



**Photovoltaik-
System
SUSE**

innovative Solarsysteme für Schule und Ausbildung

**Solarthermiesystem
Wärme von der Sonne**



Experimente zur Solarstrahlung mit dem Solarstrahlung- Messmodul SUSE 5.23, SUSE 5.23A, SUSE 4.24A

Bei Experimenten mit SUSE 4.24A geringere Genauigkeit wegen analoger Anzeige!

QR- Code für die Experimentieranleitung



A Physikalische Grundlagen zur Bestrahlungsstärke und Solarenergie B Experimente

Wenn wir die Solarstrahlung durch präzise Messungen in Experimenten analysieren, ist es notwendig, ihre Entstehung in der Sonne und ihre Strukturen auf der Erde zu kennen.

- A1 Die Entstehung der Solarstrahlung durch Kernfusion in der Sonne
- A2 Die Ausbreitung der Strahlung von der Sonne durch die Lufthülle auf den Erdboden
- A3 Die Intensitätsverteilung der Strahlung
- A4 Globalstrahlung, Direkt- und Diffusstrahlung
- A5 Von der Bestrahlungsstärke zur Solarenergie: Stunden- und Tagesverläufe der Strahlung und Bestimmung der eingestrahnten Energie



Die Sonne
In jeder Sekunde wandeln sich 4,2 Mill. t Masse in Energie um nach $E = mc^2 = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ J}$

Strahlungsenergie An der Oberfläche **63 MW/m²**

150 Mill. km

Außenrand der Lufthülle der Erde: **1380 W/m²**

Wolkenloser Himmel:
Am Erdboden **1000 W/m²**

Bewölkter Himmel:
Am Erdboden **100 W/m²**

A1 Die Kernfusion im Inneren der Sonne:

Die Sonne ist ein riesiger Kernfusionsreaktor, der seine Energie als Strahlungsenergie in den Weltraum abstrahlt. Im Sonneninnern läuft bei 100 Millionen °C die Proton-Proton-Reaktion ab, dabei fusionieren Deuteriumkerne zu Heliumkernen. Stark vereinfacht kann man diese Proton-Proton-Reaktion als die Verschmelzung von vier Protonen zu einem Heliumkern beschreiben, bei den Zwischenreaktionen werden auch Positronen, Neutrinos und Gammastrahlung erzeugt. Die Masse eines Heliumkerns ist geringer als der ursprünglichen Protonen, die fehlende Masse wurde nach der Einstein- Gleichung $E = mc^2$ in Energie umgewandelt.

In der Sonne verschmelzen in jeder Sekunde 567 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 562,8 Millionen Tonnen Helium. Somit wird unsere Sonne in jeder Sekunde um 4,2 Millionen Tonnen leichter. Nach Einstein führt das zu einer Energieabstrahlung in jeder Sekunde von $3,8 \cdot 10^{26} \text{ J}$, was eine Abstrahlung von **63 MW** (Megawatt) pro 1 m² bedeutet. 10 m² Sonnenoberfläche strahlen genau so viel Energie ab wie ein Kohlekraftwerk mit 630 MW.

Weil die Erde sehr viel kleiner ist als die Sonne und 150 Millionen km entfernt ist, trifft nur ein sehr kleiner Teil der ausgestrahlten Energie die Erde am Rand ihrer Lufthülle:

Nur noch **1380 W/m²**, das ist die **Solarkonstante** am Außenrand der Lufthülle der Erde. Durch Absorption von Strahlung in der Lufthülle ist die Bestrahlungsstärke am Erdboden bei wolkenlosem Himmel **S = 1000 W/m²**.

Abb.1: Entstehung und Verlauf der Solarstrahlung

A2 Die Ausbreitung der Strahlung von der Sonne durch die Lufthülle auf den Erdboden

Am Erdboden kommen bei wolkenlosem Himmel eine Bestrahlungsstärke $S = 1000 \text{ W/m}^2$ an, die restliche Energie von 380 W/m^2 wird für chemisch- physikalische Reaktionen in der Atmosphäre benötigt (z.B. in der Ozonschicht). Diesen Messwert 1000 W/m^2 können wir bei strahlendem Sonnenschein im Sommer präzise messen.

Bei bewölktem Himmel absorbieren die Wolken einen großen Teil der Strahlungsenergie, bei stark bewölktem Wetter kommen z.B. nur noch 100 W/m^2 auf dem Erdboden an. Auch im Winter erreicht die Bestrahlungsstärke bei strahlendem Sonnenschein den Wert 1000 W/m^2 nicht, weil der längere Weg des Lichts im Winter durch die Lufthülle Energie absorbiert, der Wert wird maximal 600 W/m^2 . Alle zugehörigen Messungen führen wir mit **SUSE 5.23** durch.

A3 Die Intensitätsverteilung der Strahlung

Die Sonne ist ein Temperaturstrahler, ihre Oberflächentemperatur beträgt 6000 K , die Strahlung zeigt ein kontinuierliches Spektrum vom Infrarotlicht über das sichtbare Licht bis hin zum UV-Licht. Die nachfolgende Grafik zeigt die Intensitätsverteilung.

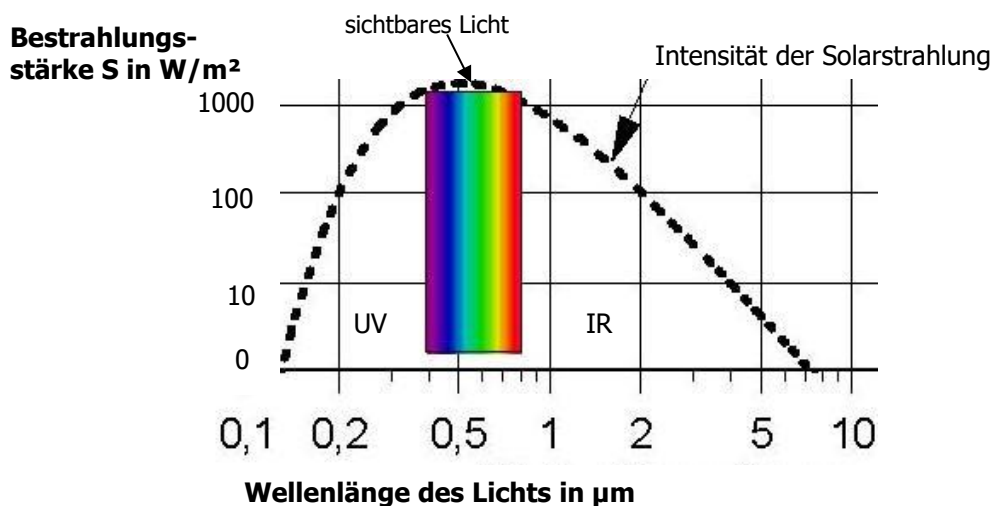


Abb.2: Die Intensitätsverteilung der Solarstrahlung

Der Wellenlängenbereich des Sonnenlichts geht von $0,15 \mu\text{m}$ im UV- Licht über das sichtbare Licht (Regenbogenspektrum, $400 - 800 \text{ nm}$) bis zu langwelligem Infrarotlicht (IR) bei ca. $7 \mu\text{m}$. Das Maximum der Strahlung liegt im grünen Licht bei ca. 550 nm ($0,55 \mu\text{m}$). Für Silizium-Solarzellen ist besonders das Licht von $500 - 1100 \text{ nm}$ sehr wichtig. Am empfindlichsten sind Si-Solarzellen im roten und im IR- Licht bis 1100 nm .

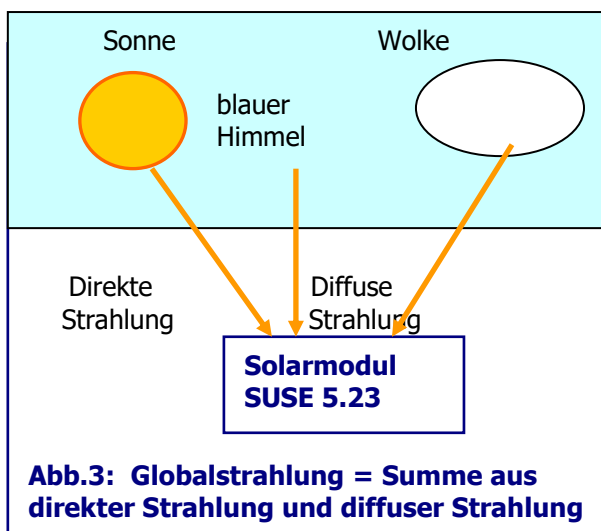


Abb.3: Globalstrahlung = Summe aus direkter Strahlung und diffuser Strahlung

A4 Globalstrahlung, Direkt- und Diffusstrahlung

Wenn wir das Solarmodul **SUSE 5.23** bei strahlendem Sonnenschein zum Himmel, zur Sonne hin halten, messen wir einmal die **direkte Strahlung** der Sonne, wir messen aber auch die Strahlung des hellen blauen Himmels oder einzelner weißer Wolken, die **diffuse Strahlung**. Beide Strahlungsarten zusammen ergeben die **Globalstrahlung**, die wir mit **SUSE 5.23** messen. Bei trübem, bedecktem Himmel haben wir nur diffuse Strahlung, die vom ganzen Himmel stammt, mit einer kleinen stärkeren Richtung aus der Sonnennähe.

A5 Von der Bestrahlungsstärke zur Solarenergie: Stunden- und Tagesverläufe der Strahlung und Bestimmung der eingestrahlt Energie

Mit unserem Solarmodul **SUSE 5.23** messen wir die augenblickliche Strahlungsleistung (Bestrahlungsstärke) in W/m^2 , um die eingestrahlte Energie im Zeitraum t zu messen, müssen wir bei konstanter Bestrahlungsstärke mit der Zeit t multiplizieren und erhalten dann die eingestrahlte Energie W für diesen Zeitraum pro 1m^2 .

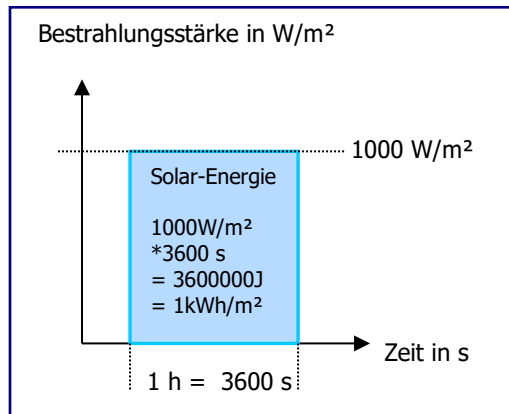


Abb.4: Eingestrahlt Solarenergie bei einer Bestrahlungsstärke von $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ und einer Zeitdauer von $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$

Da sich die Sonne – von der Erde aus gesehen – bekanntlich von Ost nach West wandert und mittags um 12 Uhr ihren höchsten Stand erreicht, müssten wir unsere Solarmodul in ca. 5- Minuten- Intervallen ständig in Horizontal- und Vertikalrichtung nachdrehen, damit die Sonnenstrahlung immer senkrecht auf die Solarzelle trifft. Dies werden wir in den Experimenten durchführen. Gehen wir im Idealfall davon aus, dass so an einem schönen Sommertag die Bestrahlungsstärke genau 1 Stunde (3600 s) bei $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ bleibt, dann erhalten wir **pro 1 m^2** genau eine Energie von $3\,600\,000 \text{ J} = 1\text{kWh}$ eingestrahlt Energie, die nebenstehende Abbildung zeigt diese energetische Situation.

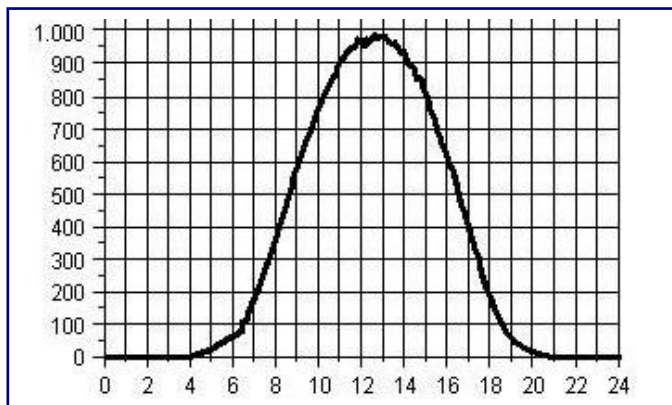


Abb.5: Tagesverlauf einer Bestrahlungsstärke in W/m^2 (y-Achse) von 0 – 24 Uhr (x- Achse) an einem wolkenlosen Sommertag (Quelle: NILS- ISFH). Das Messmodul **SUSE 5.23** ist auf einem Süddach mit 35° Dachneigung montiert.

In der Praxis ist die Situation schwieriger, da bei strahlendem Sonnenschein bei einem fest montierten Gerät **SUSE 5.23** (auf Süd- Dach mit 35° Dachneigung) die Sonnenstrahlung morgens nach Sonnenaufgang von Ost kommend mit flachem Winkel auftrifft, mittags um 12 Uhr nahezu Senkrecht auf die Solarzelle strahlt und abends sehr flach einstrahlend nach Westen ausläuft. Die nebenstehende Abbildung zeigt eine solche reale Situation.

Die Bestrahlungsstärke beginnt morgens um 4.00 Uhr, steigt mit dem Sonnenstand in Form einer Glockenkurve an, erreicht mittags den maximalen Wert von $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ und klingt am Nachmittag wieder ab, bis sie abends gegen 21 Uhr zum Sonnenuntergang auf 0 zurückgeht.

Die **eingestrahlt Energie ist** nun die Fläche = das Integral unter der Kurve der Bestrahlungsstärke. Jedes Rechteck der Grafik entspricht einer Energie von $100 \text{ Wh} = 0,1 \text{ kWh}$, die gesamte Fläche ist ca. $7,5 \text{ kWh}$, soviel Energie wurde im Laufe des Tages auf 1 m^2 Dachfläche eingestrahlt. In Strompreiseinheiten von $20 \text{ ct}/\text{kWh}$ entspricht diese Energie einem Wert von $3,75 \text{ Euro pro m}^2$. Durch Auszählen der Kästchen lässt sich die Energie berechnen, ist die mathematische Funktion der Kurve bekannt, kann man die Fläche durch mathematische Integration bestimmen.

An bewölkten Tagen mit einem schnellen Wechsel von Wolken und Sonnenschein ist die Situation komplizierter, die Tagesenergie wäre dann nur noch $3\text{-}4 \text{ kWh pro m}^2$, an einem ganz trüben Wintertag unter 1 kWh pro m^2 . Alle Messungen können wir mit unserem Messmodul **SUSE 5.23** durchführen.

B 7 Experimente mit dem Solarmodul SUSE 5.23

1. Messungen der Bestrahlungsstärke S in W/m^2 im natürlichen Sonnenlicht
2. Messungen der Bestrahlungsstärke S in W/m^2 von Lichtquellen
3. Messungen der Sonnenposition
4. Messung der Direktstrahlung und der Diffusstrahlung und Probleme der Verschattung
5. Messung der Globalstrahlung auf Dachflächen
6. Messungen von Stunden- oder Tagesverläufen mit PC- Interface, Bestimmung der eingestrahlt Solarenergie in kWh oder J
7. Absorptionsmessungen mit Glas, Plexiglas, Klarsichthüllen

Zusätzliche optionale Geräte und Bauteile:

- 1 Halogenstrahler (Baustrahler) 500 W auf Tischfuß
- 1 optische Bank PV 5.0 mit Halogenstrahler 5.16 und Trafo 12V/60 W
- 1 Kompass, schulübliches Stativmaterial (Dreifuß, Stangen, Muffen), 1 Zollstock
- PC- Interface (z.B. Cassylab) und Notebook + 2 Laborkabel

B1 Messungen der Bestrahlungsstärke S in W/m^2 im natürlichen Sonnenlicht

Unser Auge ist ein sehr schlechtes Messgerät für Solar- und Lichtstrahlung, durch die Irisblende empfinden wir sehr helles Licht als weniger intensiv und schwaches Licht (z.B. in der Dämmerung) als viel heller als es wirklich ist.

Daher wollen wir vor Durchführung der Messungen die erwartete Lichtintensität schätzen und nach den Messungen mit den präzisen Messwerten vergleichen und die Abweichung in % berechnen!

Die Richtung zur Sonne findet man dadurch, dass dann auf dem Display der maximale Wert angezeigt wird, auch bei bedecktem Himmel!

Wählen Sie aus der Tabelle passende Mess- Situationen!

Strahlungssituation	Schätzung in W/m^2	Messung in W/m^2	Differenz in %
Strahlender Sonnenschein im Sommer, keine Wolken SUSE 5.23 zur Sonne gehalten Vormittags:Uhr			
Strahlender Sonnenschein im Sommer, keine Wolken SUSE 5.23 zur Sonne gehalten Mittags: 12 Uhr			
Strahlender Sonnenschein im Sommer, keine Wolken SUSE 5.23 zur Sonne gehalten abends:Uhr			
Strahlender Sonnenschein im Winter, keine Wolken SUSE 5.23 zur Sonne gehalten Vormittags:Uhr			
Strahlender Sonnenschein im Winter, keine Wolken SUSE 5.23 zur Sonne gehalten Mittags: 12 Uhr			

Strahlender Sonnenschein im Winter, keine Wolken SUSE 5.23 zur Sonne gehalten abends:Uhr			
Leicht bedeckter Himmel SUSE 5.23 in Richtung Sonne gehalten Uhrzeit:Uhr im Sommerhalbjahr			
Leicht bedeckter Himmel SUSE 5.23 in Richtung Sonne gehalten Uhrzeit:Uhr im Winterhalbjahr			
Stark bedeckter Himmel SUSE 5.23 in Richtung Sonne gehalten Uhrzeit:Uhr im Sommerhalbjahr			
Stark bedeckter Himmel SUSE 5.23 in Richtung Sonne gehalten Uhrzeit:Uhr im Winterhalbjahr			
Sehr stark bedeckter Himmel extrem trübes Wetter SUSE 5.23 in Richtung Sonne gehalten Uhrzeit:Uhr im Winterhalbjahr			

Bewerten Sie Ihre Messungen hier:

B2 Messungen der Bestrahlungsstärke S in W/m^2 von Lichtquellen

Strahlungssituation	Schätzung in W/m^2	Messung in W/m^2	Differenz in %
20 cm vor Halogenstrahler (Baustrahler) 500 W			
40 cm vor Halogenstrahler (Baustrahler) 500 W			
80 cm vor Halogenstrahler (Baustrahler) 500 W			

Auf optischer Bank SUSE 5.0 mit Halogenstrahler 35 W Abstand zur Lampe 15 cm			
Auf optischer Bank SUSE 5.0 mit Halogenstrahler 35 W Abstand zur Lampe 30 cm			
Südfenster, Modul senkrecht gehalten vor der Scheibe(außen!)			
Südfenster, Modul senkrecht gehalten hinter der Scheibe (innen!)			
Modul mit Taschenlampe bestrahlt Im Innenraum Modul zum Fenster ausgerichtet			
Im Innenraum Modul zur Deckenbeleuchtung ausgerichtet			
Vor Vorderlicht eines PKW im Fernlicht- Modus, Messung direkt am Glas			
Overheadprojektor Modul SUSE 5.23 in der Mitte des Glasfeldes nach unten zur Lichtquelle gerichtet			
Overheadprojektor Modul SUSE 5.23 in einer Ecke am Rand des Glasfeldes nach unten zur Lichtquelle gerichtet			

Bewerten Sie ihre Messungen hier:

B3 Messungen der Sonnenposition

Mit astronomischen Tabellen oder Berechnungen lässt sich an jedem Ort der Stand der Sonne zu jeder Tageszeit im Azimuth (Winkel in der horizontalen Ebene) und Elevation (Winkel in der vertikalen Ebene) bestimmen. Mit PV 5.23 lässt sich diese Messung auch wie folgt durchführen: Richten Sie – im strahlenden Sonnenschein- das Solarmodul PV 5.23 mit Hilfe eines Kompasses genau waagrecht nach Norden aus. Befestigen Sie nun mit einem Stativaufbau ein Geo- Dreieck parallel zu einer Kante des Gehäuses. Drehen Sie nun das Modul horizontal so weit, bis der maximale Bestrahlungswert angezeigt wird, dann haben Sie die horizontale Richtung gefunden. Messen Sie den Drehwinkel mit dem Geo- Dreieck.

Kippen Sie nun das Gerät so weit nach hinten, bis der Bestrahlungsstärke- Messwert das absolute Maximum erreicht. Nun haben Sie auch den vertikalen Winkel (Elevation) eingestellt. Messen Sie nun mit einem kleinen Schnurlot und dem Geo- Dreieck den Vertikalwinkel.

Auch bei völlig bedecktem Himmel, bei dem man die Sonnenposition nicht mehr erkennen kann, lässt sie sich mit **SUSE 5.23** finden: Halten Sie das Modul **SUSE 5.23** schräg zum Himmel nach oben und drehen Sie es solange, bis der maximale Wert angezeigt wird, dort befindet sich die Sonne hinter der Wolkenschicht.

B4 Messung der Direktstrahlung und der Diffusstrahlung und Probleme der Verschattung

Richten wir bei strahlendem Sonnenschein das Modul **SUSE 5.23** zur Sonne aus, so kommen ca. 90% des Lichts direkt von der Sonne (**direkte Strahlung**), ca. 10% vom hellen, blauen Himmel (**diffuse Strahlung**), beides zusammen ergibt die Globalstrahlung, die wir mit der Solarzelle des Gerätes messen. Um nur die Diffusstrahlung zu messen, richten wir das Modul mit einem Stativaufbau genau zur Sonne aus. Nun nehmen wir ein ca. 10x 10 cm großes Quadrat aus schwarzer Pappe an einem ca. 50 cm langen Draht und gehen damit einige dm entfernt vor die Solarzelle, so dass der Schatten des Kartons genau die Solarzelle bedeckt. Nun messen wir nur noch die Diffusstrahlung, weil das direkte Licht der Sonne die Solarzelle nicht mehr erreicht. Ein großes Problem für Solaranlagen auf Dächern sind ungewollte Verschattungen durch Nachbargebäude, Bäume, Schornsteine, Antennenmasten..., die für einen gewissen Zeitraum die Solarzelle verschatten. Simulieren Sie dieses mit einer Verschattung der Solarzelle mit der Hand um 1/3 oder nur mit einem Finger. Messen Sie diese Situation:

Strahlungssituation	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Minderung um % gegenüber der unverschatteten Solarzelle
Solarzelle zur Sonne ausgerichtet, keine Verschattung		
Abschattung der Solarzelle mit der Hand in ca. 10 cm Abstand um etwa 1/3		
Abschattung der Solarzelle mit einem Finger in ca. 10 cm Abstand		

Bewerten Sie ihre Messungen hier:

B5 Messung der Globalstrahlung auf Dachflächen

Wird eine begehbare und ungefährlich zu betretende Dachfläche als Standort für eine Solaranlage vorgesehen, kann man die Bestrahlungsstärke – und über einen zeitlichen Bereich- auch die Solarenergie messen. Das Modul wird genau parallel zur Dachfläche auf dem Dach befestigt und die Bestrahlungsstärke S gemessen. Die Solarenergie erhält man, wenn man manuell oder mit einem PC- Interface die Bestrahlungsstärke über einen gewissen Zeitraum (1- 6 Stunden oder mehr) im Minutentakt aufnimmt, die Werte tabellarisch festhält und die Grafik S(t) zeichnet.

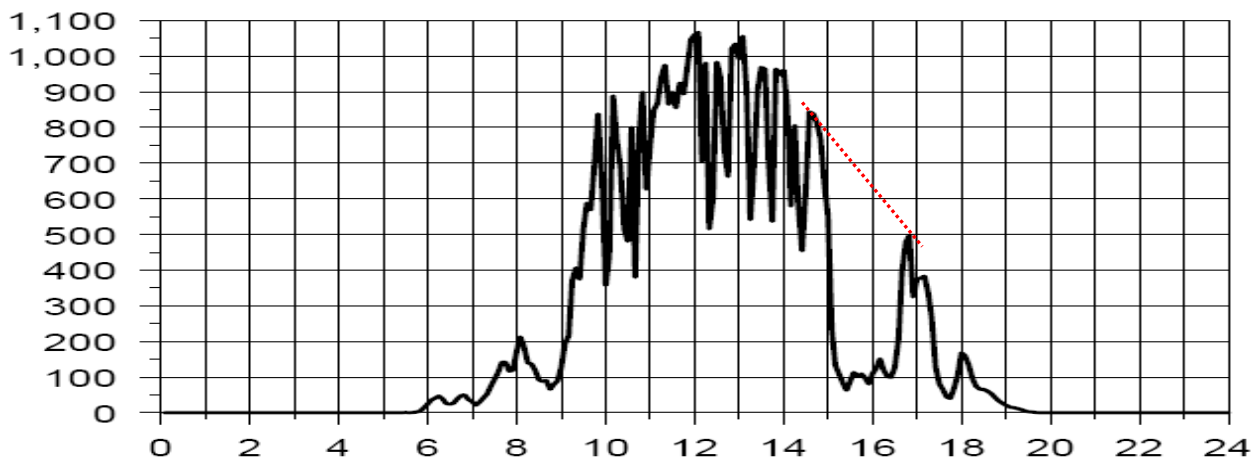
Wird die t- Achse in Sekunden eingeteilt (z.B. 5mm für 1 Minute = 60 Sekunden) so ergibt die Fläche unter der Kurve ist die eingestrahlte Solarenergie in Watt-Sekunden = Joule.

Wenn das Display des Gerätes **SUSE 5.23** verdeckt ist, da es parallel zur Dachfläche angebracht wurde, kann an den Messbuchsen ein Voltmeter im Messbereich 200 mV angeschlossen werden, es zeigt den identischen Wert zum Display an. Diese Kabel zum Voltmeter kann auch recht lang sein, 10...20 m, da lediglich eine Spannung gemessen wird.

B6 Messungen von Stunden- oder Tagesverläufen mit PC- Interface, Bestimmung der eingestrahlichten Solarenergie in kWh oder J

Die Messung eines Bestrahlungsstärkeprofils über mehrere Stunden oder über einen ganzen Tag zur Bestimmung der eingestrahlichten Energie lässt sich manuell mit **SUSE 5.23** nicht mehr durchführen, hierzu benötigt man ein PC- Interface zur automatischen Messung. Das Modul wird nach Süden ausgerichtet und um 35° geneigt, das wäre die ideale Dachposition für die Installation einer Solaranlage in Deutschland. Nun wird über die Messbuchsen ein PC- Interface angeschlossen, der im 1- oder 5- Minutentakt die Bestrahlungsstärke S misst. In einer Beispielmessung ergab sich an einem regnerischen Apriltag folgender Tagesverlauf:

y- Achse: Bestrahlungsstärke in W/m^2



x- Achse: Uhrzeit in Stunden Quelle: NILS- ISFH

Aufnahme eines Tagesprofils der Bestrahlungsstärke und Bestimmung der eingestrahlichten Energie

Man erkennt deutlich die Einbrüche der Bestrahlungsstärke bei Bewölkung, dieses passierte an diesem Frühlingstag im April mehrfach. Durch Zählen der Energie- Kästchen (je 100 Wh) lässt sich die eingestrahlte Solar- Energie des Tages pro m^2 bestimmen.

An einem Tag mit strahlendem Sonnenschein wären 7 kWh eingestrahlt worden, bei diesem bewölkten Tag waren es nur 5 kWh.

Besonders zwischen 15 und 17 Uhr war die Bewölkung sehr stark, der Verlauf des Graphen bei strahlendem Sonnenschein ist durch die rot gestrichelte Linie markiert! Die eingestrahlte Solarenergie wird also durch Bewölkung stark vermindert.

B7 Absorptionsmessungen mit Glas, Plexiglas oder Folien

Glas oder Plexiglas bzw. Folien (z.B. Klarsichthüllen) lassen das Licht nicht zu 100% passieren (Transmission), sondern absorbieren einen Teil des eingestrahlichten Lichts, so dass bei 100% Einstrahlung weniger als 100% der Strahlung das Glas/Plexiglas/Folie wieder verlassen. Der prozentuale Anteil des durchgehenden Lichts (z.B. 90%) wäre der Transmissionskoeffizient (= 0,9), der Rest, nämlich 10%, wäre vom Stoff reflektiert oder /und absorbiert worden.

7.1 Versuchsaufbau:

7.1.1 Benötigte Bauteile

Messmodul SUSE 5.23, optische Bank SUSE 5.0 o.ä., Halogenstrahler SUSE 5.16 mit Trafo 12 V/60 W, transparente Materialien (Glas/Plexiglas/Folien)

7.1.2 Aufbau + Durchführung

Auf der optischen Bank wird der Halogenstrahler im Abstand von ca. 20 cm zum Messmodul SUSE 5.23 aufgebaut und direkt auf das Messmodul ausgerichtet. Die transparenten Materialien werden direkt vor die Solarzelle gehalten, so dass die Solarzelle vollständig bedeckt wird. Es werden der Wert für die Bestrahlungsstärke S in W/m^2 einmal ohne Material, 1x mit Material abgelesen.

7.2 Die Messungen

Tragen Sie die Messwerte in die Tabelle ein und berechnen Sie die Transmission in % und als Faktor:

Material ↓	Messung der Bestrahlungsstärke S ohne Material in W/m^2	Messung der Bestrahlungsstärke S mit Material in W/m^2	Transmission in % (Differenz der Werte geteilt durch S ohne Material * 100) Transmission- Faktor
Dünne Glasplatte Dicke = mm			
Plexiglasplatte Dicke = mm			
Dicke Glasplatte Dicke = mm			
1 Klarsichthülle			
2 Klarsichthüllen übereinander			
5 Klarsichthüllen übereinander			

Erläutern Sie Ihre Ergebnisse hier: