

**Photovoltaik-
System
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**



Das Solarmodul SUSE 4.2/4.2S

Gerätebeschreibung und Versuchsanleitungen

Leistungsstarkes Solarmodul mit Hochleistungssolarzelle, Solarmotor und Messbuchs

Besonders geeignet für den schülerzentrierten experimentellen Unterrichtseinsatz in den Klassenstufen 6 -13



Das nebenstehende Foto zeigt das Solarmodul **SUSE 4.2** auf einem transparenten Plexiglasträger.

Unten erkennt man die robuste und leistungsstarke **Solarzelle** SUSEmod215 (0,62 V – 990 mA) mit dem unteren rot- schwarzen Buchsenpaar, (Buchsenpaar 1+2) welches über 2 Verbindungsstecker (mit Messbuchs) mit dem oberen Buchsenpaar (3+4) des Solarmotors- auf den der Propeller aufgesteckt ist- verbunden ist.

So lassen sich für Experimente Elektromotor und Solarmodul einfach und deutlich sichtbar trennen und auch mehrere Module **SUSE 4.2** vielfältig miteinander verschalten:

- Reihenschaltung mehrerer Module zum Betrieb eines Radios oder LEDs
- Reihenschaltung mehrerer Module an einen Solarmotor
- Parallelschaltung mehrerer Motoren an eine Solarzelle
- Parallelschaltung mehrerer Module an einen Solarmotor
- Mit dem Solarmodul **SUSE 4.2** lässt sich einfach mit einer Stromstärkemessung die Lichtintensität des Sonnenlichts oder des Lichts künstlicher Lichtquellen in W/m² bestimmen.
- Durch „Anpusten“ des blauen Propellers wirkt der Solarmotor als Generator und kann Gleichspannungen bis ca. 2,5 V erzeugen.
- Speicherung der elektrischen Energie der Solarzelle mit dem Speichermodul SUSE 4.12



Bei der Version SUSE 4.2S (links) wird statt der Verbindungsstecker ein zweipoliger Schalter eingebaut, der den Motor elektrisch vom Solarmodul trennt. Schalter nach oben zum Motor geschaltet = Motor an die Solarzelle geschaltet, Schalter nach unten = Trennung von Solarzelle und Elektromotor.

Das Photovoltaik- Experimentiergerät **SUSE 4.2** besteht aus einem Solarmodul (0,62 V/ 990 mA) und einem Solar - Elektromotor mit Propeller. Elektro- Motor und Solarmodul sind mit Buchsenpaaren und Verbindungssteckern (**Version SUSE 4.2**) oder mit einem Schalter (**Version SUSE 4.2S**) gekoppelt und können für Experimente leicht getrennt (4.2) oder ausgeschaltet (4.2S) werden. Mit den **umfangreichen Versuchsanleitungen** (ab S. 2) können eine Vielzahl von Experimente zur Photovoltaik durchgeführt werden, von Basisversuchen in der der Grundschule bis zu fachlich niveauvollen Experimenten im Abiturniveau. Die Experimente sind in der mitgelieferten Experimente- Datei ausführlich aufgelistet. Für Experimente kann das Solarmodul **SUSE 4.2** im natürlichen Sonnenlicht im Freien, im Innenraum auf dem Grundgerät SUSE 4.0 oder auf einem Overheadprojektor betrieben werden. In die Buchsen sollen die Laborkabel von der Rückseite eingesteckt werden um Schattenbildung von Experimentierkabeln auf der Solarzelle zu vermeiden. **Aufstellpositionen:**

Sonne tief stehend



Aufstellung im Freien

Sonne hoch stehend





**Photovoltaik-
System
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**



Leibniz
Universität
Hannover

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

Experimentieranleitung für das Solarmodul SUSE 4.2

Handreichung für Lehrkräfte

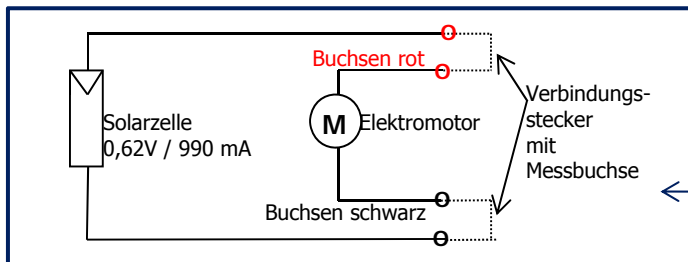
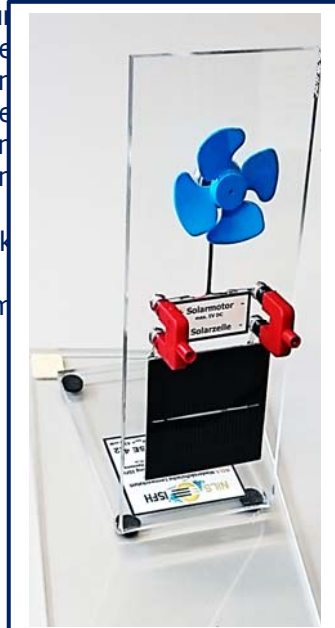
Lernstation

C23

Das **Solarmodul SUSE 4.2** ist ein universell einsetzbares Experimentiergerät für Experimente zur Photovoltaik. Es besteht aus einer hochwertigen, leistungsstarken Solarzelle (0,62 V/990 mA) und einem Solar- Elektromotor mit Propeller, die mit lösbaren Verbindungssteckern mit integrierten Messbuchsen miteinander verbunden sind. Solarzelle (unteres Buchsenpaar Solarzelle 1+2) und Elektromotor (oberes Buchsenpaar 3+4) haben jeweils eigene Messbuchsen für Experimentierkabel, bei gesteckten Verbindern können Kabel in die Buchse des Verbindungssteckers eingesteckt werden.

Mit dem **Solarmodul SUSE 4.2** lassen sich eine Vielzahl von Experimenten zur Photovoltaik im Niveau der Klassenstufen 6-13 durchführen.

Oben im Verbindungsstecker befindet sich eine Messbuchse, so dass auch bei gestecktem Verbindungsstecker gemessen werden kann.



Das Solarmodul SUSE 4.2

Die elektrische Schaltung des Solarmoduls SUSE 4.2

In dieser Anleitung sind 11 Experimente aufgeführt. Entweder werden alle Versuche in dieser Reihenfolge bearbeitet, oder es werden einzelne Experimente ausgewählt.

Notwendige Zusatzgeräte: Overheadprojektor oder Halogenstrahler als Lichtquelle, wenn nicht im Freien experimentiert wird, Laborkabel und ein Multimeter.

Für Exp. 5 sind 6 Solarmodule SUSE 4.2 notwendig, sowie das Solarradio SUSE 4.36 und ein LED- Modul SUSE 4.15.

Für Exp. 11 ist noch ein Speichermodul SUSE 4.12 erforderlich.

Die hier verwendete Solarzelle im Solarmodul SUSEmod215 hat spezifizierte Daten, mit diesen kann die Lichtintensität des bestrahlenden Lichts in W/m^2 gemessen werden.

Die Experimente und didaktische/technische Infos

- | | | |
|-----|---|----------|
| 1. | Elektrische Spannung U Leerlaufspannung U_{oc} | Seite 3 |
| 2. | Kurzschlussstrom I Kurzschlussstrom I_{sc} | Seite 4 |
| 3. | Leistung P | Seite 5 |
| 4. | Qualität der Solarzelle / Stromdichte j | Seite 5 |
| 5. | Reihenschaltung von Solarzellen | Seite 6 |
| 6. | U,I,P in Abhängigkeit von der Fläche | Seite 7 |
| 7. | Wirkungsgradbestimmung | Seite 8 |
| 8. | Messung der Bestrahlungsstärke (Lichtintensität) | Seite 9 |
| 9. | Experimente mit dem Solarmotor I | Seite 10 |
| 10. | Experimente mit dem Solarmotor II | Seite 13 |
| 11. | Experimente mit Solarmotor und Speichermodul | Seite 13 |
| 12. | 23 weitere Experimente (Kurzfassung) | Seite 16 |
| 13. | Info zur Funktion der Solarzelle (Niveau SEK I) | Seite 19 |
| 14. | Die technischen Daten der Solarzelle | Seite 20 |
| 15. | Energieumwandlungsprozesse | Seite 23 |
| 16. | Didaktische und methodische Hinweise | Seite 24 |

1. Die Leerlaufspannung U_{oc} der Solarzelle

U_{oc} = die elektrische Spannung U der unbelasteten Solarzelle oc = open circuit gemessen im strahlenden Sonnenschein bei einer Bestrahlungsstärke von $S = 1000 \text{ W/m}^2$ oder auf dem Overheadprojektor mit $S = 1000 \text{ W/m}^2$. Die Leerlaufspannung ist bei Silizium materialbedingt $0,61 - 0,64 \text{ V}$ und abhängig von der Lichtintensität (= Bestrahlungsstärke)

Der Wert sollte im Sonnenlicht zwischen $0,61 \text{ V}$ und $0,64 \text{ V}$ liegen, bei bedecktem Himmel $0,52 - 0,58 \text{ V}$, unabhängig von der Fläche! Bei gleicher Bestrahlungsstärke sollten alle Solarzellen, etwa die gleiche Spannung haben, der Standard-Test-Wert wäre $0,62 \text{ V}$. Kleine Differenzen sind Qualitätsunterschiede. **Die Leerlaufspannung hängt nur von der Lichtintensität, vom Material und von der Qualität 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 Buchsen (rot- schwarz) der beleuchteten Solarzelle an.

Die Messungen zur elektrischen Spannung:

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 auf dem Tisch
Leerlaufspannung U in V ohne Motor Stecker abziehen!				
Leerlaufspannung U in V a) Solarzelle zu 50% abgedeckt durch schwarze Pappe oder Alufolie b) Solarzelle vollständig durch Klarsichthülle abgedeckt	a) b)	Keine Messungen		
Leerlaufspannung U in V mit Solarmotor Verbindungsstecker gesteckt				

Was fällt Dir bei den Messungen zur Leerlaufspannung auf, formuliere hier:

Zur niveauvollen Erklärung kannst Du auch die Solarzellendaten der letzten Seite verwenden!

2. Der Kurzschlussstrom I_{sc} der Solarzelle sc = 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 die + und – Buchsen 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 27,04 cm² sollte der Strom bei einer Lichtintensität von 1000 W/m² 0,99 A sein.

Die Messungen zum Kurzschlussstrom: **Verbindungsstecker abziehen!**

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
Verbindungsstecker abgezogen!				
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	a) b)	Keine Messungen		
Mit gestecktem Verbindungsstecker in A				

Was fällt Dir 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 zur Berechnung der elektrischen Leistung P:

P ist Leerlaufspannung x Kurzschlussstrom x 0,75, P sollte also im Idealfall bei 1000 W/m² Einstrahlung ca. 0,45 W sein, (bei einer Fläche von 27,04 cm²). Der Faktor 0,75 erklärt sich über die Kennlinie und den MPP der Solarzelle.

Die Messungen zur Leistung:

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 der Platte des Overhead-Projektors.

So berechnen wir die Stromdichte j:

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

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. Reihenschaltung von Solarzellen

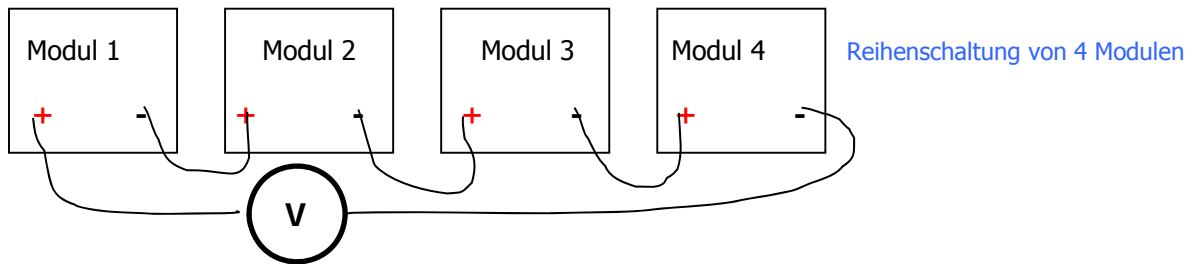
Die Module lassen sich beliebig in Reihe schalten und damit höhere Spannungen erreichen!

Verbindungsstecker wahlweise abziehen oder gesteckt lassen! Notiere die Ergebnisse beider Varianten!

Mehrere Module in Reihenschaltung:

Lege die Module ins Sonnenlicht oder (mit der Oberseite nach unten!) auf einen Overheadprojektor und schalte 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- Solarradio 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!

Einzelmodul:	U_{oc} in V	I_{sc} in A
Modul 1:.....		
Modul 2:.....		
Modul 3:.....		
Modul 4:.....		

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

U_{ges} =V

I_{sc} =A

Was fällt Dir auf, erläutere Deine Ergebnisse hier:

6. 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 CM4MBV auf das Grundgerät SUSE 4.0, mit der Vorderkante am schwarzen Strich, 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 10° DC), berechnen die Leistung P ($P= 0,75*U_{oc}*I_{sc}$) und tragen die Werte in die Tabelle ein.

Nun decken wir die Solarzelle mit schwarzer Pappe oder Alufolie genau zur Hälfte lichtdicht 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/Ihnen bei den Ergebnissen auf? Notieren Sie Ihre Beobachtungen und Erklärungen hier:

7. 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 = 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: 17- 21 %

Polykristalline Zellen: 16 – 19 %

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 7 bestimmt.

Methode:

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

U_{oc} =V I_{sc} =A

2. Mit der Gleichung P = U_{oc} * I_{sc} * 0,75 wird die elektrische Leistung P der Solarzelle bestimmt:

$$P_E = \frac{\dots\dots\dots}{U_{oc}} * \frac{\dots\dots\dots}{I_{sc}} * 0,75 = \dots\dots\dots W \quad (I)$$

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

$$S_x = \frac{I_{mess} \text{ (in A)} * 1000}{0,99 A} \dots\dots\dots W/m^2$$

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

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:

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

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 17 % liegen.

8. Messungen der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke) in W/m²

Die Helligkeit (Intensität) des Lichts heißt Bestrahlungsstärke S und wird in W/m² (Watt pro m²) gemessen.

Mit der hier verwendeten kalibrierten Solarzelle kann die **Lichtintensität in W/m²** vor einem Halogenstrahler oder auf einem Overheadprojektor oder im Freien genau bestimmt werden.

1000 W/m² 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/m²

$$I_{sc} = \dots\dots\dots 0,99 \dots\dots\dots A = \dots\dots\dots 990 \dots\dots\dots mA$$

Messung der Bestrahlungsstärke S von Licht (Lichtintensität) in W/m²:

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

$$\frac{I_{sc} \text{ in A}}{1000 \text{ W/m}^2} = \frac{I_{mess} \text{ in A}}{S_x \text{ in W/m}^2} \quad \text{oder nach } S_x \text{ umgestellt: } S_x = \frac{I_{mess} \text{ (in A)} * 1000}{0,99 \text{ A}}$$

Dabei ist:

- I_{sc} in A S_x in W/m²
- 1000 W/m² I_{sc} in A der kalibrierte Kurzschlussstrom bei 1000 W/m² = 0,99 A
- I_{mess} in A I_{mess} in A der gemessene Kurzschlussstrom bei der Bestrahlungsstärke S_x
- S_x in W/m² S_x in W/m² 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 150 W		
Im Innenraum Zum Fenster hin ausgerichtet		

Was fällt Dir/Ihnen auf, erläutere hier:

Experimente 9- 11: Energieumwandlungen von elektrischer Energie in mechanische Energie und umgekehrt. Speicherung von elektrischer Energie (Exp. 11).

9. Experimente mit dem Solarmotor I

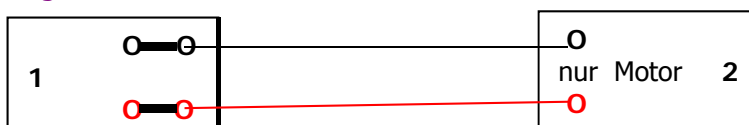
Du benötigst für diese Experimente 4 Solarmodule SUSE 4.2!

Experiment 9.1: 4 Motoren in Parallelschaltung

Lass bei einem Gerät (Gerät 1) die Verbindungsstecker gesteckt und ziehe bei den weiteren 3 Geräten die Verbindungsstecker ab. Du benötigst weiterhin 3 rote und 3 schwarze Laborkabel.

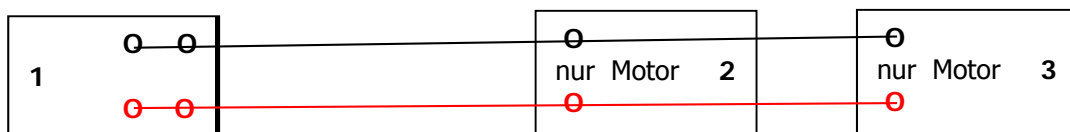
Gehe mit den Geräten ins Freie oder experimentiere im Innenraum auf einem Overheadprojektor oder vor einem Halogenstrahler.

Bestrahle das Gerät Nr. 1 mit Licht und schließe einen weiteren 2. Motor des Solarmoduls 2 zusätzlich an (schwarze Motor- Buchse von Gerät 2 an die Buchse im Verbindungsstecker der schwarzen Buchsen von Gerät 1, rote Motor- Buchse von Gerät 2 an die + Buchse im Verbindungsstecker von Gerät 1!



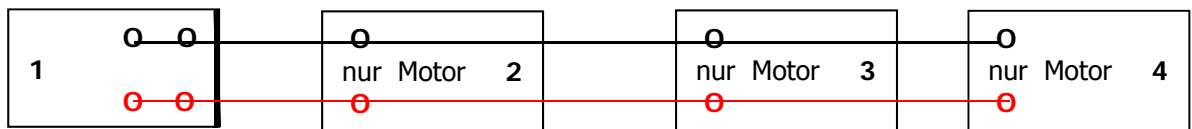
Was fällt Dir/Ihnen bei den Experimenten auf, notiere hier:

Ergänze nun einen weiteren 3. Motor, indem Du ihn mit dem Motor 2 mit Laborkabeln verbindest, rote Buchse wird mit roter Buchse verbunden, schwarze Buchse mit schwarzer Buchse)



Was fällt Dir/Ihnen auf, notiere hier:

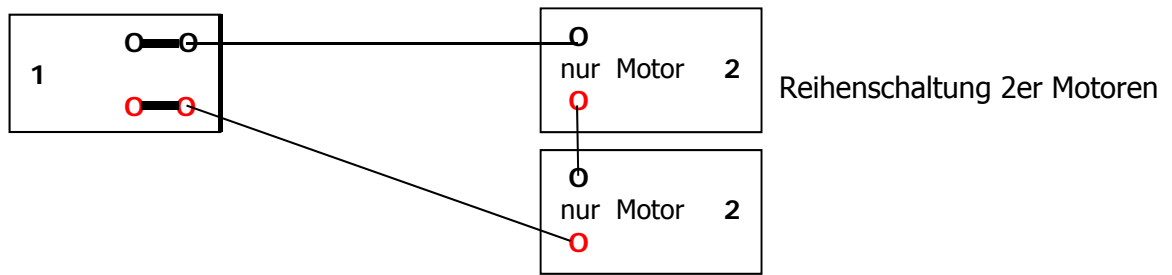
Ergänze nun einen weiteren 4. Motor, indem Du ihn mit dem Motor 3 mit Laborkabeln verbindest:



Was fällt Dir/Ihnen auf, notiere hier:

Experiment 9.2: 2 Motoren in Reihenschaltung an eine Solarzelle mit Motor

Lass bei einem Gerät (Gerät 1) die Verbindungsstecker gesteckt und ziehe bei den weiteren 2 Geräten die Verbindungsstecker ab. Von diesen 2 Geräten werden nur die Motoren benötigt. Du benötigst weiterhin 3 Laborkabel beliebiger Farbe.



Was fällt Dir/Ihnen auf, notiere + erkläre hier.

Ergänze evtl. einen 3. Motor in der Reihenschaltung und beobachte!

Experiment 9.3

Auch hier benötigst Du 4 Geräte SUSE 4.2, ziehe bei allen 4 Geräten den Verbindungsstecker ab!

Erstelle mit 2 Solarmodulen eine Reihenschaltung und schließe den Pluspol der 1. Solarzelle und den Minuspol der 2. Solarzelle an einen Solarmotor des 3. Moduls an:

Was fällt Dir/Ihnen auf, notiere hier.

Erstelle nun mit 4 Solarmodulen eine Reihenschaltung und schließe den Pluspol der 1. Solarzelle und den Minuspol der 4. Solarzelle an einen Solarmotor an.

Was fällt Dir/Ihnen auf, notiere hier, erkläre die Beobachtungen dieser Experimente:

10. Experimente mit dem Solarmotor II

Der kleine Elektromotor kann auch als Generator benutzt werden er erzeugt dann bei Drehung elektrische Energie. Wenn wir den blauen Propeller anpusten, dreht er den Motor, dabei wird elektrische Energie erzeugt, wir können dazu 2 Experimente durchführen:

Experiment 10.1

Ziehe den Verbindungsstecker und schließe ein Voltmeter im Messbereich 20V DC an die Anschlüsse des Solarmotors (gelbe und schwarze Buchse) an.

Puste nun kräftig auf den blauen Propeller und lies die erzeugte Spannung U ab, führe das Experiment 3-mal durch und puste immer kräftiger:

Experiment Nr.	Erreichte Spannung U in Volt
1 schwach gepustet	
2 stark gepustet	
3 sehr stark gepustet	

Experiment 10.2

Verbinde 2 Solarmotoren mit 2 Laborkabeln miteinander, rote Buchse mit roter Buchse und schwarze Buchse mit schwarzer Buchse.

Puste nun kräftig auf den Propeller des 1. Motors und beobachte den 2. Motor

Puste nun kräftig auf den Propeller des 2. Motors und beobachte den 1. Motor

Was beobachtest Du bei den Experimenten 9.1 und 9.2, welche Energieumwandlungen finden statt, erkläre hier:

11. Experimente mit dem Solarmotor und einem Speichermodul

Das Speichermodul SUSE 4.12 kann die elektrische Energie speichern, die von der Solarzelle oder vom Generator (Motor als Generator verwendet) erzeugt wird.

11.1 Speicherung der elektrischen Energie einer Solarzelle

Ziehe den Verbindungsstecker! Vor jedem Experiment das Speichermodul entladen durch Drücken der Taste T für 2 Sekunden!



Schließe mit 2 Laborkabeln den Plus- und Minuspol der Solarzelle (rot- schwarze Buchsenpaar) polrichtig (rot an rot, schwarz an schwarz) an den Solarspeicher SUSE 4.12 und lade den Speicher auf, indem Du die Solarzelle mit Licht bestrahlst, entweder mit dem natürlichen Sonnenlicht oder durch Bestrahlung mit einer Halogenlampe. Die Ladezeit sollte ca. 3 Minuten betragen. Ziehe nun das Laborkabel vom Pluspol (rot) der Solarzelle ab und verbinde es mit dem Pluspol des Motors (gelbe Buchse).

Was beobachtest Du, erläutere und erkläre hier:

11.2 Vertiefung von 11.1

Führe den Versuch genau so durch, schließe aber an das Buchsenpaar des Solarspeichers SUSE 4.12 ein Voltmeter im Messbereich 20 V DC an. Bestimme mit einer Stoppuhr im Moment des Verbindens des Speichers mit dem Solarmotor die Spannung U und trage die Werte in die Tabelle ein:

Zeit in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U in V																

Was beobachtest Du, werte die Tabelle aus, erkläre hier:

11.3 Aufladen des Speichermoduls mit dem Solarmotor

Schließe das schwarz- rote Buchsenpaar des Solarmotors an den Solarspeicher an. Da im Generatorbetrieb des Motors die Pole vertauscht sind, muss der gelbe Pol des Solarmotors mit dem schwarzen -Pol des Speichers verbunden werden, der schwarze Pol des Solarmotors mit dem roten +Pol des Speichers. Puste nun kräftig ca. eine Minute auf den Propeller und beobachte anschließend

den Effekt:

Was beobachtest Du, erläutere und erkläre hier:

Du kannst auch wie in 10.2 ein Voltmeter anschließen und die Spannung messen und den Verlauf beobachten, notiere und erkläre:

12. 23 Weitere Experimente mit dem Solarmodul SUSE 4.2

Mit dem Solarmodul SUSE 4.2 lassen sich weitere Experimente durchführen, die hier aufgelistet sind. Bei Interesse kontaktieren Sie bitte nils@isfh.de, wir senden Ihnen per email detaillierte Anleitungen zu.

12.1 Messung der Leerlaufspannung bei verschiedener Zellenfläche I, II

Die Leerlaufspannung ist völlig unabhängig von der Zellenfläche. Wenn man die Solarzelle mit schwarzem Papier in Stufen abdeckt (auch die Rückseite! völlig mit schwarzer Pappe abdecken, auch von hier kommt Licht auf die Zelle!), erkennt man an den Messungen, dass die Leerlaufspannung konstant bleibt.

12.2 Messung der Leerlaufspannung bei verschiedenen Einfallswinkeln des Lichts I, II

Bei verschiedenen Einfallswinkeln des Lichts wird sich die Leerlaufspannung entsprechend der Grafik verhalten, wobei die wirksame Bestrahlungsstärke $S' = S \cdot \sin \alpha$ ist. α ist der Winkel zwischen der Einstrahlungsrichtung des Lichts und der Zellenfläche. Bei 90° Einfallswinkel ist die effektive Bestrahlungsstärke gleich der wirklichen Bestrahlungsstärke, also optimal, bei 0° , wenn das Licht also parallel zur Zelle streift, ist $S' = 0$ und U_{oc} ebenfalls $0V$. In der Praxis sollte also das Licht immer senkrecht auf die Solarzelle treffen (was sich nicht immer verwirklichen lässt).

12.3 Messung des Kurzschlussstroms einer Solarzelle bei verschiedener Zellenfläche I, II

Der Kurzschlussstrom I_{sc} (sc- short-cut) ist eine besonders wichtige Größe einer Solarzelle. **Der Kurzschlussstrom ist proportional zur Lichtintensität und zur Fläche einer Solarzelle.**

Im Gegensatz zu anderen Stromquellen, wo niemals ein Kurzschluss eingestellt werden darf, können Solarzellen problemlos kurzgeschlossen werden, und die Stromstärke gemessen werden, da nur so viel Strom fließen kann, wie vom Licht erzeugt wird. Bei der SUSE- Solarzelle beträgt der Kurzschlussstrom genau 990 mA für eine Einstrahlung (Bestrahlungsstärke) von 1000 W/m^2 , was dem strahlenden Sonnenschein bei blauem Himmel ohne Bewölkung entspricht. Der Kurzschlussstrom muss mit einem Multimeter **immer im 10A- Messbereich** gemessen werden, weil die kleineren Messbereiche einen zu hohen Innenwiderstand haben und das Messergebnis verfälschen.

12.4 Messung des Kurzschlussstroms einer Solarzelle bei verschiedenen Einfallswinkeln des Lichts I, II

Das Solarmodul SUSE 4.2 wird auf dem Grundgerät SUSE 4.0 befestigt, die Verbindungsstecker gezogen und der Kurzschlussstrom im 10A-Messbereich gemessen. Zu Beginn wird die Solarzelle genau zum Halogenstrahler ausgerichtet, erkennbar am maximalen Wert. Nun wird das Modul mit Hilfe eines Geo-Dreiecks zur Winkelmessung um jeweils 10° gedreht und der Kurzschlussstrom bestimmt. Der Kurzschlussstrom wird gemäß $I = I_{max} \sin \alpha$ kleiner.

Bei verschiedenen Einfallswinkeln des Lichts wird sich der Kurzschlussstrom entsprechend der Grafik verhalten, wobei die wirksame Bestrahlungsstärke $S' = S \cdot \sin \alpha$ ist. α ist der Winkel zwischen der Einstrahlungsrichtung des Lichts und der Zellenfläche. Bei 90° Einfallswinkel ist die effektive Bestrahlungsstärke gleich der wirklichen Bestrahlungsstärke, also ist der Kurzschlussstrom hier maximal und optimal, bei 0° , wenn das Licht also parallel zur Zelle streift, ist $S' = 0$ und I_{sc} ebenfalls $0A$. In der Praxis sollte also das Licht immer senkrecht auf die Solarzelle treffen (was sich nicht immer verwirklichen lässt).

12.5 Punktweise Aufnahme der Kennlinie von Solarzellen, Bestimmung des MPP (Maximum- Power- Point) der Solarzelle bei verschiedener Lichtintensität S II, III (optimal hierfür: Gerät SUSE 5.15)

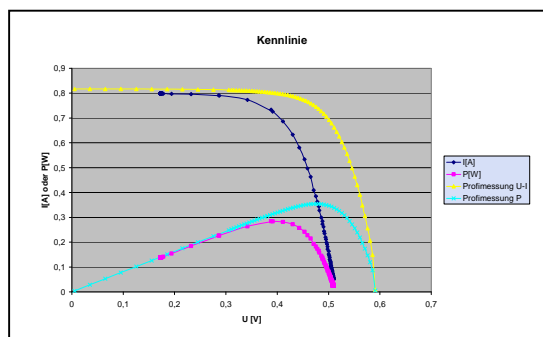
Die I-U-Kennlinie einer Solarzelle mit Bestimmung des MPP und des Wirkungsgrades sind wichtige charakteristische Größen einer Solarzelle und erlaubt auch eindeutige Aussagen über ihre Qualität. Zur Aufnahme der I-U-Kennlinie wird die Solarzelle mit Licht bestrahlt, günstig wäre $S > 500\text{ W/m}^2$, z.B. die Platte eines guten Overheadprojektors, auf die die Solarzelle mit der Zellenfläche nach unten aufgelegt wird.

Nach Messung der Leerlaufspannung wird die Zelle mit Widerständen von 10Ω bis 1Ω schrittweise belastet, bis zum Kurzschlussfall ohne Widerstand mit $R = 0\Omega$. Die Graphische Darstellung ergibt die Kennlinie. Die im ISFH gemessene U-I-Kennlinie der SUSE- Solarzelle finden Sie bei den technischen Daten. Wird nun die Leistung $P = U \cdot I$ berechnet und über U aufgetragen ergibt sich die Leistungskennlinie $P(U)$ mit einem deutlichen Maximum, dem MPP. An diesem Punkt gibt die Solarzelle die maximale Leistung ab, dieser Punkt muss bei technischen Photovoltaikanlagen immer getroffen werden, was der Wechselrichter ständig automatisch ausführt.

12.6 Aufnahme der Kennlinie und Bestimmung des MPP von Solarzellen mit einem Interface und PC

(optimal hierfür: Gerät SUSE 5.15) II, II

1. Mit einem PC + Mess- Interface (z.B. Leybold Cassy) lässt sich die U- I- Kennlinie und die P-U-Kennlinie einfach und schnell aufnehmen. Einmaliges Durchdrehen des Lastpotentiometers genügt und Sie erhalten eine U-I-Messwerttabelle sowie die Graphen $I(U)$ und $P(U)$ mit dem MPP.



Mit Cassy aufgenommene Kennlinien einer kühlen und einer erwärmten Solarzelle:

Gelb: U-I-Kennlinie kühl
Blau: U-I-Kennlinie warm
Türkis: P-U-Kennlinie mit MPP im Maximum kühl
Rot: P-U-Kennlinie mit MPP im Maximum erwärmt

12.7 Bestimmung des Wirkungsgrads einer Solarzelle bei verschiedener Lichtintensität S (optimal hierfür: Gerät SUSE 5.15) II, III

Die exakte Wirkungsgradbestimmung einer Solarzelle wird immer am Maximum- Power- Point der Solarzelle bestimmt. Dazu muss der MPP genau bestimmt werden (siehe Experiment 12/13). Für eine Annäherung kann man auch den MPP mit $0,8 \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}$ bestimmen. Man misst über den Kurzschlussstrom der Solarzelle die eingestrahlte Leistung des Lichts in W und setzt diesen Wert mit der Leistung im MPP ins Verhältnis. Für das Solarmodul SUSE 4.2 ergibt sich ein Wert von ca 17% .

12.8 Parallelschaltung von Solarzellen (mit mehreren Modulen SUSE 4.2) I, II

Mehrere Solarmodule SUSE 4.2 lassen sich problemlos parallel schalten, es muss jeweils der + Anschluss (rote Buchse) mit dem + Anschluss weiterer Module verbunden werden, ebenfalls die Minus- Anschlüsse. Die Spannung bleibt konstant bei ca. $0,6\text{ V}$, die Stromstärken addieren sich bei der Parallelschaltung.

12.9 Die Abhängigkeit der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstroms von der Temperatur der Solarzelle I, II

• Leerlaufspannung U_{oc}

Die Leerlaufspannung U_{oc} sinkt bei zunehmender Erwärmung mit ca. 2 mV pro K Temperaturerhöhung. Hat die Zelle bei 25°C bei einer Bestrahlung mit 1000 W/m² eine Leerlaufspannung von 620 mV, so sinkt die Spannung bei einer Erwärmung der Zelle auf 65°C (= Temperaturerhöhung um 40 K) um $40 \cdot 2 \text{ mV} = 80 \text{ mV}$ auf 520 mV. Diesen Effekt kann man zeigen, indem man die Solarzelle des Moduls SUSE 4.2 (Motorstecker abgezogen) auf die Glasplatte eines Overheadprojektors legt und das von unten kommende Licht die Zelle bestrahlt und leider auch erwärmt. Misst man nun in Abständen von ca. 30 s die Leerlaufspannung, kann man die Minderung deutlich erkennen. Solarzellen sollten also immer kühl gehalten werden, bei Experimenten sollte man die Lichtquelle nur für die Messungen anschalten, um die Erwärmung der Zelle zu minimieren.

• Kurzschlussstrom I_{sc}

Der Kurzschlussstrom I_{sc} steigt bei zunehmender Erwärmung um 0,02 % pro K Temperaturerhöhung, das wäre bei der SUSE- Solarzelle (Kurzschlussstrom bei 1000 W/m² = 880 mA eine Erhöhung von 1,6 mA pro K. Hat die Zelle bei 25°C bei einer Bestrahlung mit 1000 W/m² einen Kurzschlussstrom von 990 mA, so erhöht sich die Stromstärke bei einer Erwärmung der Zelle auf 65°C (= Temperaturerhöhung um 40 K) um $40 \cdot 1,6 \text{ mA} = 64 \text{ mA}$ auf 926 mA. Diesen Effekt kann man zeigen, indem man die Solarzelle des Moduls SUSE 4.2 (Motorstecker abgezogen) auf die Glasplatte eines Overheadprojektors legt und das von unten kommende Licht die Zelle bestrahlt und leider auch erwärmt. Misst man nun in Abständen von ca. 30 s den Kurzschlussstrom, kann man die Erhöhung deutlich erkennen. Da die Spannung stärker sinkt als der Strom steigt, sinkt die Leistung bei Erwärmung!

12.10 Die Abhängigkeit der elektrischen Leistung P von der Temperatur der Solarzelle I, II, III

Da bei Erwärmung der Solarzelle die Leerlaufspannung sinkt und der Kurzschlussstrom steigt, ändert sich auch die Leistung der Solarzelle bei Erwärmung. Die Spannung sinkt stärker als die Stromstärke steigt, deshalb sinkt auch die Leistung bei Erwärmung. Die Leistungsminderung ist 0,49 % pro K Temperaturerhöhung. Die SUSE- Solarzelle hat bei 25°C und einer Lichteinstrahlung von 1000 W/m² eine Leistung im MPP von 0,43 W. Wird die Zelle nun von 25°C auf 65°C erwärmt, also um 40 K, mindert sich ihre Leistung um 19,6 % auf 0,338 W. Solarzellen sollte also möglichst kühl betrieben werden! Bei Messungen mit künstlichen Lichtquellen sollen diese also nur kurzfristig für die Messungen angeschaltet werden, um Leistungsminderungen durch Erwärmung zu vermeiden!

12.11 Die Solarzelle als Halbleiter - Diode im Stromkreis I, II

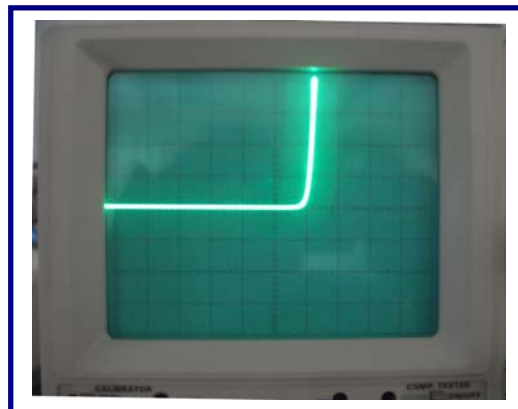
Eine durch schwarze Pappe lichtdicht abgedunkelte Solarzelle ist eine normale Halbleiterdiode mit Kathode (n-dotierter Bereich, der Minuspol der Solarzelle) und Anode (p-dotierter Bereich, der Pluspol der Solarzelle). Wird ein Stromkreis mit Gleichspannung und einem Glühlämpchen aufgebaut und eine Solarzelle eingebaut, so leuchtet das Lämpchen auf, wenn die Solarzelle in Durchlassrichtung geschaltet ist, (Minuspol der Solarzelle zeigt zum Minuspol des Netzgerätes). Wird die Solarzelle umgedreht, sperrt sie den Strom wie eine normale Si-Diode. Mit diesem Experiment lässt sich deutlich zeigen, dass eine Solarzelle eine Si- Halbleiterdiode ist.

12.12 Aufnahme der Diodenkennlinie (Dunkelkennlinie) der Solarzelle (punktweise) II, III

Die Solarzelle wird mit einem 5 Ω - Widerstand in Reihe geschaltet und an ein Gleichspannungsnetzgerät angeschlossen. An der Solarzelle wird ein Voltmeter angeschlossen, in den Stromkreis ein Amperemeter. In Sperrrichtung kann man die Spannung von 0- 3 V erhöhen, in Durchlassrichtung von 0- 1V. Führt man nun die Messungen in Schritten von 0,1 V Spannungsvariation am NG aus, so erhält man die U-I-Kennlinie einer normalen Diode, die sogenannte Dunkelkennlinie der Solarzelle. Es fällt auf, dass der Sperrstrom viel höher ist als bei normalen Si- Dioden, das liegt an der großen Zellfläche (25 cm²) im Vergleich zum Halbleiterplättchen (<1mm²) einer normalen Si- Diode.

12.13 Aufnahme der Diodenkennlinie einer Solarzelle (Oszilloskop) II, III

Die Dunkelkennlinie einer Solarzelle in x-y- Darstellung aufnehmen. Die mit schwarzer Pappe lichtdicht abgedunkelte Solarzelle wird in Reihe mit einem 10 Ω - Widerstand an eine Wechselspannung mit 4V angelegt. U(t) wird an der Solarzelle abgenommen, I(t) am Widerstand, das Oszilloskop wird in x-y-Betrieb geschaltet.



**U-I-
Darstellung
der Kennlinie
auf dem
Oszilloskop-
Bildschirm:**

x- Achse: U
y- Achse: I

x: 1 cm = 1V
y: 1 cm = 0,1 A

12.14 Aufnahme der Diodenkennlinie der Solarzelle (mit PC-Messsystem) II,III

Wie mit dem Oszilloskop wird auch hier die Solarzelle in Reihe mit einem 10 Ω - Widerstand an eine Wechselspannung (3V, 50 Hz) angeschlossen, U wird auf der x- Achse, I auf der y- Achse aufgetragen, die Kennlinie wird graphisch dargestellt und entspricht dem Bild von Exp. 21

12.15 Messungen von Absorption, Reflexion und Transmission des Lichts an Glas/Plexiglas oder anderen lichtdurchlässigen Materialien II,III

Halten wir ein transparentes Material zwischen Lichtquelle und Solarzelle, wird ein Teil der Strahlung am Material reflektiert, ein weiterer Teil im Material absorbiert, so dass nur ein Teil des einstrahlenden Lichts die Solarzelle erreicht. Für Experimente legen wir das Solarmodul mit der Solarzelle nach unten auf einen Overhead- Projektor (OHP) und legen transparente Materialien (Glas verschiedener Sorten und verschiedener Dicken, Kunststoffe, Folien.....) zwischen OHP und Solarzelle und messen den Kurzschlussstrom der Zelle einmal ohne Material und einmal mit Material. Der Kurzschlussstrom ist direkt proportional zur Lichtintensität (= Bestrahlungsstärke). Der Rückgang der Stromstärke zeigt die Summe von Reflexion und Absorption des Lichts. Ein gutes Material für Experimente sind Klarsichthüllen, die man in mehrfacher Lage durchstrahlen kann, Wärmeschutzgläser absorbieren über 50% des einfallenden Lichts.

12.16 Messung der Lichtintensität des Strahlengangs zwischen Glasplatte und Linsen/Spiegelkopf eines Overhead-Projektors I,II

Unter der Glasplatte eines Overheadprojektors befindet sich eine Fresnel- Linse, die das Licht bündelt und deren Brennpunkt sich etwa in Höhe des Umlenkspiegels befindet. Legt man das Solarmodul SUSE 4.2 (mit gezogenen Verbindungssteckern) auf die Glasplatte des OHP und misst dort den

Kurzschlussstrom, so lässt sich dort (mit der Methode aus Exp.8) die Bestrahlungsstärke S des Lichts bestimmen. Bei modernen Projektoren liegt sie bei ca. 1000 W/m^2 . Hebt man nun das Solarmodul in cm- Schritten nach oben, steigt die Bestrahlungsstärke und damit der Kurzschlussstrom bis in den Brennpunkt des Lichts immer stärker an. Vorsicht, den Brennpunkt meiden, sonst wird die Zelle zu heiß und die Folie kann Schaden nehmen.

12.17 2 Solarmodule SUSE 4.2 in entgegengesetzt gepolter Reihenschaltung II

Schaltet man 2 Module SUSE 4.2 entgegengesetzt gepolt (d.h. man verbindet 2 gleiche Pole miteinander) in einer Reihenschaltung, so müsste die Summenspannung exakt 0 sein. Sie ist dann exakt 0, wenn die Bestrahlungsstärke auf beiden Zellen gleich groß ist, sonst entsteht eine Differenzspannung entsprechend zur Ungleichheit der Bestrahlungsstärken auf beiden Zellen. Diesen Effekt kann man technisch ausnutzen, um Solarmodule mit einem Getriebemotor immer dem Sonnenstand nachzuführen, der Getriebemotor wird mit der Differenzspannung betrieben und dreht das Modul so lange, bis es genau zur Sonne ausgerichtet ist, die Differenzspannung nun 0 wird und der Motor stehen bleibt.

12.18 Messung der genauen Position der Sonne mit SUSE 4.2 I, II

Mit SUSE 4.2 lässt sich der genaue Sonnenstand einfach bestimmen. Man zieht die Verbindungsstecker und schließt an die Buchsen der Solarzelle ein Amperemeter im 10A- Messbereich an. Nun schwenkt man das Modul zuerst auf der x-y-Ebene, bis der Strom maximal ist, dann schwenkt man das Modul in der vertikalen Ebene solange, bis auch hier der Stromstärkewert maximal ist. Nun ist die Senkrechte zur Solarzelle exakt die Richtung zur Sonne.

12.19 Messung der diffusen Strahlung des Himmels I, II

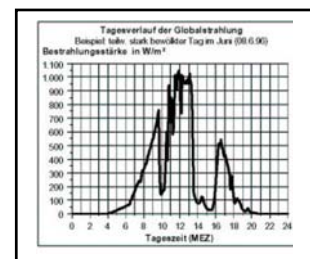
Nicht nur die direkte Sonnenstrahlung, sondern auch der helle Himmel und die hellen Wolken liefern Strahlungsenergie, die nicht unerheblich ist und gerne vernachlässigt wird. Mit einem schwarzen, quadratischen Pappe-Kartonstück mit ca. 6cm Seitenlänge wird in ca. 40 cm Abstand vom Modul die Solarzelle von der direkten Strahlung abgeschirmt, d.h. der Schatten der Pappe deckt die Solarzelle exakt ab, so dass kein direktes Sonnenlicht auf die Solarzelle fällt. Mit gezogenen Verbindungssteckern misst man nun den Kurzschlussstrom mit einem Amperemeter und bestimmt, wie in Exp. 8 beschrieben, die Bestrahlungsstärke S des diffusen Licht des hellen Himmels. Diese ergibt in Addition mit der direkten Strahlung der Sonne die Globalstrahlung.

12.20 Absorption der Sonnenstrahlung durch Bewölkung I, II

Die Bewölkung absorbiert die Sonnenstrahlung erheblich, während an wolkenlosen Tagen Bestrahlungsstärken von 1000 W/m^2 gemessen werden, kann sie bei dichter Bewölkung an trüben Tagen bis 10 W/m^2 absinken. An wechselhaft bewölkten Tagen mit sonnigen Abschnitten kann die Bestrahlungsstärke innerhalb von Minuten erheblich schwanken. Im SUSE- PV- Handbuch finden sich im Kapitel 5 Grafiken mit Messwerten von verschieden bewölkten Tagen. Zur Messung wird das Modul SUSE 4.2 mit Stativmaterial im Freien so aufgestellt, dass die Zelle horizontal ausgerichtet ist und bei gezogenen Kurzschlusssteckern mit einem Amperemeter der Kurzschlussstrom gemessen, der proportional zur Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts ist und der wie in Experiment 8 dargestellt ist, einfach in die Werte der Bestrahlungsstärke in W/m^2 umzurechnen ist. Durch Vergleich verschiedener Bewölkungsarten mit dem Wert wolkenloser Tage lässt sich die Absorption verschiedener Wolkenstrukturen bestimmen.

12.21 Langzeitmessung der Globalstrahlung mit PC- Interface II, III

Die stark schwankenden Bestrahlungsstärken der Globalstrahlung – bedingt durch Bewölkung oder Sonnenstand- lässt sich mit Langzeitmessungen mit einem PC- Interface oder mit einem Datenlogger experimentell gut ermitteln und graphisch darstellen, wie es nebenstehende Grafik zeigt: Auf der x- Achse ist die Zeit von 0-22 Uhr aufgetragen, auf der y- Achse die Bestrahlungsstärke von 0 bis 1000 W/m^2 . Bis ca. 9.30 Uhr steigt die Bestrahlungsstärke auf der nach Süden orientierten Solarzelle des Moduls SUSE 4.2 bei unbewölktem Himmel stark an, bis eine dunkle Wolkenfront die Bestrahlungsstärke von ca. 750 auf 150 W/m^2 reduziert. Für diese Messungen wird SUSE 4.2 an ein PC- Interface- System oder einen Datenlogger angeschlossen, der so eingestellt wird, dass der Kurzschlussstrom jede Minute einmal gemessen und gespeichert wird. Mit intern programmierter Umrechnung ($990 \text{ mA} = 1000 \text{ W/m}^2$) kann dann direkt die Bestrahlungsstärke S in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt werden.



12.22 Nachweis von sinusförmig schwankender Lichtintensität von Glüh- oder Halogenlampen beim Betrieb mit Wechselspannung II, III

Glühlampen und Halogenlampen, die mit Wechselstrom betrieben werden, senden keine konstante Lichtstrahlung aus, sondern pulsierendes Licht, welches mit doppelter Frequenz der Stromquelle schwankt. Mit der Solarzelle des Moduls SUSE 4.2 lässt sich diese pulsierende Lichtintensität nachweisen. Da der Kurzschlussstrom der Solarzelle streng proportional zur Bestrahlungsstärke ist, wird dieser auch pulsierend schwanken. Man verbindet die Pole der Solarzelle mit einem 10Ω - Widerstand und gibt den Spannungsabfall auf den y-Eingang eines Oszilloskops. Auf dem Bildschirm kann man dann die pulsierende Bestrahlungsstärke der Lichtquelle erkennen.

12.23 Nachweis des quadratischen Abstandsgesetzes der Lichtstrahlung punktförmiger Lichtquellen. II, III

Die Lichtintensität einer punktförmigen Lichtquelle nimmt nach außen quadratisch ab. Diese Abhängigkeit lässt sich mit dem Modul SUSE 4.2 experimentell nachweisen. Man baut als Lichtquelle eine Glüh- oder Halogenlampe (ohne Reflektor!) auf (optimale Lampe: Halogenlampe 50W) und stellt das Modul SUSE 4.2 in ca. 30 cm Abstand auf. Der Kurzschlussstrom wird – bei gezogenen Verbindungssteckern- mit einem Amperemeter gemessen und wie im Exp. 8 dargestellt, in die Bestrahlungsstärke umgerechnet. Nun wird das Modul in Abständen von 2 cm entfernt und jeweils punktweise die Kurzschlussstromstärke gemessen. Die Bestrahlungsstärke S verringert sich quadratisch zum Abstand (der am Ort der Glühlampe beginnt!).



Photovoltaik-System SUSE

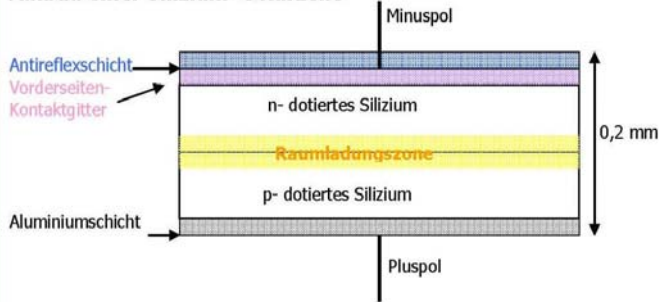
innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

Solarthermiesystem Wärme von der Sonne



13. Aufbau und Funktion einer Silizium- Solarzelle (Niveaustufe 2- Klasse 8/9)

Aufbau einer Silizium- Solarzelle



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.

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 0,5 – 0,61 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.

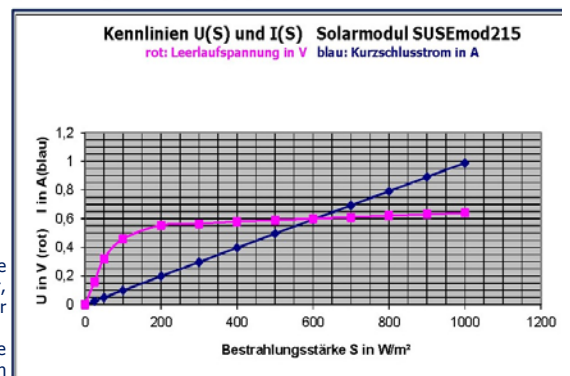


Rechts: Die U(S)- Kennlinie (rot) und die I(S)- Kennlinie (blau) der SUSE- Solarzelle SUSEmod215.

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.





**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.

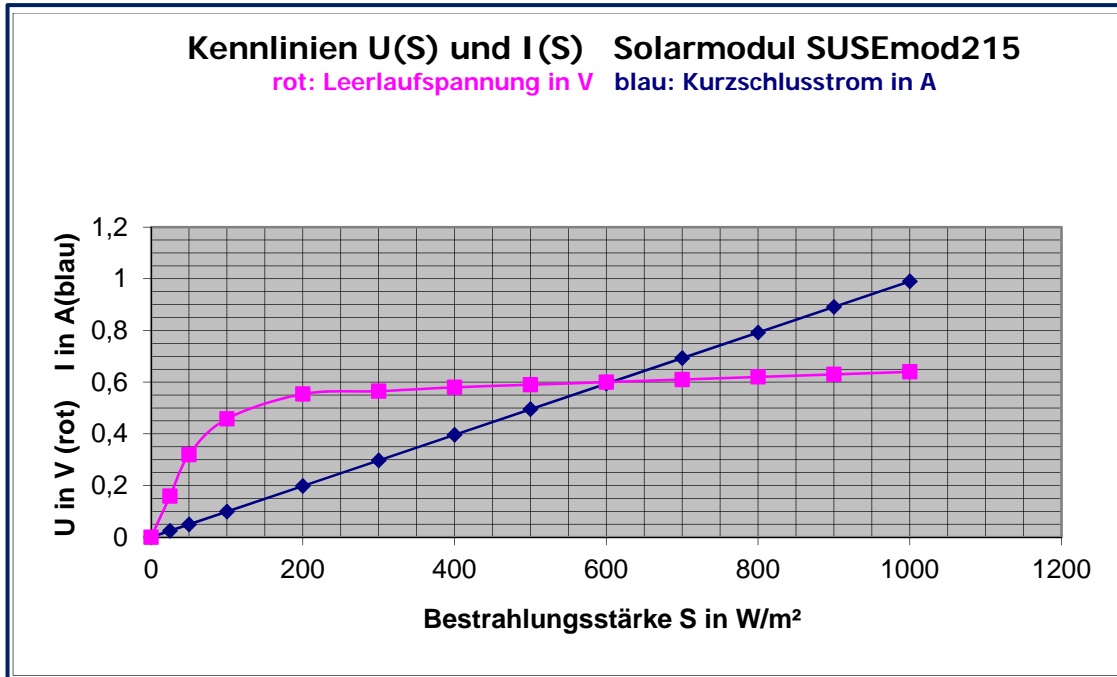
Technische Daten bei einer Einstrahlung von 1000 W/m², T = 25°C, AM = 1,5 Toleranz 2 %

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) <small>Maximum Power Point</small>
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 SUSEmod2

1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität

(Bestrahlungsstärke S in W/m^2)

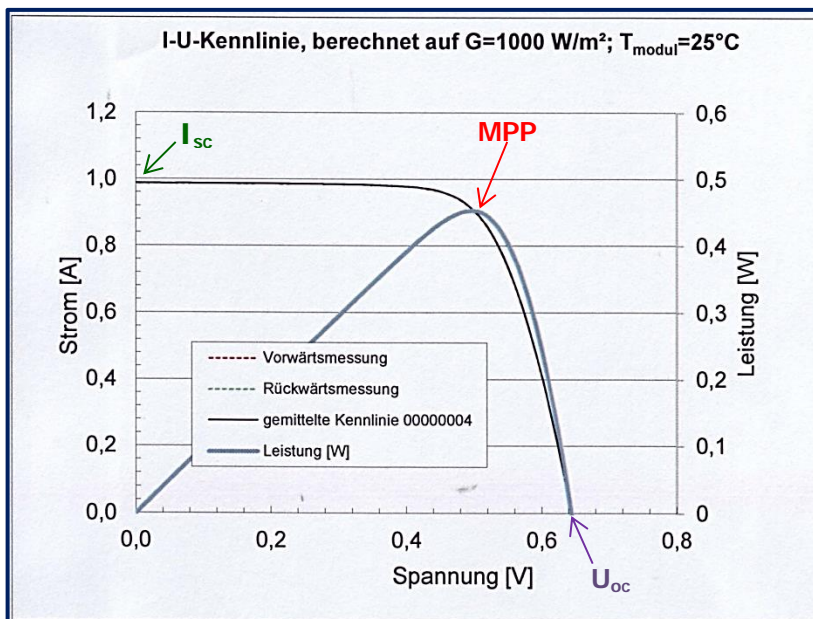


Die Leerlaufspannung U_{oc} (e- Funktion!) ist 0 bei totaler Dunkelheit, erhöht sich stark bei niedrigen Bestrahlungsstärken und wächst dann nur noch langsam bis zum Maximalwert 0,64 V bei 1000 W/m^2 (strahlender Sonnenschein bei blauem Himmel, Solarzelle zur Sonne hin ausgerichtet).

Der Kurzschlussstrom I_{sc} ist eine Ursprungsgerade und wächst linear von 0 bei totaler Dunkelheit auf 0,9 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!

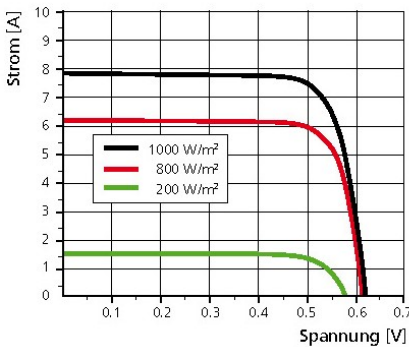
3.1

3.2

3.3

Intensitätsabhängigkeit

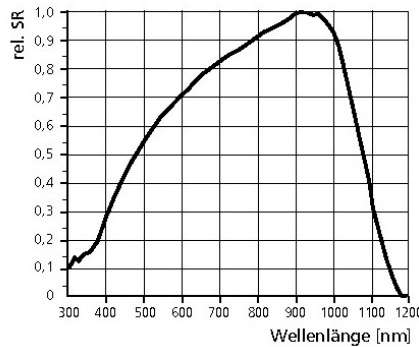
IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

Spektrale Empfindlichkeit

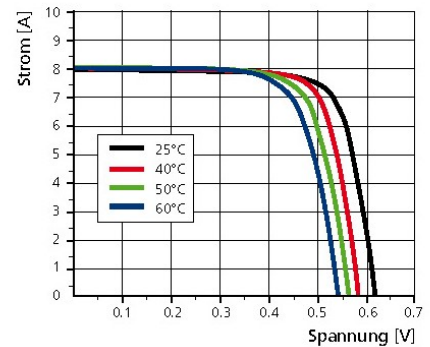
Spektrale Empfindlichkeit



Kennlinie der spektralen Empfindlichkeit.

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 eingestrahlenen 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. $1,1 \text{ eV}$, 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: $I_{sc} = c * S$ $c = \text{const.}$

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

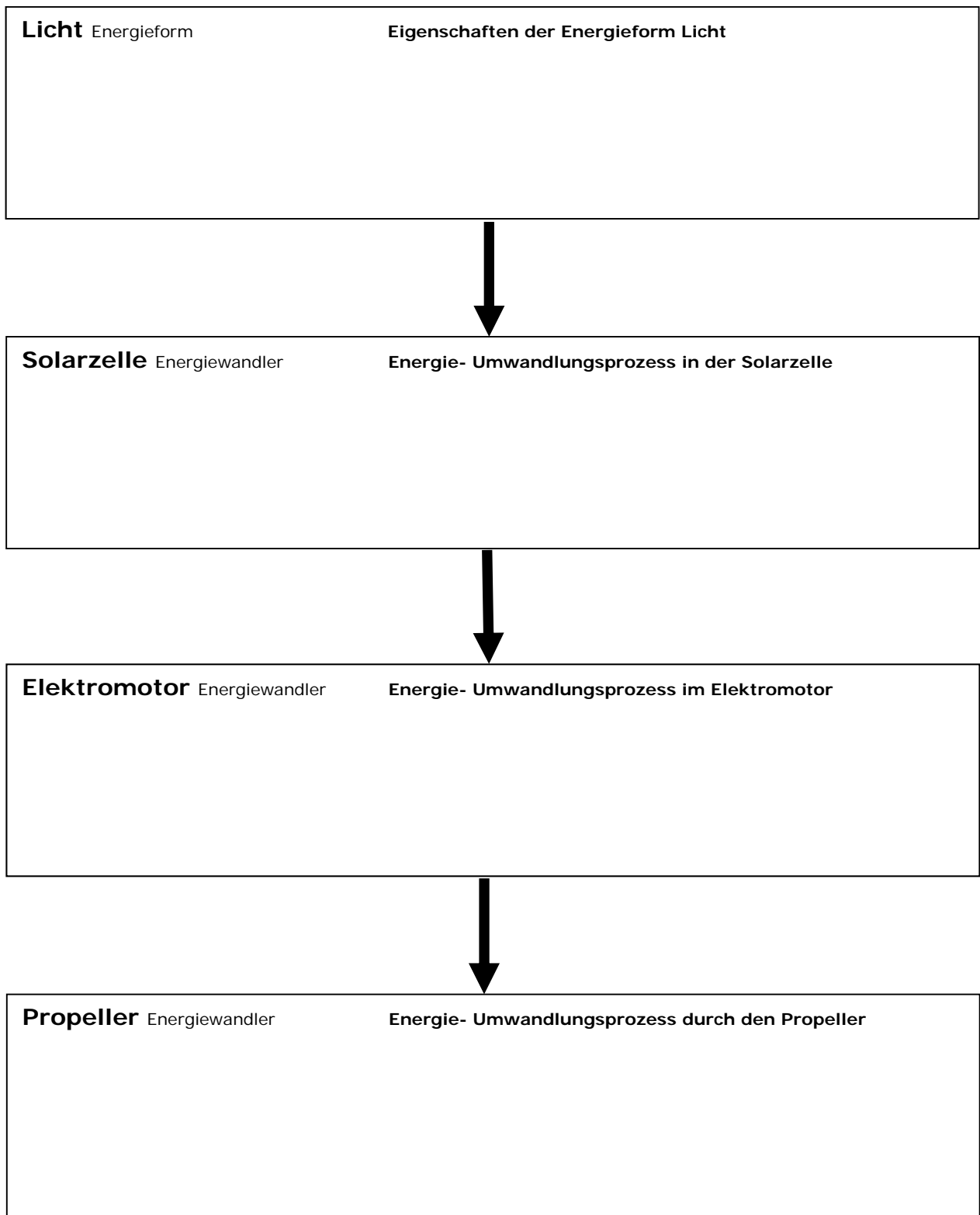
Technische Daten des Solarmotors:

1. Anlaufspannung: 200 mV
2. Anlaufstrom: 10 mA
3. Spannungsbereich: 0,35,0 V
4. Durchmesser Gehäuse: 24,2 mm
5. Durchmesser Achse: 2 mm
6. Achslänge: 10 mm

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

Max. Spannung des Elektromotors 5,0 V! Ein Überschreiten dieser Spannung kann den Motor zerstören

15. Energieumwandlungsprozesse bei Solarzellen, fülle die Energie- Kästen aus:



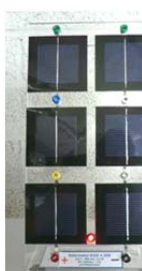
16. Methodische und didaktische Hinweise

- 16.1 Diese umfangreiche Anleitung ist nicht direkt für die Ausgabe an SchülerInnen gedacht, sondern für die Hand der Lehrkraft. Die Lehrkraft kann anhand der Unterrichtsplanung und der geltenden Curricula einzelne Experimente dieser Anleitung für Schüler- Experimente entnehmen und evtl. nach eigenen Vorstellungen umgestalten.
- 16.2 Lösungen und Muster- Messergebnisse erhalten Sie gerne per email von NILS- ISFH.
- 16.3 Die Experimente lassen sich gut in 2er Partnergruppen durchführen, so lassen sich auch die Ergebnisformulierungen in Diskussionen gemeinsam erstellen.
- 16.4 Das NILS- ISFH- Team unterstützt Sie bei der Planung einer Unterrichtseinheit aus dieser Anleitung, email: nils@isfh.de, auch bei Details zu den Experimenten.
- 16.5 Für Experimente im Innenraum eignet sich optimal das Grundgerät SUSE 4.0 mit Halogenstrahler 120 W sowie der Overheadprojektor. Auf dessen Glasplatte haben wir meist eine Bestrahlungsstärke von 7001000 W/m². Halogenstrahler sind als Lichtquelle weniger gut geeignet, da sie das falsche Lichtspektrum abstrahlen (zu wenig rot im Spektrum, zu viel blau!)
- 16.6 Die betreuende Lehrkraft sollte vor dem Einsatz der Experimente im Unterricht oder bei Schulprojekten alle Experimente einmal selbst durchführen, um eine fachkompetente experimentelle Sicherheit zu erlangen. Gerne sendet das NILS- Team Ihnen per email Muster-Ergebnisse der Experimente zu.
- 16.7 Verwenden Sie bei den Experimenten handelsübliche Multimeter, Spannungen sollten im Messbereich 20V DC gemessen werden, der Kurzschlussstrom im Messbereich 10A DC, kleinere Strommessbereiche haben einen zu hohen Innenwiderstand und verfälschen die Ergebnisse. Nur im Innenraum muss bei normaler Raumbeleuchtung der Messbereich 200 mA oder 20 mA verwendet werden.
- 16.8 Bitte achten Sie darauf, dass die SchülerInnen die orange gerahmten Kästen sorgfältig mit selbst formulierten Ergebnissen ausfüllen und diese im Forum vergleichend diskutieren.
- 16.9 Aufgrund der geringen Spannung (ca. 0,6 V) lassen sich mit einer Solarzelle nur Solarmotoren betreiben, weitere Geräte, z.B. LED- Module benötigen höhere Spannungen, die nur mit Reihenschaltung mehrerer Module zu erreichen sind.
- 16.10 Die Plexiglasträger lassen sich problemlos mit Brillenputztüchern oder handelsüblichen Glasreinigern säubern.
- 16.11 Für weiterführende Experimente mit Solarmodulen empfehlen wir das Experimentiergerät SUSE 4.3RB mit 6 Solarzellen oder das Solarmodul SUSE 4.51 mit 18 Solarzellen mit entsprechendem Zubehör



SUSE 4.2 auf Grundgerät SUSE 4.0

Viel Freude und fachliche Kompetenzentwicklung bei Experimentieren mit SUSE 4.2!



SUSE 4.3RB

SUSE 4.51

