



Photovoltaik-System SUSE

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne



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

Experimentieranleitung für das Solarmodul SUSE CM6MS

Lernstation

C2

15 Seiten

Benötigte Materialien für alle Experimente: Solarmodul SUSE CM6MS, 1 digitales Multimeter, Laborkabel, Solar- Radio SUSE 4.36, 2 LED- Module SUSE 4.15, Handylader- Modul SUSE 4.17, 4 Solarmotoren SUSE 4.16, SUSE 4.0-Halogenstrahler 120 W mit schaltbarer Tischsteckdose, Overheadprojektor, SUSE Solarfahrzeug 1 oder 4, schwarze Pappe A5, für SEK II- Experimente: Kennlinienmodul SUSE 4.55 + Cassy/Vernier Messtechnik

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

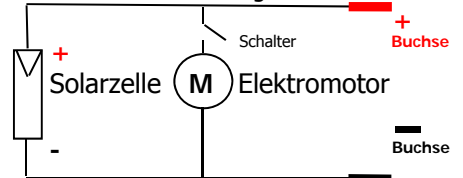
Weitere Experimente mit Zusatzgeräten:

14. Smartphone- Ladung mit SUSE 4.17 und 15x SUSE CM6MS in Reihenschaltung
16. Experimente zur Elektromobilität mit Solar-Fahrzeug SF4 oder SF1 und 4x SUSE CM6MS
17. Anschluss von 2 LED Modulen SUSE 4.15 an 6x SUSE CM6MS in Reihenschaltung
18. Radiobetrieb mit SUSE- Solarradio und 6x SUSE CM6MS in Reihenschaltung
19. „Falsche“ Reihenschaltung mit 2x SUSE CM6MS

Diese Dateien erhalten Sie bei NILS- ISFH oder Sundidactics



Die elektrische Schaltung des Solarmoduls



Das Solarmodul SUSE CM6MS
Links die Vorderansicht mit der Solarzelle
Rechts die Rückseitenansicht mit Buchsen, Schalter, Elektromotor mit Propeller

QR- Code dieser Versuchsanleitung

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

Als Lichtquelle für die Experimente sind möglich:

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

Elektrische und mechanische Daten der Solarzelle und des Solarmoduls:

Solarzelle: 52mm x 52mm
Solarmodul: 75mm x 75mm
Leerlaufspannung U_{oc} : 0,64V
Kurzschlussstrom I_{sc} : 990mA
 bei einer Einstrahlung von $S = 1000 \text{ W/m}^2$
 = strahlender Sonnenschein mittags im Sommer

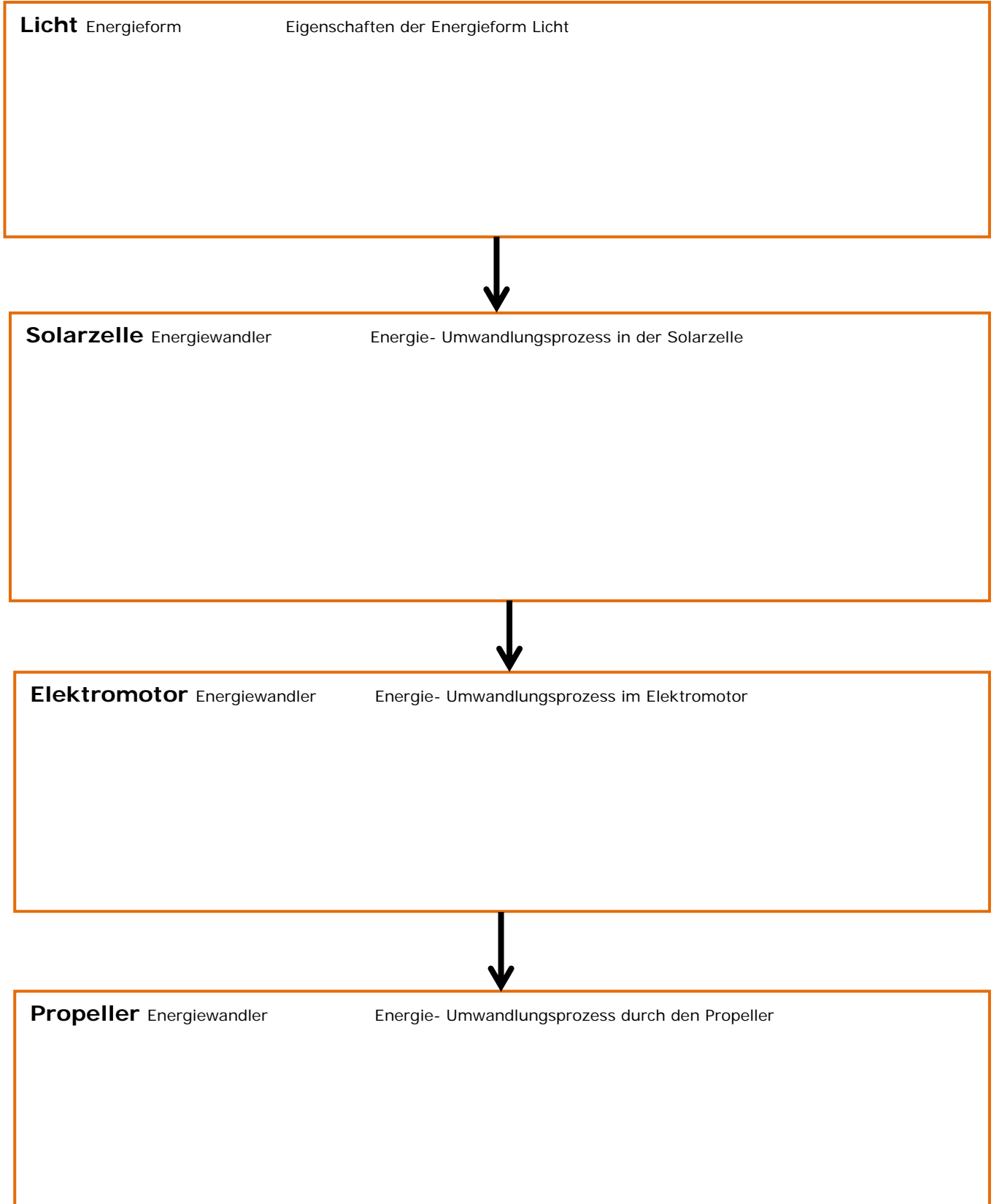
Ausführliche Daten auf den Seiten 13- 15

Für Lehrkräfte sind Lösungen für alle Experimente und Aufgaben bei SUNDidactics erhältlich →mail an info@sundidactics.de

Didaktische und methodische Hinweise:

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

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



Die Experimente mit dem Solarmodul SUSE CM6MS

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

2. Die elektrische Spannung der Solarzelle

Die Leerlaufspannung U_{oc}

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

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

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

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

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

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

Messungen zur Spannung:

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

3. Die maximale Stromstärke der Solarzelle = Kurzschlussstrom

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

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

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

Der Wert des Kurzschlussstroms ist direkt proportional zur Zellenfläche und zur Lichtintensität /Bestrahlungsstärke, sowie abhängig von der Qualität. Standard-Test-Wert: Bei der Solarzelle dieses Moduls mit den Maßen 52mm x 26mm ist die Kurzschluss- Stromstärke bei einer Lichtintensität von 1000W/m² genau **0,99A = 990mA**.

Weitere Messungen:

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

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

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

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

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

Vereinfachter Ansatz: P ist Leerlaufspannung x Kurzschlussstrom x 0,8, P sollte also im Idealfall bei **1000 W/m²** Einstrahlung **0,27 W** sein. Der Faktor 0,8 erklärt sich über die Kennlinie (siehe S.14 unten) und den MPP der Solarzelle und lässt sich dort exakt bestimmen.

Weitere Berechnungen (Motor ausgeschaltet):

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

5. Die Qualität der Solarzelle

= Stromdichte j in mA/cm²

Sehr Gut: > 40 mA/cm²
 Gut: 32- 40 mA/cm²
 Mittel: 24- 32 mA/cm²
 Schlecht: < 24 mA/cm²
 Bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² !!

Maximal möglicher theoretischer Wert: 45 mA/cm²

Die **Stromdichte j** (in mA/cm²) gibt an, wieviel Stromstärke ein **1 cm² großes Stück der Solarzelle** produziert, je mehr, desto besser! **Dazu muss die Einstrahlung genau 1000 W/m² betragen** (internationaler Standard- Wert = strahlender Sonnenschein oder OHP- Projektor), denn bei geringerer Einstrahlung <1000 W/m² ist die Stromdichte j natürlich auch geringer!

Kurzschlussstrom in mA
 $j = \frac{\dots}{\dots} = \dots \text{ mA/cm}^2$ bei 1000 W/m² Einstrahlung!
 Zellenfläche in cm²

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

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

Art der Solarzelle im Solarmodul: Bitte Zelltyp umkreisen

monokristalline Solarzelle – polykristalline Solarzelle

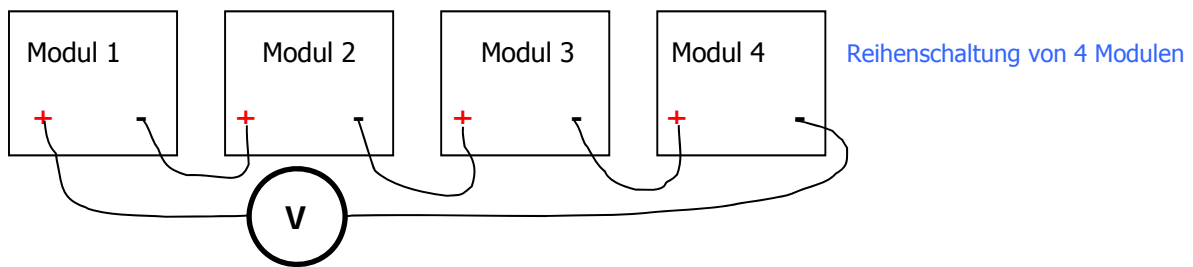
Erkläre stichpunktartig den unterschiedlichen Aufbau dieser beiden Zelltypen (Internet oder NILS-ISFH-PV- Handbuch):

6. Die Reihenschaltung von Solarzellen

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

Mehrere Module SUSE CM6MS in Reihenschaltung:

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



Einzelmodul:	U_{oc} in V	I_{sc} in A	Ergänze die Tabelle nach unten, falls Du mehr als 4 Module in Reihe schaltest!
Modul 1:.....			
Modul 2:.....			
Modul 3:.....			
Modul 4:.....			

Werte für die Reihenschaltung von.....Modulen:

$U_{ges} = \dots \text{ V}$

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

Was fällt auf, beschreibe und erkläre!

Zusatzaufgabe zur Parallelschaltung:

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

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

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

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

Versuchsaufbau:

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

Versuchsdurchführung:

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

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

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

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

8. Wirkungsgradbestimmung einer Solarzelle

Voraussetzung: Overheadprojektor oder Sonnenlicht mit der Bestrahlungsstärke 1000 W/m^2

1. Umrechnung der Lichtleistung 1000 W/m^2 bzw. $0,1 \text{ W/cm}^2$ auf die wirkliche Fläche der Solarzelle:

Die Solarzelle hat eine Fläche von $27,04 \text{ cm}^2$, sie erhält bei 1000 W/m^2

eine Lichtleistung von :..... W

2. Die elektrische Leistung (Aufgabe 4) war bei der gemessenen Zelle $P_E = \dots\dots\dots \text{W}$

3. Wirkungsgrad = elektrische Leistung P_E : Lichtleistung P_L * 100 = Wirkungsgrad in %

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

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

Wirkungsgrade von Solarzellen:

Monokristalline Zellen: 17- 22 %

Polykristalline Zellen: 15 – 19 %

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

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

9. Messungen der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) in W/m^2

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

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

Kurzschlussstrom I_{sc} der Solarzelle bei einer Bestrahlung von 1000 W/m^2

$$I_{sc} = \dots\dots\dots 0,98 \dots\dots\dots \text{A} = \dots\dots\dots 980 \dots\dots\dots \text{mA}$$

Messung der Bestrahlungsstärke S von Licht (Lichtintensität) in W/m^2 :

Da der Kurzschlussstrom I_{sc} einer Solarzelle proportional zur Bestrahlungsstärke S ist, gilt:

$$\frac{I_{sc} \text{ in A}}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{I_{mess} \text{ in A}}{S_x \text{ W/m}^2} \quad \text{oder nach } S_x \text{ umgestellt:}$$

$$S_x = \frac{I_{mess} \text{ (in A)} * 1000}{0,98 \text{ A}}$$

Dabei ist: I_{sc} in A der kalibrierte Kurzschlussstrom bei $1000 \text{ W/m}^2 = 0,99 \text{ A}$
 I_{mess} in A der gemessene Kurzschlussstrom bei der Bestrahlungsstärke S_x
 S_x in W/m^2 die Bestrahlungsstärke der Lichtstrahlung im Experiment

Messungen im Freien und bei Lichtquellen:

Lichtstrahlung	Kurzschlussstrom I_{sc} in A	Bestrahlungsstärke S_x in W/m^2
Strahlender Sonnenschein direkt zur Sonne gemessen		
Strahlender Sonnenschein im Schatten gemessen		
Bedeckter Himmel		
Sehr trübes Wetter		
Auf der Platte eines Overheadprojektors		
10 cm über der Platte eines Overheadprojektors		
40 cm vor Halogenlampe 35 W (Strahler SUSE 5.16)		
40 cm vor Halogenstrahler 150 W		
Im Innenraum Zum Fenster hin ausgerichtet		
Im Innenraum Zur Decke hin ausgerichtet		

Was fällt Dir bei den Experimenten auf, erläutere hier:

10. Experimente mit zusätzlichen Solarmotoren

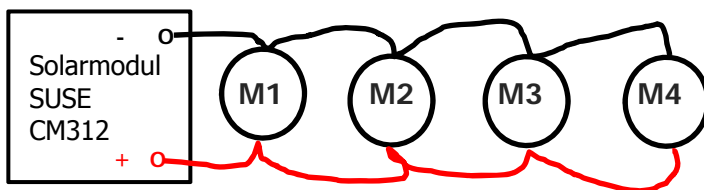


Für dieses Experiment sind 4 zusätzliche Solarmotoren SUSE 4.16 erforderlich.

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

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

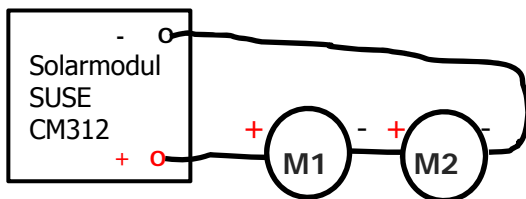
Richte die Solarzelle zur Sonne aus oder bestrahle sie mit Halogenlicht. Schalte den Solarmotor ein. Verbinde die rote Buchse des Solarmoduls mit der roten Buchse des Solarmotors und beide schwarze Buchsen mit je einem Laborkabel (rot bzw. schwarz). Teste, ob beide Motoren laufen! Ergänze einen weiteren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



Parallelschaltung von 4 zusätzl. Motoren

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

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



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

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

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

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



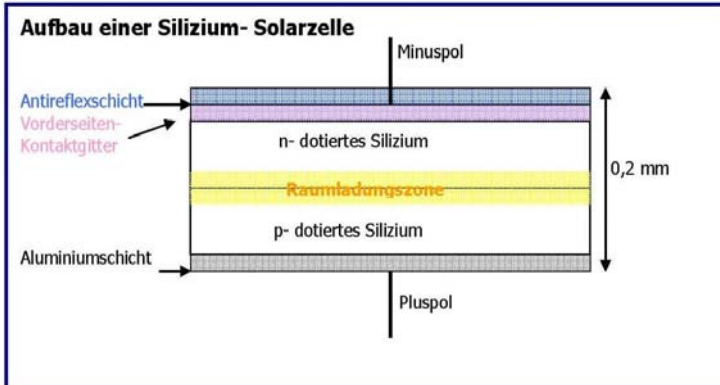
Photovoltaik-System SUSE

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne



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



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

11. Wie funktioniert eine Solarzelle?

Niveaustufe II

1. Elektrische Spannung U Leerlaufspannung U_{oc}

Eine Solarzelle liefert im Leerlauf (= Spannung ohne angeschlossenen Verbraucher) eine **typische Spannung von 0,6 – 0,64 V**. Der genaue Wert der **Leerlaufspannung U_{oc}** ist vom Material des Halbleiters, der Dotierung, der Temperatur und der Bestrahlungsstärke S abhängig, jedoch **unabhängig von der Fläche** (Größe) der Solarzelle.

2. Elektrische Stromstärke I Kurzschlussstrom I_{sc}

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

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

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

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

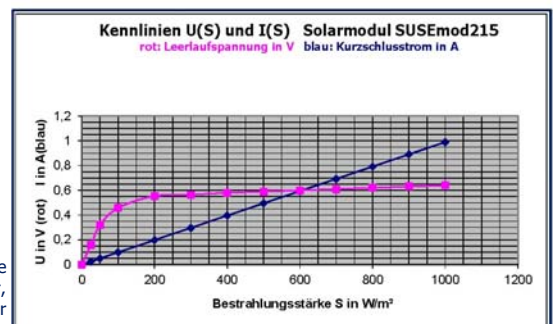


Rechts: Die $U(S)$ - Kennlinie (rot) und die $I(S)$ - Kennlinie (blau) der SUSE- Solarzelle SUSEmod4.

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

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

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



26 Fragen zum Solarmodul und zu den Experimenten

Einfach
Mittel
Niveauvoll

Für Lehrkräfte gibt es die
Lösungen der Fragen bei
NILS-ISFH oder bei
SUNdidactics.de

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



**Photovoltaik-
System
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**



SUSEmod215- ein leistungsstarkes, hocheffizientes robustes Solarmodul



Das Solarmodul SUSEmod215

Im Innern erkennt man die einlamierte monokristalline Si-Solarzelle, links ein quadratisches Element, rechts ein Eckstück mit abgeschrägter Ecke.

Modulmaße: 75 x 75 mm
Solarzellenmaße: 52 x 52 mm

Das im Herbst 2015 neu konzipierte **Sundidactics Solarmodul SUSEmod215** ist die Weiterentwicklung des bisher verwendeten Moduls SUSEmod2. Das Solarmodul **SUSEmod215** 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 mit Kunststoff vergossen/laminiert, Material: EVA/PET. 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, mechanisch sehr robust.

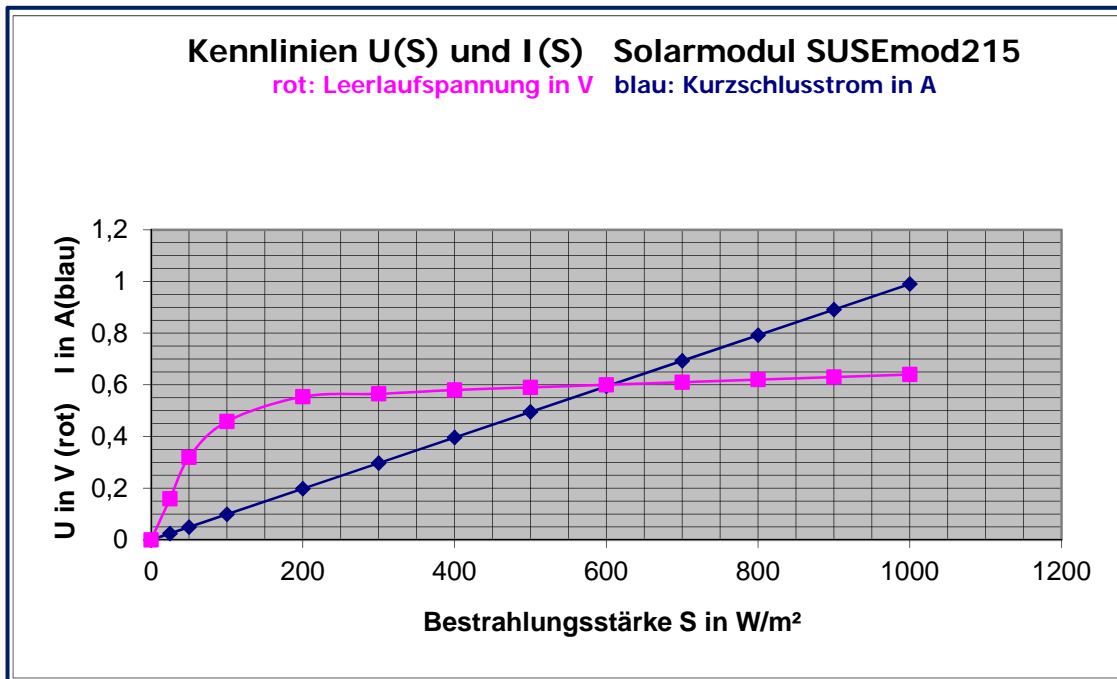
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN- Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

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		52 x 52 x 0,22	mm	Quadratische Zelle
Fläche	A	27,04	cm ²	1/9 einer 6 Zoll Solarzelle
Leerlaufspannung	U _{oc}	0,64	V	Typisch für Silizium
Kurzschlussstrom	I _{sc}	0,99	A	Proportional zur Lichtintensität S
Spannung im MPP	U _{MPP}	0,50	V	Spannung im (MPP) Maximum Power Point
Kurzschlussstrom im MPP	I _{MPP}	0,91	A	Kurzschlussstromstärke im MPP
Elektrische Leistung	P	0,45	W	Bei S = 1000 W/m ² , AM 1,5, 25°C
Wirkungsgrad	η	17,5	%	Qualitätsmerkmal
Füllfaktor	FF	72	%	FF ist ein Qualitätsmerkmal
Stromdichte	j	36,6	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

Die Kennlinien der Solarzelle im Modul SUSEmod215

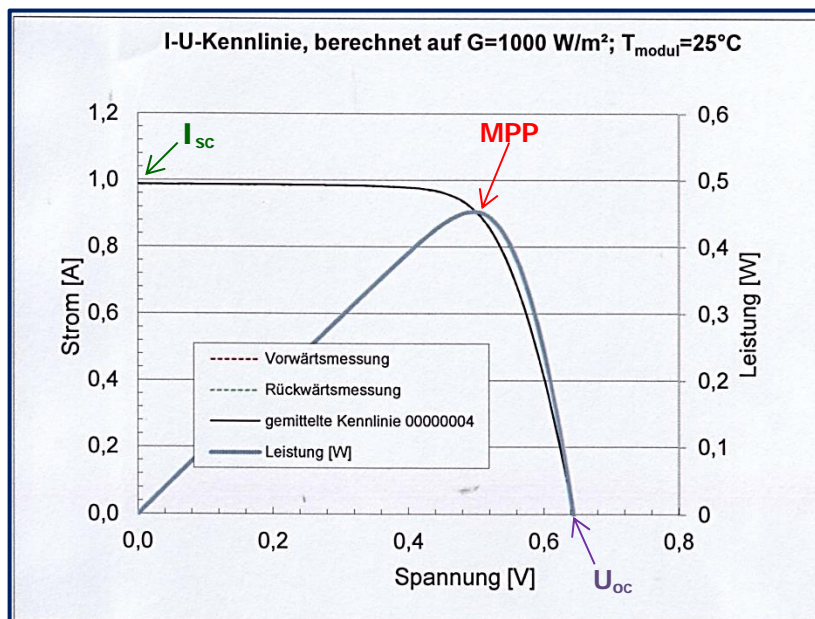
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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 0,64 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 0,99 A bei 1000 W/m^2 .

2. Die $I(U)$ und die $P(U)$ - Kennlinien der Solarzelle SUSEmod215 bei $S = 1000 W/m^2$ und $T = 25^\circ C$
 aufgenommen im Kennlinienlabor des ISFH



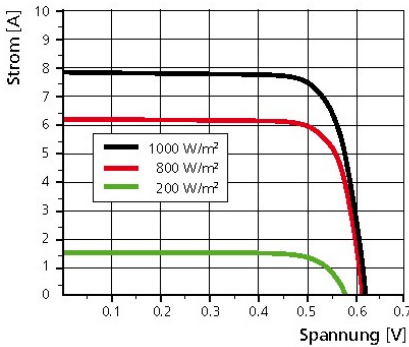
Die **I-U-Kennlinie** zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 und einer Temperatur von 25°C. Der Schnittpunkt mit der x- Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung U_{oc} , der Schnittpunkt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

3. Weitere Daten (für die ganze Solarzelle 156 x 156 mm), für die Solarzelle 52x 52mm im Modul SUSEmod215 muss die Stromstärke bei 3.1 und 3.3 durch 9 geteilt werden!

3.1 Intensitätsabhängigkeit

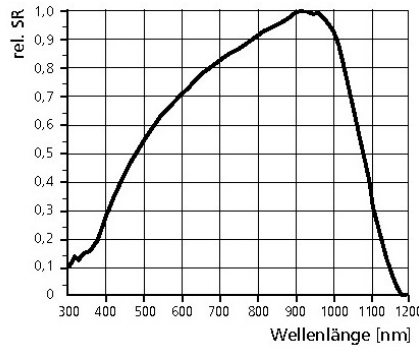
IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

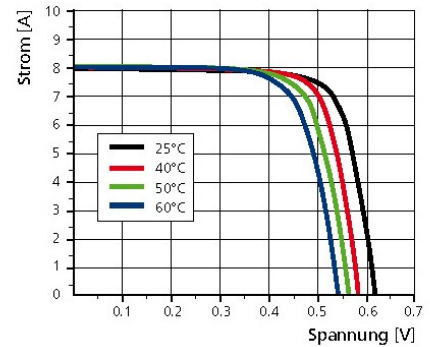
Spektrale Empfindlichkeit



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/m^2 entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosem Himmel, 0 W/m^2 ist absolute Dunkelheit).

Der **mittlere Graph 3.2** zeigt die **spektrale Empfindlichkeit** in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts, die maximale Empfindlichkeit liegt bei ca. 950 nm im nahen Infrarot. Die Ursache ist der Bandabstand von Silizium bei ca. 1,1 eV, der dazu führt, dass Lichtquanten im Bereich 950 nm die genau passende Quantenenergie haben und optimal für den inneren lichtelektrischen Effekt geeignet sind. Für Licht kürzerer Wellenlänge ist die Quantenenergie zu hoch, der nicht nutzbare überschüssige Teil der Quantenenergie wird über kinetische Energie der freigesetzten Elektronen als thermische Energie in das Kristallgitter abgegeben, was zu Verlusten führt.

Daraus ergibt sich, dass für Experimente mit Si – Solarzellen Glühlampen- oder Halogenlampenlicht besonders gut geeignet ist, da sie hohe Anteile IR- Licht haben. Weißes LED- Licht ist weniger geeignet, da es kaum rotes bzw. IR- Licht enthält.

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

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 in A
 S = Bestrahlungsstärke S in W/m^2