



# SUNdidactics

SolarEnergyDidactics  
SolarEducation  
SolarEngineering  
Photovoltaics + Solarthermal

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung  
innovative solar- systems for school, college, technical education

NILS ISFH

Kooperationspartner  
cooperation partner  
Lernwerkstatt NILS-ISFH  
am Institut für Solarenergieforschung  
ISFH  
An- Institut der Leibniz Universität  
Hannover  
Solartechnik  
Solardidaktik  
Solare Wissenschaft  
Solar technology Solar didactics  
Solar science

Photovoltaik-  
System  
SUSE

Solartechnik  
Experimentiergeräte  
Solare Experimente  
von der Grundschule  
bis zum Abitur

Solar technology  
Experimentation devices  
Solar experiments

BNE

Bildung  
für  
nachhaltige  
Entwicklung

Education  
for  
Sustainable  
Development

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

## SUNdidactics Solar Systems Hildesheim, Germany

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

### Experimente mit dem Solarmodul

# SUSE 5.22

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

Verbindung über Schalter

Geeignet für die Klassenstufen 10 - 12

### Experimentiergerät:

## SUSE 5.22

### Zusatzgeräte optional:

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



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



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

### A Gerätebeschreibung:

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

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

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

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

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



## B Physikalisch – technische Grundlagen

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

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

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

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

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

Bei Bestrahlung der Solarzelle mit Licht entsteht die elektrische Spannung am **p-n- Übergang** des Halbleiters. Der p-n- Übergang ist nur ca. 5  $\mu\text{m}$  unterhalb der Solarzellen- Oberfläche, um die Lichtabsorption sehr gering zu halten.

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

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

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

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

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

Quantenenergie der Photonen höher als der Bandabstand, so wird die restliche Energie in thermische Energie im Halbleiterkristall umgewandelt, es entsteht Wärmeenergie. Das ist leider ein unvermeidbarer Verlust. Daher ist der Wirkungsgrad umso geringer, je kürzer die Wellenlänge ist. Wird eine Solarzelle mit violetterem oder blauem Licht bestrahlt, ist ihr Wirkungsgrad erheblich geringer als mit Bestrahlung von rotem oder IR- Licht (bis 1100 nm). Der Wirkungsgrad einer Solarzelle bezogen auf das gesamte Lichtspektrum der Sonne liegt je nach Zelltyp und Qualität zwischen 17% und 26%.

Bei Zurückfallen von Elektronen vom Leitungsband zurück ins Valenzband strahlen Solarzellen IR- Licht ab, welches man mit einer IR- Kamera aufnehmen kann, sie wirkt dann wie eine LED. Dieses Phänomen wird zur Qualitätsmessung an Solarzellen verwendet (**Elektrolumineszenz**).

Die Höhe der **elektrische Spannung U** (Leerlaufspannung  $U_{oc}$ ) einer Solarzelle hängt vom Halbleitermaterial, der Qualität der Solarzelle und von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) ab.

Die Höhe der **maximalen Stromstärke I** (Kurzschlussstrom  $I_{sc}$ ) hängt vom Halbleitermaterial, der Qualität der Solarzelle, der Solarzellenfläche und von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) ab.

Damit hängt auch die elektrische **Leistung P**, die die Solarzelle abgeben kann von den oben genannten Faktoren ab.

Bei Verschattungen einer Solarzelle reagieren der Kurzschlussstrom und die Leistung sehr empfindlich leistungsmindernd, die Spannung reagiert auf Abschattung weniger empfindlich.

Bei einer Reihenschaltung von 2 Solarzellen addiert sich deren Spannung, die Stromstärke bleibt gleich, bei einer Parallelschaltung addiert sich die Stromstärke, die Spannung bleibt gleich.

Alle wesentliche Parameter und Abhängigkeiten können mit diesem Solarmodul PV 5.22 in Experimenten aufgenommen werden.

## **C Experimente mit SUSE 5.22**

## **Experimente C1, C2, C3**

**Experimente C1: Spannung, Stromstärke, Leistung, Lichtintensität S** Seiten 3 - 10

**Experimente C2: Wirkungsgrad, Stromdichte** Seiten 10 - 13

**Experimente C3: Kennlinienaufnahmen** Seiten 13 - 15

### **Hinweise zu den Experimenten**

Die Experimente eignen sich in der vorliegenden Form für Schülerinnen und Schüler ab Klassenstufe 10. Für die Experimente werden die im Kopf auf S.1 aufgeführten Zusatzgeräte benötigt, sinnvoll ist es, bei ungeübten Teilnehmern das Messen mit einem digitalen Multimeter vorher zu üben.

Je nach Forschungsdrang und Motivation könne auch bestimmte Experimente ausgelassen werden und nur ausgewählte Experimente durchgeführt werden.

### **C1.1 Experimente zur Leerlaufspannung $U_{oc}$ einer Solarzelle**

Die Leerlaufspannung ist die Spannung, die man eine einer beleuchteten Solarzelle messen kann, wenn an sie kein Verbraucher angeschlossen ist, daher „Leerlaufspannung“ (englisch open circuit, abgekürzt oc). Bei voller Sonneneinstrahlung (strahlender Sonnenschein, blauer Himmel = Bestrahlungsstärke 1000 W/m<sup>2</sup>) liegt die Leerlaufspannung einer Silizium Solarzelle bei 0,6 – 0,67 V, ein kleiner Wert, der sich durch Reihenschaltung vieler Solarzellen auf hohe Werte von mehreren hundert Volt steigern lässt.

Wir verwenden zur Spannungsmessung ein **Multimeter im Messbereich 20 V DC, d.h. wir können hier Gleichspannungen (DC) bis max. 20 V messen.**

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

**Die Leerlaufspannung  $U_{oc}$**  (Die elektrische Spannung der unbelasteten Solarzelle):

Der Wert sollte im Sonnenlicht zwischen 0,6 und 0,65 V liegen, bei bedecktem Himmel 0,55- 0,6 V, bei gleicher Bestrahlungsstärke sollten alle Solarzellen, unabhängig von ihrer Fläche die gleiche Spannung haben, der Standard-Test-Wert wäre 0,65 V). Kleine Differenzen sind Qualitätsunterschiede.

**Zum Vergleich: Die Leerlaufspannung einer Mignonzelle (Batterie) ist 1,5 V.**

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

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

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

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

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

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

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

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

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

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

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

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

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

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

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

### C1.2.1 Der Kurzschlussstrom einer Solarzelle

Wir ziehen den Verbindungsstecker und messen nur an einer Solarzelle.

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

**Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:**

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

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

**Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:**

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

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

**Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:**

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

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

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

(In Worten: Leistung = Leerlaufspannung \* Kurzschlussstrom \* 0,8)  
Der Faktor 0,8 ergibt sich aus der P(U)- Kennlinie)

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

#### C1.3.1 Die Leistung P einer Solarzelle:

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

**Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:**

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

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

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

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

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

Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:

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

Der **Kurzschlussstrom ist direkt proportional zur Bestrahlungsstärke S des Lichts** und beträgt nach Messungen des Herstellers unserer SUSE- Solarzelle SUSEmod218 genau **1,025 A** bei einer Lichtintensität von **1000  $W/m^2$**  (strahlender Sonnenschein bei blauem Himmel). Mit der Messung des Kurzschlussstroms können wird also genau die **aktuelle Intensität = Bestrahlungsstärke des Lichts  $S_x$**  bestimmen.

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

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

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

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

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

**Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier:**

## Experimente C2: Wirkungsgrad, Stromdichte

### Hinweise zu den Experimenten C2:

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

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

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

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

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

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

## C2.1 Experimente zur Wirkungsgradbestimmung

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

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

### Messungen:

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

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

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

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

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

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

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

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

### Berechnung der Bestrahlungsstärke S

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

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

**Erhaltene Bestrahlungsstärke  $S_x = \dots\dots\dots W/m^2$**

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

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

**Die Fläche A der Solarzelle beträgt:.....cm<sup>2</sup>**

**Somit erhält die Solarzelle vom Licht eine Leistung  $P_L = \dots\dots\dots W$**

**Der Wirkungsgrad ergibt sich nun aus der Gleichung:**

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

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

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

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

Stromdichte j in mA/cm<sup>2</sup>

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

Messung im strahlenden Sonnenschein oder auf dem Overhead- Projektor bei S = 1000 W/m<sup>2</sup>

Die Stromdichte j gibt an, wieviel Stromstärke in mA ein 1 cm<sup>2</sup> großes Stück der Solarzelle produziert, je mehr, desto besser !

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

1. Messen Sie den Kurzschlussstrom **genau bei einer Einstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup>.**

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

2. Bestimmen Sie genau die Fläche A der Solarzelle

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

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

Die Stromdichte der verwendeten Zelle ist  $\dots\dots\dots \text{mA/cm}^2$

Die Qualität der SUSE- Solarzelle SUSEmod218 ist  $\dots\dots\dots$   
Sehr gut – gut – mittel- schlecht

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

### Hinweise zu den Experimenten C3

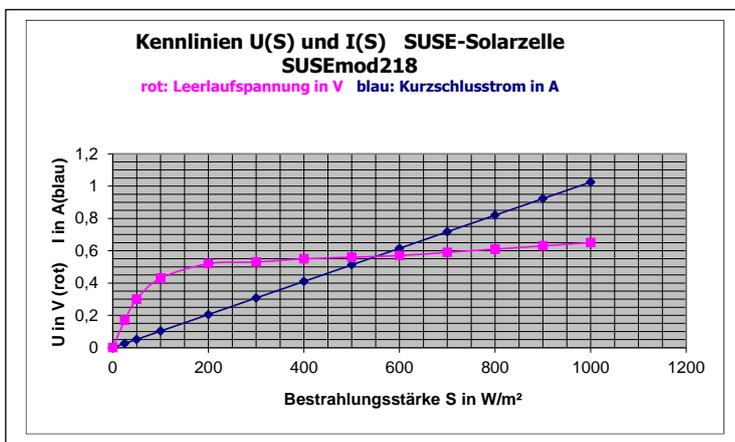
Die Experimente sind in der vorliegenden Form für Schülerinnen und Schüler ab Klassenstufe 10 gedacht, es sind fachliche Voraussetzungen notwendig, die bei den Experimenten I mit SUSE 5.22 erarbeitet werden.

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

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

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

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



Die Stromstärke ist direkt proportional zur Lichtintensität (Bestrahlungsstärke  $S$ ), eine Ursprungsgerade, erreicht bei  $1000 \text{ W/m}^2$   $1025 \text{ mA}$ , die Spannung dagegen ist eine Exponentialkurve, die bei ganz geringer Helligkeit stark ansteigt und dann im Bereich zwischen mittlerer und hoher Lichtintensität zwischen  $0,5 \text{ V}$  und  $0,6 \text{ V}$  langsam ansteigt und bei maximaler Helligkeit bei  $1000 \text{ W/m}^2$   $0,65 \text{ V}$  erreicht.

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

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

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

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

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

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

**Berechnung der Bestrahlungsstärke S:**

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

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

## Die Messungen

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

### C3.1.1 Im Freien

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

Die Werte tragen wir in die Tabelle ein.

### C3.1.2 Im Laborraum

befestigen wir das Modul SUSE 5.22 auf der optischen Bank SUSE 5.0 und verwenden einen Halogenstrahler 500 W als Lichtquelle, der Halogenstrahler sollte waagrecht abstrahlen und die beiden Zellen gleichmäßig beleuchten. Zu Beginn stellen wir den Strahler so nah an das Modul, dass der Kurzschlussstrom 1,025 A ist, dann ist die Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) genau 1000 W/m<sup>2</sup>.

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

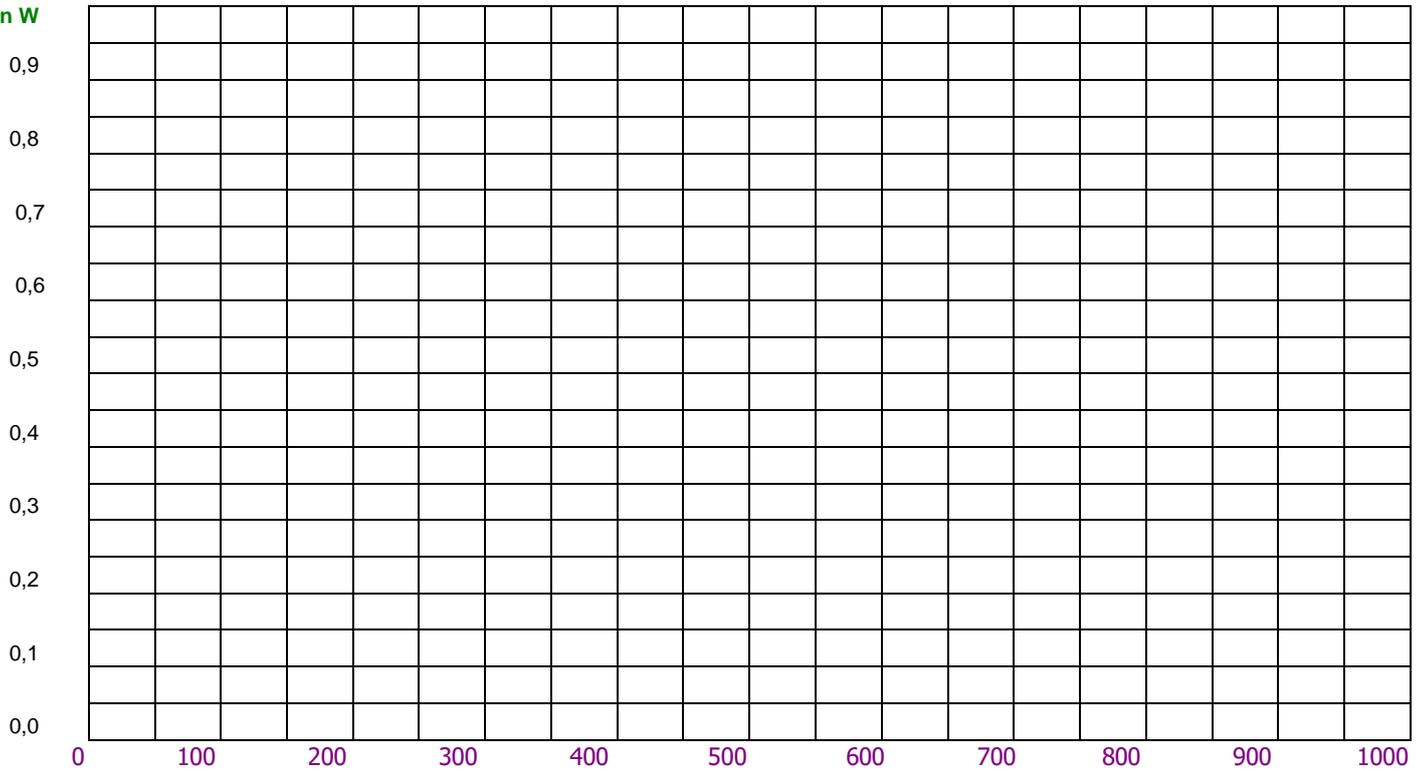
Dann entfernen wir den Strahler in geringen Abständen vom Modul, dadurch sinkt die Bestrahlungsstärke und messen jeweils Spannung und Stromstärke und berechnen daraus die weiteren Tabellenwerte.

## Die Messwerttabelle

	geringe Lichtintensität <span style="font-size: 2em;">→</span> hohe Lichtintensität										
<b>I<sub>sc</sub> sollte ungefähr sein in A</b>	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9
<b>genauer Messwert I<sub>sc</sub> in A</b>											
<b>Spannung U<sub>oc</sub> in V</b>											
<b>Bestrahlungsstärke S in W/m<sup>2</sup></b>											<b>1000</b>
<b>Leistung P der Solarzelle in W</b> <small>P = U*I*0,8</small>											

U in V  
I in A  
P in W

## 5. Koordinatensystem zum Zeichnen der 3 Graphen



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

y- Achse:     **in rot eintragen: Spannung  $U_{oc}$  in V**  
                  **in blau eintragen: Stromstärke  $I_{sc}$  in A**  
                  **in grün eintragen: Leistung  $P$  in W**