



**Photovoltaik-
System
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**



Experimente mit dem Solarmodul SUSE 4.3RB

Solarmodul mit 6 Solarzellen in Reihenschaltung mit 2 Messbuchsen an jeder Zelle

3,6 V/900 mA/2,5 W bei $S = 1000 \text{ W/m}^2$ $T = 25^\circ\text{C}$, AM 1,5 Funktionsanzeige durch Indikator- LED

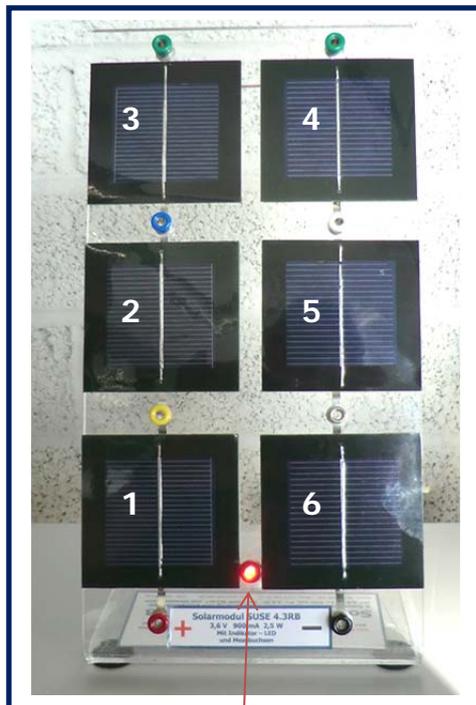
23 Seiten Experimente zur Auswahl mit SUSE 4.3 RB

Lernstation

C3

A	Basisinformationen und technische Daten	Seiten 1 -5
B	SUSE 4.3 RB als Stromquelle für Geräte	Seite 6
C	Experimente mit <u>einer</u> Solarzelle	Seiten 7 - 14
D	Experimente mit Solarzellen in Reihenschaltung	Seiten 15 - 19
E	Experimentelle Lernstation 1 mit SUSE 4.3RB	Seiten 20 - 21
F	Experimentelle Lernstation 2 mit SUSE 4.3RB	Seiten 22 - 23

A Basisinformationen und technische Daten



rot leuchtende Indikator LED

weiße Zahlen: Nr. der Solarzellen

Das Solarmodul **SUSE 4.3RB** ist ein hochwertiges 3,6 V -0,9 A- 2,5 W -Solarmodul auf einem stabilen Plexiglasträger (480x160x6 mm) mit 6 Solarzellen in Reihenschaltung mit Buchsenpaaren.

In der Reihenschaltung liefert das Modul (bei 1000 W/m^2) eine Leerlauf- Spannung von 3,6 V, eine Kurzschluss- Stromstärke von 0,9 A und eine max. Leistung von 2,5 W. Jede Solarzelle hat ein eigenes Buchsenpaar für elektrische Messungen, am rot- schwarzen Buchsenpaar steht die Gesamtspannung zur Verfügung. Zur weiteren Erhöhung der Spannung lassen sich auch mehrere Module in Reihe schalten. **Das Modul besitzt eine Indikator- LED, welche die Betriebsbereitschaft anzeigt.** Die Indikator- LED leuchtet bereits im Innenraum hell auf und signalisiert so die Energiebereitschaft. Die 6 Buchsenpaare vor und hinter jeder Solarzelle sind farblich gekennzeichnet und bilden die elektrischen Anschlüsse für jede einzelne Solarzelle.

Mit diesem Modul können elektrische Geräte (Radio, Solarfahrzeuge....) betrieben werden, die für 3- 4 V DC ausgelegt sind, es lassen sich mit der Experimentieranleitung zu **SUSE 4.3RB** viele Experimente zur Solarzelle und Photovoltaik- Systemtechnik durchführen.

Buchsen- Belegung:	plus	minus
Solarzelle 1	rot	gelb
Solarzelle 2	gelb	blau
Solarzelle 3	blau	grün
Solarzelle 4	grün	weiß
Solarzelle 5	weiß	silber
Solarzelle 6	silber	schwarz
Reihenschaltung von 6 Solarzellen	rot	schwarz

Technische Daten

Solarmodul: Plexiglasträger 480 x 160 x 6 mm, um 75° gebogen

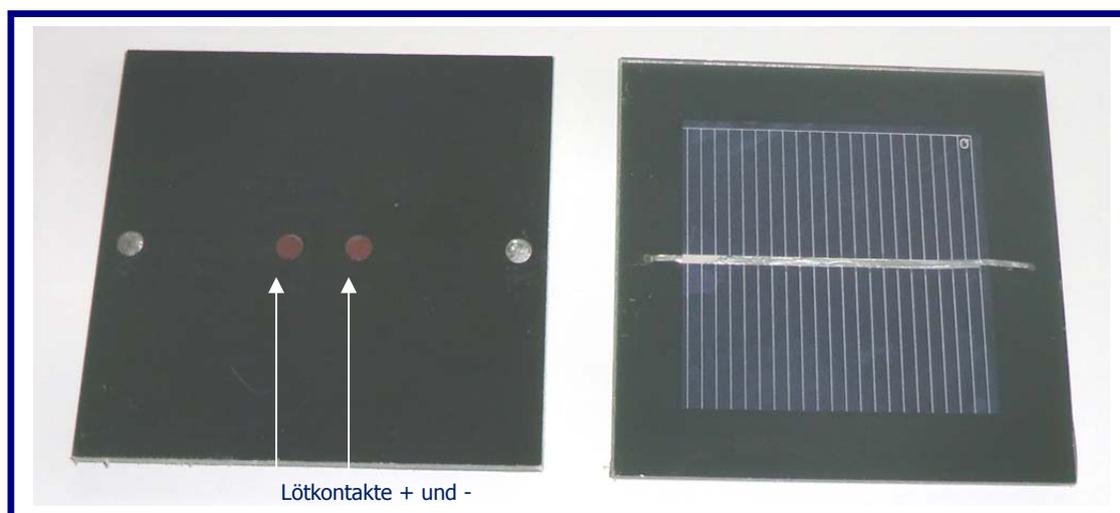
Solarzellen: 6 Solarzellen SUSEmod2 in Reihenschaltung mit je 2 Buchsen 4 mm für Bananenstecker/Laborkabel

Elektrische Daten der Reihenschaltung bei einer Bestrahlungsstärke S von 1000 W/m^2 , $T = 25^\circ\text{C}$, AM 1,5
 Leerlaufspannung $U_{oc} = 3,6 \text{ V}$, Kurzschlussstrom $I_{sc} = 900 \text{ mA}$, Leistung $P = 2,5 \text{ W}$

Indikator- LED: rot leuchtende LED, über Vorwiderstand an Plus/Minus-Pole der Reihenschaltung fest angeschlossen

Technische Daten der Solarzellen:

SUSEmod2- ein leistungsstarkes und robustes Solarmodul



Rückseite

Vorderseite mit Solarzelle 52 x 52 mm

Das NILS- ISFH- Solarmodul **SUSEmod2** enthält eine multikristalline Solarzelle 52x52 mm. Die Solarzelle ist bruchsicher eingebettet in ein Kunststoffplättchen der Größe 75 x 75 mm. Die Oberseite über der Solarzelle ist hochtransparent mit Kunststoff laminiert. Auf der Rückseite sind 2 Lötkontakte zum Anlöten der Plus- und Minusleiter (Schaltdraht).

Modul: Kunststoffträger quadratisch 75 x 75 mm mit hochtransparenter Oberfläche, mechanisch sehr robust

Solarzelle: Polykristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch

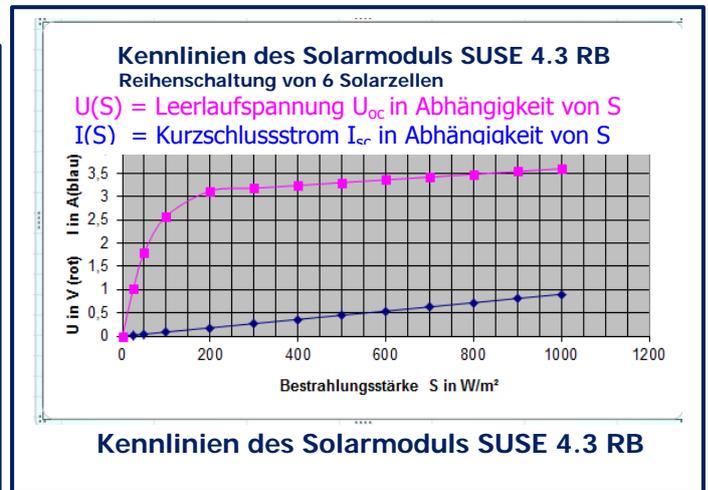
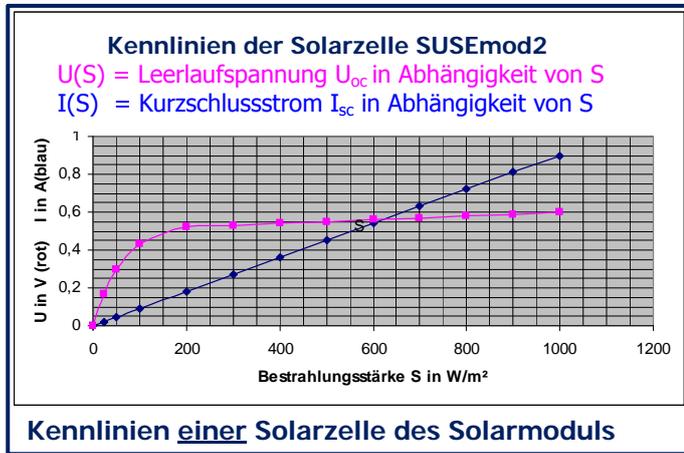
Im Modul befindet sich einlaminiert eine multikristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberfläche sauer texturiert

Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 , $T = 25^\circ\text{C}$, AM = 1,5 Toleranz 3 %

Physikalische Größe	Symbol	Zahlenwert	Physikalische Einheit	Bemerkungen
Maße		52 x 52 x 0,22	mm	Quadratische Zelle
Leerlaufspannung	U_{oc}	0,61	V	Typisch für Silizium
Kurzschlussstrom	I_{sc}	0,90	A	Proportional zur Lichtintensität
El. Leistung	P	0,42	W	Bei Sonnenspektrum, AM 1,5
Wirkungsgrad	η	16,0	%	
Füllfaktor	FF	77,5	%	
Stromdichte	j	33,3	mA/cm^2	j ist ein Qualitätsmerkmal
Temperaturverhalten Leerlaufspannung U_{oc}		- 0,36	% /K	Die Spannung mindert sich bei Erwärmung um 0,36% pro $1^\circ\text{C} = 1\text{K}$
Temperaturverhalten Kurzschlussstrom I_{sc}		+ 0,06	% /K	Der Kurzschlussstrom vergrößert sich um 0,06 % pro $1^\circ\text{C} = 1\text{K}$

Kennlinien der Solarzellen im Modul, Kennlinien des Moduls mit 6 Solarzellen

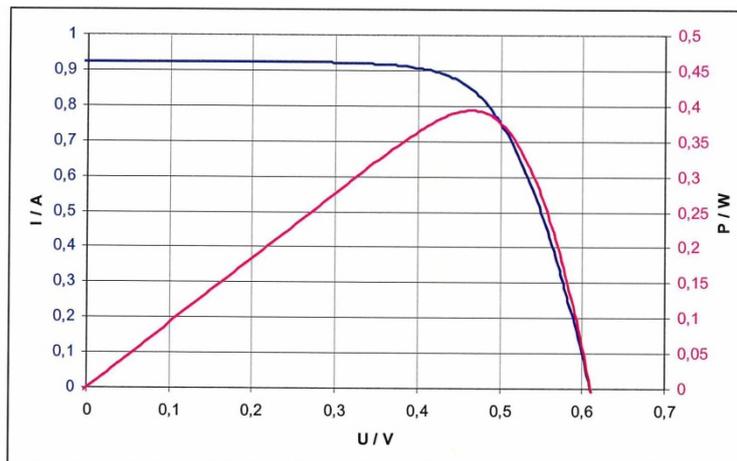
1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)



Die Leerlaufspannung (e- Funktion!) ist 0 bei totaler Dunkelheit, erhöht sich stark bei niedrigen Bestrahlungsstärken und wächst dann nur noch langsam bis zum Maximalwert 0,6 V bei 1000 W/m^2 (strahlender Sonnenschein im Sommer bei blauem Himmel, Solarzelle zur Sonne hin ausgerichtet).

Der Kurzschlussstrom ist eine Ursprungsgerade und wächst linear von 0 bei totaler Dunkelheit auf 0,9 A bei 1000 W/m^2 .

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



Die **blaue Kennlinie** zeigt die Abhängigkeit der Kurzschlussstromstärke von der Leerlaufspannung bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 und einer Temperatur von $25^\circ C$.

Der **rote Graph** zeigt die elektrische Leistung der Solarzelle (jeweils das Produkt $U \cdot I$ der blauen Kurve aufgetragen über U) mit dem Maximum- Power- Point MPP im Maximum dieser Kurve bei ca. 0,4 W.

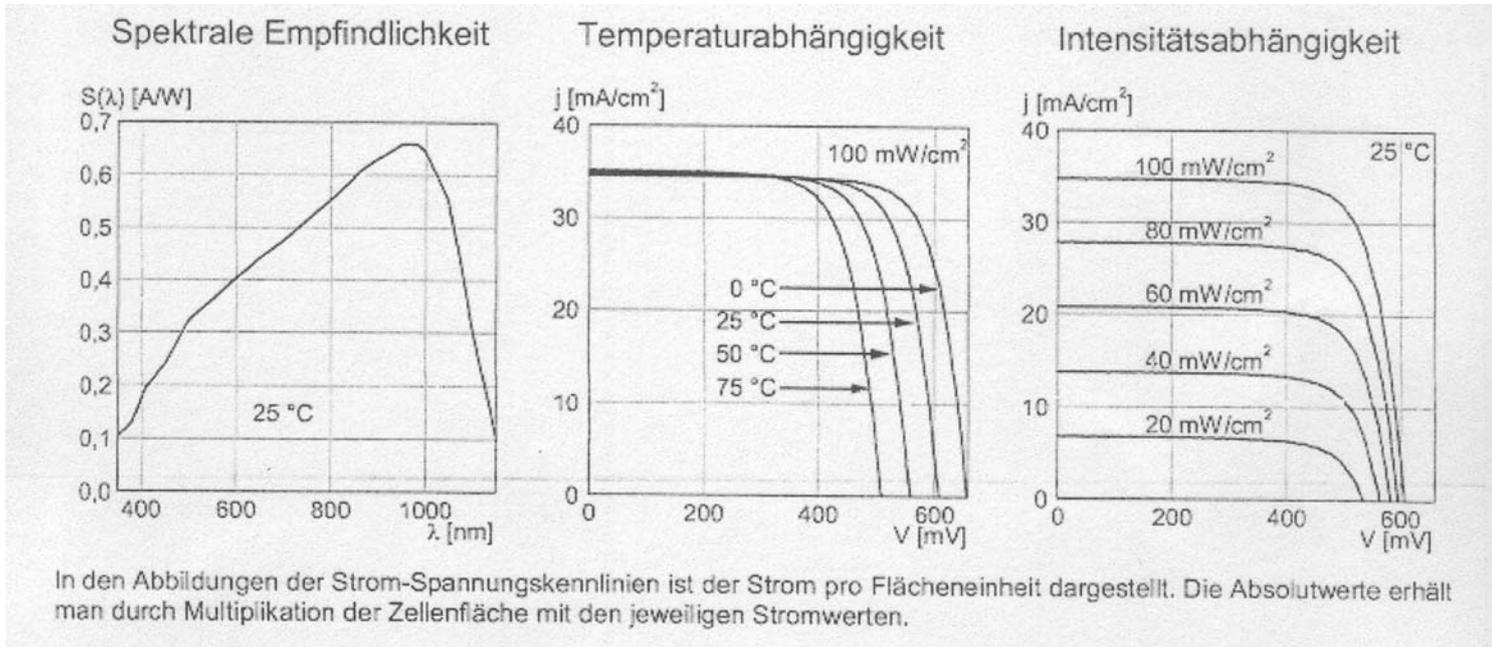
Mit dem Photovoltaik- Messmodul SUSE 5.15 können diese Kurven experimentell aufgenommen werden.

2. Weitere Daten der Solarzelle

2A

2B

2C



2A Der **linke Graph** zeigt die **spektrale Empfindlichkeit** in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts, die maximale Empfindlichkeit liegt bei ca. 950 nm im nahen Infrarot, Abhängig vom Bandabstand des Halbleitermaterials Silizium Si.

2B Der **mittlere Graph** zeigt die **$j(U)$ - 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).

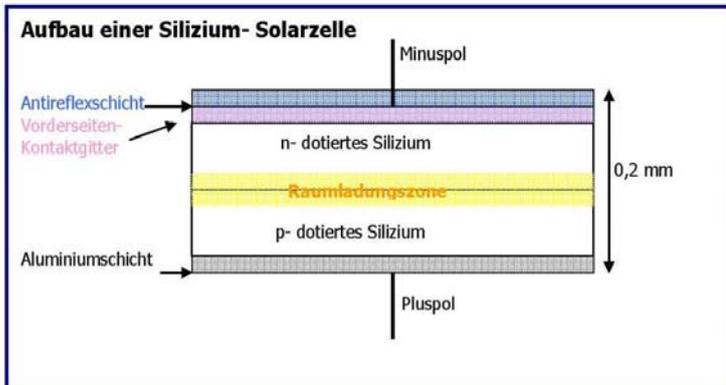
2C Der rechte Graph zeigt die **Intensitätsabhängigkeit** der **$j(U)$ - Kennlinien** in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke S des eingestrahlenen Lichts. (1000 W/m² entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosem Himmel, 0 W/m² ist absolute Dunkelheit).

Die **Temperaturabhängigkeiten (2B) $U(T)$ und $I(T)$** und die **Stromdichte (2C) $j(S)$** lassen sich in Experimenten dieser Anleitung nachweisen.

Durch den **75°- Winkel** lässt sich das Solarmodul SUSE 4.3RB für den Betrieb im Sommerhalbjahr bzw. im Winterhalbjahr unterschiedlich aufstellen:



Aufbau und Funktion einer Silizium- Solarzelle II ab Klassenstufe 8/9



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. 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.

Wie funktioniert eine Solarzelle? Niveaustufe II

1. Elektrische Spannung U_{oc}

Eine Si- Solarzelle liefert im Leerlauf (= Spannung ohne angeschlossenen Verbraucher) eine **typische Spannung von 0,6...0,62 V**. Der genaue Wert der **Leerlaufspannung U_{oc}** ist vom Material und Aufbau des Halbleiters, der Temperatur und der Bestrahlungsstärke S abhängig, jedoch **unabhängig von der Fläche**.

Die Leerlaufspannung ist ab einer gewissen Mindest- Lichtintensität nur noch wenig von der Lichtintensität abhängig, erkennbar an der $U(S)$ - Kennlinie. In der Forschung wird intensiv an Technologien für höhere Leerlauf- Spannungen gearbeitet, ein aktueller Wert von Forschungs- Solarzellen liegt bei 0,65 V.

2. Elektrische Stromstärke I_{sc}

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

- **Fläche der Solarzelle:** Je größer die Fläche, desto höher ist I (proportional)!
- **Intensität der auftreffenden Lichtstrahlung:** Je höher die Lichtintensität S , desto höher ist I (proportional)!
- **Qualität der Solarzelle** (sehr guter Solarzellen: $I_{sc} = 30 - 40 \text{ mA/cm}^2$)

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.

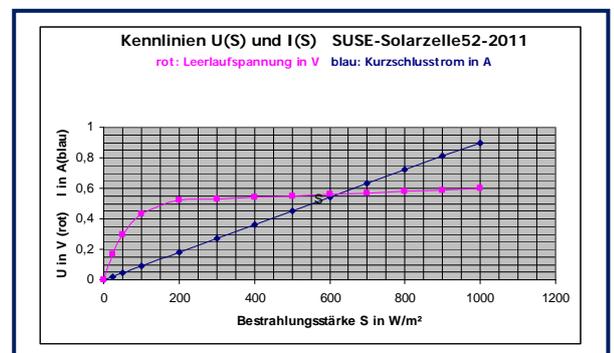
Wird der Solarzelle Strom entnommen, sinkt die Spannung U . Der genaue Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke wird in der $U - I$ - Kennlinie einer Solarzelle dargestellt, in der Datei Niveaustufe III erklärt. Die **maximale Leistung** wird nur in einem bestimmten Punkt, d.h. bei einer ganz bestimmten Spannung und Stromstärke erreicht, dieser Punkt heißt **MPP = Maximum Power Point**, wichtig in der Praxis! Der **Wirkungsgrad einer Solarzelle** liegt bei ca. **16 – 21 %**, d.h. nur 16– 21% des einfallenden Lichts wird in elektrische Energie umgewandelt, abhängig vom Solarzellentyp.



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

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



Weitere Info- Dateien zur Erklärung der Funktion einer Solarzelle für weitere Niveaustufen sind bei SUNdidactics erhältlich.

Die Experimente

Die Möglichkeiten für Experimente mit dem Solarmodul SUSE 4.3RB sind sehr vielfältig und umfangreich, es ist nicht möglich, alle Experimente in einer Sitzung durchzuführen. Die verantwortliche Lehrkraft kann aus den Angeboten angemessen auswählen. In mehreren Etappen lassen sich natürliche auch alle Experimente sorgfältig bearbeiten.

B SUSE 4.3RB als Stromquelle für Geräte

Mit dem Solarmodul SUSE 4.3B lassen sich SUSE- Experimentiergeräte betreiben, am rot-schwarzen Buchsenpaar liegen 3,6 V DC an (bei strahlendem Sonnenschein oder bei Beleuchtung auf dem Grundgerät SUSE 4.0 oder mit einem Halogenstrahler 120 W):

- LED- Module SUSE 4.15 (rot, grün, blau, weiß, rainbow)
- LED- Modul SUSE 4.20IRRB
- SUSE- Solarradio SUSE 4.36
- Ein oder mehrere Solarmotoren SUSE 4.16
- SUSE- Solarkran SUSE 4.37
- Solartankstelle für das SUSE Solarfahrzeug 1.2
- Solartankstelle für das SUSE Solarfahrzeug 4 (es werden nur 4 Solarzellen verwendet)
- Handylader SUSE 4.17 bei 3-4 Modulen SUSE 4.3 RB in Reihenschaltung

Die Geräte werden polrichtig an das rot- schwarze Buchsenpaar angeschlossen. Zum Betrieb ist eine ausreichende Lichtintensität erforderlich, tagsüber im Freien (strahlender Sonnenschein oder auch bedeckter Himmel) oder Bestrahlung mit einem Halogenstrahler 120 W oder Auflegen des Moduls auf die beleuchtete Platte eines Overheadprojektors.

C Experimente mit einer Solarzelle

Seiten 7 - 14

Verwenden Sie eine der 6 Solarzellen des Moduls!

Die Experimente

U_{oc} = Leerlaufspannung = die elektrische Spannung U der unbelasteten Solarzelle oc = open circuit

Experimente: Die Solarzelle als Energiewandler von Strahlungsenergie in elektrische Energie

1. Die Leerlaufspannung U_{oc} der Solarzelle

Der Wert sollte im Sonnenlicht zwischen 0,55 und 0,61 V liegen, bei bedecktem Himmel 0,5- 0,55 V, unabhängig von der Fläche! Bei gleicher Bestrahlungsstärke sollten alle Solarzellen, etwa die gleiche Spannung haben, der Standard-Test-Wert wäre 0,6 V). Kleine Differenzen sind Qualitätsunterschiede. **Die Leerlaufspannung hängt nur von der *Lichtintensität und vom Material der Solarzelle* ab. Bei unserer Solarzelle ist das Material Silizium.**

Verwende ein Multimeter im Messbereich **20 V DC** und schließe das Voltmeter mit 2 Laborkabeln an den beiden Pole (rot- schwarz) der beleuchteten Solarzelle an.

Die Messungen:

Ort der Messung	Draußen bei Sonnenschein zur Sonne gerichtet oder Overheadprojektor	Draußen bei Sonnenschein im Schatten	Draußen bei bedecktem Himmel	Im beleuchteten Innenraum auf dem Tisch
Leerlaufspannung U in V				
Leerlaufspannung U in V a) Solarzelle zu 50% abgedeckt durch schwarze Pappe oder Alufolie b) Solarzelle vollständig durch Klarsichthülle abgedeckt		Keine Messungen		

Was fällt Ihnen bei den Messungen zur Leerlaufspannung auf, formulieren Sie hier:

2. Der Kurzschlussstrom I_{sc} der Solarzelle $sc = \text{short cut}$

Im Gegensatz zu anderen Stromquellen (Batterie, Netzgerät...) darf man Solarzellen kurzschließen, der Kurzschlussstrom ist sogar eine sehr wichtige Größe bei Solarzellen

Verwende zur Strommessung ein Multimeter im Messbereich 10A DC, welches an + und – der Solarzelle angeschlossen wird
Nur für Messungen im Innenraum den Messbereich 200 mA oder 20 mA verwenden!

Der Wert des Kurzschlussstroms ist ***direkt proportional zur Zellenfläche und zur Lichtintensität*** /Bestrahlungsstärke, Standard-Test-Wert: Bei dieser Solarzelle mit einer Zellenfläche von 28,6 cm² sollte der Strom bei einer Lichtintensität von 1000 W/m² 0,9 A sein.

Die Messungen:

Ort der Messung	Draußen bei Sonnenschein zur Sonne gerichtet oder auf dem Overheadprojektor	Draußen bei Sonnenschein im Schatten	Draußen bei bedecktem Himmel	Im beleuchteten Innenraum
Kurzschlussstrom I_{sc} in A				
I_{sc} in mA (umrechnen)				
Kurzschlussstrom I_{sc} in A a) Solarzelle zu 50% abgedeckt durch schwarze Pappe oder Alufolie b) Solarzelle vollständig durch Klarsichthülle abgedeckt		Keine Messungen		

Was fällt Ihnen bei den Stromstärkemessungen zum Kurzschlussstrom auf, notieren Sie **hier** Ihre Beobachtungen/ Erklärungen:

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

Hier sind keine erneuten Messungen 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 ca. 0,54 W sein, wenn die Zelle eine Fläche von 28,5 cm² hat) (Der Faktor 0,8 erklärt sich über die Kennlinie und den MPP der Solarzelle)

Die Messungen:

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				

4. Die Qualität der Solarzelle

Das ist die Stromdichte j in mA/cm²

Hier sind keine erneuten Messungen notwendig, Berechnung mit den beiden bereits bestimmten Messwerten U_{oc} und I_{sc}

Die Stromdichte j gibt an, wie viel Kurzschluss- Strom ein 1 cm² großes Stück der Solarzelle produziert, je mehr, desto besser! **Dazu muss die Einstrahlung 1000 W/m² betragen** (internationaler Standard- Wert), denn bei geringerer Einstrahlung <1000 W/m² ist die Stromdichte j natürlich auch geringer! Wir nehmen also den Wert vom strahlenden Sonnenschein oder auf dem Overhead- Projektor.

So berechnen wir die Stromdichte j:

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

Unsere Solarzelle ist ein Quadrat mit der Seitenlänge 5,2 cm, ihre Fläche A ist.....cm²

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

Die Qualität der Solarzelle ist.....

Sehr gut – gut – mittel- schlecht

Sehr Gut: > 34 mA/cm² Gut: 28-33 mA/cm² Mittel: 24....28 mA/cm²
 Schlecht: < 24 mA/cm²
 Bei einer Bestrahlungsstärke von 1000W/m² !! Maximal möglicher theoretischer Wert: 44 mA/cm²

5. Wirkungsgradbestimmung einer Solarzelle

Beispiel: Overheadprojektor oder Sonnenlicht mit der Bestrahlungsstärke 1000 W/m²

1. Umrechnung der Lichtleistung 1000 W/m² bzw. 0,1W/cm² auf die wirkliche Fläche der Solarzelle:

Die Zelle hat eine Fläche von 27,04 cm² hat, sie erhält bei 1000 W/m² eine Lichtleistung von 27,04 cm²*0,1 W = P_L = 2,704 W

2. Die elektrische Leistung von Aufgabe 3 war bei der gemessenen Zelle P_E = 0,432 W

3. Wirkungsgrad = elektrische Leistung: Lichtleistung * 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: 15- 21 %

Polykristalline Zellen: 12 – 20 %

Experimentelle Aufgabe:

Bestimmen Sie den Wirkungsgrad der Solarzelle des Moduls bei einer Bestrahlung mit einem Halogenstrahler 120 – 150 W, Abstand ca. 30 cm. Die Lichtintensität (Bestrahlungsstärke) des Lichts ist < 1000 W/m² und wird mit der Gleichung aus Experiment 6 bestimmt.

Methode:

1. Messung der Leerlaufspannung U_{oc} und des Kurzschlussstroms I_{sc} :

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

2. Mit der Gleichung P = U_{oc} * I_{sc} * 0,8 wird die elektrische Leistung P der Solarzelle bestimmt:

$$P_E = \frac{U_{oc}}{\dots\dots\dots} * \frac{I_{sc}}{\dots\dots\dots} * 0,8 = \dots\dots\dots W \quad (I)$$

3. Mit der Gleichung aus Exp. 7 wird die Bestrahlungsstärke des Lichts in W/m² bestimmt:

$$S_x = \frac{I_{mess} \text{ (in A)} * 1000}{0,9 A}$$

I_{mess} ist hier der bei 1.) gemessene Kurzschlussstrom
S_x ist die Bestrahlungsstärke des Lichts in W/m²

$$S_x = \dots\dots\dots W/m^2$$

S_x ist die Lichtleistung pro 1 m², da die Fläche der Solarzelle aber nur 27,04 cm² ist, müssen wir diesen Anteil für unsere Solarzelle berechnen, indem wir den Wert durch 10 000 teilen (weil 1 m² 10 000 cm² hat) und dann mal 27,04 multiplizieren, das ist dann die wirkliche Lichtleistung P_L auf die Solarzelle:

$$P_L = S_x * \frac{27,04}{10\,000} \text{ W (II)}$$

Den Wirkungsgrad erhalten wir, indem wir die elektrische Leistung P_E durch die Lichtleistung teilen und den Wert mal 100 nehmen, um einen Prozentwert zu erhalten:

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

Bei korrekten Messungen/Berechnungen, müsste der Wirkungsgrad um 16% liegen.

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

Die Helligkeit (Intensität) des Lichts heißt Bestrahlungsstärke S und wird in W/m^2 (Watt pro m^2) gemessen.

Mit der hier verwendeten kalibrierten Solarzelle kann die **Lichtintensität in W/m^2** vor einem Halogenstrahler oder auf einem Overheadprojektor oder im Freien genau bestimmt werden.

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

$$I_{sc} = \dots\dots\dots 0,9 \dots\dots\dots A = \dots\dots 900 \dots\dots\dots mA$$

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

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

$$\frac{I_{sc} \text{ in A}}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{I_{mess} \text{ in A}}{S_x \text{ in W/m}^2} \quad \text{oder nach } S_x \text{ umgestellt: } S_x = \frac{I_{mess} \text{ (in A)} * 1000}{0,9 \text{ A}}$$

1000 W/m^2
Dabei ist:

S_x in W/m^2
 I_{sc} in A

der kalibrierte Kurzschlussstrom bei 1000 $W/m^2 = 0,9 \text{ A}$

I_{mess} in A

der gemessene Kurzschlussstrom bei der Bestrahlungsstärke S_x

S_x in W/m^2

die Bestrahlungsstärke von Lichtstrahlung

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 120 W		
Im Innenraum Zum Fenster hin ausgerichtet		

Was fällt Ihnen auf, erläutern Sie hier:

7. Messungen zur Temperaturabhängigkeit von U, I, P

Spannung, Stromstärke und Leistung von Solarzellen sind temperaturabhängig, die Spannung sinkt deutlich bei Erwärmung der Solarzelle, die Stromstärke steigt wenig, die Leistung als Produkt beider Werte sinkt daher. Im Sommer, bei intensiver Sonneneinstrahlung liefern Photovoltaikanlagen auf Dächern oder anderen Fundamenten zwar die höchste Leistung, diese sinkt jedoch deutlich, wenn sich die Solarzellen erwärmen. Im Sommer sind Zellentemperaturen von 60° – 80° möglich. Ideale Bedingungen sind im Weltraum, dort herrscht intensive Einstrahlung mit sehr tiefen Temperaturen (< -50°C).

Die Kennlinien 2B auf Seite 4 zeigen diesen Effekt. Mit eigenen Messungen wollen wir diesen Effekt nachweisen.

7.1 Messungen ohne Temperaturmessung an der Solarzelle

Voraussetzung: Strahlender Sonnenschein ohne Wolken oder Bestrahlung mit Halogenstrahler 120W z.B. auf Grundgerät SUSE 4.0.

Zubehör: 1 Multimeter zur Spannungs- und Stromstärkemessung, 2 Laborkabel, Taschenrechner oder Smartphone- Rechner.

Wir legen das Solarmodule SUSE 4.3RB in den Kühlschrank oder an eine dunkle, kühle Stelle im Raum und lassen es abkühlen. Nach der Abkühlung gehen wir in das Sonnenlicht, richten das Modul zu Sonne aus und messen **an einer Solarzelle** in zeitlichen Abständen 5 Minuten lang U_{oc} und I_{sc} und tragen die Werte in die Tabelle ein. In den Messpausen berechnen wir P und tragen die Leistung in die Spalte ein. Wir starten sofort mit den Messungen nach Aufstellung des Moduls.

Zeit in s	Leerlaufspannung U_{oc} in V	Kurzschlussstrom I_{sc} in A	Leistung P $= U_{oc} * I_{sc} * 0,8$
0			
30			
60			
90			
120			
180			
240			
300			

Was fällt Ihnen auf, erläutern Sie hier, vergleichen Sie mit Grafik 2B:

7.2 Messungen mit Temperaturmessung an der Solarzelle

Voraussetzung: Strahlender Sonnenschein ohne Wolken oder Bestrahlung mit Halogenstrahler 120W z.B. auf Grundgerät SUSE 4.0.

Zubehör: 1 Multimeter zur Spannungs-, Stromstärke-, und Temperaturmessung, 2 Laborkabel, Taschenrechner oder Smartphone- Rechner.

Wir befestigen das Kabel mit dem Temperatursensor des Multimeters mit Tesafilm am schwarzen Rand einer Solarzelle und achten darauf, dass die eigentliche Solarzelle im Modul frei bleibt. Anschließend legen wir das Solarmodule SUSE 4.3RB in den Kühlschrank oder an eine dunkle, kühle Stelle im Raum und lassen es abkühlen. Nach der Abkühlung gehen wir in das Sonnenlicht, richten das Modul zu Sonne aus und messen an einer Solarzelle in zeitlichen Abständen 5 Minuten lang T , U_{oc} und I_{sc} und tragen die Werte in die Tabelle ein. In den Messpausen berechnen wir P und tragen die Leistung in die Spalte ein. Wir starten sofort mit den Messungen nach Aufstellung des Moduls.

Zeit in s	Temperatur T in °C	Leerlaufspannung U_{oc} in V	Kurzschlussstrom I_{sc} in A	Leistung P $= U_{oc} * I_{sc} * 0,8$
0				
30				
60				
90				
120				
180				
240				
300				

Was fällt Ihnen auf, erläutern Sie hier, vergleichen Sie mit Grafik 2B:

D Experimente mit Solarzellen in Reihenschaltung Seiten 15 -19

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie

Zur Erhöhung der Spannung werden in den von der Industrie hergestellten Solarmodulen eine große Zahl (meist 36 oder 72 Zellen) von Solarzellen in Reihe geschaltet. Dabei addieren sich die Einzelspannungen der Zellen zur Modulspannung.

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

(Ausnahme: Die Zellen werden mit unterschiedlicher Lichtintensität bestrahlt oder abgeschattet, dann bestimmt die schwächste Zelle die Stromstärke bei der Reihenschaltung). Das kann in der Praxis zum Problem werden, wenn eine Photovoltaikanlage auf einem Dach mit mehreren hundert oder sogar über 1000 Solarzellen in Reihenschaltung auch nur eine Solarzelle abgeschattet wird, z.B. durch einen Schatten des Gebäudes, des Schornsteins, eines Baums oder wenn die Solarzelle durch ein umher fliegendes Blatt bedeckt wurde. Die verschattete Einzelzelle hat nun eine geringere Stromstärke, die den Gesamtstrom aller Solarzellen mindert und bestimmt. Dadurch sinkt die Leistung der gesamten Anlage erheblich.

Experiment D1:

Im Solarmodul SUSE 4.3 RB sind die Solarzellen intern bereits in Reihe geschaltet. Jede Solarzelle hat eigene Anschlüsse für Plus und Minus, der Anschluss der Reihenschaltung ist das rot-schwarze Buchsenpaar.

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 6 einzelnen Solarzellen des Moduls **SUSE 4.3RB** bei 4 verschiedenen Lichtquellen: Auf dem Grundgerät **SUSE 4.0**, 2: Falls kein Grundgerät SUSE 4.0 zur Verfügung steht vor einem 120 W-Halogenstrahler (Baustrahler), 3: Auf der Platte eines Overheadprojektors, 4: Draußen im natürlichen Sonnenlicht oder im Licht des bedeckten Himmels).

Messen Sie mit dem Multimeter (Spannung im Bereich 20 V DC, Stromstärke im Bereich 10A DC) von jeder Zelle einzeln die **Leerlaufspannung U_{oc}** und den **Kurzschlussstrom I_{sc}** Tragen Sie die Messwerte in die nachstehende Tabelle ein.

Solarzelle Nr.	1	2	3	4	5	6
Leerlaufspannung U_{oc} in V	Tragen Sie in die nachstehenden Tabellenfelder die Leerlaufspannung U_{oc} ein					
Auf Grundgerät SUSE 4.0						
40 cm vor 120 W-Strahler						
Auf Platte eines Overhead-Projektors						
Im Freien bei strahlendem Sonnenschein (Modul zur Sonne hin ausgerichtet)						
Im Freien bei bedecktem/bewölkten Himmel						

Kurzschlussstrom I_{sc} in A	Tragen Sie in die nachstehenden Tabellenfelder die Kurzschlussstromstärke I_{sc} ein					
Auf Grundgerät SUSE 4.0						
40 cm vor 120 W-Strahler (Baustrahler)						
Auf Platte eines Overhead-Projektors						
Im Freien bei strahlendem Sonnenschein (Modul zur Sonne hin ausgerichtet)						
Im Freien bei bedecktem/bewölkten Himmel						

Experiment D2: Reihenschaltung von Solarzellen

Verwenden Sie als Lichtquelle das natürliche Sonnenlicht, das Grundgerät SUSE 4.0 oder den Baustrahler 120 W in 40 cm Abstand.

Messen Sie nun die Leerlaufspannung/den Kurzschlussstrom der Solarzelle 1, indem Sie das Messgerät an den Pluspol der Zelle 1 und an die Buchse im Verbindungsstecker 1 anschließen: Spannungsmessung im Messbereich 20 V DC, Stromstärkemessung im Messbereich 10 A DC.

Solarzelle 1:

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

Solarzellen 1 + 2 in Reihenschaltung

Messen Sie nun die Leerlaufspannung/den Kurzschlussstrom der Solarzellen1+2, indem Sie das Messgerät an den Pluspol der Zelle 1 und an die Buchse im Verbindungsstecker 2 anschließen:

Solarzellen 1+2:

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

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

Solarzellen 1 + 2 + 3 in Reihenschaltung

Messen Sie nun die Leerlaufspannung/den Kurzschlussstrom der Solarzellen1+2+3, indem Sie das Messgerät an den Pluspol der Zelle 1 und an die Buchse im Verbindungsstecker 3 anschließen:

Solarzellen 1+2+3:

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

.....führen Sie den Versuch bis 1+2+3+4+5+6 fort und tragen Sie die Ergebnisse in die Tabelle ein:

Bestimmen Sie nun aus dem Kurzschlussstrom die Bestrahlungsstärke S des einfallenden Sonnenlichts wie in Experiment 6 erläutert!

Reihenschaltung von Solarzellen

	Leerlaufspannung U_{oc} in V	Kurzschlussstrom I_{sc} in A	Bestrahlungsstärke S in W/m^2
Zelle 1			
Zellen 1 + 2			
Zellen 1+2+3			
Zellen 1+2+3+4			
Zellen 1+2+3+4+5			
Zellen 1+2+3+4+5+6			

Welche Gesetzmäßigkeiten entdecken Sie? Formulieren Sie das Ergebnis hier:

Experiment D3:

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 der 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 lahm legen. Daher haben alle kommerziellen Solarmodule sogenannte bypass- Dioden, die den Strom um die ausgefallenen Zellen herumleiten.**

Das Experiment:

Stellen Sie das Modul auf das Grundgerät SUSE 4.0 oder 40 cm vor den Baustrahler 120 W. Messen Sie nun die Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom der Reihenschaltung der 6 Solarzellen (Messgerät an die rote Buchse und die schwarze Buchse anstecken):

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

Decken Sie nun eine Zelle der 6 Solarzellen mit schwarzer Pappe o.ä. lichtdicht ab und messen Sie wiederum Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom:

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

Was fällt Ihnen auf, erläutern Sie Ihr Ergebnis hier:

Experiment D4:

Experimente zur Reihenschaltung mehrerer Solarmodule SUSE 4.3RB

Zubehör: 4 Solarmodule SUSE 4.3 RB, Multimeter, 2 Laborkabel

Vor der Praxis zuerst etwas Theorie:

Schaltet man zur Spannungserhöhung in Reihenschaltung mehrere Solarmodule hintereinander, erhält man einen Solargenerator.

Da jedes Solarmodul SUSE 4.3RB ca. 3,6 V Spannung liefert, können wir durch Reihenschaltung schrittweise die Spannung in 3,6 V-Stufen erhöhen, also 3,6 V -7,2 V -10,8 V -14,4 V.....

Mit 4 Modulen erhält man mit der Spannung von ca. 14,4 V eine Spannung, die für 12 V-Geräte optimal geeignet ist (Autoradio, Stereoanlage, kl. Fernsehgerät, DVD- Player.....etc), schalten Sie das Gerät an die Reihenschaltung von 4 Modulen (Minuspol von Modul 1 und Pluspol von Modul 4), es wird gut funktionieren!

Experiment D4.1:

Nehmen Sie 4 Module SUSE 4.3RB und stellen Sie diese nebeneinander ins Sonnenlicht oder vor das Licht eines 500-W-Strahlers. Achten Sie beim Experimentieren mit Halogenstrahlern darauf, dass die Module gleichmäßig ausgeleuchtet werden.

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

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

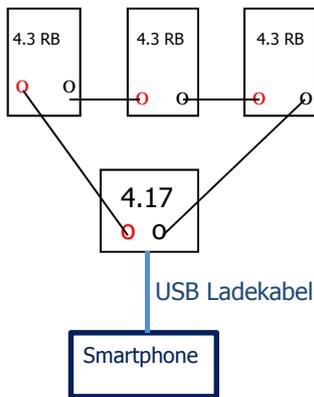
Reihenschaltung von Solarmodulen ($S = \dots\dots\dots W/m^2$)

Reihenschaltung der Module	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:

Experiment D4.2: Laden eines Smartphones mit 3x SUSE 4.3 RB und SUSE 4.17

Schließen Sie 3 oder 4 Solarmodule SUSE 4.3 RB in einer Reihenschaltung zusammen und verbinden Sie den Pluspol des ersten Moduls und den Minuspol des 3. Moduls mit dem Handylader **SUSE 4.17**.



Lichtquelle: Natürliches Tageslicht draußen oder im Innenraum die Platte eines Overheadprojektors oder vor einem 120 W Halogenstrahler. An der USB- Buchse des Lademoduls SUSE 4.17 können Sie Ihr Handy- oder Smartphone aufladen oder einen 5V- Akku (Powerbank).

Im Modul SUSE 4.17 befindet sich ein DC- DC- Wandler, der die höhere Spannung der Reihenschaltung mehrerer Solarmodule auf genau 5V DC an einer USB- Buchse umwandelt. Smartphones und Tablets werden mit 5 V DC aufgeladen.

Experimentelle Lernstationen zur Solarenergie

Photovoltaik, Solarstrahlung, Solarthermie, Optoelektronik

Experimente für Unterricht, Ausbildung, Workshops, Projekttag, Praktika
Durchführung im Sonnenlicht/Tageslicht im Freien oder mit Halogenstrahlern im Innenraum
Niveaustufen: 1 (einfach) 2(mittel) 3(hoch)

Experiment LS2

Wie viele Solarmotoren kann man an ein Solarmodul anschließen?
Wie viele LED's kann man an ein Solarmodul anschließen?

Niveaustufe 1

Verwendete Bauteile: 1 Grundgerät SUSE 4.0, 1 schaltbare 3er- Tischsteckdose, 1 Solarmodul SUSE 4.3RB, 20 Laborkabel 1m (10x schwarz, 10x rot) 1 Multimeter VC 150 o.ä., 10 Solarmotoren SUSE 4.16, 10 LED- Module (SUSE 4.15), Taschenrechner Deines Handys

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 jeweils das Solarmodul SUSE 4.3 RB, hier entsteht aus der Lichtstrahlung elektrische Energie, 6 Solarzellen sind hier in Reihe geschaltet, verwende die Anschlüsse rot (+ der 1. Solarzelle) und schwarz (- der 6. Solarzelle).

Versuchsdurchführung 1:

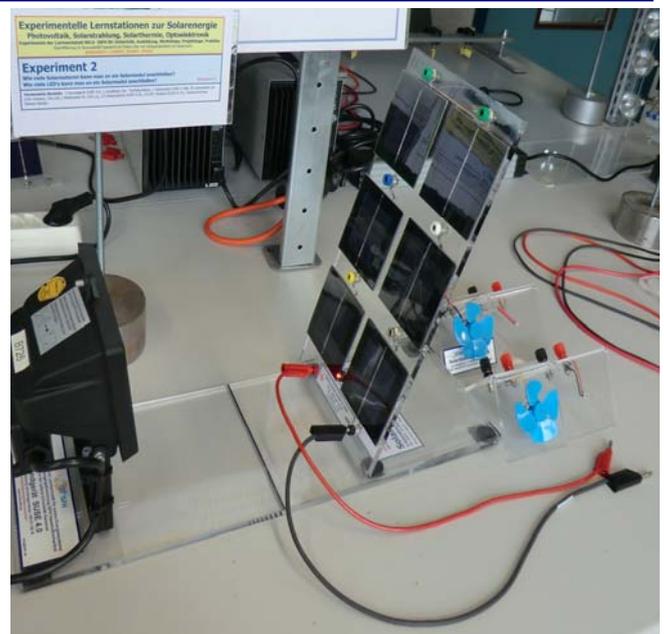
Schließe 1 Solarmotor an das Solarmodul an, wenn er sich schnelle dreht kannst Du einen 2. Solarmotor dazu anschließen, mache immer so weiter. Teste, wie viele Solarmotoren das Solarmodul antreiben kann. Die Art der elektrischen Schaltung kannst Du Dir selbst überlegen (versuche sowohl Parallel- wie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

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

Welche Unterschiede zwischen Parallel- und Reihenschaltung fallen Dir auf, erkläre:

Profi- Frage: Wie könnte man durch elektrische Messungen und Berechnungen die maximale Anzahl der Motoren oder der LED's berechnen? Du kannst Deine Idee mit einem Multimeter bestätigen! **Erkläre hier:**

Experimentelle Lernstationen zur Solarenergie

Photovoltaik, Solarstrahlung, Solarthermie, Optoelektronik

Experimente für Unterricht, Ausbildung, Workshops, Projekttag, Praktika
Durchführung im Sonnenlicht/Tageslicht im Freien oder mit Halogenstrahlern im Innenraum
Niveaustufen: 1 (einfach) 2(mittel) 3(hoch)

Experiment LS 3: Wir holen Lichtenergie von draußen in den Innenraum

Niveaustufe 1-2

Verwendete Bauteile: 1 Solarmodul SUSE 4.3 RB, 1 Speichermodul SUSE 4.12, 1 LED- Modul SUSE 4.15, 4 Laborkabel 1m (2x rot, 2x schwarz), bei Schlechtwetter: Grundgerät SUSE 4.0 (Halogenstrahler 150 W) und schaltbare 3er Steckdose

Hinweise zum Experiment:

Das natürliche Tageslicht oder der Halogenstrahler des Grundgeräts SUSE 4.0 bestrahlt das Solarmodul SUSE 4.3 RB. Hier entsteht aus der Lichtstrahlung elektrische Energie. 6 Solarzellen sind hier in Reihe geschaltet, verwende die Anschlüsse rot (+ der 1. Solarzelle) und schwarz (- der 6. Solarzelle). Der Solarspeicher SUSE 4.12 kann am Solarmodul aufgeladen werden und kann elektrische Energie speichern. Du kannst nach der Aufladung das Speichermodul abklemmen und in den abgedunkelten Innenraum tragen und dort eine LED anschließen, diese leuchtet!

Versuchsdurchführung:

Gehe hinaus ins Freie und richte das Solarmodul zur Sonne aus, bei bedecktem Himmel zur hellsten Stelle des Himmels. Bei Schlechtwetter kannst Du auch den Halogenstrahler des Grundgerätes SUSE 4.0 im Innenraum verwenden).



Aufbau des Experiments 3: Auf der Grundplatte SUSE 4.0 befindet sich das Solarmodul SUSE 4.3RB, davor stehen das Speichermodul SUSE 4.12 und das LED- Modul SUSE 4.15

Schließe das **Solar- Speichermodul SUSE 4.12** mit 2 Kabeln (rot/schwarz) **polrichtig** (plus an plus und minus an minus) an das Solarmodul an und lass es ca. 3 Minuten aufladen. Ziehe nach der Aufladung die Kabel aus dem Speichermodul heraus und gehe mit dem Speichermodul in den Innenraum. Schließe dort polrichtig ein LED- Modul SUSE 4.15 an den Speicher an.

Was beobachtest Du, notiere hier, Du kannst die Leuchtdauer mit einer Stoppuhr (im Handy!) messen:

Erkläre hier die Funktion dieses Experiments und die unterschiedlichen Energie-Umwandlungsvorgänge.

Wie lange leuchtet die LED? Bestimme die Leuchtdauer mit der Stoppuhr Deines Handys. Kann man die Leuchtdauer auch berechnen? Hast Du eine Idee?

Weitere Experimente mit SUSE 4.3RB erhalten Sie von sundidactics.de