



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

Das Solarmodul SUSE 5.15

SUSE 5.15 ist ein spezielles Kennlinien- Solarmodul für folgende Experimente:

- **Aufnahme der I(U) und der P(U)- Kennlinie (Hellkennlinie) einer Solarzelle**
- **Aufnahme der I(U) Kennlinie (Dunkelkennlinie) einer Solarzelle**
- **Bestimmung der Maximum- Power- Point (MPP) einer Solarzelle**
- **Bestimmung des Wirkungsgrades η einer Solarzelle**

SUSE 5.15



Das Photovoltaik- Experimentiergerät SUSE 5.15 ist ein Spezialgerät für Experimente zur Aufnahme der Hellkennlinie I(U)-Kennlinie, P(U) - Kennlinie und Bestimmung des MPP (Maximum- Power- Point) und des Wirkungsgrades einer Solarzelle sowie zur Aufnahme der Dunkelkennlinie (Diodenkennlinie) der Solarzelle.

Im Sonnenlicht oder in Verbindung mit einer 12 V- Halogenlampe 35/50 W (**SUSE 5.16**) oder anderer geeigneter Lichtquellen können U-I-Kennlinien und Kennlinienscharen sowie die MPP- Kurven P(U) für verschiedene Bestrahlungsstärken S experimentell bestimmt werden.

Mit der abgedunkelten Zelle kann die Dunkelkennlinie aufgenommen werden und bei Bestrahlung die Verschiebung der Dunkelkennlinie in den 4. Quadranten beobachtet werden.

Die Messungen lassen sich mit Multimetern, mit einem Oszilloskop oder unter Verwendung eines computergesteuerten Messwertsystems (CassyLab o.ä.) mit hoher Genauigkeit schnell PC- gesteuert durchführen.

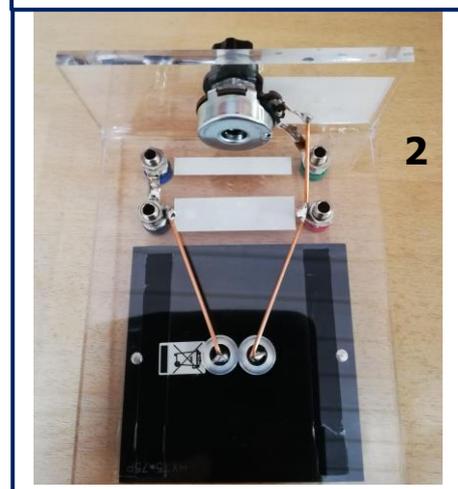
Foto 1 rechts oben:

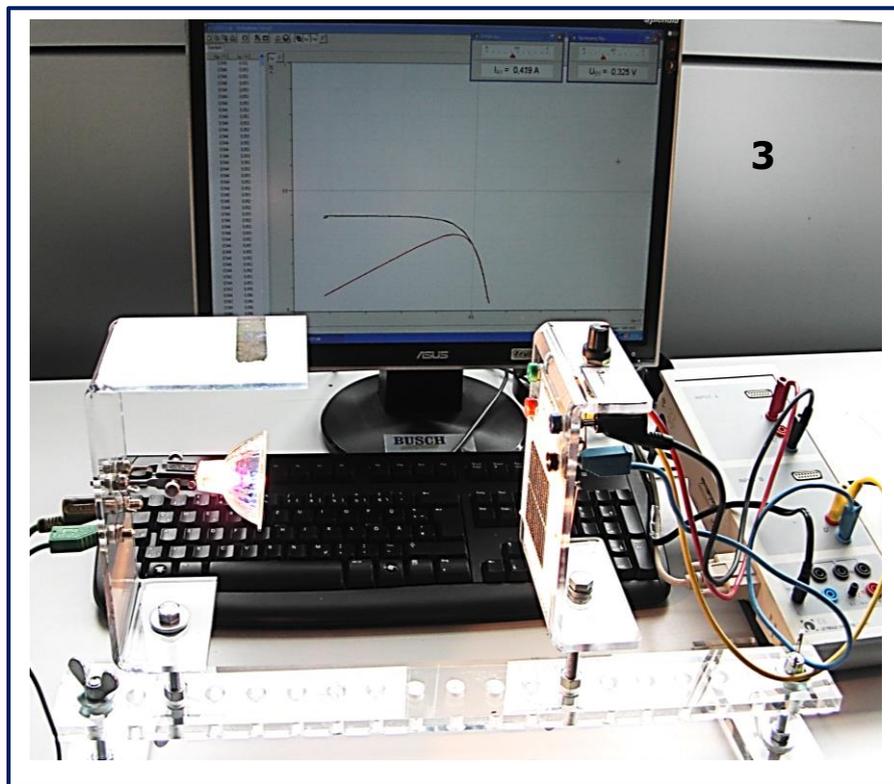
In der Mitte des Gerätes befindet sich die Solarzelle SUSEmod218 (0,65 V/1025 mA), darüber das schwarz- rote Buchsenpaar zur Messung der Solarzellenspannung, das grün- blaue Buchsenpaar zur Messung des Laststroms, ganz oben das Last- Potenziometer mit dem schwarzen Drehknopf. Die Leitungsführung erfolgt mit 1,5mm² dicken Cu- Leitern, um die ohmschen Widerstände zu minimieren!

Foto rechts unten:

Das Foto zeigt den Innenaufbau des Gerätes mit den Cu- Leitern 1,5 mm². Unten ist die Innenseite des Solarmoduls SUSEmod218 mit den Lötkontakten, links -, rechts +. Der Minusleiter geht zu den beiden Buchsen schwarz und blau, der Plusleiter zur roten Buchse und zum Schleiferanschluss des Potenziometers. Der Endanschluss des Potentiometers ist mit der grünen Buchse verbunden.

Um Kabelschatten auf der Solarzelle zu vermeiden, sollten die Stecker der Laborkabel von der Rückseite in die Buchsen gesteckt werden. Auf Seite 2 ist in Foto 3 der Messaufbau dargestellt:





Messaufbau zur Kennlinienaufnahme

Das Foto zeigt den Messaufbau mit dem Kennlinienmodul SUSE 5.15 auf einer optischen Bank mit dem Halogenstrahler **SUSE 5.16**, dessen grün- schwarzes Kabelpaar geht an ein Netzgerät 12V/>3A. Zur automatischen Messung wird hier das Interface CassyLab (ganz rechts im Foto) eingesetzt. In den U- Eingang von CassyLab gehen das gelbe und das blaue Kabelpaar vom rot- schwarzen Buchsenpaar, in den I- Eingang des CassyLab gehen das rot-schwarze Kabelpaar vom I- Buchsenpaar von SUSE 5.15. Die Halogenleuchte 35W bestrahlt die Solarzelle.

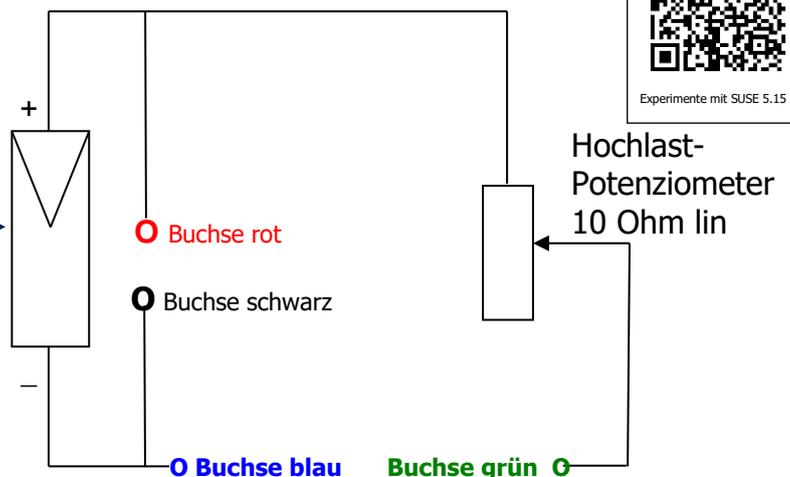
Auf dem Bildschirm des an CassyLab angeschlossenen PC erkennt man in schwarz die I(U)- Kennlinie und in rot die P(U)- Kennlinie mit dem MPP (Maximum- Power- Point) im Maximum der roten Kurve. Die Experimente können auch im „Handbetrieb“ mit 2 Multimetern werden, die Messwertepaare werden dann in eine Tabelle eingetragen und dann händisch oder mit excel o.ä. die Graphen gezeichnet. Das Gerät ist mit dem Stativfuß 8 mm für den Einsatz auf einer optischen Bank **SUSE 5.0** oder für jede schulübliche optische Bank konstruiert. Für die Experimente gibt es eine bei SUNdidactics umfangreiche Versuchsanleitung.

Auf den Folgeseiten finden sich die technischen Daten der verwendeten Solarzelle, der nachstehende QR- Code führt zur Versuchsanleitung



Gerätemaße:
 Länge 290 mm
 Breite 100 mm
 Tiefe 50 mm
 Stativstange 90 mm

**Solarzelle
 SUSEmod
 218**



SUSEmod218- ein leistungsstarkes, hocheffizientes robustes Solarmodul



Das Solarmodul SUSEmod218

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

Modulmaße: 75 x 75 mm

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

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

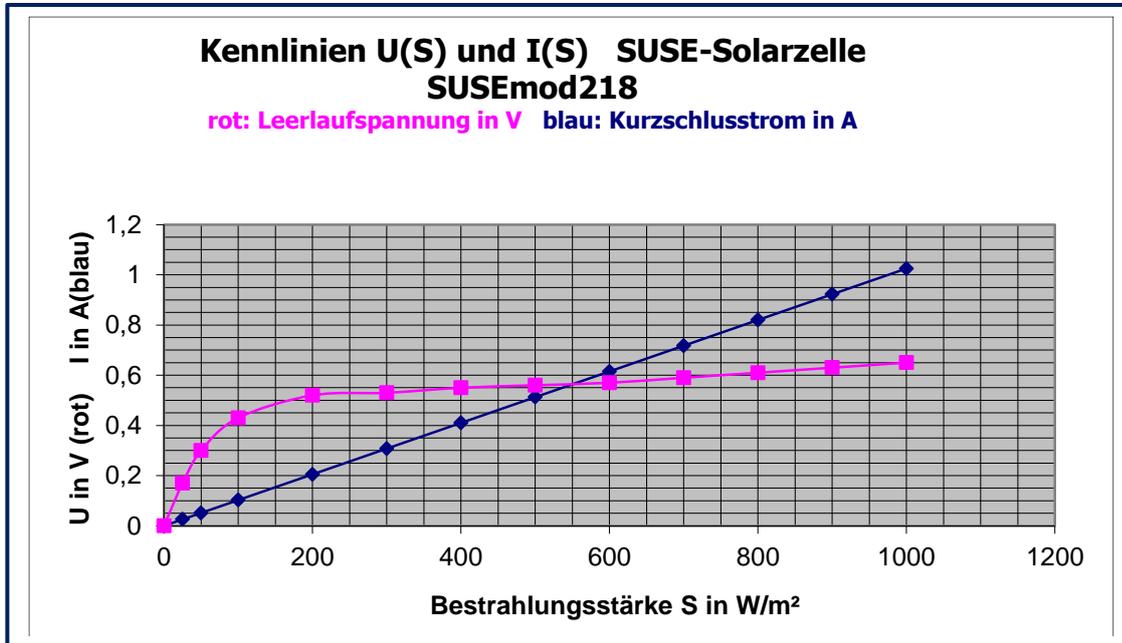
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN- Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

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

Physikalische Größe	Symbol	Zahlenwert	Physikalische Einheit	Bemerkungen
Maße der Solarzelle	s	52 x 52 x 0,18	mm	Quadratische Zelle, 1/9 6-Zoll-Zelle
Fläche	A	27,04	cm ²	1/9 einer 6 Zoll Solarzelle
Leerlaufspannung	U _{oc}	0,656	V	Typisch für Silizium
Kurzschlussstrom	I _{sc}	1,025	A	Proportional zur Lichtintensität S
Spannung im MPP	U _{MPP}	0,507	V	Spannung im (MPP) <small>Maximum Power Point</small>
Kurzschlussstrom im MPP	I _{MPP}	0,942	A	Kurzschlussstromstärke im MPP
Elektrische Leistung	P	0,477	W	Bei S = 1000 W/m ² , AM 1,5, 25°C
Wirkungsgrad	η	19,1	%	Qualitätsmerkmal
Füllfaktor	FF	71	%	FF ist ein Qualitätsmerkmal
Stromdichte	j	38,15	mA/cm ²	j ist ein Qualitätsmerkmal
Temperaturverhalten der Leerlaufspannung U _{oc}	ΔU _{oc}	- 0,36	% /K	Die Spannung mindert sich bei Erwärmung um 0,36% pro 1K
Temperaturverhalten des Kurzschlussstroms I _{sc}	ΔI _{sc}	+ 0,06	% /K	Der Kurzschlussstrom vergrößert sich um 0,06 % pro 1K
Serieller Widerstand	R _{ser}	0,097	Ω	Serieller Widerstand der Solarzelle Widerstand des Si und der Leiter
Shuntwiderstand	R _{shunt}	64,82	Ω	Parallelwiderstand der Solarzelle durch interne Kurzschlüsse im Si

Die Kennlinien der Solarzelle im Modul SUSEmod218

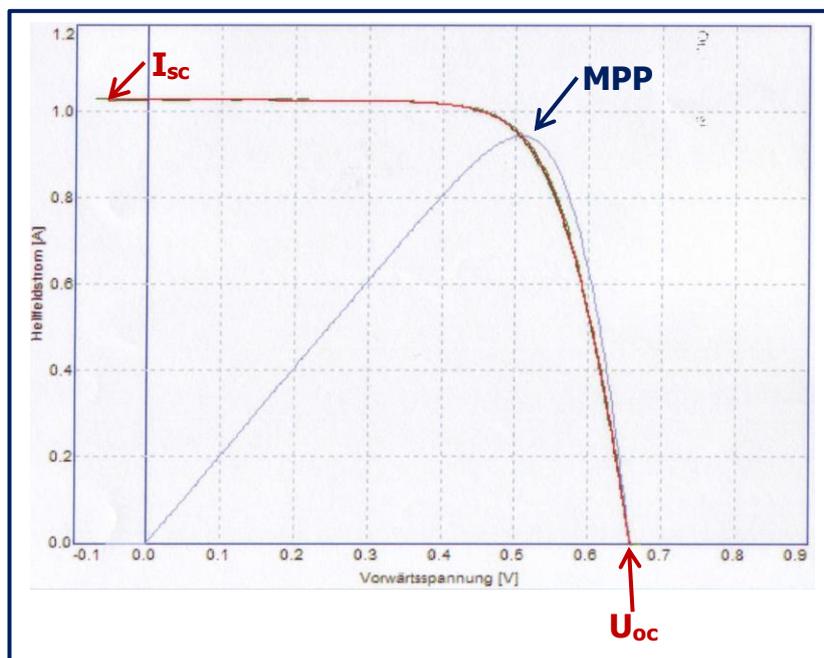
1. **Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)**



Die **Leerlaufspannung U_{oc}** (e- Funktion!) ist 0 bei totaler Dunkelheit, erhöht sich stark bei niedrigen Bestrahlungsstärken und wächst dann nur noch langsam bis zum Maximalwert 0,65 V bei 1000 W/m^2 (strahlender Sonnenschein bei blauem Himmel, Solarzelle zur Sonne hin ausgerichtet).

Der **Kurzschlussstrom I_{sc}** ist eine Ursprungsgerade und wächst linear von 0 bei totaler Dunkelheit auf 1,025 A bei 1000 W/m^2 .

2. **Die $I(U)$ und die $P(U)$ - Kennlinien der Solarzelle SUSEmod218 bei $S = 1000 W/m^2$, $T = 25^\circ C$, AM 1,5**
aufgenommen im Kennlinienlabor des ISFH



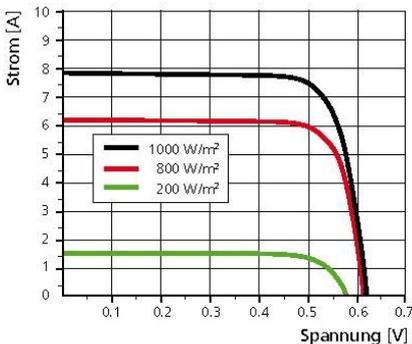
Die **$I-U$ -Kennlinie** zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 und einer Temperatur von $25^\circ C$. Der Schnittpunkt mit der x- Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung U_{oc}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

Die **$P-U$ -Kennlinie** ist die Leistungskurve, ihr Maximum ist der **Maximum- Power- Point**

3. Weitere Daten (für die ganze Solarzelle 156 x 156 mm!), für die Solarzelle 52x 52mm im Modul SUSEmod218 muss die Stromstärke bei 3.1 und 3.3 durch 9 geteilt werden!

3.1 Intensitätsabhängigkeit

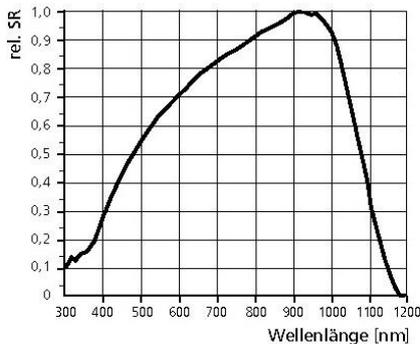
IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

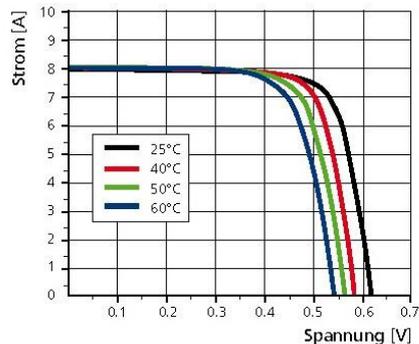
Spektrale Empfindlichkeit



Kennlinie der spektralen Empfindlichkeit.

3.3 Temperaturabhängigkeit

IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Temperaturen.

Der **linke Graph 3.1** zeigt die **Intensitätsabhängigkeit** der **I(U)- Kennlinien** in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke S des eingestrahlt Lichts. (1000 W/m² entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosem Himmel, 0 W/m² ist absolute Dunkelheit).

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

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

Der **rechte Graph 3.3** zeigt die **I(U)- Kennlinie** in **Abhängigkeit von der Temperatur**, man erkennt, dass die Leerlaufspannung sinkt, wenn die Temperatur steigt, der Kurzschlussstrom steigt nur sehr gering bei Temperaturerhöhung (j ist die Stromdichte = Kurzschlussstrom in mA pro cm² Zellenfläche). Das bedeutet auch, dass die elektrische Leistung P der Solarzelle bei Temperaturerhöhung sinkt.

Die Leerlaufspannung U_{oc} einer Solarzelle:
$$U_{oc} = \frac{kT}{e} * \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_s} \right)$$

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

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

U_{oc}= Leerlaufspannung in V
 k = Boltzmann- Konstante in J/K
 T = absolute Temperatur in K
 e = elektrische Elementarladung in As
 I_{sc}= Kurzschlussstrom in A
 I_s = Sättigungsstrom in Sperrichtung (Dunkelstrom) in A
 S = Bestrahlungsstärke S in W/m²