



**Photovoltaik-
System
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



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

BNE
Bildung für
Nachhaltige
Entwicklung

Experimente mit dem Solarmodul SUSE 4.33

Name(n):

Experimentiergerät:

SUSE 4.33

Experimente mit dem Solarmodul

SUSE 4.33

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

geeignet für die Klassenstufen 8-12

14 Seiten

Notwendige Zusatzgeräte:

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

Experimente SUSE 4.33



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

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

1 Gerätebeschreibung Kurzfassung

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

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

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

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

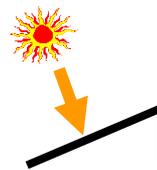
Durch den 75° -Winkel kann das Gerät im Winterhalbjahr und beim Betrieb mit Halogenlampen aufrecht gestellt werden (**Position 1**), im Sommerhalbjahr bei hochstehender Sonne wird das Gerät im Freien zur Sonne ausgerichtet flach auf den Boden oder auf einen Tisch gelegt .(**Position 2**).



Position 1

Winter

Sonne tiefstehend



Position 2

Sommer

Sonne hochstehend

2 Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler können in diesen Experimenten durch eigenes Experimentieren

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

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

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

4 Experimente zur Reihenschaltung von Solarzellen

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

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

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

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

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

Zeichnen Sie hier die Reihenschaltung von 3 Solarzellen:

...und nun geht's ans Experimentieren

Experiment 4.1:

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

Ziehen Sie für diese Messungen die 3 Verbindungsstecker heraus !!

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

Tragen Sie die Messwerte in die nachstehende Tabelle ein.

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

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

Experiment 4.2:

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

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

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

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

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

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

1+2:

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

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

1+2+3:

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

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

Reihenschaltung von Solarzellen

Verbindungsstecker gesteckt, messen Sie in den Buchsen der Verbindungsstecker

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

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

Welche Gesetzmäßigkeit fällt Ihnen auf? Formulieren Sie das Ergebnis hier

Experiment 4.4:

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

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

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

Das Experiment:

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

Messen Sie die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom:

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

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

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

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

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

Was fällt Ihnen auf, begründen Sie Ihr Ergebnis hier:

5 Experimente zur Parallelschaltung von Solarzellen

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

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

Experiment 5.1:

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

Parallelschaltung von Solarzellen

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

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

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

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

vereinfachte Berechnungsmethode

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

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

Experiment 6.1: Messung der aktuellen Leistung P

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

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

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

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

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

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

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

Berechnung der Leistung P:

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

Experiment 6.2: Bestimmung der maximalen Leistung des Moduls P_p :

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

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

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

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

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

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

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

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

B **S =W/cm²**

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

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

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

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

D **Gemessene elektrische Leistung P_E =.....W** in unserem Beispiel 0,48 W

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

$$\mathbf{E} \quad \mathbf{Wirkungsgrad \eta = \frac{\text{Elektrische Leistung } P_E (0,48W)}{\text{Lichtleistung } P_L (2,7 W)} * 100 = \%}$$

In unserem Beispiel wären es 0,48 W / 2,7 W = 0,177 * 100 = **17,7 %**. Das wäre der Wirkungsgrad der Solarzelle, es werden also 17,7 % des Sonnenlichts in elektrische Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad der 3 Solarzellen untereinander unterscheidet sich nur wenig.

Der Modulwirkungsgrad:

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

7 Experimente zur Reihenschaltung mehrerer Solarmodule SUSE 4.33

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

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

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

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

Experiment 7.1:

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

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

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

Reihenschaltung von Solarmodulen

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

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

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

Experimentelle Lernstationen zur Solarenergie

Photovoltaik, Solarstrahlung, Solarthermie, Optoelektronik

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

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

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

Experiment 8

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

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

Hinweise zum Experiment:

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

Versuchsdurchführung 1:

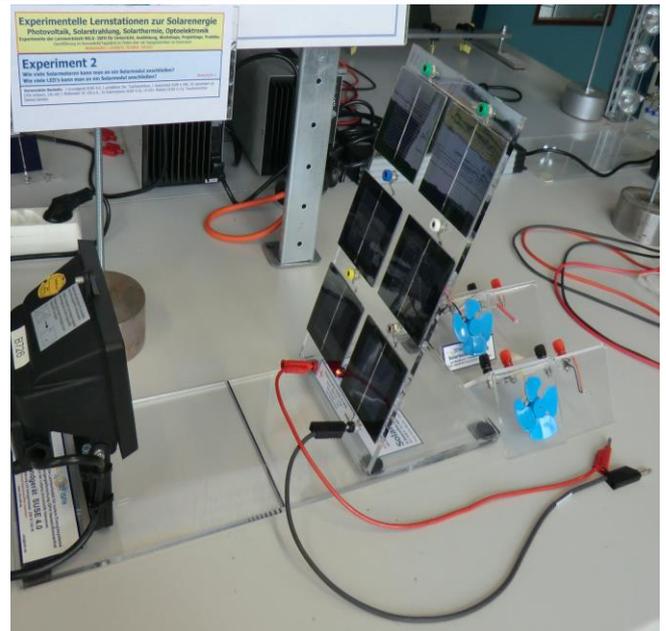
Schließe 1 Solarmotor an das Solarmodul an, wenn er sich schnelle dreht kannst Du einen 2. Solarmotor dazu anschließen, mache immer so weiter. Teste, wie viele Solarmotoren das Solarmodul antreiben kann. Die Art der elektrischen Schaltung kannst Du Dir selbst überlegen (Parallel- oder Reihenschaltung).

Versuchsdurchführung 2:

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

Versuchsdurchführung 3:

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



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

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

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

Profi- Fragen:

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

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

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

Die Solarzelle selbst ist bruchsticher in ein Modul eingebettet.



Das Solarmodul SUSEmod218

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

Modulmaße: 75 x 75 mm

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

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

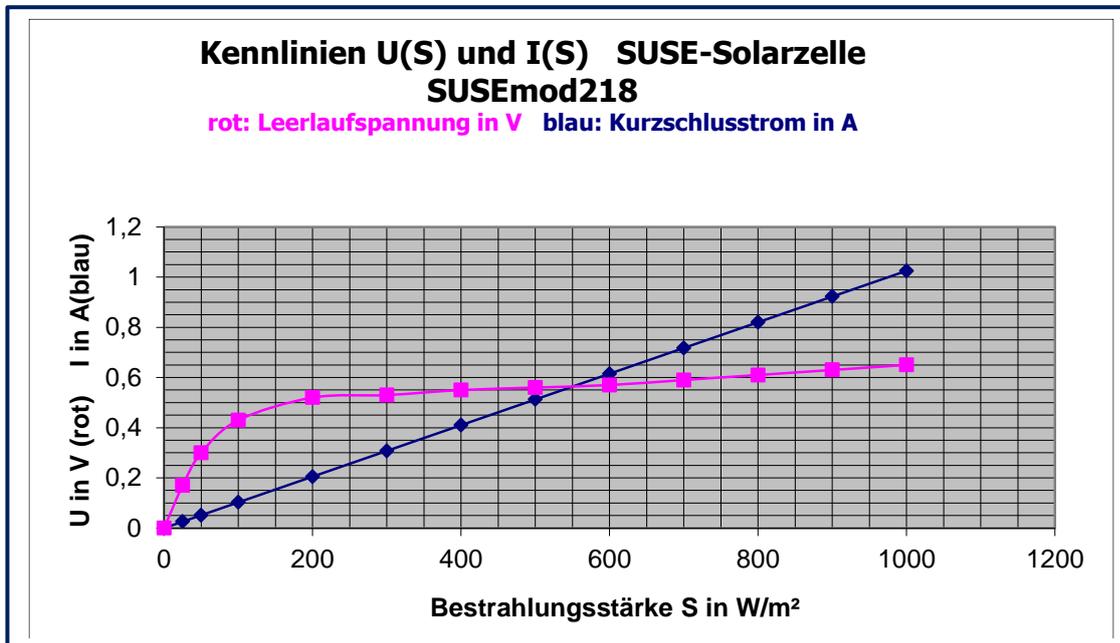
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/m², T = 25°C, AM = 1,5 Toleranz 2 %

Physikalische Größe	Symbol	Zahlenwert	Physikalische Einheit	Bemerkungen
Maße der Solarzelle	s	52 x 52 x 0,18	mm	Quadratische Zelle, 1/9 6-Zoll-Zelle
Fläche	A	27,04	cm ²	1/9 einer 6 Zoll Solarzelle
Leerlaufspannung	U _{oc}	0,656	V	Typisch für Silizium
Kurzschlussstrom	I _{sc}	1,025	A	Proportional zur Lichtintensität S
Spannung im MPP	U _{MPP}	0,507	V	Spannung im (MPP) <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

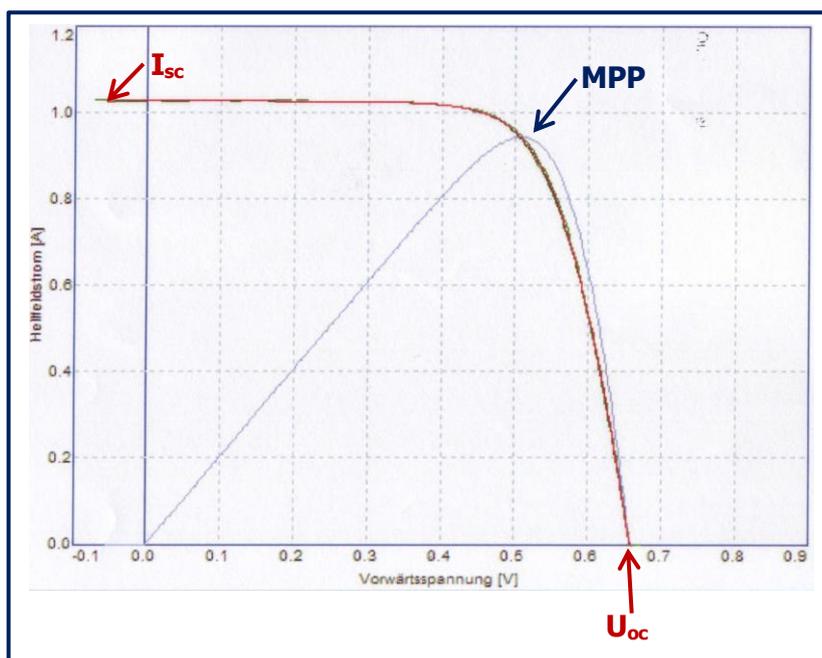
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



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



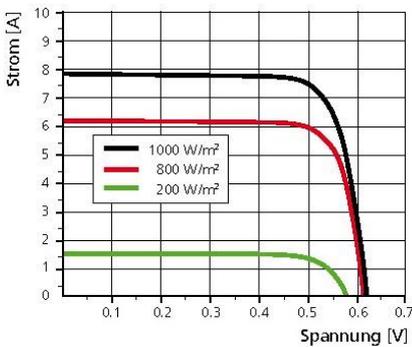
Die **I-U-Kennlinie** zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 und einer Temperatur von $25^\circ C$. Der Schnittpunkt mit der x-Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung U_{oc}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

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

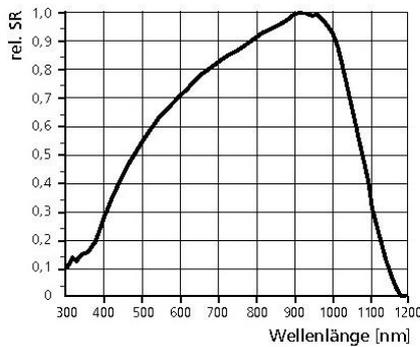
IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

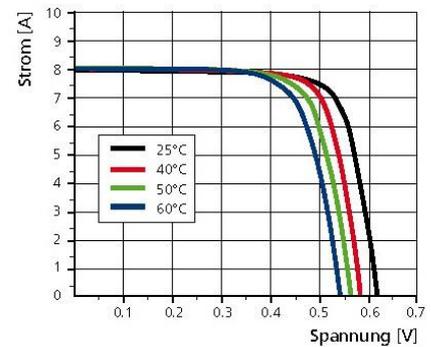
Spektrale Empfindlichkeit



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 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:
$$I_{sc} = c * S \quad c = \text{const.}$$

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