



**Photovoltaik-  
System  
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem  
Wärme von der Sonne**



## Experimente mit dem Solarmodul SUSE 5.1alpha

### Messungen zur Winkelabhängigkeit von U,I,P einer Solarzelle

#### Notwendige Geräte:

Solarmodul SUSE 5.1alpha mit Peilstift, optische Bank SUSE 5.0, Halogen- Experimentierstrahler SUSE 5.16 mit Netzgerät 12V/4A und 2 Laborkabeln, 3 Muffen, Multimeter mit 2 Laborkabeln



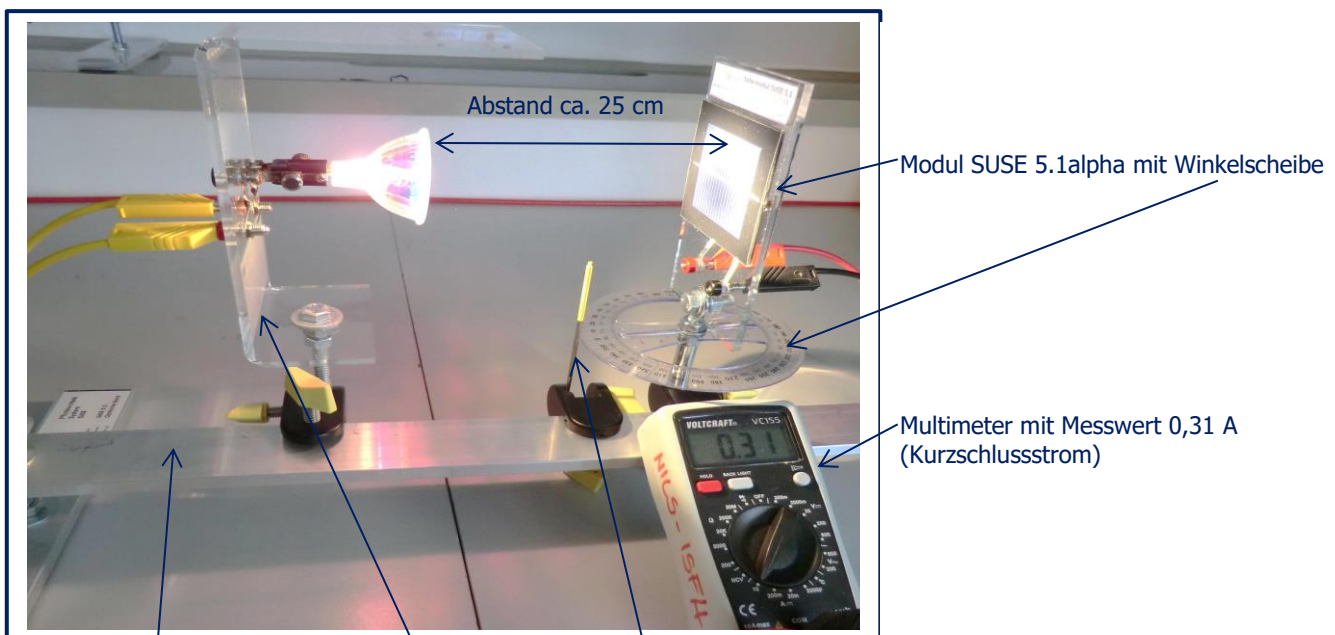
#### 1. Grundlagen und Ziele des Experiments:

Die elektrischen Leistungsdaten von Solarzellen und Solarmodulen hängen stark vom Einstrahlungswinkel zwischen Solarzellenfläche und Richtung der Lichteinstrahlung ab. Die optimale elektrische Leistung liefern nur Solarzellen und Solarmodule mit senkrechter Lichteinstrahlung. In der technischen Praxis bieten nachführbare Module diese Lösung, sie richten sich immer automatisch auf senkrechte Lichteinstrahlung aus. Fest installierte Photovoltaik- Module auf Dächern oder Freilandanlagen haben immer Fehlstellungen zum senkrechten Einstrahlungswinkel und liefern entsprechend geringere Leistung. Dies gilt aber nur bei direkter Sonneneinstrahlung, bei bedecktem Himmel greift diese Bedingung nicht, da große Flächen des Himmels als Strahlungsquelle wirken, daher sind nachführbare PV- Anlagen in Deutschland aufgrund unserer Wetterlagen nicht wirtschaftlich.

In diesem Experiment wollen wir die Abhängigkeit der Leerlaufspannung  $U_{oc}$ , des Kurzschlussstroms  $I_{sc}$  und der Leistung  $P$  einer Solarzelle vom Einstrahlungswinkel messen.

#### 2. Versuchsaufbau:

Das Foto zeigt den Aufbau des Experiments. Auf der optischen Bank sind die Experimentierleuchte SUSE 5.16, der Peilstab P und das Winkelmodul SUSE 5.1alpha mit Muffen auf einer Linie befestigt. Der Peilstab P wird so justiert, dass er ca. 1mm vor der Winkelscheibe steht.



Optische Bank SUSE 5.0 Halogenleuchte SUSE 5.16 Peilstab P

### 3. Versuchsdurchführung:

#### 3.1 Basiseinstellung

Der Halogenstrahler wird eingeschaltet, an die Solarzelle ein Multimeter im Messbereich 10A angeschlossen. Nun wird das Modul soweit gedreht, dass das Amperemeter maximalen Ausschlag zeigt, der Wert sollte bei ca. 0,3...04, A liegen. In dieser Position liegt senkrechter Strahlungseinfall vor. Falls die Winkelscheibe am Peilstab nicht exakt 90° zeigt muss sie durch leichtes Lösen der obersten M8-Mutter so justiert werden, dass sie am Peilstab exakt die 90° Position zeigt. Nun können die Messungen durchgeführt werden. Die Halogenlampe bitte nur für Messungen in Betrieb nehmen, damit sich die Solarzelle nicht stark erwärmt und dadurch veränderte Messwerte anzeigt (bei Erwärmung sinkt die Leerlaufspannung, der Kurzschlussstrom steigt leicht an).

**Stecken Sie die Laborkabel immer von der Rückseite des Gerätes in die Buchsen, um Kabelschatten auf der Solarzelle zu vermeiden!**

#### 3.2 Die Messungen

Drehen Sie nun das Solarmodul in 10°- Schritten und messen Sie jeweils den Kurzschlussstrom (MB 10A DC) und die Leerlaufspannung (MB 20V DC), tragen Sie die Messwerte in die Tabelle ein:

Winkel $\alpha$ in °	Leerlaufspannung $U_{oc}$ in V	Kurzschlussstrom $I_{sc}$ in A	Leistung $P = 0,8 \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}$ in W	$\cos \alpha$ $\sin \alpha$	Auswertung
<b>90</b> = senkrechter Lichteinfall					
<b>80</b>					
<b>70</b>					
<b>60</b>					
<b>50</b>					
<b>40</b>					
<b>30</b>					
<b>20</b>					
<b>10</b>					

Anmerkungen: 1. Die Gleichung  $P_{max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot 0,8$  ist eine Näherungslösung, für eine exakte Messung von P muss man die I-U-Kennlinie und die P-U-Kennlinie aufnehmen und daraus  $P_{max}$  bestimmen.

2. Der Winkel 0° entfällt, hier streift das Licht parallel zur Solarzellenoberfläche!

#### 3.3 Auswertungen:

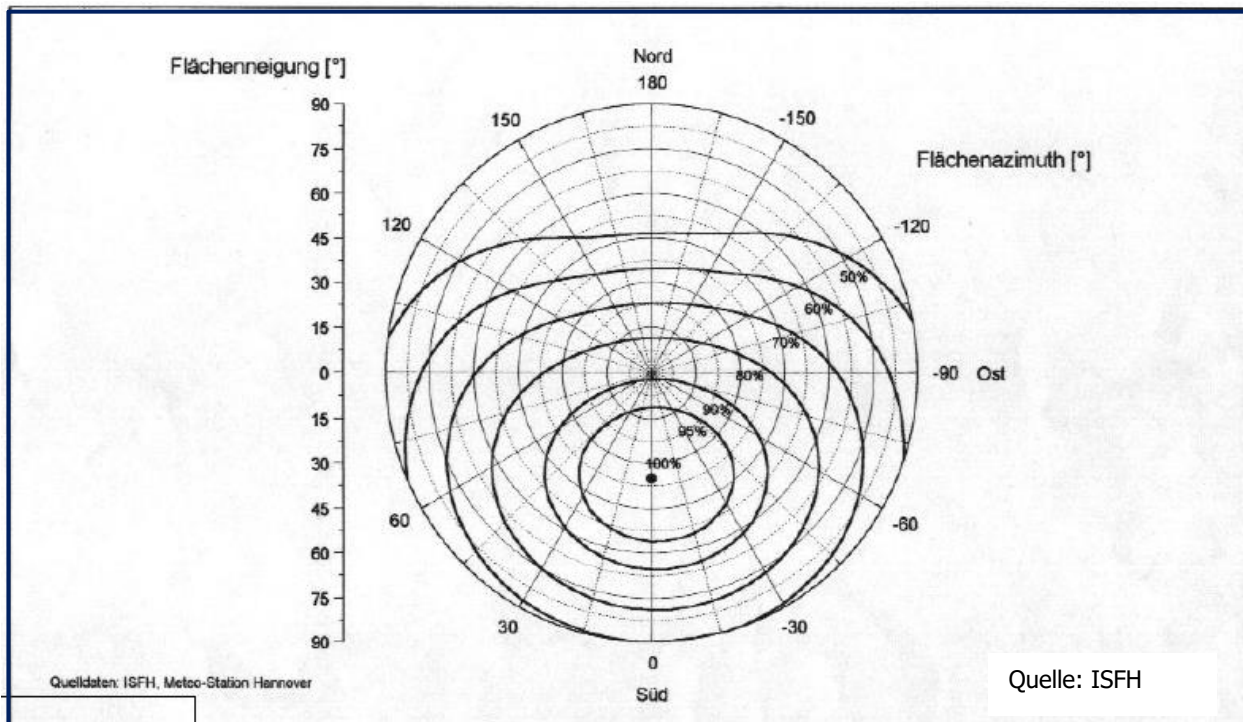
3.3.1 Zeichnen Sie auf mm- Papier oder mit excel o.Ä. die Abhängigkeiten  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$  und P vom Winkel  $\alpha$

3.3.2 Prüfen Sie die Abhängigkeit des Kurzschlussstroms vom  $\cos \alpha$  oder  $\sin \alpha$  und erläutern Sie ihr Ergebnis!

3.3.4 Erläutern Sie, warum die Werte für U und P nicht durch eine Winkelfunktion berechenbar sind, verwenden Sie hierzu die technischen Daten des Solarmoduls SUSEmod 215!

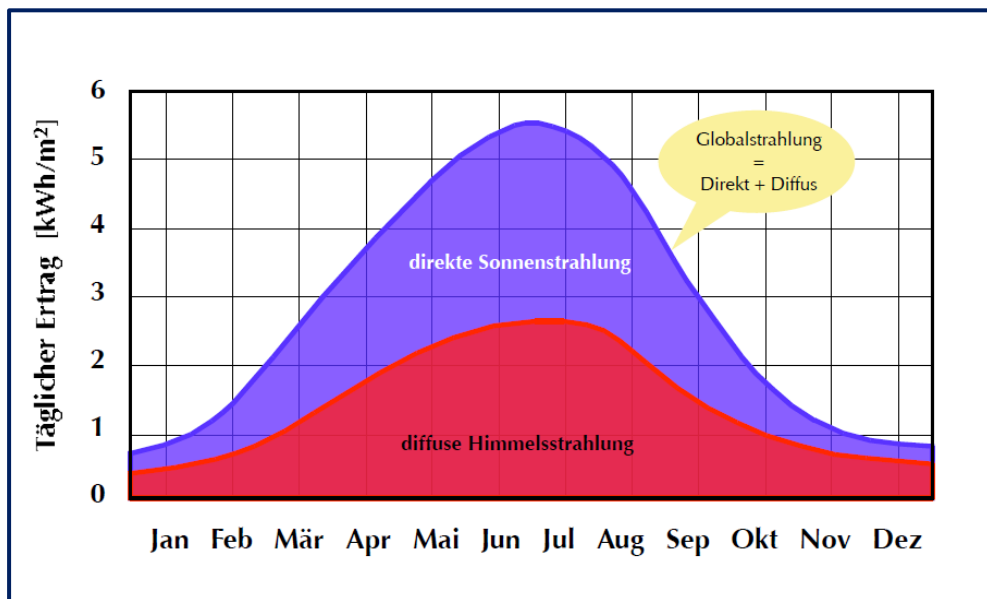
3.3.5 Bei einer Winkel- Fehlstellung einer Photovoltaikanlage auf einem Dach sinken die Leistung und die erzeugte elektrische Energie. Wieviel Grad Fehlstellung würden Sie noch tolerieren? Begründen Sie!

3.3.6 Die nachfolgende Grafik zeigt den Leistungsverlust einer PV- Anlage bei Bestrahlung mit „falschen“ Winkeln, a) die Flächenneigung in ° zur Waagerechten, b) die Ausrichtung der Himmelsrichtung zur Sonne. Berechnen Sie das Ergebnis für Dächer Ihrer Schule, Ihres Wohnhauses und weiterer Dächer!



Fest installierte PV- Anlage auf einem Dach in Deutschland (Hannover)  
 100% = exakte Südrichtung und ca. 33° Dachneigung.

3.3.7 Begründen Sie unter Verwendung der nachfolgenden Grafik, warum in Deutschland nachführbare PV- Anlagen wenig sinnvoll sind! Erklären Sie, warum sie jedoch in Spanien und Nordafrika sehr sinnvoll sind!



Auf den Folgeseiten sind die technischen Daten der verwendeten Solarzelle.

# 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

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.

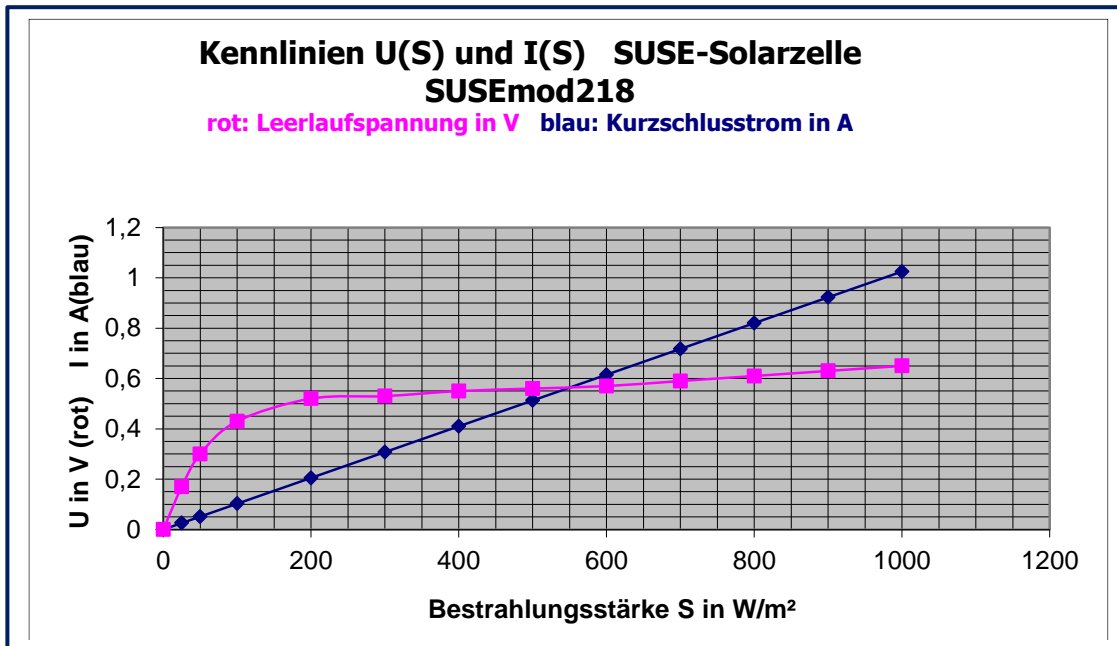
**Solarzelle:** Monokristalline Solarzelle 52 x 52 mm, quadratisch, Oberseite blau-schwarz durch SiN-Antireflexschicht, Oberfläche ist matt durch saure Texturierung.

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

## Die Kennlinien der Solarzelle im Modul SUSEmod218

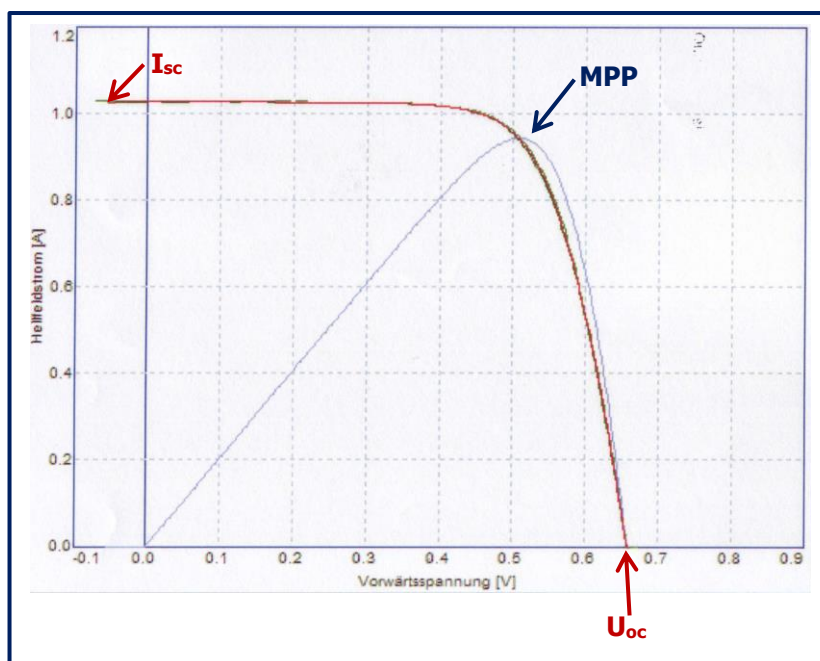
### 1. Abhängigkeit von Leerlaufspannung $U_{oc}$ und Kurzschlussstrom $I_{sc}$ von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke $S$ in $W/m^2$ )



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

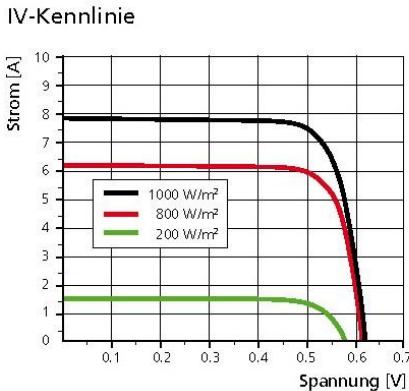


Die  **$I-U$ -Kennlinie** zeigt die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung bei Belastung der Solarzelle mit einem variablen Lastwiderstand, bei einer Bestrahlungsstärke von  $1000 W/m^2$  und einer Temperatur von  $25^\circ C$ . Der Schnittpunkt mit der x- Achse (U- Achse) ist die Leerlaufspannung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

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

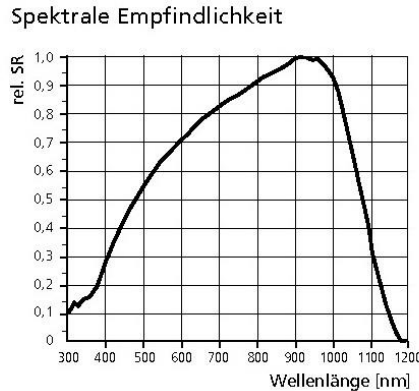
**3. Weitere Daten** (für die ganze Solarzelle 156 x 156 mm!), für die Solarzelle 52x 52mm im Modul SUSEmod218 muss die Stromstärke bei 3.1 und 3.3 durch 9 geteilt werden!

**3.1 Intensitätsabhängigkeit**



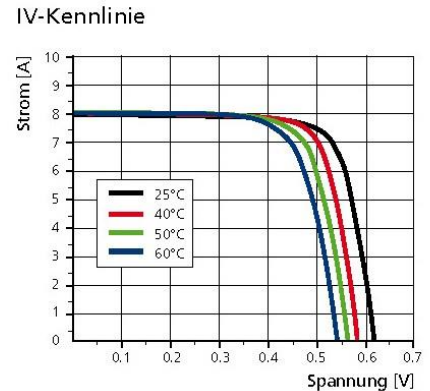
IV-Verhalten für unterschiedliche Bestrahlungsstärken.

**3.2 Spektrale Empfindlichkeit**



Kennlinie der spektralen Empfindlichkeit.

**3.3 Temperaturabhängigkeit**



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/m<sup>2</sup> entspricht dem strahlenden Sonnenschein im Sommer bei blauem, wolkenlosen Himmel, 0 W/m<sup>2</sup> 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 cm<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup>