

<h2>Experimente mit dem Solarmodul</h2> <h1>SUSE 4.2</h1> <h1>SUSE 5.1</h1> <h1>SUSE 5.2</h1> <p>Solarmodul mit 1 Solarzelle und Solarmotor, Verbindung über Verbindungsstecker Geeignet für die Klassenstufen 3-10 SUSE 5.1 + SUSE 5.2 ab Klassenstufe 10</p>	Experimentiergerät: SUSE 4.2 SUSE 5.2 SUSE 5.1 oder alle Experimente in Kombination mit dem Solarmotor SUSE 4.16
	Zusatzgeräte optional: Halogenstrahler 120W (Baustrahler) oder Rotlichtlampe 2 digitale Multimeter Schwarze Pappe zum Abdecken Overheadprojektor Laborkabel Batterie 1,5 V Für SUSE 5.0 + 5.2 zusätzlich: Optische Bank SUSE 5,0 Halogenstrahler SUSE 5.16 + Netzgerät 12V / 5A

12 Experimente mit SUSE 4.2/ 5.1/5.2

Sommer- und Winterposition des Solarmoduls:



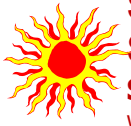
Niveaustufen:

Mit SUSE 4.2 können einfache Experimente in der Niveaustufe I (Klassenstufen 3 - 4) durchgeführt werden, Experimente im mittleren Niveaubereich II (Klassenstufen 5 - 7) und Experimente im hohen Niveaubereich III (Klassenstufen 8 - 10). Die einzelnen Experimente sind entsprechend mit I, II, III markiert.

Tipps und Hinweise

1. Alle aufgeführten Experimente sind im NILS- ISFH- Labor und im Physikunterricht an Schulen ausführlich erprobt worden und problemlos durchzuführen. Für weitergehende Informationen, theoretische Grundlagen, detaillierte Versuchsanleitungen, Versuchsaufbauten, Messmethoden, Messungen werden Sie gerne von OStR W.R. Schanz aus dem NILS- Team ausführlich beraten: nils@isfh.de

2. Für Messungen an der Solarzelle werden Motor und Solarzelle durch Ziehen der Verbindungsstecker getrennt. Zur Spannungsmessung sollte ein digitales Multimeter im 2V oder 20V- Messbereich verwendet werden, für Stromstärkemessungen sollte unbedingt der 10A- oder 2A- Messbereich verwendet werden, da der 200mA- Messbereich durch den hohen Innenwiderstand die Messung bis



zu 50% verfälscht. Die Messkabel immer von hinten in die Buchsen stecken, damit es nicht zu Verschattungen auf der Solarzelle durch Kabelschatten kommt. Nur wenn es nicht auf absolute Messungen ankommt, kann bei kleinen Stromstärken der 20mA- oder 200mA-Bereich verwendet werden.

Die 10 Experimente mit SUSE 4.2 / 5.1 / 5.2 weitere Experimente in Kurzfassung im Anhang

Experiment 1: Eine Solarzelle als Spannungsquelle für einen Motor = Eine Solarzelle liefert elektrische Energie (vgl. mit Batteriebetrieb für Motor)

Die Verbindungsstecker zwischen Solarzelle und Motor werden gezogen, in das obere Buchsenpaar des Motors wird über 2 Kabel eine Batterie 1,5 V an den Motor angelegt. Der Motor/Propeller dreht sich schnell.

Verbindet man nun durch Stecken der Verbindungsstecker wieder Zelle + Motor, dreht sich der Motor bei beleuchteter Zelle langsamer als mit der 1,5 V Batterie.

Ergebnis:

Eine Solarzelle liefert elektrische Energie + eine Solarzelle ist „schwächer“ als eine 1,5 V Batterie

Experiment 2: Der drehende Propeller als Nachweis für Solarstrom

Mit der Drehung des Propellers am Solarmotor kann die Umwandlung der Strahlungsenergie des Lichts in elektrische Energie ohne Messgeräte direkt beobachtet werden, ideal für Einstiegesexperimente und Versuche für die Klassenstufen 3-5 .

Die Drehzahl des Motors hängt von der Lichtintensität ab, durch die leistungsstarke Solarzelle dreht sich der Motor im Freien auch bei stark bedecktem Himmel, so dass die SchülerInnen nicht das Vorurteil erleben, dass Solarenergie nur bei strahlendem Sonnenschein funktioniert, wie es oft bei Billigprodukten erkennbar ist.

Der Motor kann von 0,4 V bis 5,0 V betrieben werden, d.h. man kann problemlos schrittweise mehrere (bis 8) Module in Reihe schalten und an einen Motor anlegen.

Experiment 3: Reihenschaltung mehrerer Solarmodule SUSE 4.2/5.1/5.2 an einem Solarmotor

Mehrere Solarmodule SUSE 4.2 lassen sich in beliebiger Anzahl elektrisch in Reihe schalten. Die Verbindungsstecker werden abgezogen. Der Minuspol des 1. Moduls wird mit einem Kabel mit dem Pluspol des 2. Moduls verbunden, der Minuspol des 2. Moduls mit dem Pluspol des 3. Moduls usw.

Dabei addieren sich die Spannungen, die Stromstärke bleibt gleich. Bitte darauf achten, dass die Kabel nicht über die Solarzelle verlaufen und sich keine Abschattungen ergeben, alle Solarmodule müssen mit gleicher Lichtintensität bestrahlt werden.

Legt man nun den Pluspol des 1. Moduls und den Minuspol des letzten Moduls an einen Solarmotor, so dreht sich der Propeller immer schneller, je mehr Module in Reihe geschaltet werden. Es dürfen bis maximal 8 Module in Reihe geschaltet werden, um den Motor nicht zu überlasten.



Experiment 4: Der Solarmotor als Generator

Der kleine Solarmotor kann auch als Generator verwendet werden. Beide Verbindungsstecker werden gezogen und ein Voltmeter im Messbereich 2 V an die Anschlüsse des Motors angeschlossen. Wird nun der Propeller mit der Hand zur Drehung gebracht (Anstoßen mit dem Finger), erzeugt der Motor als Generator elektrische Energie, eine elektrische Spannung kann gemessen werden.

Drehung des Propellers	langsam	mittel	schnell
Gemessene elektrische Spannung U in V			

Experiment 5: Messung der Leerlaufspannung U_{oc} einer Solarzelle oc= open circuit = offener Stromkreis

Die Leerlaufspannung U_{oc} einer Solarzelle liegt vor, wenn kein Verbraucher an die Zelle angeschlossen ist und sie im Leerlauf betrieben wird. Die Verbindungsstecker werden abgezogen und das Multimeter wird im Spannungsbereich 20 V DC polrichtig an die Buchsen der Solarzelle angeschlossen. Bei ausreichender Beleuchtung liegt diese zwischen 0,5V und 0,6 V, bei strahlendem Sonnenschein erreicht sie exakt 0,6V. In der Nähe verschiedener Lichtquellen und draußen bei verschiedenen Helligkeiten unterschiedlicher Wetterlagen lassen sich Messungen durchführen. Das Modul wird vor verschiedene Lichtquellen gehalten und die Spannung gemessen. Mit der Grafik Abb. 6.2 oder 8.3 lässt sich die Bestrahlungsstärke S des Lichts in W/m^2 ermitteln und in die untere Zeile eintragen (Aufgabe 5.2).

Lichtquelle	Zur Sonne gehalten, strahlender Sonnenschein	Zur Sonne gehalten, stark bedeckter Himmel	Zur Sonne gehalten, gering bedeckter Himmel	Im Innenraum am Fenster	Im Innenraum auf Tisch
Spannung U in V					
Bestrahlungsstärke S in W/m^2 Aus Grafik 6.2 oder 8.3 ermittelt					

Lichtquelle	Auf Grundgerät SUSE 4.0	20 cm vor Glühlampe 60W	20 cm vor Leuchtstoffröhre	Auf Platte eines Overhead-Projektors Solarzelle nach unten halten	10 cm über Platte eines Overhead-Projektors Solarzelle nach unten halten
--------------------	-------------------------	-------------------------	----------------------------	-------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------



Spannung U in V					
Bestrahlungsstärke S in W/m² Aus Grafik ermittelt					

Aufgabe 1:

Wie wirkt sich die Bestrahlungsstärke des Lichts auf die Leerlaufspannung der Solarzelle aus? Erkläre:

Aufgabe 2 für II: Bestimme aus den Messwerten unter Verwendung der Graphen aus den physikalisch- technischen Grundlagen die Bestrahlungsstärke S des Lichts und trage die Werte in die 3. Zeile der Tabelle ein.

Experiment 6: Messung der Leerlaufspannung bei verschiedener Zellenfläche

Das Modul wird auf dem Grundgerät SUSE 4.0 befestigt. Wenn man die Solarzelle mit schwarzem Karton in Stufen abdeckt (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.

Abdeckung der Solarzelle mit schwarzer Pappe	¼ abgedeckt	Die Hälfte abgedeckt	¾ abgedeckt
Leerlaufspannung U _{oc} in V			

Was beobachtest Du, erkläre:

Experiment 7: Messung der Leerlaufspannung bei verschiedenen Einfallswinkeln des Lichts

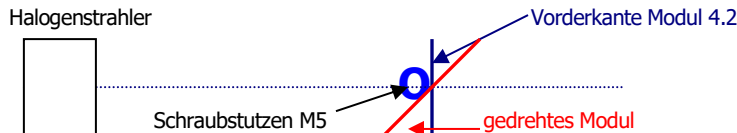
Wenn die Lichtstrahlung senkrecht auf die Solarzelle trifft, hat sie die stärkste Wirkung, bei schrägem Einfall verringern sich Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom.

In der Praxis sollte also das Licht immer senkrecht auf die Solarzelle treffen, was sich nicht immer verwirklichen lässt, da die Sonne von Ost nach West wandert und eine nach Süden ausgerichtete



Photovoltaikanlage nur mittags um 12 Uhr senkrecht trifft, auch nur dann, wenn die Dachneigung stimmt.

Dieser Effekt lässt sich im Experiment auf der Grundplatte SUSE 4.0 zeigen.



Das Solarmodul wird von hinten her an den Schraubstützen gestellt (blau) und anschließend um den Winkel α gedreht (rot), dabei werden Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom abgelesen. Der Winkel kann mit einem Geo- Dreieck abgelesen werden, vorher wird am Schraubstützen eine senkrechte Linie mit einem Folienstift auf die Grundplatte gezeichnet.

Winkel α in Grad	0°	30°	50°	80°
Leerlaufspannung in V				
Kurzschlussstrom in A				

Experiment 8: Messung des Kurzschlussstroms einer Solarzelle bei verschiedener Zellenfläche

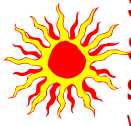
Der Kurzschluss- Strom I_{sc} (sc- short-cut) ist eine besonders wichtige Größe einer Solarzelle. Der Kurzschlussstrom ist proportional zur Lichtintensität und zur Fläche einer Solarzelle.

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 900 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.

Das Modul wird auf dem Schraubstützen des Grundgerät SUSE 4.0 befestigt. Wenn man die Solarzelle mit schwarzem Karton in Stufen abdeckt (die Rückseite! völlig mit schwarzer Pappe abdecken, auch von hier kommt Licht auf die Zelle!), kann man die Veränderung des Kurzschlussstroms messen.

Abdeckung der Solarzelle mit schwarzer Pappe	1/4 abgedeckt	Die Hälfte abgedeckt	3/4 abgedeckt
Kurzschlussstrom in A			

Was beobachtest Du, erkläre hier:



Experiment 9

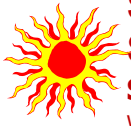
Messung des Kurzschlussstroms einer Solarzelle bei verschiedener Lichtintensität

Wenn die Solarzelle kalibriert wurde (Kurzschlussstrom 880 mA = 1000 W/m²) können Kurzschlussströme und Lichtintensitäten in gegenseitiger Abhängigkeit gemessen werden. Hier lassen sich interessante Messungen der Bestrahlungsstärke im Freien und in der Umgebung von Lichtquellen durchführen. Im Freien empfinden wir schwache Bestrahlungsstärken bei trüben Wetterlagen mit unserem Auge als viel höher als sie wirklich sind, die Messungen ergeben dann Werte von ca. 100 W/m². Interessant ist auch der Rückgang der Bestrahlungsstärke bei sonnigen Wetterlagen, wenn sich eine Wolke vor die Sonne schiebt. Weiterhin kann man bei bedecktem Himmel den Standort der Sonne feststellen, denn von hier kommt das meiste Licht, richtet man das Modul auf diesen Ort, ist I_{sc} maximal. Bestimme die Bestrahlungsstärke S aus dem Graphen in den der physikalisch-technischen Grundlagen:

Lichtquelle	Zur Sonne gehalten, strahlender Sonnenschein	Zur Sonne gehalten, stark bedeckter Himmel	Zur Sonne gehalten, gering bedeckter Himmel	Im Innenraum am Fenster	Im Innenraum auf Tisch
Kurzschlussstrom I in A					
Bestrahlungsstärke S in W/m² aus Abb. 6.2 oder 8.3 ermittelt					

Lichtquelle	Auf Grundgerät SUSE 4.0	20 cm vor Glühlampe 60W	20 cm vor Leuchtstoffröhre	Auf Platte eines Overhead-Projektors Solarzelle nach unten halten	10 cm über Platte eines Overhead-Projektors Solarzelle nach unten halten
Kurzschlussstrom I in A					
Bestrahlungsstärke S in W/m² aus Abb. 6.2 oder 8.3 ermittelt					

Aufgabe 9.1: Wie wirkt sich die Bestrahlungsstärke des Lichts auf die Kurzschlussstromstärke der Solarzelle aus? Erkläre hier:



Aufgabe 9.2 für II: Bestimme aus den Messwerten unter Verwendung der Graphen aus den physikalisch- technischen Grundlagen die Bestrahlungsstärke S des Lichts und trage die Werte in die 3. Zeile der Tabelle ein.

Experiment 10

Verwendung einer Solarzelle als Messgerät zur Messung der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) der Sonne oder von Lichtquellen in W/m² mit einem Amperemeter

Da der Kurzschlussstrom direkt proportional zur Bestrahlungsstärke S ist und bei 1000 W/m² 0,90 A beträgt (siehe Datei suz11 im Anhang) kann mit Dreisatz aus der Messung der Kurzschlussstromstärke (immer im 10A- Messbereich bei Multimetern messen!) S bestimmt werden.

Für die Bestrahlungsstärke S gilt somit:

$$S = \frac{\text{aktueller Messwert I in A} * 1000 \text{ W/m}^2}{1,025 \text{ A}} \text{ in W/m}^2 \text{ Gleichung I}$$

Messung	Strahlender Sonnenschein Senkrecht zu den Sonnenstrahlen gemessen	Geringe Bewölkung Zur Sonne hin gemessen	Starke Bewölkung	Auf dem Schraubstutzen Grundgerät SUSE 4.0	Auf Platte Eines Overhead-Projektors
Kurzschlussstrom I _{sc} in A					
Bestrahlungsstärke S in W/m ² Aus Gleichung I ermittelt					

Experiment 11:

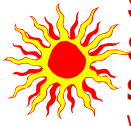
Die Solarzelle als Halbleiter - Diode im Stromkreis

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.



Experiment 12: PV – Spiel: Bestimme Dein Alter

Die Solarzelle wird bestrahlt, der Kurzschlussstrom im 200 mA-Bereich gemessen, er soll nicht über 200 mA liegen, durch Abstand zur Lichtquelle justieren.

Durch geschicktes Zuhalten der Solarzelle mit der Hand kann man den Kurzschlussstrom soweit verringern, bis das eigene Alter angezeigt wird.

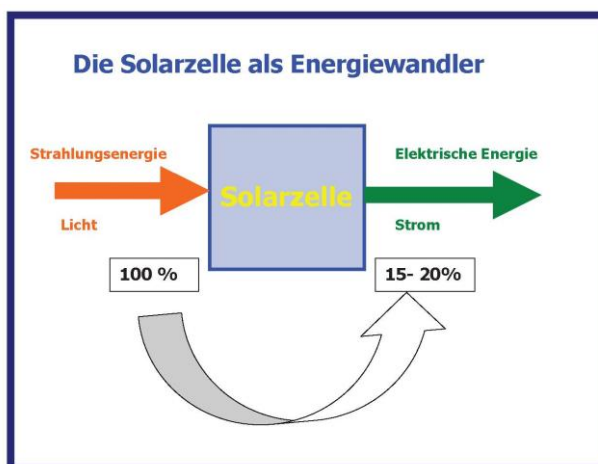
Nun soll die spielende Person durch geschicktes Abdecken der Solarzelle ihr eigenes Alter auf dem Display des Messgerätes darstellen!

Eine Solarzelle aus dem Halbleiter Silizium – unabhängig von Ihrer Fläche – liefert bei voller Sonnenbestrahlung, die senkrecht auf die Solarzelle auftrifft (Bestrahlungsstärke $S = 1000 \text{ W/m}^2$, strahlender Sonnenschein) nur eine kleine Spannung von 0,6...0,65 V, aber eine relativ große Stromstärke von 4 A bei einer Fläche von 100 cm^2 , die Stromstärke ist proportional zur Fläche. Die Spannung wird bei geringerer Lichtintensität ebenfalls geringer.

Die im Versuchsgerät SUSE 4.2 verwendete Solarzelle mit einer Fläche von $24,5 \text{ cm}^2$ liefert bei 1000 W/m^2 eine elektrische Spannung von 0,6 V und eine maximale Stromstärke von 1,025 A.

Mit der kleinen Spannung von 0,6 V kann man in der elektrotechnischen Praxis noch wenig anfangen, es lässt sich ein Solarmotor damit betreiben. In der technischen Praxis schaltet man viele Solarzellen in Reihe, um höhere Spannungen zu erhalten. Dieser Effekt lässt sich auch mit SUSE 4.2 zeigen, wenn man mehrere Module in Reihe schaltet.

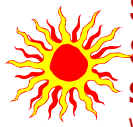
Eine Solarzelle ist ein Energiewandler, sie wandelt die Strahlungsenergie des Lichts in elektrische Energie um, der Wirkungsgrad liegt je nach Solarzellentyp bei 15 – 20%.



Der Solarmotor lässt sich mit den beiden Verbindungssteckern von der Solarzelle elektrisch trennen, so können unabhängig voneinander Experimente durchgeführt werden.

Spannung und Stromstärke einer Solarzelle:

Die elektrische Spannung einer Solarzelle (Leerlaufspannung U_{oc}) ist vom Halbleitermaterial und von der Lichtintensität = Bestrahlungsstärke S abhängig. Das am häufigsten verwendete Halbleitermaterial Silizium Si hat bei einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 eine materialtypische Spannung von ca. 0,6 V. Die Spannung ist unabhängig von der Fläche der Solarzelle. Wie die Grafik zeigt, sinkt die Spannung bei geringerer Lichtintensität ab, bis auf 0 V bei absoluter Dunkelheit. Der genaue Verlauf ist in der Grafik dargestellt.



Die maximale Stromstärke einer Solarzelle ist der Kurzschlussstrom I_{sc} , sie ist vom Halbleitermaterial, von der Lichtintensität = Bestrahlungsstärke S und von der Solarzellenfläche abhängig. Die im Experimentiergerät SUSE 4.2 verwendete Solarzelle hat bei strahlendem Sonnenschein ($S = 1000 \text{ W/m}^2$) eine Kurzschlussstromstärke von $0,90 \text{ A}$. Der genaue Verlauf ist in der Grafik dargestellt.

Die maximale elektrische Leistung der Solarzelle P_{max} berechnet sich (vereinfacht) nach der Gleichung: $P_{max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot 0,8$, sie beträgt bei der im Gerät verwendeten Solarzelle $0,43 \text{ W}$.

43 Experimente mit dem Solarmodul SUSE 4.2/5.1/5.2

Niveaustufen:

Mit SUSE 4.2 können einfache Experimente in der **Niveaustufe I (Klassenstufen 4 -7)** durchgeführt werden, Experimente im mittleren **Niveaubereich II (Klassenstufen 8 -10)** und Experimente im hohen **Niveaubereich III (Klassenstufen 10 - 13)**. Die einzelnen Experimente sind entsprechend mit **I, II, III** markiert.

Tipps und Hinweise

1. Alle aufgeführten Experimente sind im NILS- ISFH- Labor und im Physikunterricht an Schulen ausführlich erprobt worden und problemlos durchzuführen. Für weitergehende Informationen, theoretische Grundlagen, detaillierte Versuchsanleitungen, Versuchsaufbauten, Messmethoden, Messungen werden Sie gerne von OStR W.R. Schanz aus dem NILS- Team ausführlich beraten: nils@isfh.de

2. Für Messungen an der Solarzelle werden Motor und Solarzelle durch Ziehen der Verbindungsstecker getrennt. Zur Spannungsmessung sollte ein digitales Multimeter im 2V oder 20V- Messbereich verwendet werden, für Stromstärkemessungen sollte unbedingt der 10A- oder 2A- Messbereich verwendet werden, da der 200mA- Messbereich durch den hohen Innenwiderstand die Messung bis zu 50% verfälscht. Die Messkabel immer von hinten in die Buchsen stecken, damit es nicht zu Verschattungen auf der Solarzelle durch Kabelschatten kommt. Nur wenn es nicht auf absolute Messungen ankommt, kann bei kleinen Stromstärken der 20mA- oder 200mA-Bereich verwendet werden.

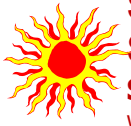
Die Experimente

1. Eine Solarzelle als Spannungsquelle für einen Motor = Eine Solarzelle liefert elektrische Energie (Vgl. mit Batteriebetrieb für Motor) **I**

Die Verbindungsstecker werden gezogen, in das obere Buchsenpaar des Motors wird über 2 Kabel eine Batterie $1,5 \text{ V}$ an den Motor angelegt. Der Motor/Propeller dreht sich schnell. Verbindet man nun durch Stecken der Verbindungsstecker wieder Zelle + Motor, dreht sich der Motor bei beleuchteter Zelle langsamer als mit der $1,5 \text{ V}$ Batterie:
Eine Solarzelle liefert elektrische Energie + **eine** Solarzelle ist „schwächer“ als eine $1,5 \text{ V}$ Batterie

2. Experimente mit dem Solarmotor **I**

Mit der Drehung des Propellers am Solarmotor kann die Umwandlung der Strahlungsenergie des Lichts in elektrische Energie ohne Messgeräte direkt beobachtet werden, ideal für Einstiegesexperimente und Versuche für die Klassenstufen 4-7. Die Drehzahl des Motors hängt von der Lichtintensität ab, durch die leistungsstarke Solarzelle dreht sich der Motor im Freien auch bei stark bedecktem Himmel, so dass die SchülerInnen nicht das Vorurteil erleben, dass Solarenergie nur bei strahlendem Sonnenschein funktioniert, wie es oft bei Billigprodukten erkennbar ist. Der Motor kann von $0,4 \text{ V}$ bis $5,0 \text{ V}$ betrieben werden, d.h. man kann problemlos schrittweise mehrere (bis 8) Module in Reihe schalten und an einen Motor anlegen.



3. Messung der Leerlaufspannung einer Solarzelle = U_{oc} **I, II**

(oc = open circuit = offener Stromkreis)

Die Leerlaufspannung einer Solarzelle liegt vor, wenn kein Verbraucher an die Zelle angeschlossen ist und sie im Leerlauf betrieben wird. Das nebenstehende Foto zeigt die Messung der Leerlaufspannung einer Solarzelle. Bei ausreichender Beleuchtung liegt diese zwischen 0,5V und 0,6 V, bei strahlendem Sonnenschein erreicht sie exakt 0,6V. In der Nähe verschiedener Lichtquellen und draußen bei verschiedenen Helligkeiten unterschiedlicher Wetterlagen lassen sich Messungen durchführen. Auch die Experimente 4-6 beziehen sich auf Parameter für die Leerlaufspannung.

4. Messung der Leerlaufspannung bei verschiedener Lichtintensität **I, II**

Wie die Datei suz11 (im Anhang) zeigt, hat die Leerlaufspannung einer Solarzelle die Eigenschaft, bei kleinen Lichtintensitäten von 0 – 0,52 V stark ansteigt, bis zu hohen Intensitäten dann nur noch langsam auf 0,6 V steigt. Bei Messungen oberhalb kleiner Lichtintensitäten liegen wir immer im Spannungsbereich von 0,5 – 0,6 V.

5. 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 (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.

6. 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).

7. Messung des Kurzschlussstroms einer Solarzelle bei verschiedener Zellenfläche **I, II**

Der Kurzschluss- Strom 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 880 mA für eine Einstrahlung (Bestrahlungsstärke) von 1000 W/m², 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.

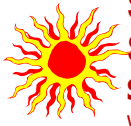
8. Messung des Kurzschlussstroms einer Solarzelle bei verschiedener Lichtintensität **I, II**

Wenn die Solarzelle kalibriert wurde (Kurzschlussstrom 880 mA = 1000 W/m²) können Kurzschlussströme und Lichtintensitäten in gegenseitiger Abhängigkeit gemessen werden. Siehe dazu die Datei suz11 im Anhang. Hier lassen sich interessante Messungen der Bestrahlungsstärke im Freien und in der Umgebung von Lichtquellen durchführen. Im Freien empfinden wir schwache Bestrahlungsstärken bei trüben Wetterlagen mit unserem Auge als viel höher als sie wirklich sind, die Messungen ergeben dann Werte von nur 10....100 W/m². Interessant ist auch der Rückgang der Bestrahlungsstärke bei sonnigen Wetterlagen, wenn sich eine Wolke vor die Sonne schiebt. Weiterhin kann man bei bedecktem Himmel den Standort der Sonne feststellen, denn von hier kommt das meiste Licht, richtet man das Modul auf diesen Ort, ist I_{sc} maximal.

9. 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).



10. Verwendung einer Solarzelle als Messgerät zur Messung der Lichtintensität (Strahlungsleistung S) der Sonne oder von Lichtquellen in W/m² mit einem Amperemeter I, II

(optimal hierfür: Gerät SUSE 5.23, hier wird S direkt digital angezeigt)

Da der Kurzschlussstrom direkt proportional zur Bestrahlungsstärke S ist und bei 1000 W/m² 0,90 A beträgt (siehe Datei suz11 im Anhang) kann mit Dreisatz aus der Messung der Kurzschlussstromstärke (immer im 10A- Messbereich bei Multimetern messen!) S bestimmt werden.

Für die Bestrahlungsstärke S gilt somit:

$$S = \frac{\text{Aktueller Messwert I in A} * 1000 \text{ W/m}^2}{1,025 \text{ A}} \text{ in W/m}^2$$

Verbindet man das Modul SUSE 4.2 mit einem PC- Interface, so lässt sich die Lichtintensität/Bestrahlungsstärke S über einen längeren Zeitraum automatisch messen. Interessante Ergebnisse ergeben sich hier bei bewölkten Wetterlagen mit stark schwankenden Lichtintensitäten.

11. Die elektrische Leistung der Solarzelle I, II

Die elektrische Leistung der Solarzelle in W (Watt) lässt sich einfach bestimmen. Man beleuchtet die Solarzelle und misst zuerst die Leerlaufspannung in V, danach den Kurzschlussstrom in A. Multipliziert man nun beide Werte und dieses Produkt noch einmal mit 0,8, erhält man die elektrische Leistung P. Beispiel: Bei strahlendem Sonnenschein wird das Modul zur Sonne hin ausgerichtet. Die Leerlaufspannung zeigt 0,6 V, der Kurzschlussstrom 0,90 A, dann ist die elektrische Leistung $0,6V * 0,90A * 0,8 = 0,43 \text{ W}$.

12. Punktweise Aufnahme der Kennlinie von Solarzellen, Bestimmung des MPP (Maximum- Power- Point) der Solarzelle bei verschiedener Lichtintensität S II, III

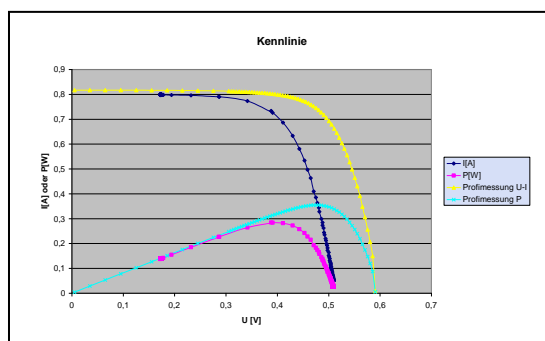
(optimal hierfür: Gerät SUSE 5.15)

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 im Anhang 2 (Datei suz12). Wird nun die Leistung $P = U * I$ 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. (Anhang 3, Datei suz13)

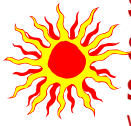
13. Aufnahme der Kennlinie und Bestimmung des MPP von Solarzellen mit einem Interface und PC (optimal hierfür: Gerät SUSE 5.15) II, III

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



14. 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 15-16 %.

15. Reihenschaltung von Solarzellen (mit mehreren Modulen SUSE 4.2) (optimal hierfür: Gerät SUSE 4.3 oder 4.33) **I, II**

Solarmodule SUSE 4.2 lassen sich in beliebiger Anzahl elektrisch in Reihe schalten. Der Pluspol des 1. Moduls wird mit einem Kabel mit dem – Pol des 2. Moduls verbunden, der + Pol des 2. Moduls mit dem – Pol des 3. Moduls usw. Dabei addieren sich die Spannungen, die Stromstärke bleibt gleich. Bitte darauf achten, dass die Kabel nicht über die Solarzelle verlaufen und sich keine Abschattungen ergeben, alle Solarmodule müssen mit gleicher Lichtintensität bestrahlt werden.

Das Solarmodul SUSE 4.33 hat bereits 3 Solarzellen in Reihenschaltung (Reihenschaltung mit lösbaren Verbindungssteckern), das Modul SUSE 4.3 hat 6 Zellen in Reihenschaltung mit Verbindungssteckern.

Nimmt man pro Gerät bei einer Bestrahlung im Sonnenlicht 0,6 V an, so ergibt eine Reihenschaltung mit n Modulen eine Spannung von $n \cdot 0,6$ V. 6 Module ergeben z.B. eine Spannung von 3,6 V, damit lassen sich dann hervorragend 3V- Geräte (z.B. Radio) betreiben. Werden die Verbindungsstecker gezogen lassen sich auch bis zu 8 Module in Reihenschaltung an **einen Motor** anlegen, die Drehzahl steigt proportional mit der Anzahl der Module.

16. Parallelschaltung von Solarzellen (mit mehreren Modulen SUSE 4.2) **I, II** (optimal hierfür: Gerät SUSE 4.3 oder 4.33)

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 V, die Stromstärken addieren sich bei der Parallelschaltung.

17. Die Abhängigkeit der Leerlaufspannung und des Kurzschlussstroms von der Temperatur der Solarzelle **I, II**

17.1 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 600 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.

17.2 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 880 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 944 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!

18. 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!

19. 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.

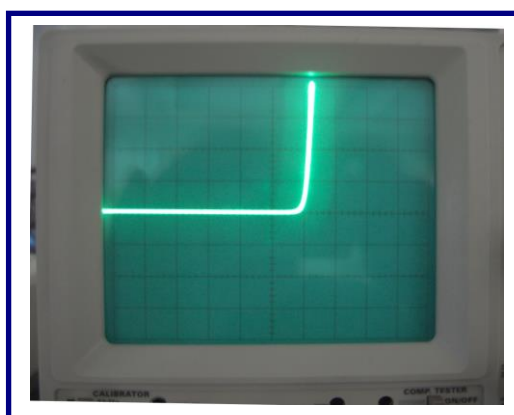


20. Aufnahme der Diodenkennlinie (Dunkelkennlinie) der Solarzelle (punktweise) **II, III**

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.

21. 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

22. 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

23. Eine Solarzelle als Gleichrichter von Wechselspannung **II,III**

23.1 In einen Gleichstromkreis mit Netzgerät und Glühlampe wird eine SUSE- Solarzelle eingefügt. Liegt der - Pol der Solarzelle (= n- dotierte Seite) am - Pol des Netzgerätes, so arbeitet die Solarzelle als Diode im Durchlassbereich und die Glühlampe leuchtet. Der Spannungsabfall an der Solarzelle ist ca. 0,6 V. Liegt der + Pol der Solarzelle (= p-dotierte Seite) am - Pol des Netzgerätes, sperrt die Solarzelle und die Glühlampe leuchtet nicht. Die Solarzelle verhält sich also genau wie eine Diode.

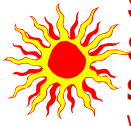
23.2 Wird nun eine Wechselspannung angelegt, so lässt die Solarzelle als Diode nur eine Halbwelle passieren (je nach Polung die positive oder die negative Halbwelle) und entspricht so genau der Einweg- Gleichrichtung mit einer normalen Si- Diode. Dieser Effekt lässt sich auch mit dem Oszilloskop graphisch zeigen.

24. 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.

25. Betrieb eines 3 V- Radios oder anderer 3V- Geräte etc. mit 6 Modulen SUSE 4.2 in Reihenschaltung (optimal hierfür: Gerät SUSE 4.3 oder 4.33) **I,II**

Mehrere Solarmodule SUSE 4.2 lassen sich problemlos zur Spannungserhöhung in Reihe schalten. Zum Betrieb von 3V- Geräten mit 2 Mignonzellen (Radio, etc.) werden die Batterien herausgenommen und an die Batterieanschlüsse 2 Anschlusskabel gelötet. 6 Solarmodule SUSE 4.2 werden in Reihe geschaltet und polrichtig an die Kabel des Gerätes angeschlossen. Nun kann das Gerät mit Solarstrom betrieben werden. Radiogeräte für 3 V sind bei NILS- ISFH als Zubehör erhältlich.



26. Die Solarzelle funktioniert auch bei Infrarotlicht – Beweis mit SUSE 4.2 **III**

Wegen des Bandabstands von Silizium hat eine Silizium- Solarzelle ihre höchste Empfindlichkeit und ihr Wirkungsgrad- Maximum im nahen Infrarotbereich bei 1100 – 1200 nm Wellenlänge. In den Schul- Physiksammelungen gibt es Infrarotfilter zum Vorsatz vor Experimentierleuchten, mit denen man z.B. Lichtmühlen mit IR- Licht bestrahlen kann, deren Drehung weist dann IR- Licht nach. Auch an Solarzellen, die mit IR- Licht <1200 nm bestrahlt werden, zeigen durch Strom und Spannungsmessungen den lichtelektrischen Effekt, sie funktionieren auch bei IR- Licht. Auch mit Bestrahlung mit einer IR- Fernbedienung lässt sich ein Stromanstieg des Kurzschlussstroms nachweisen.

27. Aufladen eines Energiespeichers (Goldcap- Kondensator) mit einer Solarzelle. **II,III**

Die von einer Solarzelle gelieferte elektrische Energie lässt sich in einem Goldcap- Kondensator speichern, um sie bei Dunkelheit wieder abzugeben. Die Spannung **einer** Solarzelle reicht aus, um einen Goldcap- Kondensator großer Kapazität (optimal 3,3 F) aufzuladen. Dieser muss anschließend von der Solarzelle getrennt werden, da diese bei Abdunklung als Diode in Durchlassrichtung den Kondensator wieder entladen würde. Den aufgeladenen Kondensator kann man an den Motor des Solarmoduls SUSE 4.2 anlegen, der sich solange dreht, bis die Spannung am Goldcap die Minimalspannung des Motors unterschritten hat. Ein NiMH- oder NiCd- Akku lässt sich mit 3 Modulen SUSE 4.2 in Reihenschaltung aufladen.

28. Betrieb des Solarmotors mit mehreren Modulen SUSE 4.2 in Reihenschaltung **I,II**

Der Solarmotor kann mit bis zu 7 Modulen in Reihenschaltung ($U = 4,2 \text{ V}$) betrieben werden. An allen Modulen werden die Verbindungsstecker gezogen, nur der Motor eines Moduls wird verwendet. Die übrigen Module werden schrittweise in Reihe geschaltet und die Reihenschaltung an einen Motor angelegt. Dieser dreht sich Stufe für Stufe immer schneller.

29. Bestimmung der Stromdichte j (in mA/cm^2) einer Solarzelle **II,III**

Die Qualität von Solarzellen lässt sich gut mit der Stromdichte j der Zelle – das ist der generierte Strom bei $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ Einstrahlung und 25°C pro cm^2 Zellenfläche- definieren. Eine gute Solarzelle sollte über $30 \text{ mA}/\text{cm}^2$ haben, eine sehr gute Zelle über $34 \text{ mA}/\text{cm}^2$. Entsprechend der Herstellerangaben der SUSE- Solarzelle im Modul SUSE 4.2 sollte die Zelle bei $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ und 25°C einen Kurzschlussstrom von 880 mA haben, d.h. eine Stromdichte j von $880 \text{ mA}/25\text{cm}^2 = 35,2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ besitzen, ein sehr guter Wert ! Zur Messung benötigt man eine kalibrierte Lichtquelle mit $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ (oder das natürliche Sonnenlicht im Sommer bei wolkenlosem Himmel). Man misst den Kurzschlussstrom der Zelle in mA und die Zellenfläche in cm^2 , der Quotient ist die Stromdichte j .

30. Der Solarmotor als Generator **I, II**

Dreht man den Solarmotor am Propeller wirkt er als Gleichstromgenerator, die Spannung kann mit einem Voltmeter gemessen werden oder ein zweiter Motor wird angeschlossen und dreht sich dann, wenn der erste Motor mit der Hand gedreht wird. Der erste Motor wirkt dann als Generator, der 2. Motor erhält seine Energie vom ersten Motor und dreht sich daraufhin. Dabei müssen die Verbindungsstecker zur Solarzelle abgezogen sein.

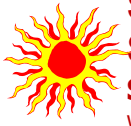
31. Digitale Anzeige der Bestrahlungsstärke des Lichts in W/m^2 auf einem Digitalvoltmeter (optimal hierfür: Gerät SUSE 5.23) **II,III**

Die Bestrahlungsstärke S des Lichts in W/m^2 lässt sich – wie in Experiment 10 aufgezeigt – über den Kurzschlussstrom einer Solarzelle mit einer kleinen Berechnung einfach bestimmen. Es gibt aber eine Möglichkeit, mit einem 3 1/2 –stelligen Digitalvoltmeter im 200 mV Bereich den Wert S direkt digital anzuzeigen:

1. Man bestimmt auf der Platte eines Overheadprojektors mit der Methode von Exp. 10 die Bestrahlungsstärke S .
2. Nun verbindet man die beiden Anschlüsse der Solarzelle des Moduls SUSE 4.2 (Verbindungsstecker gezogen) mit einem Schaltaht der Länge ca. $1,20\text{m}$ und misst anschließend den Spannungswert am DVM im 200 mV Bereich, der Wert ist nun zu groß. Nun verkürzt man die Länge des Schaltdrahtes so lange, bis die Anzeige auf dem DVM dem Wert der Bestrahlungsstärke S genau entspricht. Beim Modul SUSE 5.23 wird dieses Verfahren verwendet.

32. Messungen mit dem Overhead- Projektor als ideale Lichtquelle **I, II**

Neben Messungen im natürlichen Sonnenlicht ist das Licht eines Overheadprojektors (OHP) ideal für Messungen mit dem Solarmodul SUSE 4.2 geeignet. Moderne Overheadprojektoren haben auf der Glasplatte hohe Bestrahlungsstärken von ca. $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, durch eingebaute IR- Filter ist das Licht relativ „kalt“ und erwärmt die Zelle nur langsam. Den genauen Wert der Bestrahlungsstärke kann man nach der Methode von Experiment 10 bestimmen. Die unter der Glasplatte eingebaute Fresnel- Linse bündelt das Licht nach oben zum Spiegelkopf des OHP, so dass von der Glasplatte nach oben die Bestrahlungsstärke ansteigt und für Messungen bei höheren Bestrahlungsstärken das Modul SUSE 4.2 mit Stativmaterial nur höher befestigt werden muss. Um die Erwärmung der Solarzelle zu vermeiden – dadurch würde die Leistung der Solarzelle sinken- sollte nur für direkte Messungen das Licht auf die Zelle einwirken, ansonsten ist es sinnvoll, eine Alufolie zwischen Glasplatte und Zelle zu legen.



33. 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 nach der Methode von Experiment 10 dort 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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. 10 beschrieben, die Bestrahlungsstärke S des diffusen Licht des hellen Himmels. Diese ergibt in Addition mit der direkten Strahlung der Sonne die Globalstrahlung.

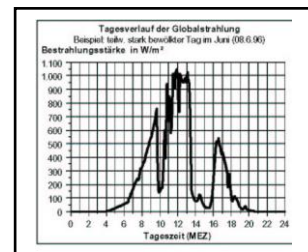
37. Absorption der Sonnenstrahlung durch Bewölkung I, II

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 verschiedenen 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 10 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.

38. 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 ($880 \text{ mA} = 1000 \text{ W/m}^2$) kann dann direkt die Bestrahlungsstärke S in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt werden.



39. 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.

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

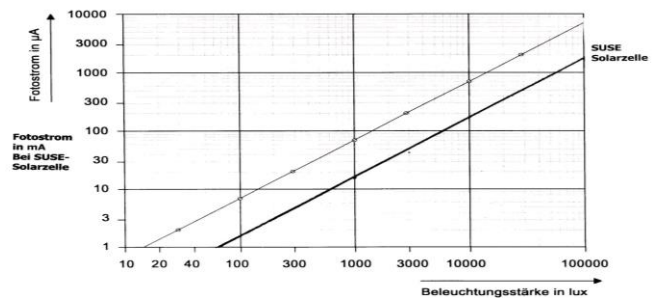
Die Lichtintensität einer punktförmigen Lichtquelle nimmt nach außen quadratisch ab. Diese Abhängigkeit lässt sich mit dem Modul SUSE 4.2 experimentell nachweisen. Man baut als Lichtquelle eine Glüh- oder Halogenlampe (ohne Reflektor!) auf (optimale Lampe: Halogenlampe 50W) und stellt das Modul SUSE 4.2 in ca. 30 cm Abstand auf. Der Kurzschlussstrom wird – bei gezogenen Verbindungssteckern- mit einem Amperemeter gemessen und wie im Exp. 10 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!).

41. Messung der Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung I, II

Die Globalstrahlung ist die Summe der Bestrahlungsstärken der Sonne direkt, der Strahlung der Wolken und der Strahlung des blauen Himmels. Wird die Solarzelle im Freien waagrecht montiert, so misst man die Globalstrahlung, die bei unbewölktem Himmel und sommerlicher Sonnenstrahlung 1000 W/m^2 beträgt und bei bestimmten Wetterlagen sogar über 1000 W/m^2 betragen kann, wenn die direkte Sonnenstrahlung auf die Solarzelle fällt und weiße Kumulus- Wolken zusätzlich als Lichtquelle dienen. Mit der in Exp. vorgestellten Methode, lässt sich aus dem Kurzschlussstrom die Globalstrahlung berechnen.

42. SUSE 4.2 als Luxmeter II, III

Die Beleuchtungsstärke Lux ist eine auf das menschliche Auge bezogene Messgröße und nicht linear zur Bestrahlungsstärke S . Mit nebenstehender Eichkurve lässt sich SUSE 4.2 als Luxmeter verwenden. Der Kurzschlussstrom wird in mA gemessen, der Wert auf der y-Achse aufgesucht und über die Eichkurve der Luxwert bestimmt.



43. Aufnahme der U(S) und der I(S)- Kennlinie einer Solarzelle mit 2 Geräten SUSE 4.2/5.2

Die Spannung und die Kurzschlussstromstärke einer Solarzelle hängen von der Lichtintensität (Bestrahlungsstärke S) ab. Stellt man nun 2 Geräte 4.2 oder 5.2 exakt nebeneinander lassen sich bei verschiedener Lichtintensität im Labor oder im Freien Die Spannung und die Kurzschlussstromstärke messen und aus der Kurzschlussstromstärke die Bestrahlungsstärke S berechnen. Danach lassen sich die Graphen per Messung aufnehmen und zeichnen. Es ergeben sich die nebenstehenden Graphen:

