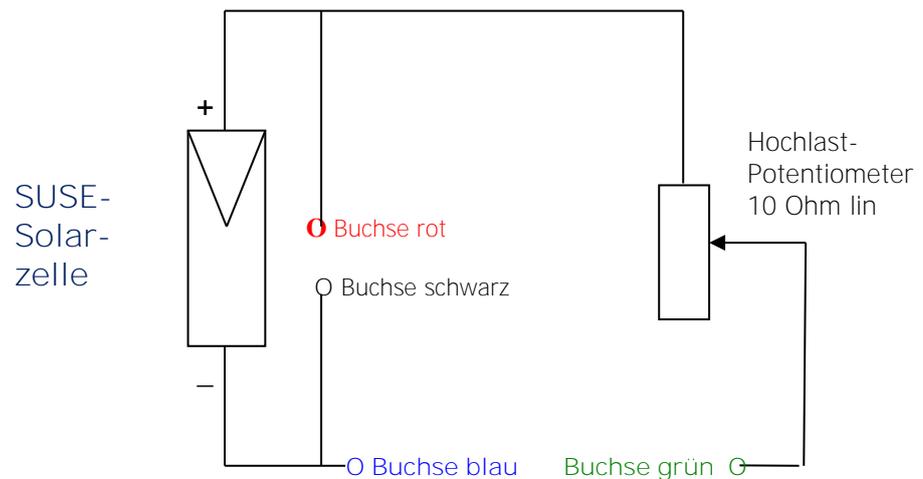


Oszilloskopschirm

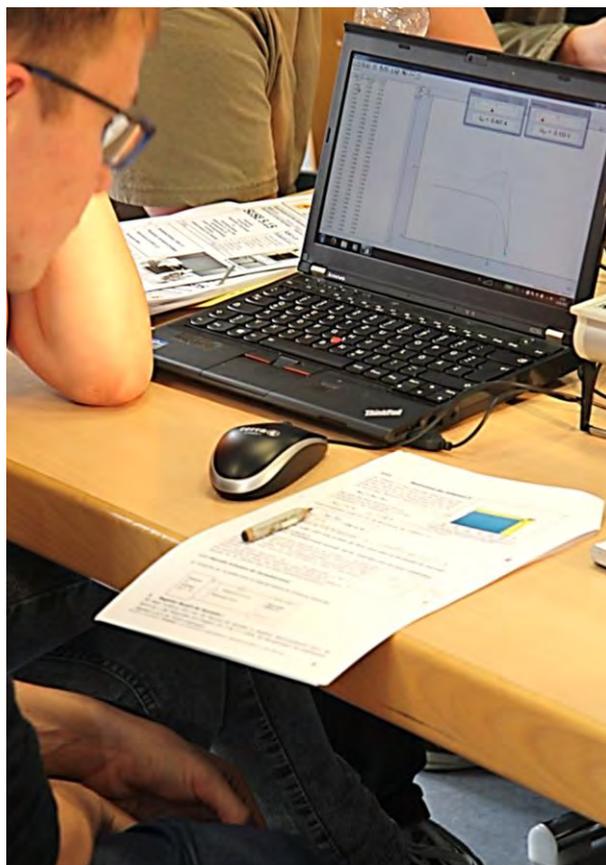


Dunkelkennlinie auf

Der Stromlaufplan des Solarmoduls SUSE 5.15



Ein Schüler bei der Kennlinienaufnahme mit SUSE 5.15, CassyLab und Laptop mit dieser Versuchsanleitung. Der Bildschirm zeigt die aufgenommene I(U) und P(U)-Kennlinie.



Auf den Folgeseiten befinden sich die technischen Daten der verwendeten Solarzelle SUSEmod218

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.

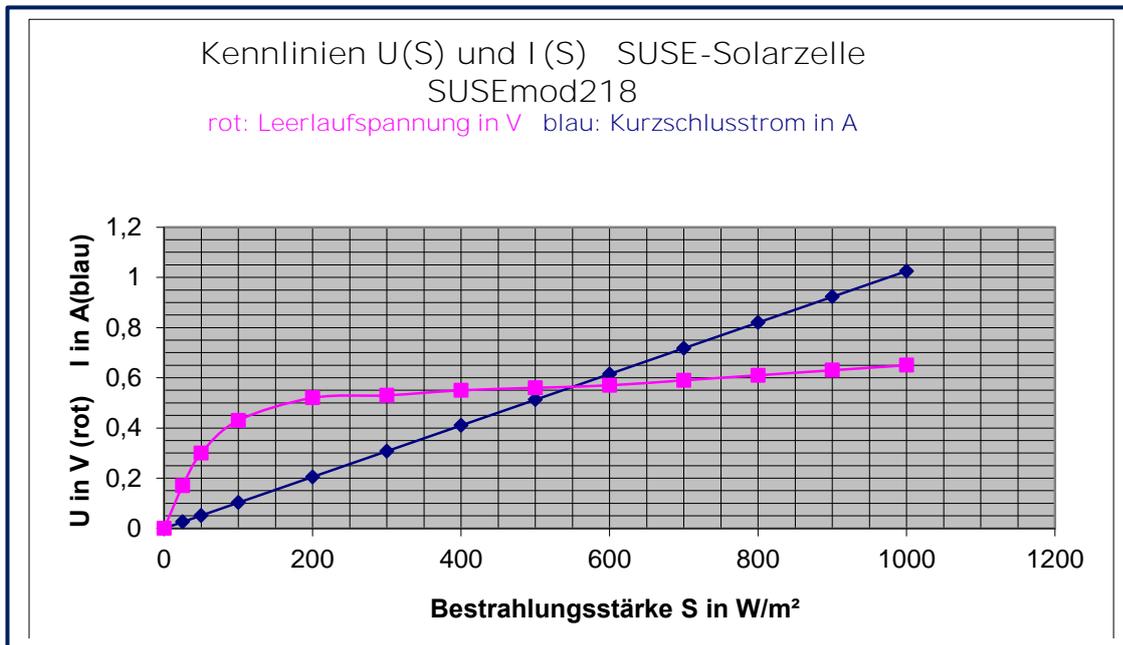
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/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) <small>Maximum Power Point</small>
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

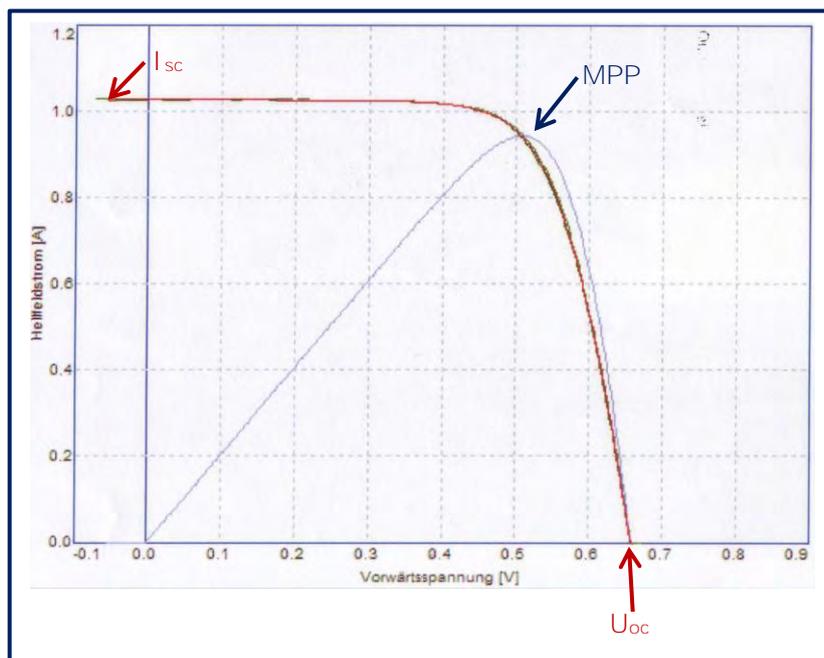
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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



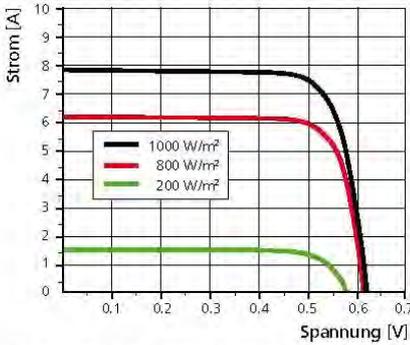
Die $I-U$ -Kennlinie zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 und einer Temperatur von 25°C. Der Schnittpunkt mit der x- Achse (U - Achse) ist die Leerlaufspannung U_{oc} , der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

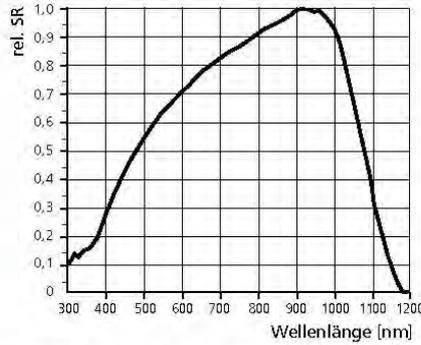
IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

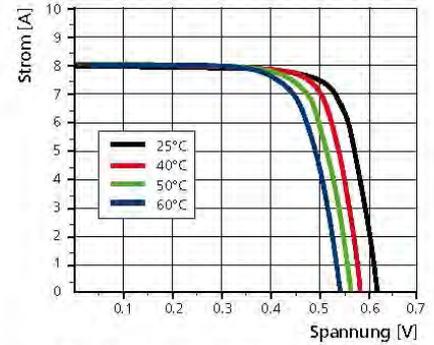
Spektrale Empfindlichkeit



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 eingestrahlt 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.

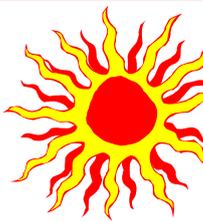
Der rechte Graph 3.3 zeigt die I(U)- Kennlinie in Abhängigkeit von der Temperatur, man erkennt, dass die Leerlaufspannung sinkt, wenn die Temperatur steigt, der Kurzschlussstrom steigt nur sehr gering bei Temperaturerhöhung (j ist die Stromdichte = Kurzschlussstrom in mA pro cm² Zellenfläche). Das bedeutet 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: $I_{sc} = c * S$ $c = const.$

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 Sperrichtung (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
 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 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

Experimente mit dem Solarmodul

SUSE 5.22

Solarmodul mit 2 Solarzellen
 in steckbarer Reihenschaltung
 für qualifizierte
 Photovoltaik- Experimente
 und zur
 Kennlinienaufnahme

Verbindung über Verbindungsstecker

Geeignet für die Klassenstufen 10 - 12

Experimentiergerät:

SUSE 5.22

Zusatzgeräte optional:

- Optische Bank SUSE 5.0
- Halogenstrahler SUSE 5.16 - 12V / 35 W
- 500 W- Halogenstrahler (Baustrahler)
- Netzgerät 12 V/ >3A
- 2 digitale Multimeter
- Overheadprojektor
- Vertikal- Drehgelenk SUSE 5.100
- >4 Laborkabel
- Maßband /Zollstock



SUSE 5.22 mit 2 Solarzellen
 SUSEmod218
 Die rote (+) und schwarze (-)
 Buchse gehören zur Solarzelle 1
 (oben), die grüne (+) und blaue
 (-) Buchse zur Solarzelle 2
 (unten). In der Mitte: Schalter
 oder Verbindungsstecker



- A Gerätebeschreibung SUSE 5.22
- B Physikalisch- technische Grundlagen
- C Experimente mit SUSE 5.22
- D Technische Daten der Solarzelle SUSEmod 218

A Gerätebeschreibung:

Das Photovoltaik- Experimentiergerät SUSE 5.22 besteht aus 2 identischen Solarzellen (0,65 V /1025 mA) mit jeweils + und - Anschlussbuchsen, die Zellen können einzeln getrennt oder in Reihenschaltung (mit Verbindungsstecker) verwendet werden. SUSE 5.22 ist speziell für Experimente mit dem NILS- ISFH - Stativsystem oder üblichen Schulstativsystemen in der gymnasialen Oberstufe ab Klassenstufe 10 bis zum Abitur geeignet. Auch in berufsbildenden Schulen ist SUSE 5.22 optimal einsetzbar.

Mit SUSE 5.22 lassen sich folgende Experimente im Freien im Sonnenlicht oder im Labor durchführen:

- Physikalische Messungen an einer Solarzelle, Bestimmung aller relevanten Messdaten
- Bestimmung der Bestrahlungsstärke S des Lichts aus dem Kurzschlussstrom der kalibrierten Solarzelle
- Physikalische Messungen an einer Reihenschaltung oder an einer Parallelschaltung von zwei Solarzellen
- Gleichzeitige Messung von Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom bei verschiedenen Bestrahlungsstärken (Lichtintensität).

Mit diesen Experimenten lassen sich präzise, experimentell ermittelte Graphen zur Abhängigkeit des Solarzellenspannung, des Kurzschlussstroms und der Solarzellenleistung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke S des Lichts ermitteln.

Rechts: Messungen mit SUSE 5.22 im Freien an einem bewölkten Tag: Das linke Messgerät zeigt den Kurzschlussstrom der unteren Solarzelle mit 0,65 A an, das rechte Messgerät die Leerlaufspannung der oberen Solarzelle mit 0,581 V



B Physikalisch – technische Grundlagen

Solarzellen sind Energiewandler, sie wandeln die Strahlungsenergie des Sonnenlichts oder des Lichts künstlicher Lichtquellen in elektrische Energie um.

Sie bestehen aus Halbleitermaterialien, Solarzellen für Anwendungen auf der Erde verwenden überwiegend den Halbleiter Silizium, für Weltraumzwecke werden Solarzellen aus Galliumarsenid (GaAs) verwendet, da ihr Wirkungsgrad höher ist.

Solarzellen sind großflächige, lichtdurchlässige Halbleiterdioden, an der n- dotierten Seite, der Oberseite der Solarzelle, dringt das Licht ein, hier in der n- dotierten Zone entsteht der Minuspol der elektrischen Spannung.

Die Leiter der Oberseite bilden ein Vorderseitenkontaktgitter mit dünnen, parallelen Silberstreifen, die an einem breiteren Silberband enden, wo der Strom **abgenommen wird, dem „Busbar“**. Die blau schimmernde Oberfläche ist die Antireflexschicht, sie verhindert die Reflexion des einfallenden Lichts. Das Material der Antireflexschicht, Siliziumnitrid dient auch zur Passivierung des Halbleiters, d.h. offene Si- Bindungen im Halbleiter (Störstellen) werden durch Wasserstoffatome besetzt, so dass sich die Rekombination verringert.

Die Unterseite der Solarzelle ist ganzflächig mit Aluminium metallisiert, es ist die p- dotierte Seite und hier ist der Pluspol der Solarzelle.

Bei Bestrahlung der Solarzelle mit Licht entsteht die elektrische Spannung am p-n- Übergang des Halbleiters. Der p-n- Übergang ist nur ca. 5 μm unterhalb der Solarzellen- Oberfläche, um die Lichtabsorption sehr gering zu halten.

Die von den Photonen des Lichts freigesetzten Elektronen wandern aufgrund des durch die Dotierung entstandenen inneren elektrischen Feldes (+ in der n- dotierten Zone, - in der p- dotierten Zone) durch die elektrischen Feldkräfte zur Oberfläche der Solarzelle und können dort an den Elektroden abgenommen werden. Die Löcher wandern analog dazu zur Unterseite der Solarzelle.

Für die Zukunft der Energieversorgung der Menschheit sind sie von großer Bedeutung, da die Energie der Sonne eine unerschöpfliche, kostenlose Energiequelle für alle Menschen ist, und eine nachhaltige und umweltfreundliche Energiegewinnung ermöglicht.

Bei der Bestrahlung einer Solarzelle mit Licht entsteht an ihren beiden elektrischen Polen plus (+) und Minus (-) eine elektrische Spannung U , beim Anschluss eines Verbrauchers fließt ein elektrischer Strom I , sie gibt wie andere Stromquellen (Steckdose, Akku, Batterie) eine elektrische Leistung P ab. Eine moderne Solarzelle mit den Maßen 156 x 156 mm hat eine Leerlaufspannung von 0,65 V, einen Kurzschlussstrom von $>9\text{A}$ und eine Leistung von ca. 5 W bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 , $T = 25^\circ\text{C}$, AM 1,5.

Die Funktionsweise von Solarzellen kann nur mit der Lichtquantentheorie Einsteins erklärt werden, es ist der innere lichtelektrische Effekt.

Die Photonen des Lichts schlagen im Kristall Bindungselektronen aus der äußeren Schale des Si- Atoms, wenn die Quantenenergie $h \cdot f > W_B$ (Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband) des Halbleiters ist. Der Bandabstand des Siliziums ist ca. 1,124 eV, d.h. bereits infrarotes Licht der Wellenlänge 1100 nm aus dem Lichtspektrum der Sonne kann den photovoltaischen Effekt auslösen. Das gesamte sichtbare Spektrum hat kürzere Wellenlängen und damit höhere Quantenenergien der Photonen. Ist die

Für Experimente mit einer Solarzelle wird der Verbindungsstecker abgezogen. Der Pluspol des Messgerätes muss an den Pluspol der Solarzelle (rote Buchse) angeschlossen werden, der Minuspol des Messgerätes an den Minuspol der Solarzelle (schwarze Buchse).

Die Leerlaufspannung U_{oc} (Die elektrische Spannung der unbelasteten Solarzelle):
 Der Wert sollte im Sonnenlicht zwischen 0,6 und 0,65 V liegen, bei bedecktem Himmel 0,55- 0,6 V, bei gleicher Bestrahlungsstärke sollten alle Solarzellen, unabhängig von ihrer Fläche die gleiche Spannung haben, der Standard-Test-Wert wäre 0,65 V). Kleine Differenzen sind Qualitätsunterschiede.
 Zum Vergleich: Die Leerlaufspannung einer Mignonzelle (Batterie) ist 1,5 V.

C1.1.1 Bestimmen Sie die Leerlaufspannung einer Solarzelle bei verschiedener Lichthelligkeit (Bestrahlungsstärke S):

Wir ziehen für das Experiment den Verbindungsstecker zwischen den beiden Solarzellen des Moduls SUSE 5.22 und verwenden nur eine Solarzelle.

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: Bestrahlungsstärke in W/m ² eintragen →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead- Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogenlampe	Im Labor- Innenraum
Leerlaufspannung in V (Volt)					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier, vergleichen Sie mit den technischen Daten von SUSEmod 218

C1.1.2 Bestimmen Sie die Leerlaufspannung von 2 Solarzellen in Reihenschaltung bei verschiedener Lichthelligkeit (Bestrahlungsstärke), dazu wird der Verbindungsstecker wieder gesteckt, gemessen wird zwischen dem Pluspol der 1. Zelle und dem Minuspol der 2. Zelle:

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: Bestrahlungsstärke in W/m ² eintragen →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead- Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogenlampe	Im Labor- Innenraum
Leerlaufspannung in V (Volt)					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C1.1.3 Bestimmen Sie die Leerlaufspannung von 2 Solarzellen in Parallelschaltung bei verschiedener Lichthelligkeit (Bestrahlungsstärke), dazu wird der Verbindungsstecker wieder gezogen, die beiden Pluspole werden mit einem Kabel verbunden, ebenso die beiden Minuspole. Gemessen wird zwischen dem Pluspol und dem Minuspol .

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: Bestrahlungsstärke in W/m ² eintragen →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead- Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogen- lampe	Im Labor- Innenraum
Leerlaufspannung in V (Volt)					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C1.2. Experimente zum Kurzschlussstrom I_{sc} einer Solarzelle

Normale Stromquellen darf man niemals kurzschließen, es würde sofort ein extrem hoher Strom fließen, der Leitungsdrähte durchbrennen lässt und die Stromquelle zerstört.

Bei einer Solarzelle darf man einen Kurzschluss machen, es wird nur so viel Strom fließen, wie vom Licht generiert wird, also keine Gefahr durch extrem hohe Stromstärken. Im Englischen heißt Kurzschluss „short cut“, daher der Index „sc“.

Wir verwenden für unsere Messungen den Strommessbereich 10A oder 5A unseres Multimeters und achten auf die richtigen Buchsen (COM - und 10A/5A +)

(Der Wert ist direkt proportional zur Zellenfläche und zur Lichtintensität /Bestrahlungsstärke, Standard-Test-Wert: bei einer Zellenfläche von 25 cm² sollte der Strom ca. 1,025 sein bei $S = 1000\text{W/m}^2$ sein)

C1.2.1 Der Kurzschlussstrom einer Solarzelle

Wir ziehen den Verbindungsstecker und messen nur an einer Solarzelle.

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: S in W/m ² eintragen →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead-Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogenlampe	Im Labor- Innenraum
Kurzschlussstrom in A (Ampere)					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C1.2.2 Bestimmen Sie den Kurzschlussstrom von 2 Solarzellen in Reihenschaltung bei verschiedener Lichthelligkeit (Bestrahlungsstärke S), dazu wird der Verbindungsstecker wieder gesteckt, gemessen wird zwischen dem Pluspol der 1. Zelle und dem Minuspol der 2. Zelle:

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: Bestrahlungsstärke in W/m^2 eintragen →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead- Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogen-lampe	Im Labor- Innenraum
Kurzschlussstrom in Ampere A					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C1.2.3 Bestimme den Kurzschlussstrom von 2 Solarzellen in Parallelschaltung bei verschiedener Lichthelligkeit (Bestrahlungsstärke), dazu wird der Verbindungsstecker wieder gezogen, die beiden Pluspole werden mit einem Kabel verbunden, ebenso die beiden Minuspole. Gemessen wird zwischen dem Pluspol und dem Minuspol .

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: Bestrahlungsstärke in W/m^2 eintragen →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead- Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogen-lampe	Im Labor- Innenraum
Kurzschlussstrom in Ampere A					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C1.3 Die elektrische Leistung der Solarzelle P (in W = Watt)

Wie jede Stromquelle gibt auch die Solarzelle eine elektrische Leistung P ab, P kann man vereinfacht berechnen:

$$P = U_{oc} \times I_{sc} \times 0,8 = \dots\dots\dots W \quad (\text{In Worten: Leistung} = \text{Leerlaufspannung} \times \text{Kurzschlussstrom} \times 0,8)$$

Der Faktor 0,8 ergibt sich aus der P(U)- Kennlinie)

Hier werden keine Messungen durchgeführt, man benötigt die Messwerte aus den Experimenten 3+4, aus den roten und blauen Tabellen.

C1.3.1 Die Leistung P einer Solarzelle:

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: S in W/m ² →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead- Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogenlampe	Im Labor- Innenraum
Leerlaufspannung U in V (Volt)					
Kurzschlussstrom I in A (Ampere)					
Leistung P in W (Watt)					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C1.3.2 Die Leistung P von 2 Solarzellen in Reihenschaltung:

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: S in W/m ² →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead- Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogenlampe	Im Labor- Innenraum
Leerlaufspannung U in V (Volt)					
Kurzschlussstrom I in A (Ampere)					
Leistung P in W (Watt)					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C1.3.3 Die Leistung P von 2 Solarzellen in Parallelschaltung:

Lichtintensität Für Fortgeschrittene: In W/m ² →	Strahlender Sonnenschein Modul wird zur Sonne gehalten	Bedeckter/ bewölkter Himmel oder im Schatten	Auf der Platte des Overhead- Projektors	Auf optischer Bank SUSE 5.0, ca. 25 cm Abstand zur Halogenlampe	Im Labor- Innenraum
Leerlaufspannung U in V (Volt)					
Kurzschlussstrom I in A (Ampere)					
Leistung P in W (Watt)					

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C1.4. Bestimmung der Lichtintensität = Bestrahlungsstärke S_x über die Messung des Kurzschlussstroms

Der Kurzschlussstrom ist direkt proportional zur Bestrahlungsstärke S des Lichts und beträgt nach Messungen des Herstellers unserer SUSE- Solarzelle SUSEmod218 genau 1,025 A bei einer Lichtintensität von 1000 W/m² (strahlender Sonnenschein bei blauem Himmel). Mit der Messung des Kurzschlussstroms können wir also genau die aktuelle Intensität = Bestrahlungsstärke des Lichts S_x bestimmen.

Messen wir also mit dem Multimeter im 10A- oder 5A- Messbereich den Kurzschlussstrom I_{mess} in A, dann gilt die Verhältnisgleichung:

$$\frac{1,025\text{A}}{1000\text{ W/m}^2} = \frac{I_{\text{Mess}}}{S_x} \quad \text{somit folgt:}$$

$S_x = \frac{I_{\text{Mess}} * 1000}{1,025} \quad \text{in W/m}^2$	Berechnung mit dem Taschen- rechner oder Handyrechner
--	--

Wir messen die Bestrahlungsstärke der folgenden Lichtquellen durch Messung des Kurzschlussstroms einer Solarzelle:

Lichtquelle	Kurzschlussstrom I_{sc} in A	Bestrahlungsstärke S_x des Lichts in W/m^2
Strahlender Sonnenschein, Modul wird zur Sonne gehalten		
Bedeckter Himmel oder Schatten		
20 cm vor Halogenstrahler 150 W		
40 cm vor Halogenstrahler 150 W		
25 cm vor Halogenstrahler auf optischer Bank		
Direkt auf der Mitte der Platte des Overheadprojektors		
Am Rand der Platte des Overheadprojektors		
10 cm über der Platte des Overheadprojektors (Mitte)		
Im Innenraum Hier Messbereich 200 mA oder 20mA verwenden!		

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

Experimente C2: Wirkungsgrad, Stromdichte

Hinweise zu den Experimenten C2:

Die Experimente sind in der vorliegenden Form für Schülerinnen und Schüler ab Klassenstufe 10 gedacht, es sind fachliche Voraussetzungen notwendig, die bei den Experimenten I + II mit SUSE 5.22 erarbeitet werden.

Für die Experimente werden die im Kopf auf S.1 aufgeführten Zusatzgeräte benötigt.

Bei den vorliegenden Experimenten wird der Wirkungsgrad der Solarzelle im Näherungsverfahren bestimmt, für sehr präzise Messungen sind Messungen mit dem Modul SUSE 5.15 erforderlich.

Der Wirkungsgrad η einer Solarzelle gibt an, wie viel % der Primärenergie (Lichtstrahlung) in sekundäre Energie (Strom, elektrische Energie) umgewandelt wird.

Gute Silizium- Solarzellen haben derzeit Wirkungsgrade von 18 – 22%, je nach Zelltyp, die am ISFH neu entwickelte, hocheffiziente Solarzelle hat eine Wirkungsgrad von 26%.

Die Stromdichte j gibt an, wie viel Stromstärke 1 cm^2 der Solarzelle erzeugt, wenn die Zelle genau mit $1000 W/m^2$ bestrahlt wird.

C2.1 Experimente zur Wirkungsgradbestimmung

Wir bauen auf die optische Bank SUSE 5.0 das Modul SUSE 5.22 in ca. 20 cm Abstand auf und richten den Halogenstrahler genau auf eine der beiden Solarzellen aus, die wir für die Messung benötigen, der Verbindungsstecker ist gezogen.

Wir benötigen die eingestrahelte Leistung des Lichts P_L und die erzeugte elektrische Leistung P_E der Solarzelle. Diese werden ins Verhältnis gesetzt und mit 100 multipliziert, dann haben wir den Wirkungsgrad der verwendeten Solarzelle bestimmt.

Messungen:

- Wir schalten den Halogenstrahler an das Netzgerät (eingestellt genau auf 12 V) und bestrahlen die Solarzelle, messen an der Zelle nacheinander den Kurzschlussstrom I_{sc} und die Leerlaufspannung U_{oc} :

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

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

Ihr Produkt mit 0,8 multipliziert ergibt näherungsweise die elektrische Solarzellenleistung P

$$P = I_{sc} * U_{oc} * 0,8 = \dots\dots\dots \mathbf{W} \text{ die elektrische Leistung der Solarzelle}$$

- Nun benötigen wir die auf die Solarzelle eingestrahelte Lichtleistung P_L . Dazu müssen wir über den Kurzschlussstrom die Bestrahlungsstärke in W/m^2 des eingestrahelten Lichts berechnen:

Die Bestrahlungsstärke S des Lichts bestimmen wir aus dem Kurzschlussstrom, wie in den Experimenten I zu SUSE 5.22 ausführlich dargestellt ist:

Um die Bestrahlungsstärke S zu bestimmen, messen wir mit dem Multimeter im 10A-Messbereich den Kurzschlussstrom I_{mess} in A, dann gilt die Verhältnisgleichung:

Berechnung der Bestrahlungsstärke S

$$\frac{1,025 \text{ A}}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{I_{Mess}}{S_x} \text{ somit folgt:}$$

$S_x = \frac{I_{Mess} * 1000}{1,025} \text{ in W/m}^2$	Berechnung mit dem Taschenrechner oder Handyrechner
--	---

Erhaltene Bestrahlungsstärke $S_x = \dots\dots\dots \mathbf{W/m}^2$

- Da die Solarzelle aber nicht 1 m^2 groß ist, müssen wir berechnen, wie viel W Lichtleistung auf die kleine Fläche der Solarzelle eingestrahlt wird, wobei $1000 \text{ W/m}^2 = 0,1 \text{ W/cm}^2$ sind.

Die Solarzelle selbst ist ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 5,2 cm

Die Fläche A der Solarzelle beträgt:..... cm^2

Somit erhält die Solarzelle vom Licht eine Leistung $P_L = \dots\dots\dots \mathbf{W}$

Der Wirkungsgrad ergibt sich nun aus der Gleichung:

$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{Lichtleistung } P_L}{\text{Elektrische Leistung } P_E} * 100 = \dots\dots\dots\%$$

Der Wirkungsgrad der SUSE- **Solarzelle beträgt somit.....%**

Ist das ein guter Wert ? Wo verbleibt der Rest der Energie zu 100% ?
 Notieren Sie Ihre Ideen hier:

C2.2 Die Stromdichte j der Solarzelle = Qualität einer Solarzelle

Stromdichte j in mA/cm²

Sehr gut:	> 40 mA/cm ²
Gut	35-39 mA/cm ²
Mittel:	28....34 mA/cm ²
Schlecht:	< 28 mA/cm ²
Bei einer Bestrahlungsstärke von 1000W/m ² !!	

Messung im strahlenden Sonnenschein oder auf dem Overhead- Projektor bei S = 1000 W/m²

Die Stromdichte j gibt an, wieviel Stromstärke in mA ein 1 cm² großes Stück der Solarzelle produziert, je mehr, desto besser !

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

1. Messen Sie den Kurzschlussstrom **genau bei einer Einstrahlung von 1000 W/m².**

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

2. Bestimmen Sie genau die Fläche A der Solarzelle

$$\mathbf{A} = \dots\dots\dots \mathbf{cm}^2$$

3. Berechnen Sie $I_{sc} / A = \dots\dots\dots \text{mA/cm}^2$

Die Stromdichte der verwendeten Zelle ist.....mA/cm²

Die Qualität der SUSE- Solarzelle SUSEmod218 ist.....
Sehr gut – gut – mittel- schlecht

Experimente C3: Kennlinienaufnahme U(S) und I(S) an Solarzellen

Hinweise zu den Experimenten C3

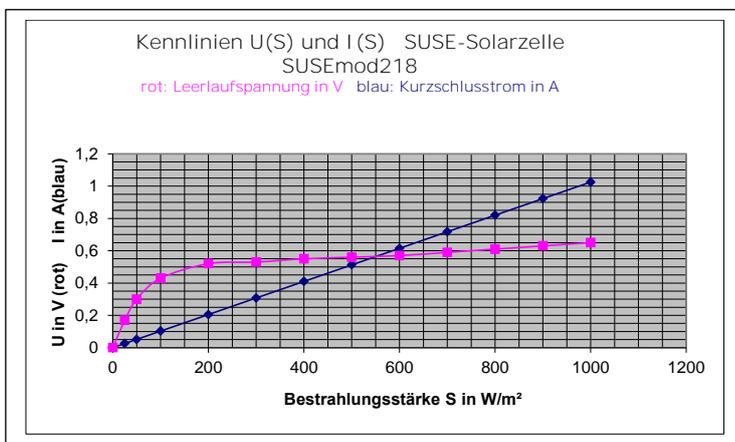
Die Experimente sind in der vorliegenden Form für Schülerinnen und Schüler ab Klassenstufe 10 gedacht, es sind fachliche Voraussetzungen notwendig, die bei den Experimenten I mit SUSE 5.22 erarbeitet werden.

Für die Experimente werden die im Kopf auf S.1 aufgeführten Zusatzgeräte benötigt.

Für die Aufnahme der I-U- Kennlinie, der P-U- Kennlinie und des MPP muss das Experimentiergerät SUSE 5.15 verwendet werden.

Bei den vorliegenden Experimenten wird die Abhängigkeit der Solarzellenspannung U_{oc} , des Solarzellen- Kurzschlussstroms I_{sc} und der Solarzellenleistung P von der Lichteinstrahlung (Bestrahlungsstärke S) aufgenommen und als Graphen dargestellt.

Die untenstehende Grafik zeigt den U(S)- Verlauf und den I(S)- Verlauf unserer Solarzelle.



Die Stromstärke ist direkt proportional zur Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S), eine Ursprungsgerade, erreicht bei 1000 W/m² 1025 mA, die Spannung dagegen ist eine Exponentialkurve, die bei ganz geringer Helligkeit stark ansteigt und dann im Bereich zwischen mittlerer und hoher Lichtintensität zwischen 0,5 V und 0,6 V langsam ansteigt und bei maximaler Helligkeit bei 1000 W/m² 0,65 V erreicht.

C3.1 Experimente zur U(S)- Kennlinie und I(S)- Kennlinie

Bei diesen Experimenten ziehen wir den Verbindungsstecker und messen gleichzeitig die Solarzellenspannung U an der oberen Solarzelle, dazu wird das Multimeter im 20 V DC Messbereich an das Buchsenpaar der oberen Solarzelle angeschlossen.

Den Kurzschlussstrom I messen wir an der unteren Solarzelle, dazu wird das Multimeter im 10 A- oder 5A- Messbereich an das Buchsenpaar der unteren Solarzelle angeschlossen.

Wir bestimmen also Spannung U und Stromstärke I der Solarzelle in Abhängigkeit von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) und tragen die Werte in eine Tabelle ein, um sie danach zur Zeichnung der Graphen zu verwenden.

Die Bestrahlungsstärke S des Lichts bestimmen wir aus dem Kurzschlussstrom, wie in den Experimenten I zu SUSE 5.22 ausführlich dargestellt ist:

Um die Bestrahlungsstärke S zu bestimmen, messen wir mit dem Multimeter im 10A- Messbereich den Kurzschlussstrom I_{Mess} in A, dann gilt die Verhältnisgleichung:

Berechnung der Bestrahlungsstärke S :

$$\frac{1,025 \text{ A}}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{I_{\text{Mess}}}{S_x} \quad \text{somit folgt:}$$

$$S_x = \frac{I_{\text{Mess}} * 1000}{1,025} \quad \text{in W/m}^2$$

Berechnung mit dem Taschenrechner oder Handyrechner

Die Messungen

Bei strahlendem Sonnenschein im Sommer bei blauem Himmel können wir die Messungen im Freien machen, bei bewölktem Himmel arbeiten wir mit einem 500 W Halogenstrahler im Laborraum.

C3.1.1 Im Freien

halten wir das Modul mit den angeschlossenen Messgeräten ins Sonnenlicht und messen U und I . Danach muss die Lichteinstrahlung verringert werden, wir halten Klarsichtfolien vor die Zellen, danach weißes Papier, gehen danach in den Schatten, um möglichst viele verschiedene Werte für die Lichtintensität zu erhalten. Die angegebenen Stromwerte sollten durch Abschatten näherungsweise erreicht werden. Wir beginnen also rechts in der Tabelle.

Die Werte tragen wir in die Tabelle ein.

C3.1.2 Im Laborraum

befestigen wir das Modul SUSE 5.22 auf der optischen Bank SUSE 5.0 und verwenden einen Halogenstrahler 500 W als Lichtquelle, der Halogenstrahler sollte waagrecht abstrahlen und die beiden Zellen gleichmäßig beleuchten. Zu Beginn stellen wir den Strahler so nah an das Modul, dass der Kurzschlussstrom 1,025 A ist, dann ist die Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) genau 1000 W/m².

Den Strahler nur kurzzeitig zum Messen einschalten, die Zellen dürfen sich nicht zu stark erwärmen!

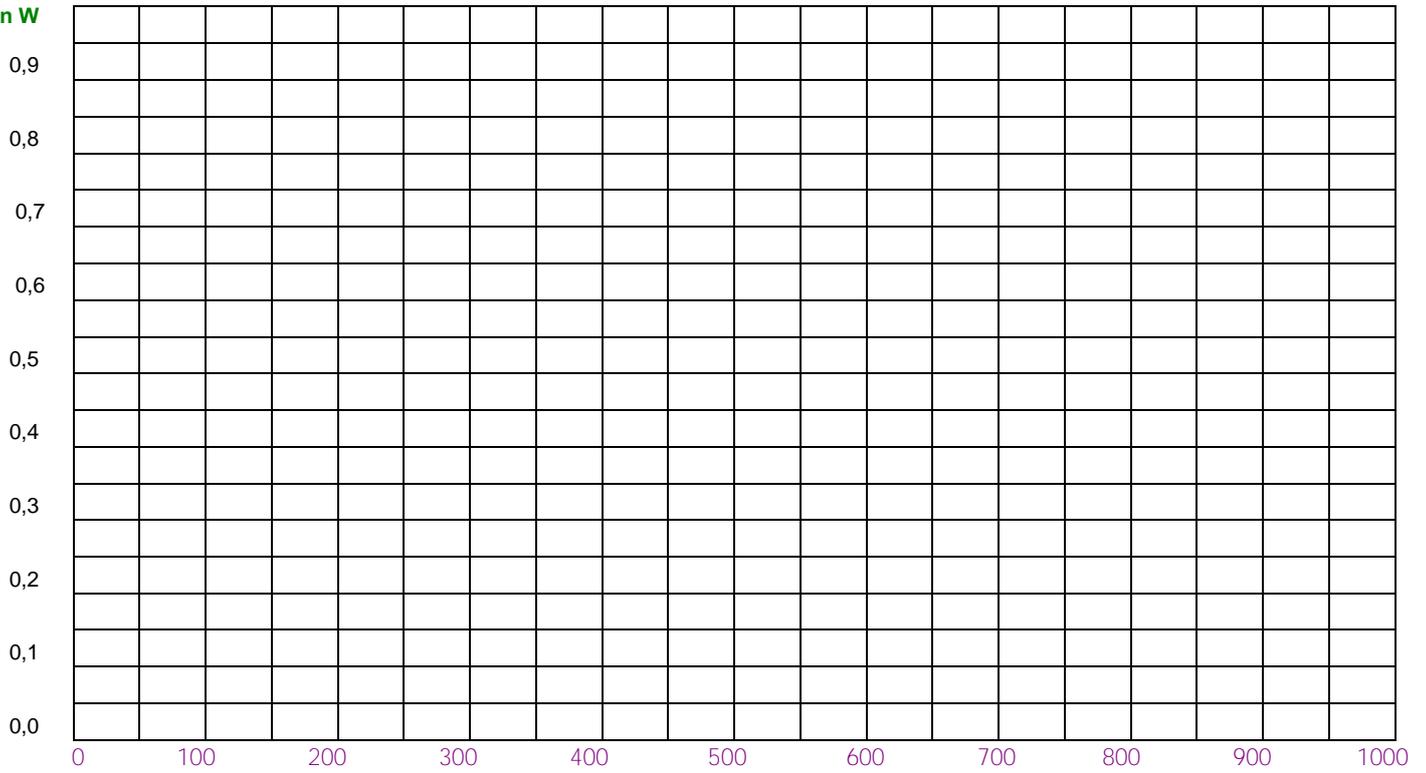
Dann entfernen wir den Strahler in geringen Abständen vom Modul, dadurch sinkt die Bestrahlungsstärke und messen jeweils Spannung und Stromstärke und berechnen daraus die weiteren Tabellenwerte.

Die Messwerttabelle

geringe Lichtintensität											hohe Lichtintensität
I_{sc} sollte ungefähr sein in A	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9
genauer Messwert I_{sc} in A											
Spannung U_{oc} in V											
Bestrahlungsstärke S in W/m ²											1000
Leistung P der Solarzelle in W $P = U * I * 0,8$											

U in V
I in A
P in W

5. Koordinatensystem zum Zeichnen der 3 Graphen



x- Achse: Bestrahlungsstärke S in W/m^2

y- Achse: in rot eintragen: Spannung U_{oc} in V

 in blau eintragen: Stromstärke I_{sc} in A

 in grün eintragen: Leistung P in W

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

Verschattungsexperimente mit SUSE 5.22

mit Verwendung der optischen Bank SUSE 5.0 und des Halogenstrahlers SUSE 5.16



Notwendige Bauteile:

Optische Bank SUSE 5.0, Solarmodul SUSE 5.22, 1 Halogenstrahler SUSE 5.16, Netzgerät 12V/>3A, 2 Muffen, 6 Laborkabel, CassyLab mit Netzteil, PC oder Laptop mit CassyLab- Software, einige Blätter weißes Schreibpapier DIN A4, einige Bögen Klarsichthüllen DIN A4.

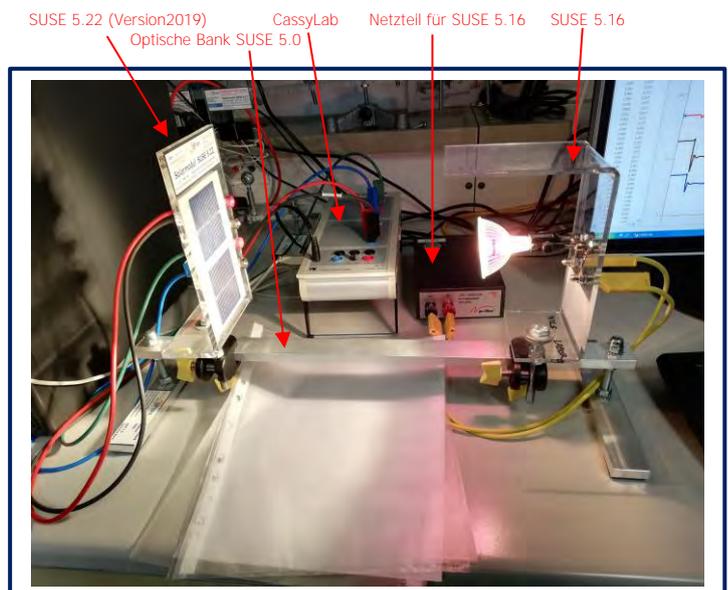
Beim Betrieb von Photovoltaikanlagen (PV) auf Dächern, Fassaden oder im Freiland sind Verschattungen durch Gebäude, Bauwerke, Bäume o.ä. zu vermeiden, da Schatten auf PV- Anlagen den Ertrag an elektrischer Energie erheblich mindern. Bei der Planung von PV- Anlagen sind mögliche Schattenereignisse zu verschiedenen Tages- oder Jahreszeiten vorher zu simulieren, um den Standort möglichst schattenfrei zu gestalten. Besonders im Winterhalbjahr bei tiefstehender Sonne sind Verschattungen ein großes Problem.

In diesem Experiment mit SUSE 5.22 als Photovoltaikanlage und CassyLab (oder ähnliches Messsystem) können wir das Problem der Verschattung studieren und die Auswirkung auf Spannung, Stromstärke, Leistung analysieren. Die eine Solarzelle auf SUSE 5.22 nehmen wir zur Messung der Leerlaufspannung U_{oc} , die andere Zelle zur Messung des Kurzschlussstroms I_{sc} . Die Leistung als Produkt beider Größen errechnet CassyLab. Als Schattengeber verwenden wir weißes Schreibpapier und Klarsichthüllen. Als Darstellung auf dem Bildschirm wählen wir $U_{oc}(t)$, $I_{sc}(t)$, $P(t)$ in wiederholender Messung, wie Foto 2 zeigt.

Aufbau des Experimentes:

Die Laborkabel sollten immer von der Rückseite in die Buchsen des Moduls SUSE 5.22 eingesteckt werden, um Kabelschatten auf den Solarzellen zu vermeiden!

Wie das Foto 1 zeigt, sind auf der optischen Bank ein Halogenstrahler SUSE 5.16 und ein Solarmodul SUSE 5.22 in ca. 35 - 40 cm Abstand befestigt. SUSE 5.16 wird mit 2 Laborkabeln an ein Netzgerät mit 12 V DC oder AC mit $I > 3A$ angeschlossen. SUSE 5.16 wird in Höhe und Neigung der Lichtquelle so eingestellt, dass beide Solarzellen gleichmäßig bestrahlt werden.



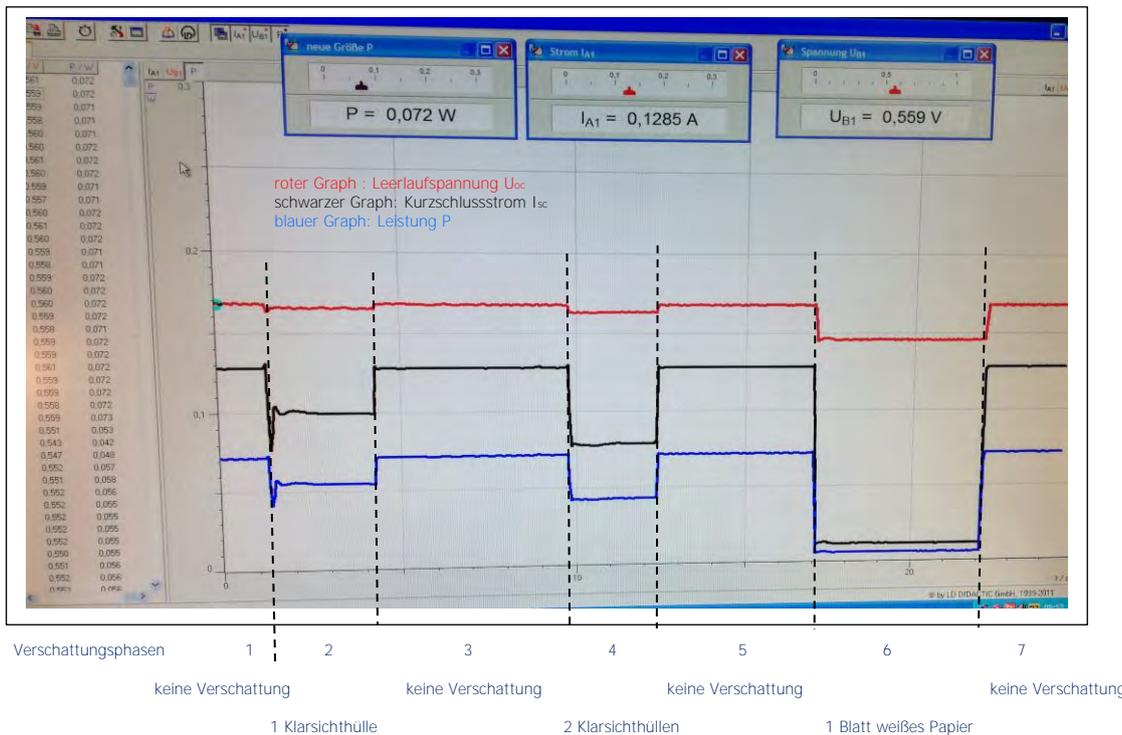
Der Verbindungsstecker wird gezogen (bzw. der Schalter zwischen den Solarzellen wird ausgeschaltet), die Solarzellen sind getrennt.

An der Solarzelle 1 wird die Leerlaufspannung U_{oc} gemessen, von ihren beiden Anschlussbuchsen gehen 2 Laborkabel an den U- Eingang von CassyLab.

An der Solarzelle 2 wird der Kurzschlussstrom I_{sc} gemessen, von ihren beiden Anschlussbuchsen gehen 2 Laborkabel an den I- Eingang von CassyLab.

An einer Solarzelle können diese Größen nicht gleichzeitig bestimmt werden!

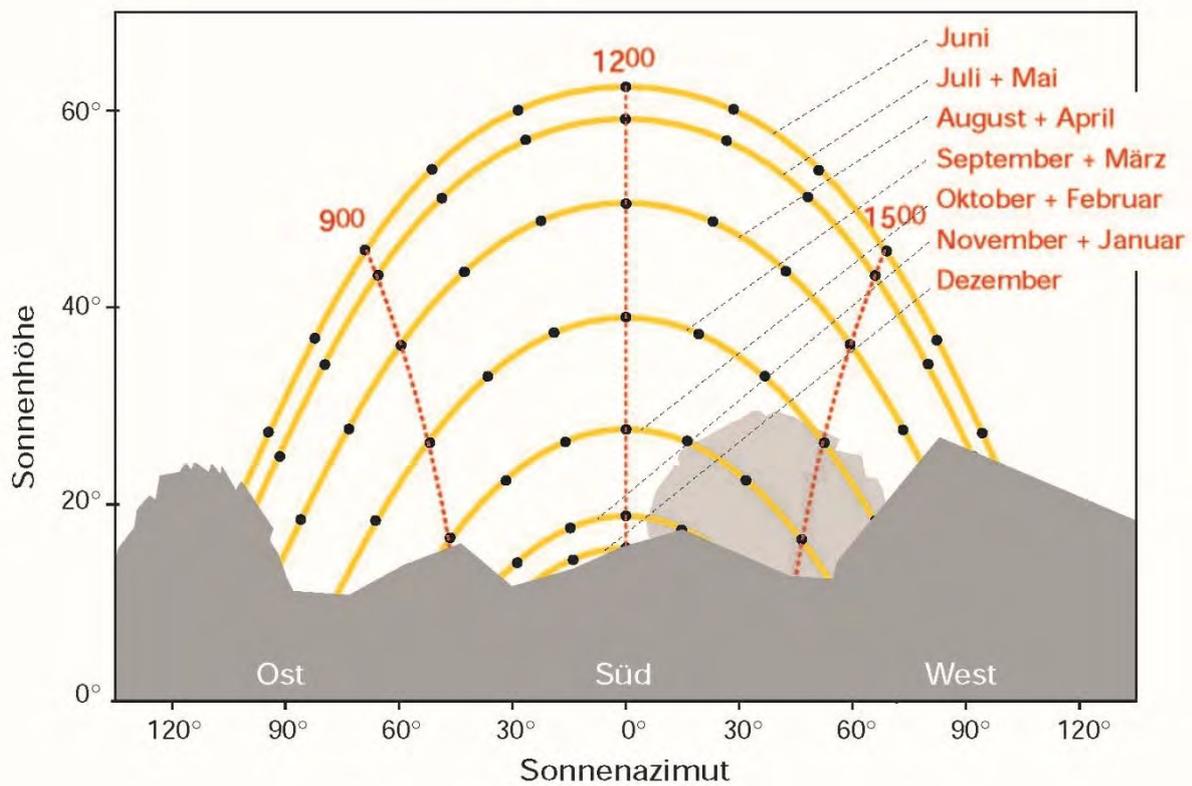
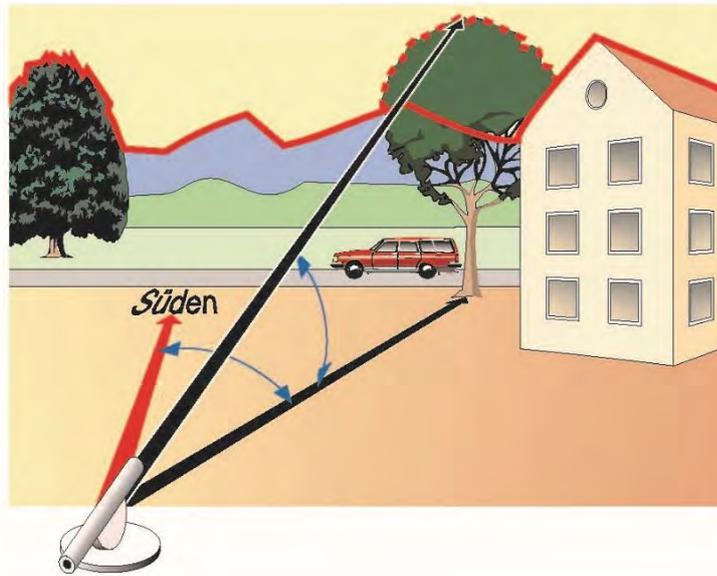
Nun wird CassyLab konfiguriert, gemessen und auf dem PC- Bildschirm dargestellt werden die Funktionen $U(t)$, $I(t)$ und das Produkt $P(t)$, Foto 2 zeigt den screenshot einer Messung und der Verschattungswirkungen. Der t- Verlauf wird langsam eingestellt, für eine Bildschirmbreite ca. 20-30 s. Es wird in der CassyLab- Software auf wiederholende Messung eingestellt, dann läuft der Versuch ständig weiter.



Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier und auf Seite 3! Erläutern Sie ausführlich unter Verwendung der Solarzellenkennlinien die unterschiedlichen Wirkungen der Verschattung bei Spannung, Stromstärke, Leistung!



In der Realität lässt sich mit einem Verschattungsdiagramm in der Planungsphase einer Photovoltaikanlage auf einem Dach die „vor-Ort-Situation“ überprüfen (Beispiel Frankfurt/M.):



Mit diesen Graphen lassen sich schon in der Planungsphase mögliche Verschattungen im Jahresverlauf erkennen (Quelle: ISFH).

Auf den nächsten Seiten folgen die technischen Daten der verwendeten Solarzelle mit den Kennlinien!

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.

Solarmodulmaße: 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.

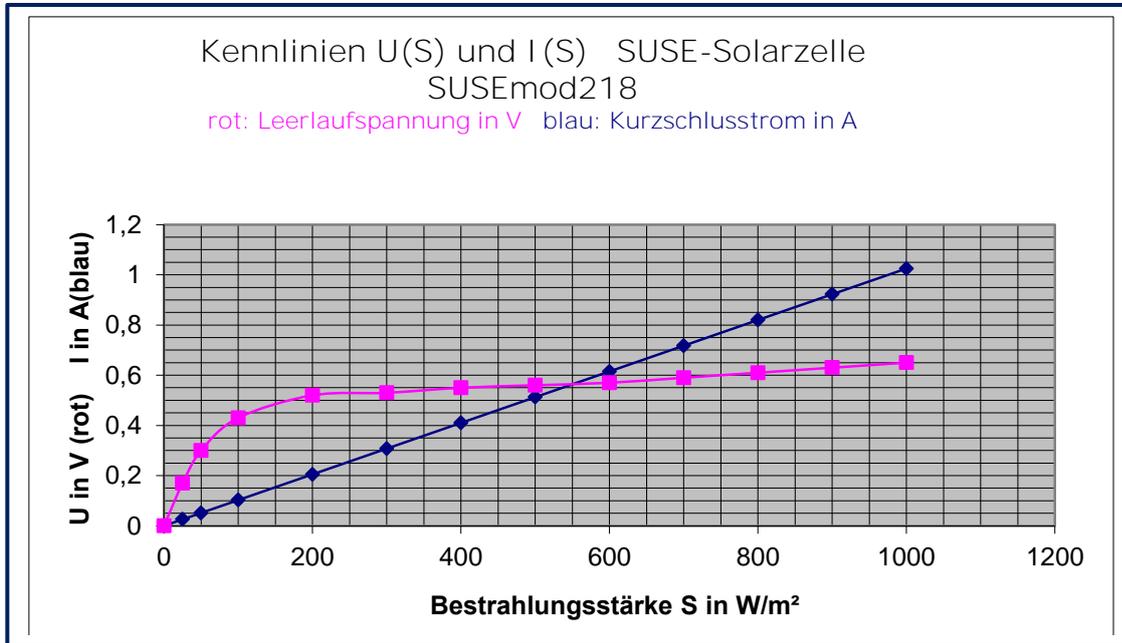
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/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) <small>Maximum Power Point</small>
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

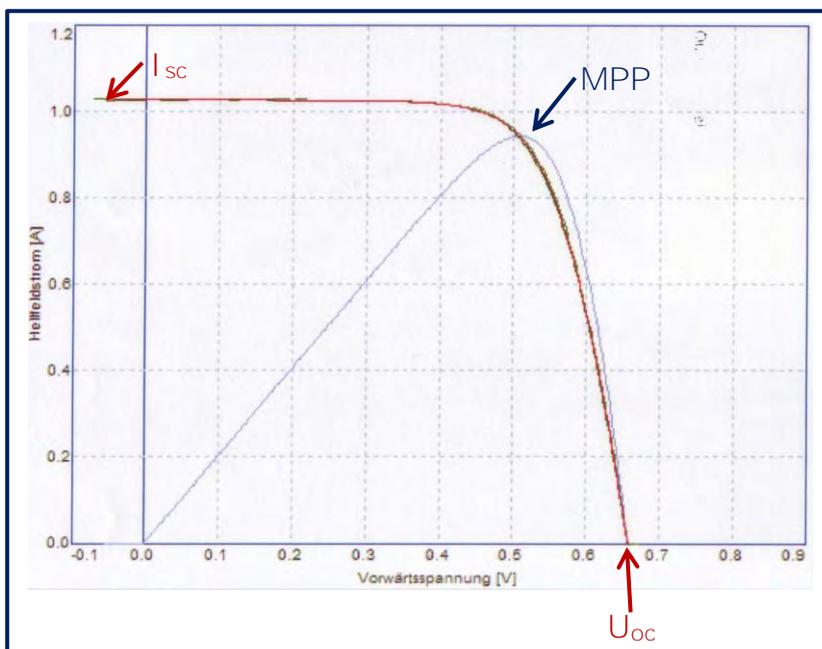
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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

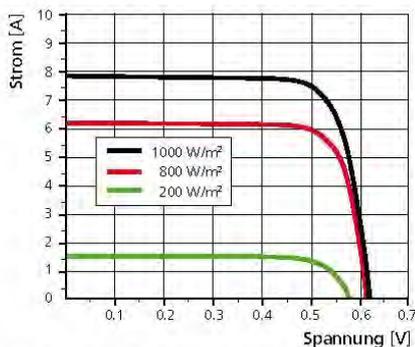
3. Weitere Daten (für die ganze Solarzelle 156 x 156 mm!), für die Solarzelle 52x 52mm im Modul SUSEmod218 muss die Stromstärke bei 3.1 und 3.3 durch 9 geteilt werden!

3.1 Intensitätsabhängigkeit

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

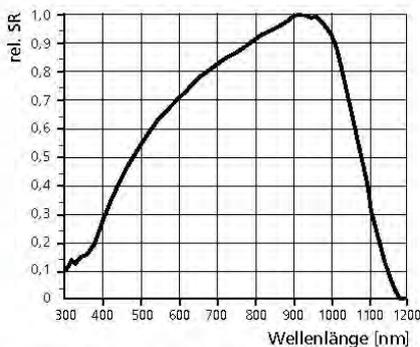
3.3 Temperaturabhängigkeit

IV-Kennlinie



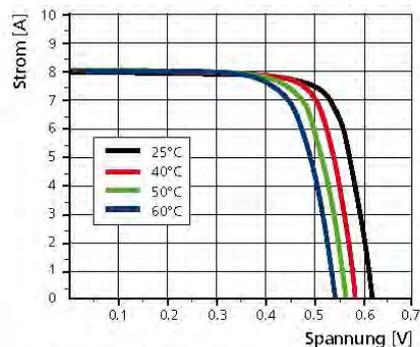
IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

Spektrale Empfindlichkeit



Kennlinie der spektralen Empfindlichkeit.

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 eingestrahlichten Lichts. (1000 W/m² entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosem 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.

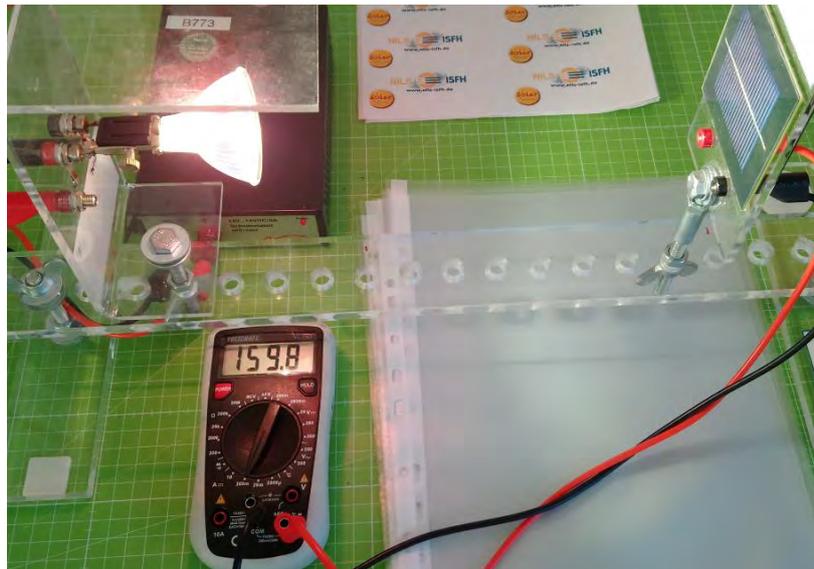
Die Leerlaufspannung U_{oc} einer Solarzelle:
$$U_{oc} = \frac{kT}{e} * \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_s} \right)$$

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

Station: Schwächung der Bestrahlungsstärke



Notwendige Experimentiergeräte:

- 1 Solarzelle, z.B. Suse 5.1 oder 1 Solarzelle von SUSE 5.22
- 1 Halogenlampe, z.B. SUSE 5.16 mit Netzgerät 12V / >3A
(Alternativ kann auch im Sonnenlicht gemessen werden)
- 1 Multimeter
- 4 Laborkabel 2 x rot und 2 x schwarz
- 30 Klarsichthüllen

Informationen zum Experiment

Scheint die Sonne und der Himmel ist frei von Wolken, erreicht uns an der Erdoberfläche eine Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 . Durch Wasserdampf in der Atmosphäre wird die Bestrahlungsstärke durch Absorption (und auch durch Reflexion) reduziert. Diesen Absorptionsvorgang stellen wir stark vereinfacht durch die Verwendung von Klarsichthüllen dar.

Durchführung des Experiments

Hinweise zum Experiment: Berühren Sie das Solarmodul nicht während des Experiments, damit es sich nicht verdreht, sonst stimmen die Werte des Kurzschlussstroms nicht mehr! Halten Sie die Klarsichthüllen direkt vor die Solarzelle, damit kein Fremdlicht seitlich eindringen kann!

Die Solarzelle wird durch eine Halogenlampe beleuchtet und der Kurzschlussstrom der Solarzelle wird mit einem Multimeter (Messbereich 10A oder 5A) gemessen. Direkt vor die Solarzelle wird die entsprechende Anzahl an Klarsichthüllen gehalten.

- Messen Sie zuerst nur die Stromstärken für 0 bis 5 Klarsichthüllen.
- Schätzen Sie mithilfe Ihrer ersten Messungen die Stromstärke für 10, 20 und 30 Klarsichthüllen ab.
- Messen Sie die Stromstärken für 10 bis 30 Folien und vergleichen Sie Ihre Schätzung mit den Messwerten.

Anzahl der Klarsichthüllen	0	1	2	3	4	5		10	15	20	25	30	0
Kurzschluss-Stromstärke I in mA													
Meine Schätzung	--	--	--	--	--	--			--		--		--

- Geben Sie Ihre Messwerte in die Tabelle der Excel-Datei: Schwächung der Bestrahlungsstärke I.xlsx ein und versuchen Sie, die Messwerte durch die Funktion $I(n) = a \cdot b^n$ zu beschreiben.

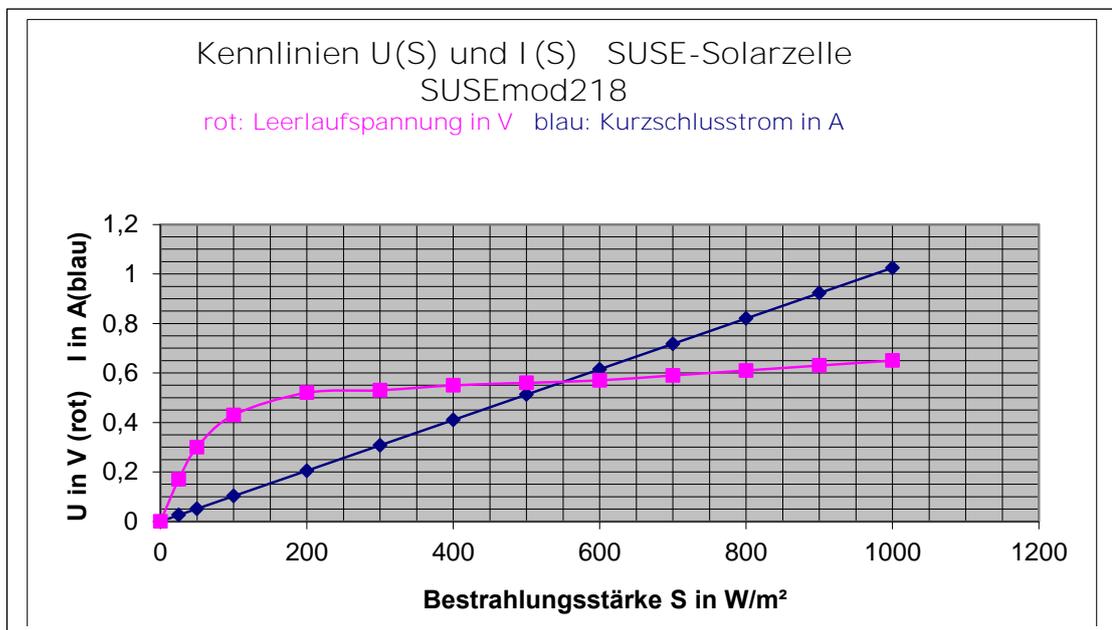
Da sich bei dem Experiment mit den Klarsichthüllen Absorptions- und Reflexionsprozesse überlagern, erscheint es sinnvoll, mit der Summe aus zwei Exponentialfunktionen zu arbeiten.

- Überprüfen Sie, ob sich die Stromstärke durch die Gleichung $I(n) = a \cdot b^n + c \cdot d^n$ berechnen lässt, indem Sie die Excel-Datei: Schwächung der Bestrahlungsstärke I.xlsx verwenden.

Zusatzaufgabe

- Berechnen Sie die Bestrahlungsstärke durch Messung des Kurzschlussstroms im Klassenraum (Messbereich 200mA oder 20 mA) und auf dem Schulhof (Messbereich 10A oder 5A).

Über den Kurzschlussstrom lässt sich die Bestrahlungsstärke des Lichts berechnen, da der Hersteller den Kurzschlussstrom bei $S = 1000 \text{ W/m}^2$ bestimmt hat und der Kurzschlussstrom proportional zur Bestrahlungsstärke ist, wie die Grafik zeigt:



	Kurzschlussstrom in A	Bestrahlungsstärke in W/m^2	Anzahl der Klarsichthüllen
Klassenraum			
Schulhof			

- Bestimmen Sie die Anzahl der Folien die nötig wären, um das Licht der Sonne (1000 W/m^2) auf die von Ihnen gemessene Bestrahlungsstärke zu reduzieren.

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

Kondensatorladung und Entladung mit SUSE 5.22 mit Verwendung der optischen Bank SUSE 5.0, des Halogenstrahlers SUSE 5.16, des Speichermoduls SUSE 4.12 sowie Solarmotor SUSE 4.16



Notwendige Bauteile:

Optische Bank SUSE 5.0, Solarmodul SUSE 5.22, 1 Halogenstrahler SUSE 5.16, Netzgerät 12V/>3A, 2 Muffen, 6 Laborkabel, Solarspeichermodul SUSE 4.12 und Solarmotor SUSE 4.16. 1 Multimeter und optional CassyLab zur Messung und Aufzeichnung der Auf- und Entladevorgänge.

Grundlagen:

Superkondensatoren (Mehrschichtkondensatoren) mit ihren hohen Kapazitäten von einigen Farad (F) bis hunderten Farad sind wichtige Speicherbausteine für elektrische Energie. Sie können elektrische Energie schnell und unkompliziert speichern und wieder abgeben. Wie für alle Kondensatoren gilt auch hier:

$$Q = C \cdot U$$

Q = Gespeicherte el. Ladung in As
C = Kapazität des Kondensators
U = Ladespannung



Im Speichermodul SUSE 4.12 sind 2 Superkondensatoren mit je 5F Kapazität in Reihenschaltung eingebaut, ihr + Anschluss ist die rote Buchse, ihr Minusanschluss die schwarze Buchse. Der Tastschalter T in der Mitte dient zur Entladung, er schließt Plus- und Minusanschluss beim Drücken des Schalters kurz. Die maximale Ladespannung eines Kondensators ist 3V, in der Reihenschaltung somit 6 V. Die Gesamtkapazität der Reihenschaltung ist 2,5 F. Laden wir beide mit Spannung der Reihenschaltung beider Solarzellen ca. 1,2 V auf, erhalten wir die Ladungsmenge $Q = 3 \text{ As}$.

Für die gespeicherte Energie W beim Kondensator gilt: $W = \frac{1}{2} CU^2$, hier somit $W = 1,8 \text{ J}$.

Aufbau des Experiments:

Die Laborkabel sollten immer von der Rückseite in die Buchsen des Moduls SUSE 5.22 eingesteckt werden, um Kabelschatten auf den Solarzellen zu vermeiden!

Wie das Foto 1 zeigt, sind auf der optischen Bank ein Halogenstrahler SUSE 5.16 und ein Solarmodul SUSE 5.22 in ca. 35 - 40 cm Abstand befestigt. SUSE 5.16 wird mit 2 Laborkabeln an ein Netzgerät mit 12 V DC oder AC mit $I > 3A$ angeschlossen.

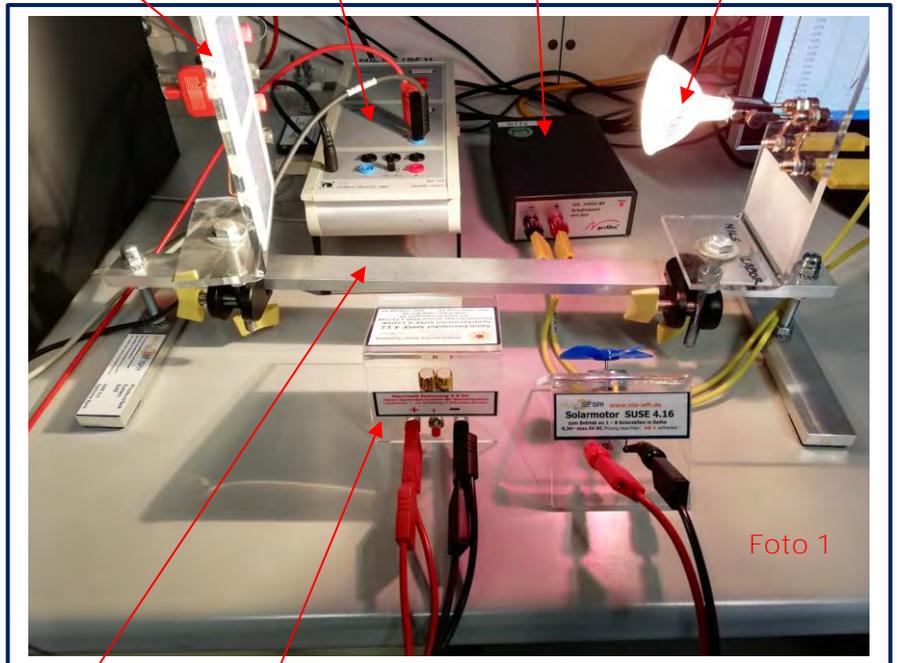
SUSE 5.16 wird in Höhe und Neigung der Lichtquelle so eingestellt, dass beide Solarzellen gleichmäßig bestrahlt werden.

Der Verbindungsstecker ist gesteckt (bzw. der Schalter zwischen den Solarzellen wird eingeschaltet), die Solarzellen sind in Reihe geschaltet. Mit 2 Laborkabeln wird das Speichermodul SUSE 4.12 polrichtig an die rote (+) und blaue (-) Buchse angeschlossen, das Pluskabel wird aber erst bei Versuchsbeginn an die rote Buchse der Solarzellen gesteckt!

Die beiden Pole des Speichermoduls SUSE 4.12 werden mit 2 Laborkabeln mit dem U- Eingang von CassyLab verbunden, CassyLab wird so programmiert, dass U(t) angezeigt wird.

Ohne CassyLab kann das Experiment auch mit einem Multimeter und einer Stoppuhr durchgeführt werden, die Kondensatorspannung wird alle 5 Sekunden abgelesen und tabellarisch festgehalten, damit später per Hand oder mit excel o.ä. ein Graph gezeichnet.

SUSE 5.22 (Version 2019) CassyLab Netzteil für SUSE 5.16 Halogenstrahler SUSE 5.16



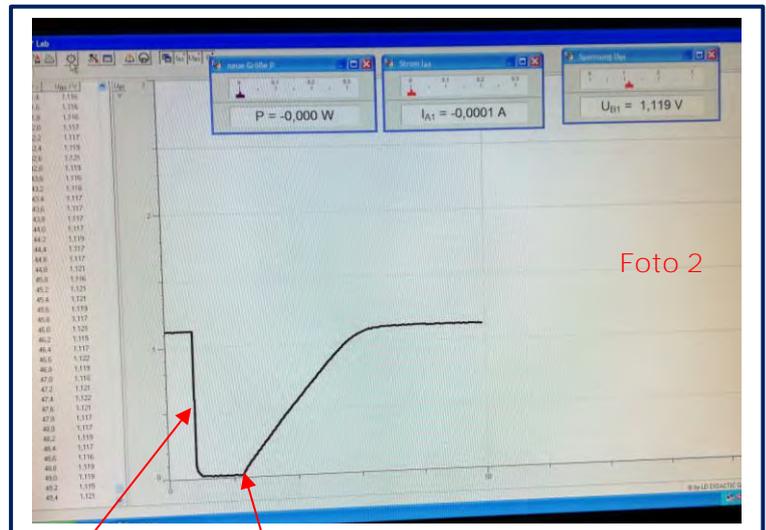
Optische Bank SUSE 5.0 Solarspeicher SUSE 4.12 Solarmotor SUSE 4.16

Versuchsdurchführung:

a) Kondensatoraufladung

Vor dem Start wird der Kondensator durch Drücken des Tastschalters (10 Sekunden!) entladen. Dann wird das Pluskabel des Speichermoduls in die Plusbuchse des Solarmoduls gesteckt, die Aufladung beginnt, Cassy startet automatisch und zeichnet die Aufladekurve U(t) auf, siehe Foto 2. Es zeigt sich die bekannte e-Funktion der Kondensatoraufladung $U(t) = U_0 - U_0 \cdot e^{-1/RC \cdot t}$. R ist in unserem Fall der sehr kleine Innenwiderstand der Solarzellen, R kann über die abgelesene Halbwertszeit berechnet werden!

Wenn I(t) aufgenommen werden soll, wird der I- Eingang von CassyLab in die Zuleitung zum Kondensator eingeschleift, im Handbetrieb wird ein Amperemeter im MB 10A oder 5A in die Zuleitung eingeschleift.



Kondensatorentladung durch Drücken des Tastschalters Start der Aufladung

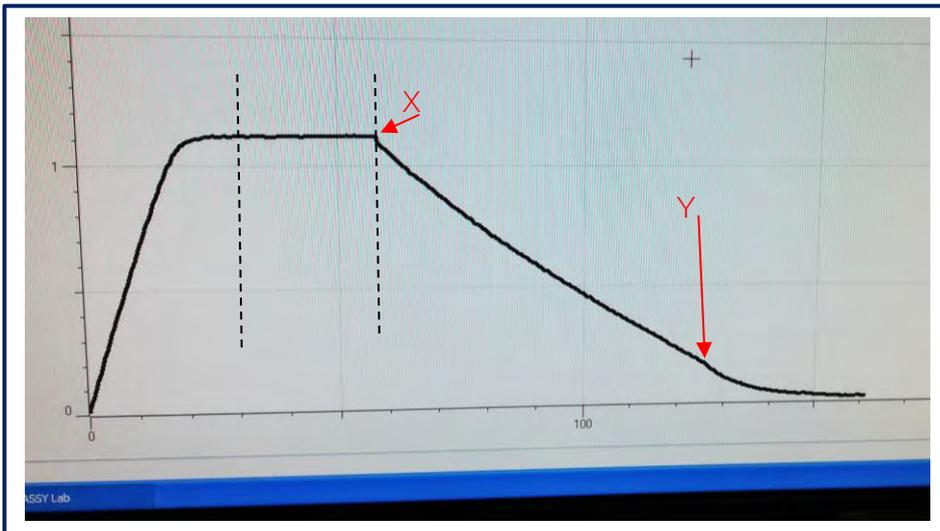
b) Kondensatorentladung

Zur Kondensatorentladung wird der Elektromotor SUSE 4.16 als Verbraucher verwendet. Er wird mit 2 Laborkabeln an das Speichermodul SUSE 4.16 gesteckt, die Plusleitung wird aber erst zu Versuchsbeginn in die rote Buchse an SUSE 4.16 gesteckt!

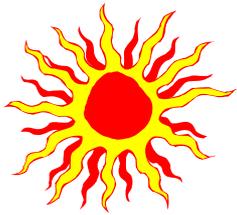
Der U- Eingang von CassyLab wird mit 2 Laborkabeln an die beiden Buchsen von SUSE 4.16 angesteckt.

Mit dem Einstecken des Pluskabels in die rote Buchse des Speichermoduls startet die Entladung, sie dauert mehrere Minuten! Statt mit CassyLab kann auch hier händisch mit einem Multimeter wie oben beschrieben gemessen werden. Die Entladekurve $U(t)$ ist in Foto 3 dargestellt, hier gilt:

$U = U_0 * e^{-1/RC * t}$, der Widerstand R ist der Widerstand des Elektromotors, er kann über Messung der Halbwertszeit bestimmt werden.



Die Kurve zeigt 3 Phasen, In Phase 1 wird der Kondensator über das Solarmodul auf 1,17 V aufgeladen. In Phase 2 ist C voll aufgeladen, am Punkt X beginnt die Entladung durch Anschluss des Solarmotors an den Solarspeicher SUSE 4.12. Am Punkt Y setzt die Drehung des Motors aus, die Entladung geht aber über die Motorspule weiter!



Photovoltaik-
System
SUSE

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne



BNE
Bildung für
Nachhaltige
Entwicklung

Experimente mit dem Solarmodul SUSE 5.1alpha

Messungen zur Winkelabhängigkeit von U, I, P einer Solarzelle

Notwendige Geräte:

Solarmodul SUSE 5.1alpha mit Peilstift, optische Bank SUSE 5.0, Halogen- Experimentierstrahler SUSE 5.16 mit Netzgerät 12V/4A und 2 Laborkabeln, 3 Muffen, Multimeter mit 2 Laborkabeln

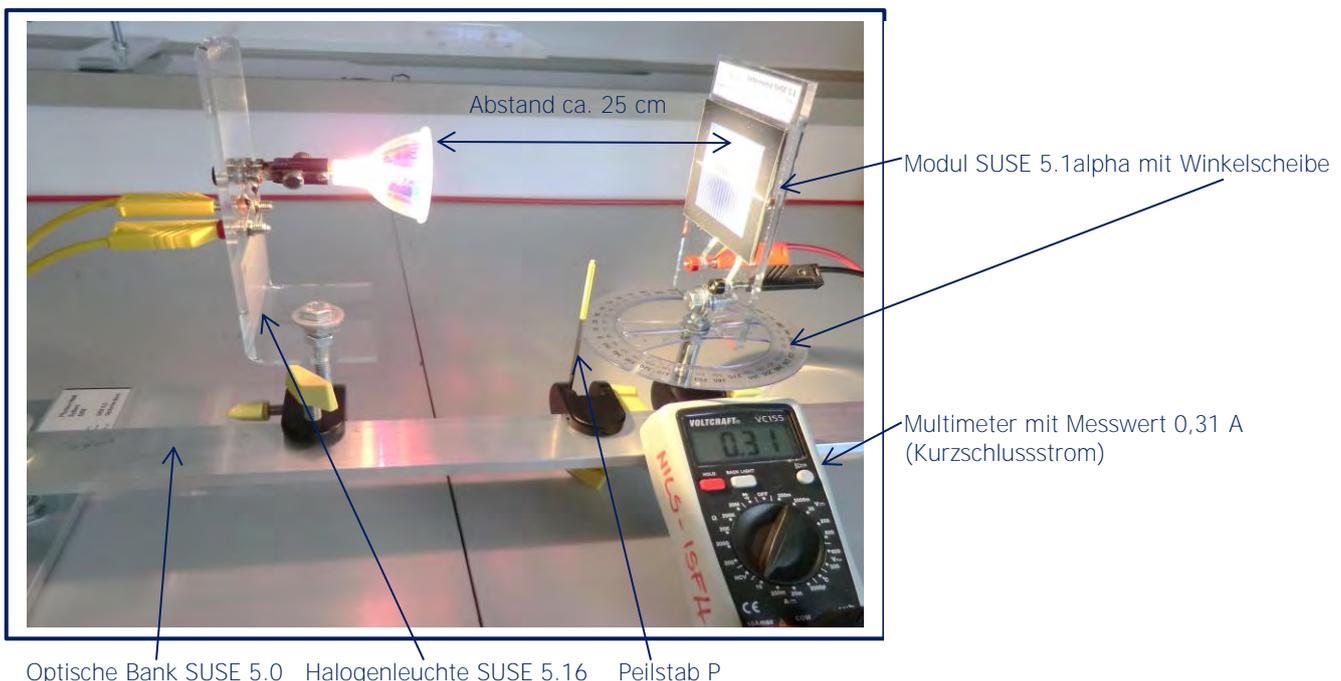


1. Grundlagen und Ziele des Experiments:

Die elektrischen Leistungsdaten von Solarzellen und Solarmodulen hängen stark vom Einstrahlungswinkel zwischen Solarzellenfläche und Richtung der Lichteinstrahlung ab. Die optimale elektrische Leistung liefern nur Solarzellen und Solarmodule mit senkrechter Lichteinstrahlung. In der technischen Praxis bieten nachführbare Module diese Lösung, sie richten sich immer automatisch auf senkrechte Lichteinstrahlung aus. Fest installierte Photovoltaik- Module auf Dächern oder Freilandanlagen haben immer Fehlstellungen zum senkrechten Einstrahlungswinkel und liefern entsprechend geringere Leistung. Dies gilt aber nur bei direkter Sonneneinstrahlung, bei bedecktem Himmel greift diese Bedingung nicht, da große Flächen des Himmels als Strahlungsquelle wirken, daher sind nachführbare PV- Anlagen in Deutschland aufgrund unserer Wetterlagen nicht wirtschaftlich. In diesem Experiment wollen wir die Abhängigkeit der Leerlaufspannung U_{oc} , des Kurzschlussstroms I_{sc} und der Leistung P einer Solarzelle vom Einstrahlungswinkel messen.

2. Versuchsaufbau:

Das Foto zeigt den Aufbau des Experiments. Auf der optischen Bank sind die Experimentierleuchte SUSE 5.16, der Peilstab P und das Winkelmodul SUSE 5.1alpha mit Muffen auf einer Linie befestigt. Der Peilstab P wird so justiert, dass er ca. 1mm vor der Winkelscheibe steht.



3. Versuchsdurchführung:

3.1 Basiseinstellung

Der Halogenstrahler wird eingeschaltet, an die Solarzelle ein Multimeter im Messbereich 10A angeschlossen. Nun wird das Modul soweit gedreht, dass das Amperemeter maximalen Ausschlag zeigt, der Wert sollte bei ca. **0,3...04, A liegen. In dieser Position liegt senkrechter Strahlungseinfall** vor. Falls die Winkelscheibe am Peilstab nicht exakt 90° zeigt muss sie durch leichtes Lösen der obersten M8-Mutter so justiert werden, dass sie am Peilstab exakt die 90° Position zeigt. Nun können die Messungen durchgeführt werden. Die Halogenlampe bitte nur für Messungen in Betrieb nehmen, damit sich die Solarzelle nicht stark erwärmt und dadurch veränderte Messwerte anzeigt (bei Erwärmung sinkt die Leerlaufspannung, der Kurzschlussstrom steigt leicht an).

Stecken Sie die Laborkabel immer von der Rückseite des Gerätes in die Buchsen, um Kabelschatten auf der Solarzelle zu vermeiden!

3.2 Die Messungen

Drehen Sie nun das Solarmodul in 10°- Schritten und messen Sie jeweils den Kurzschlussstrom (MB 10A DC) und die Leerlaufspannung (MB 20V DC), tragen Sie die Messwerte in die Tabelle ein:

Winkel α in °	Leerlaufspannung U_{oc} in V	Kurzschlussstrom I_{sc} in A	Leistung $P = 0,8 \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}$ in W	$\cos \alpha$ $\sin \alpha$	Auswertung
90 = senkrechter Lichteinfall					
80					
70					
60					
50					
40					
30					
20					
10					

Anmerkungen: 1. Die Gleichung $P_{max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot 0,8$ ist eine Näherungslösung, für eine exakte Messung von P muss man die I-U-Kennlinie und die P-U-Kennlinie aufnehmen und daraus P_{max} bestimmen.

2. Der Winkel 0° entfällt, hier streift das Licht parallel zur Solarzellenoberfläche!

3.3 Auswertungen:

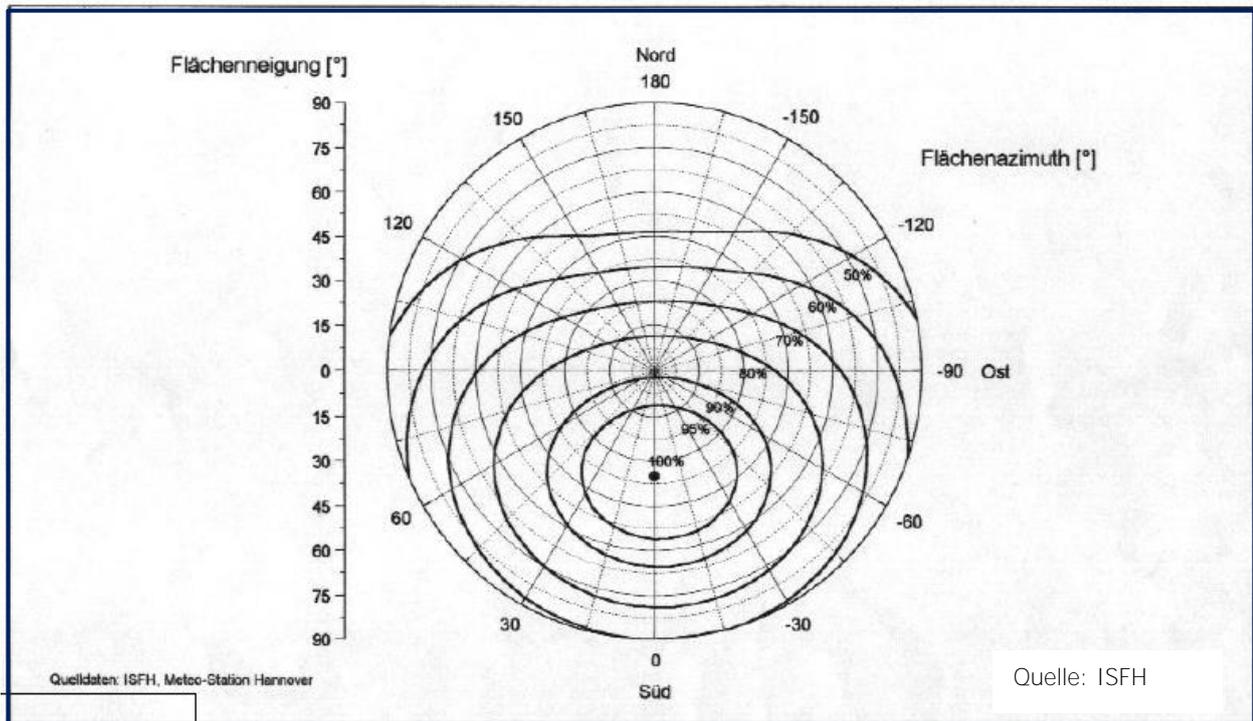
3.3.1 Zeichnen Sie auf mm- Papier oder mit excel o.Ä. die Abhängigkeiten I_{sc} , U_{oc} und P vom Winkel α

3.3.2 Prüfen Sie die Abhängigkeit des Kurzschlussstroms vom $\cos \alpha$ oder $\sin \alpha$ und erläutern Sie ihr Ergebnis!

3.3.4 Erläutern Sie, warum die Werte für U und P nicht durch eine Winkelfunktion berechenbar sind, verwenden Sie hierzu die technischen Daten des Solarmoduls SUSEmod 215!

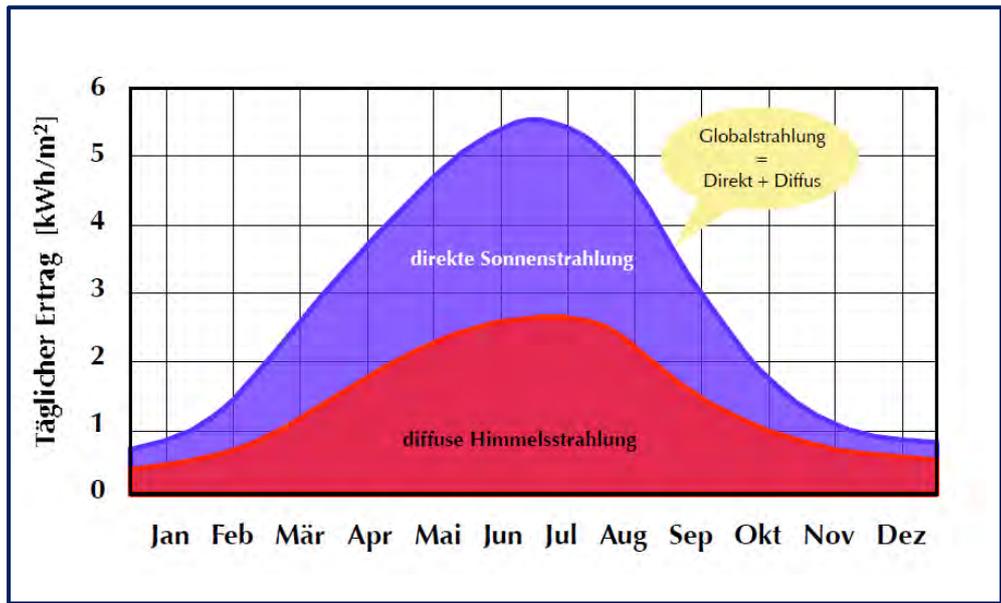
3.3.5 Bei einer Winkel- Fehlstellung einer Photovoltaikanlage auf einem Dach sinken die Leistung und die erzeugte elektrische Energie. Wieviel Grad Fehlstellung würden Sie noch tolerieren? Begründen Sie!

3.3.6 Die nachfolgende Grafik zeigt den Leistungsverlust einer PV- Anlage bei Bestrahlung mit „falschen“ Winkeln, a) die Flächenneigung in ° zur Waagerechten, b) die Ausrichtung der Himmelsrichtung zur Sonne. Berechnen Sie das Ergebnis für Dächer Ihrer Schule, Ihres Wohnhauses und weiterer Dächer!



Fest installierte PV- Anlage auf einem Dach in Deutschland (Hannover)
 100% = exakte Südrichtung und ca. 33° Dachneigung.

3.3.7 Begründen Sie unter Verwendung der nachfolgenden Grafik, warum in Deutschland nachführbare PV- Anlagen wenig sinnvoll sind! Erklären Sie, warum sie jedoch in Spanien und Nordafrika sehr sinnvoll sind!



Quelle: ISFH

Auf den Folgeseiten sind die technischen Daten der verwendeten Solarzelle.

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.

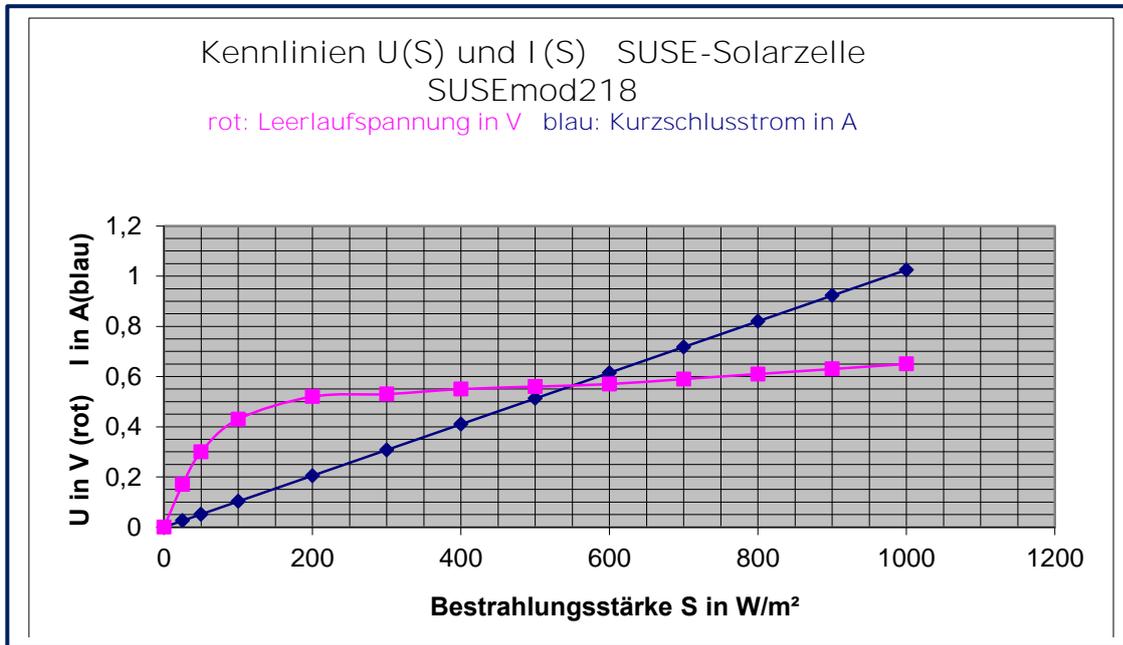
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/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) <small>Maximum Power Point</small>
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

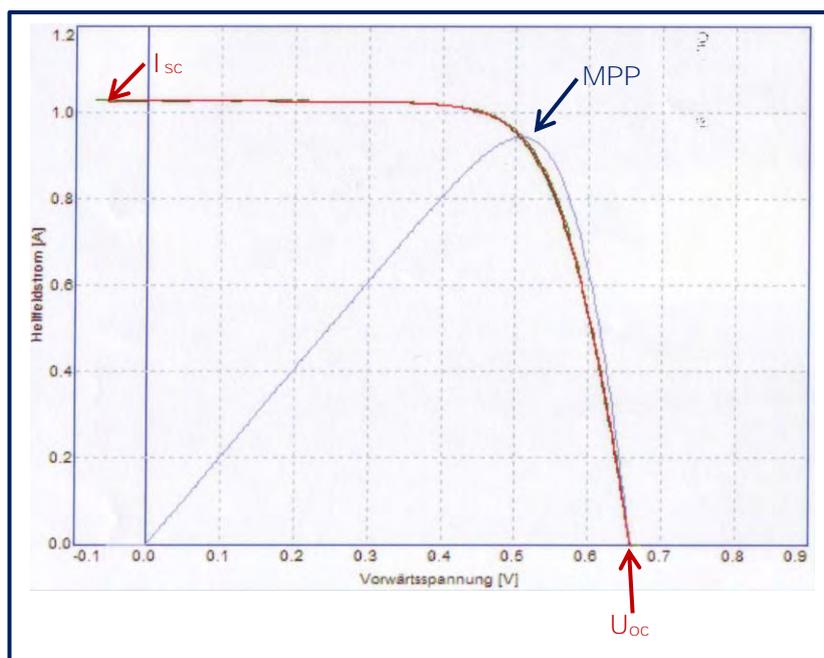
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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

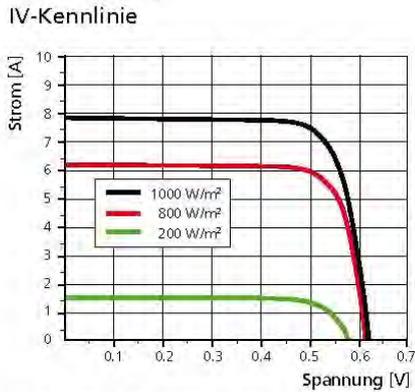


Die I-U-Kennlinie zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von $1000 W/m^2$ und einer Temperatur von $25^\circ C$. Der Schnittpunkt mit der x- Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung U_{oc}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

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

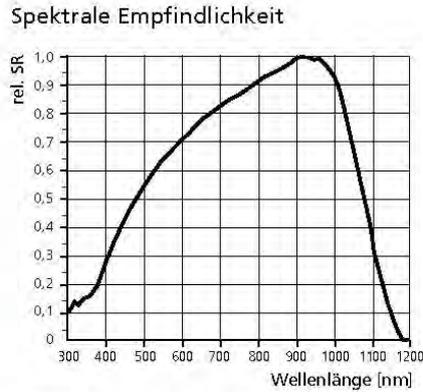
3. Weitere Daten (für die ganze Solarzelle 156 x 156 mm!), für die Solarzelle 52x 52mm im Modul SUSEmod218 muss die Stromstärke bei 3.1 und 3.3 durch 9 geteilt werden!

3.1 Intensitätsabhängigkeit



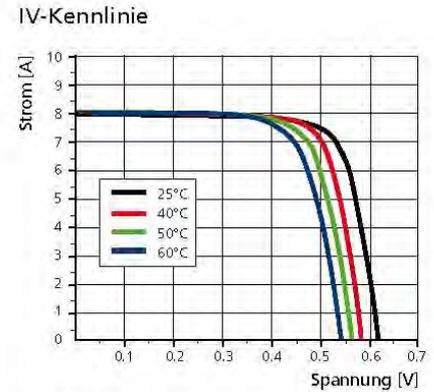
IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

3.2 Spektrale Empfindlichkeit



Kennlinie der spektralen Empfindlichkeit.

3.3 Temperaturabhängigkeit



IV-Verhalten für unterschiedliche Temperaturen.

Der linke Graph 3.1 zeigt die Intensitätsabhängigkeit der I(U)- Kennlinien in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke S des eingestrahlt 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: $I_{sc} = c * S$ $c = const.$

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 Sperrichtung (Dunkelstrom) in A
 S = Bestrahlungsstärke S in W/m²