

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

Verschattungsexperimente mit SUSE 5.22

mit Verwendung der optischen Bank SUSE 5.0 und des Halogenstrahlers SUSE 5.16



Notwendige Bauteile:

Optische Bank SUSE 5.0, Solarmodul SUSE 5.22, 1 Halogenstrahler SUSE 5.16, Netzgerät 12V/>3A, 2 Muffen, 6 Laborkabel, CassyLab mit Netzteil, PC oder Laptop mit CassyLab- Software, einige Blätter weißes Schreibpapier DIN A4, einige Bögen Klarsichthüllen DIN A4.

Beim Betrieb von Photovoltaikanlagen (PV) auf Dächern, Fassaden oder im Freiland sind Verschattungen durch Gebäude, Bauwerke, Bäume o.ä. zu vermeiden, da Schatten auf PV- Anlagen den Ertrag an elektrischer Energie erheblich mindern. Bei der Planung von PV- Anlagen sind mögliche Schattenereignisse zu verschiedenen Tages- oder Jahreszeiten vorher zu simulieren, um den Standort möglichst schattenfrei zu gestalten. Besonders im Winterhalbjahr bei tiefstehender Sonne sind Verschattungen ein großes Problem.

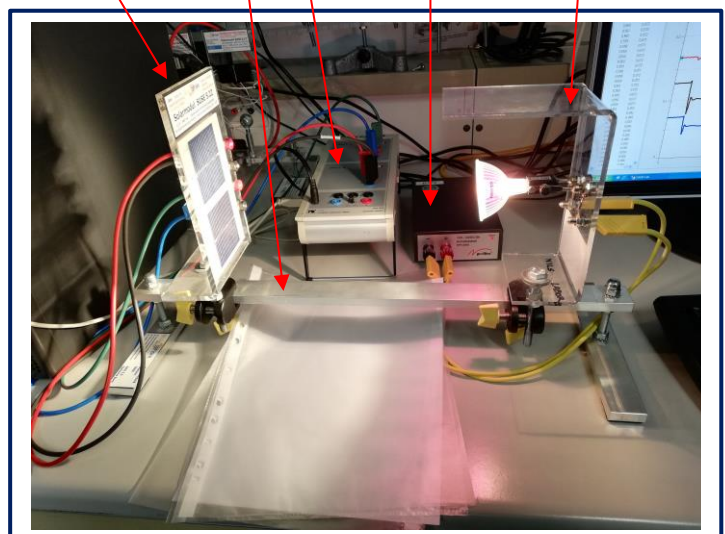
In diesem Experiment mit **SUSE 5.22** als Photovoltaikanlage und **CassyLab** (oder ähnliches Messsystem) können wir das Problem der Verschattung studieren und die Auswirkung auf Spannung, Stromstärke, Leistung analysieren. Die eine Solarzelle auf SUSE 5.22 nehmen wir zur Messung der Leerlaufspannung U_{oc} , die andere Zelle zur Messung des Kurzschlussstroms I_{sc} . Die Leistung als Produkt beider Größen errechnet CassyLab. Als Schattengeber verwenden wir weißes Schreibpapier und Klarsichthüllen. Als Darstellung auf dem Bildschirm wählen wir $U_{oc}(t)$, $I_{sc}(t)$, $P(t)$ in wiederholender Messung, wie Foto 2 zeigt.

Aufbau des Experimentes:

Die Laborkabel sollten immer von der Rückseite in die Buchsen des Moduls SUSE 5.22 eingesteckt werden, um Kabelschatten auf den Solarzellen zu vermeiden!

Wie das **Foto 1** zeigt, sind auf der optischen Bank ein Halogenstrahler **SUSE 5.16** und ein Solarmodul **SUSE 5.22** in ca. 35 - 40 cm Abstand befestigt. SUSE 5.16 wird mit 2 Laborkabeln an ein Netzgerät mit 12 V DC oder AC mit $I > 3A$ angeschlossen. SUSE 5.16 wird in Höhe und Neigung der Lichtquelle so eingestellt, dass beide Solarzellen gleichmäßig bestrahlt werden.

SUSE 5.22 (Version2019) CassyLab Netzteil für SUSE 5.16 SUSE 5.16
 Optische Bank SUSE 5.0



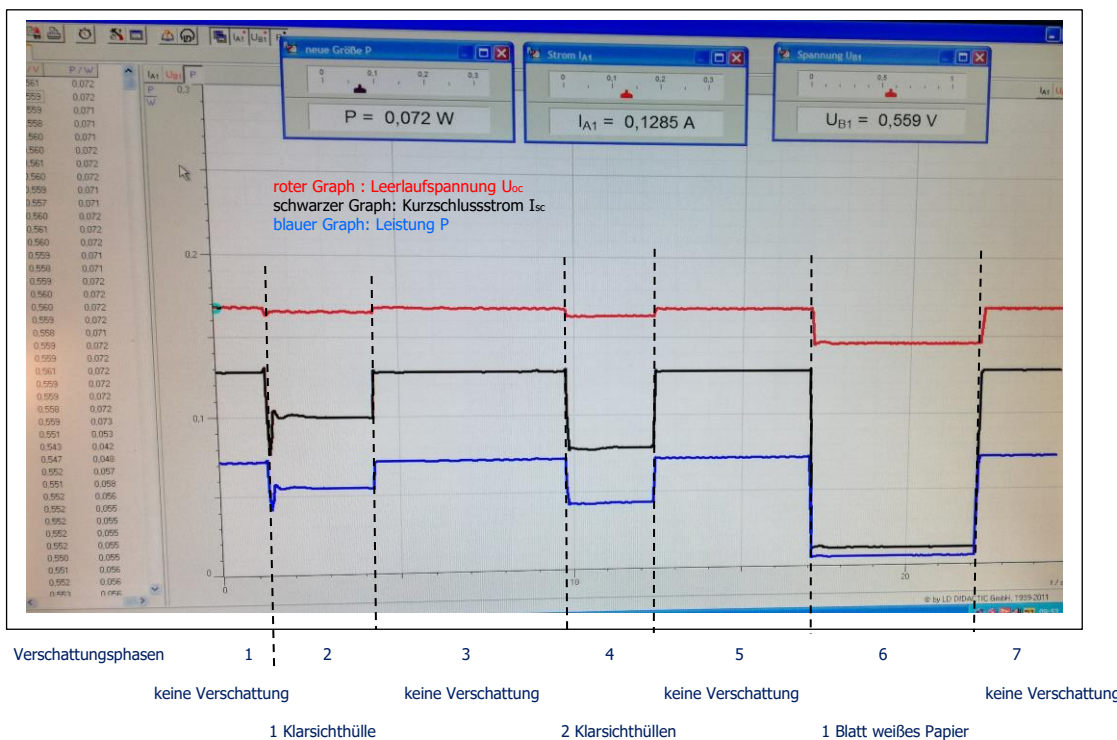
Der Verbindungsstecker wird gezogen (bzw. der Schalter zwischen den Solarzellen wird ausgeschaltet), die Solarzellen sind getrennt.

An der Solarzelle 1 wird die Leerlaufspannung U_{oc} gemessen, von ihren beiden Anschlussbuchsen gehen 2 Laborkabel an den U- Eingang von CassyLab.

An der Solarzelle 2 wird der Kurzschlussstrom I_{sc} gemessen, von ihren beiden Anschlussbuchsen gehen 2 Laborkabel an den I- Eingang von CassyLab.

An einer Solarzelle können diese Größen nicht gleichzeitig bestimmt werden!

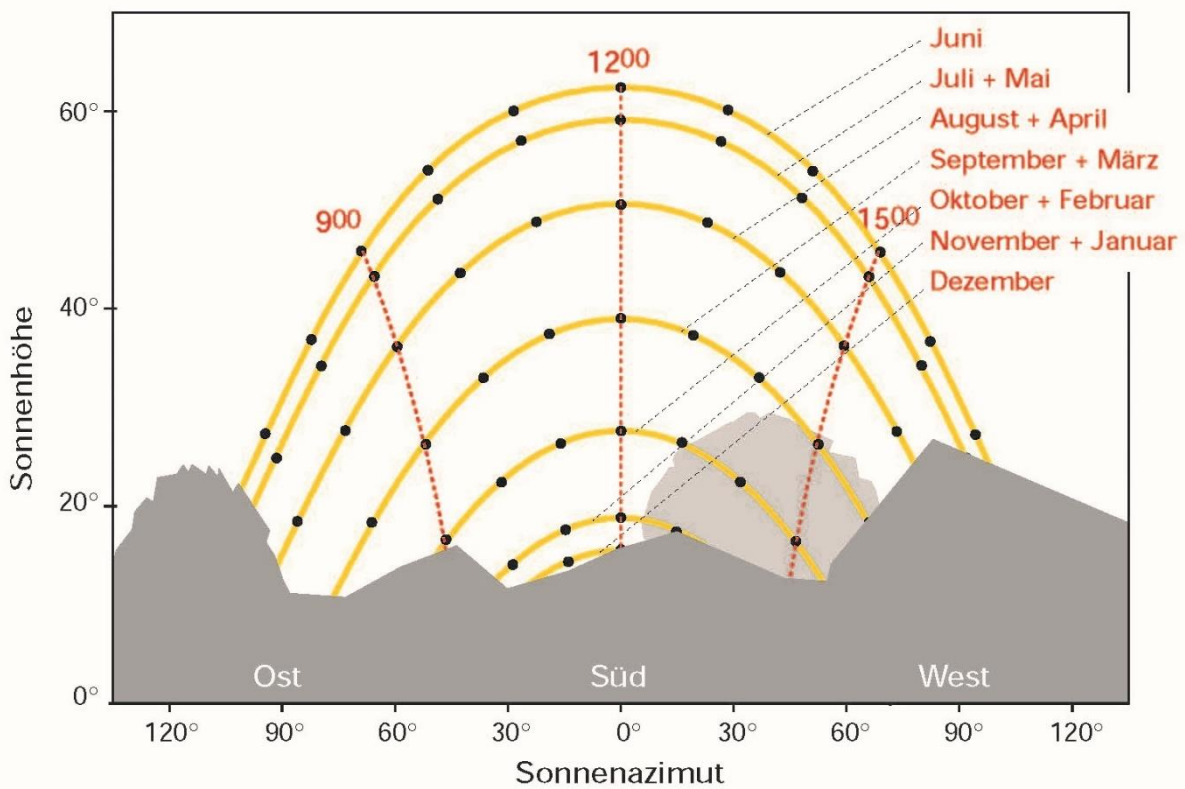
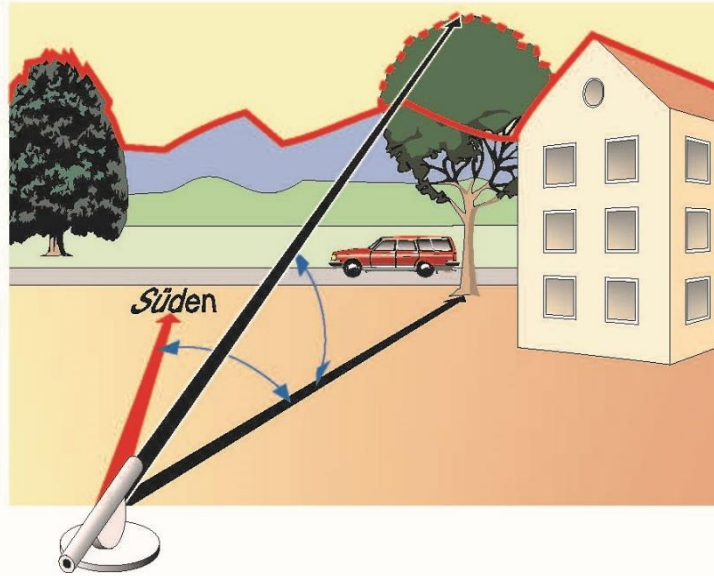
Nun wird CassyLab konfiguriert, gemessen und auf dem PC- Bildschirm dargestellt werden die Funktionen $U(t)$, $I(t)$ und das Produkt $P(t)$, **Foto 2 zeigt den screenshot einer Messung und der Verschattungswirkungen**. Der t- Verlauf wird langsam eingestellt, für eine Bildschirmbreite ca. 20-30 s. Es wird in der CassyLab- Software auf wiederholende Messung eingestellt, dann läuft der Versuch ständig weiter.



Was fällt Ihnen auf? Notieren Sie Ihre Ideen hier und auf Seite 3! Erläutern Sie ausführlich unter Verwendung der Solarzellenkennlinien die unterschiedlichen Wirkungen der Verschattung bei Spannung, Stromstärke, Leistung!



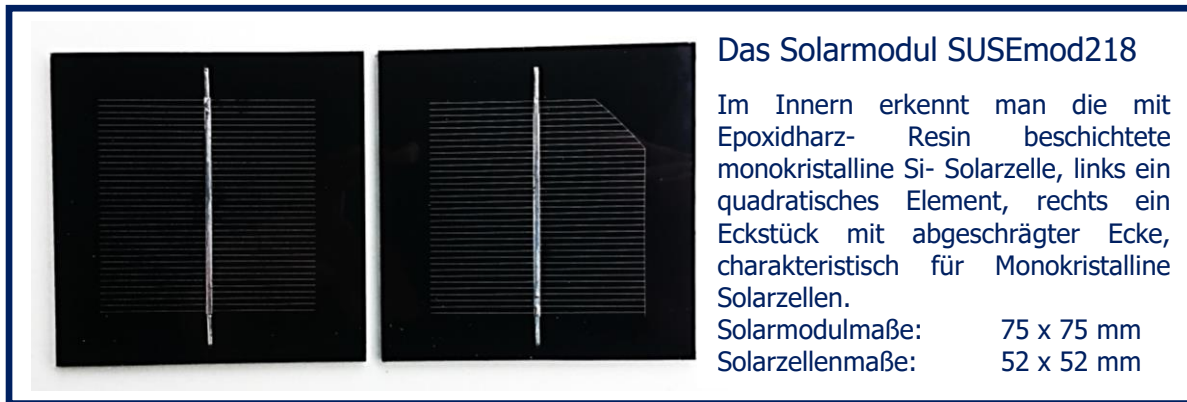
In der Realität lässt sich mit einem **Verschattungsdiagramm** in der Planungsphase einer Photovoltaikanlage auf einem Dach die „vor-Ort-Situation“ überprüfen (Beispiel Frankfurt/M.):



Mit diesen Graphen lassen sich schon in der Planungsphase mögliche Verschattungen im Jahresverlauf erkennen (Quelle: ISFH).

Auf den nächsten Seiten folgen die technischen Daten der verwendeten Solarzelle mit den Kennlinien!

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.

Solarmodulmaße: 75 x 75 mm
Solarzellenmaße: 52 x 52 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.

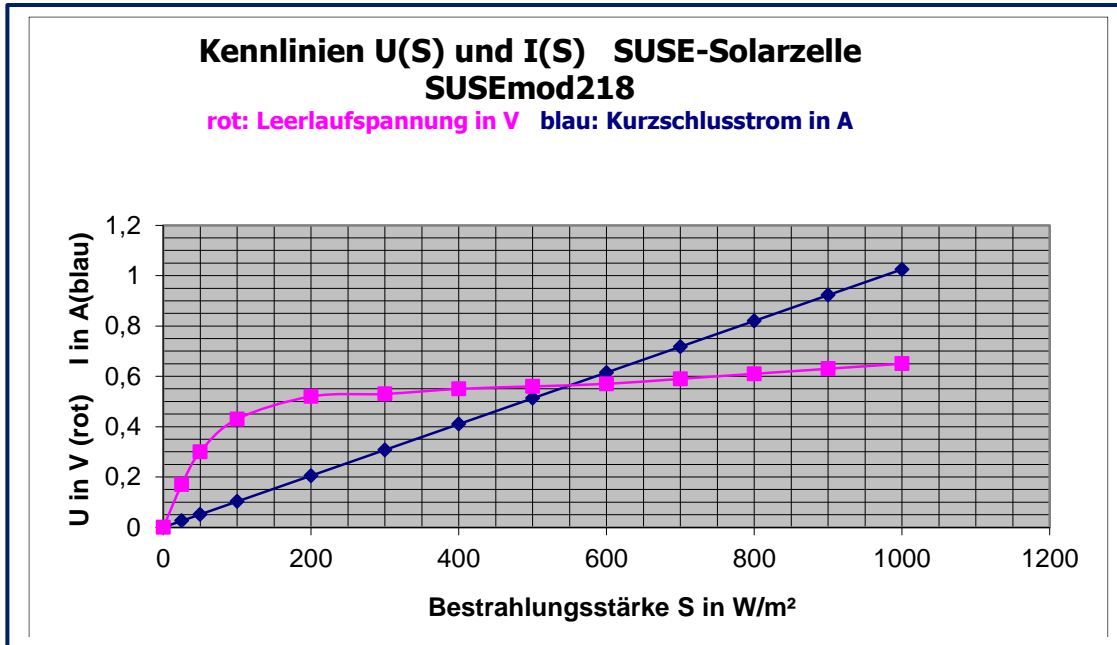
Solarzelle: Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

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

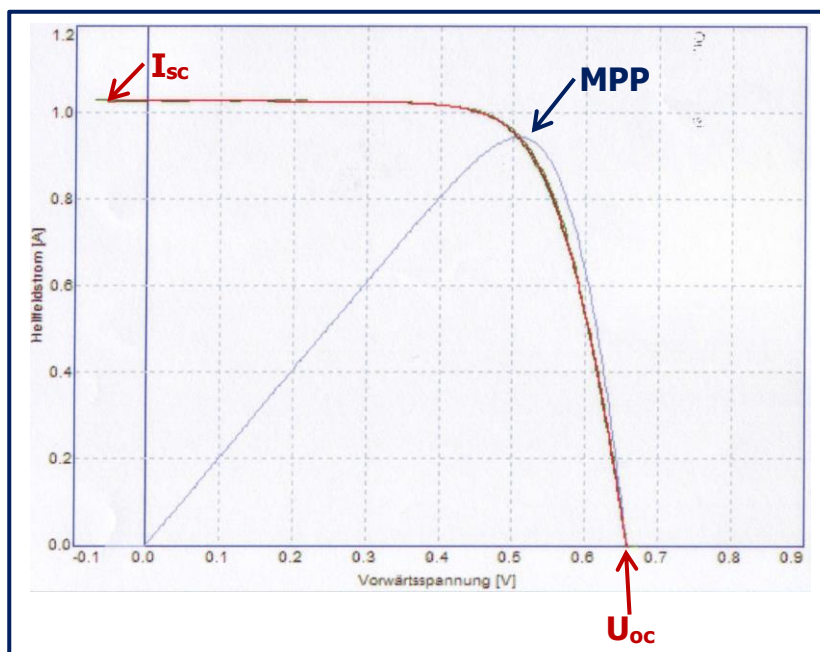
1. **Abhängigkeit von Leerlaufspannung U_{oc} und Kurzschlussstrom I_{sc} von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S in W/m^2)**



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



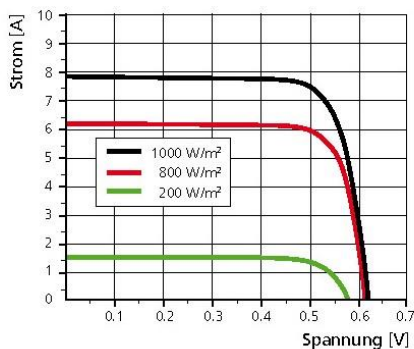
Die **$I-U$ -Kennlinie** zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von $1000 W/m^2$ und einer Temperatur von $25^\circ C$. Der **Schnittpunkt** mit der x- Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung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

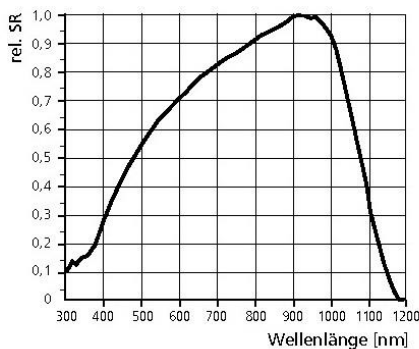
IV-Kennlinie



IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

3.2 Spektrale Empfindlichkeit

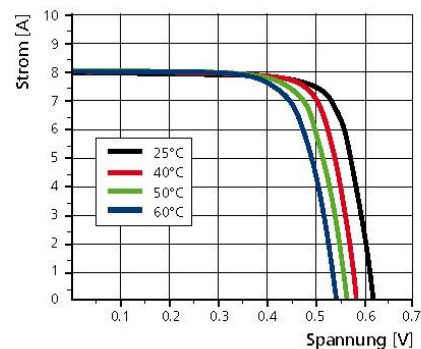
Spektrale Empfindlichkeit



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 eingestrahlichten Lichts. (1000 W/m² entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosen Himmel, 0 W/m² ist absolute Dunkelheit).

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

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

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

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

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

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