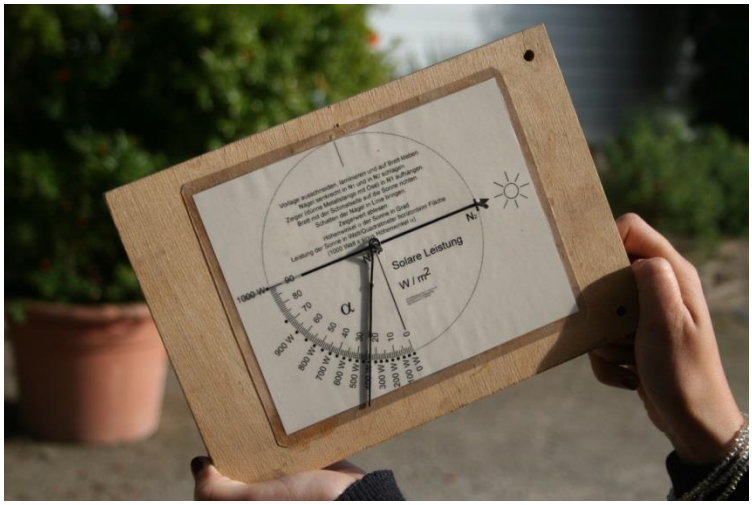
Landeshauptstadt Hannover

Hannover

Schulbiologiezentrum



Wie viel "Power" liefert die Sonne?

Sonne und Energie: Experimente, Messungen und Programme für die Schule

2

Dezember 2018

Wie viel Leistung "fällt" täglich und im kostenlos vom Himmel?

Die im Sonnenlicht enthaltene Energie ist unsere Lebensgrundlage:
Sie lässt die Pflanzen wachsen und schafft damit die Nahrungsgrundlage für Tiere und für uns.
Die Luft zum Atmen entsteht durch Sonnenlicht: Mit seiner Energie spalten Pflanzen das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff.

Ohne die durch Strahlung entstehende Wärme wäre das alles gar nicht möglich!

Foto: Ingo Mennerich

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Schulbiologiezentrum Hannover

Titel: Wie viel "Power" liefert uns die Sonne?
Experimente, Messungen und Programme zum Thema "Sonne und Energie"
Teil 2

Fotos: Ingo Mennerich

Verfasser: Ingo Mennerich
Dezember 2018

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum / Energie-LAB
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info, www.energie-lab.de

Die Sonne leuchtet, sagt der aufgeklärte Mensch, weil sich Wasserstoff unter hohem Druck zu Helium vereinigt und dabei Energie abgeben wird…

Der Physiker Heisenberg sagt: „Der erste Schluck aus dem Becher der Naturwissenschaft macht atheistisch, aber auf dem Grunde des Bechers wartet Gott!"

Feuer machen mit Sonnenpower (2004)

Radio hören mit Solarstrom (2005)

Heiße und kalte Füße:

Fußlabyrinth im Energiegarten des Schulbiologiezentrums

Inhalt

"Watt erfahren": Hanteln stemmen und Fahrrad fahren: 1

Strom selbst gemacht: Unsere "Muskelkraftwerke" 2

Was kann man mit 1000 Watt machen? 3

Wie viel Watt lässt die Sonne vom Himmel fallen? 3

Wir und die Daten der "Profis" 4

Leistungscheck mit elektrischen Messgeräten 6

Bestimmung der maximal möglichen Leistung mit Hilfe der Geometrie 7

Messreihe: Zusammenhang zwischen Leistung und Einfallswinkel 10

Messhilfe zum Bestimmen des Horizontwinkels der Sonne 10

Einfache Kalorimetrie 12

Kalorimetrie mit dem Solarkocher 12

"Kalorimetrie" mit Lupe und Wassertropfen 14

Ein Programm zur Ermittlung der möglichen solaren "Ausbeute" 16

Praktische Messungen an Solarmodulen 17

Excel-Programm zur Ermittlung der maximalen Leistung des Solarmoduls 20

Nicht konstant: Die Solarkonstante 20

Sonnenstrahlen und ihr Weg durch die Atmosphäre 21

Air Mass: Ein Maß für die Weglänge des Lichts durch die Erdatmosphäre 24

Was ist, wenn der Kollektor "schief" zur Sonne steht? 25

Einfache Messhilfe zur Bestimmung des "Fehlwinkels" 27

Solare Leistung auf horizontaler Fläche 28

Solarer Leistungsanzeiger 28

Bestimmen der solaren Tagesleistung ($kW/m^2/d$) 29

Der Sonne auf der Spur: Unser globaler "Sonnenstand-Anzeiger" 33

Tellurium zur Darstellung der Jahreszeiten auf der Erde 35

Anhang: Arbeitsblätter, Kopiervorlagen, Anleitung Tellurium

"Watt erfahren": Hanteln stemmen und Fahrrad fahren:

Foto: Energie-LAB

Bevor sich die Schüler mit dem Thema "Sonnenenergie" beschäftigen wäre es sinnvoll, ihnen eine Idee für die damit verbundenen physikalischen Einheiten zu vermitteln. In unserer Unterrichtshilfe "Newton, Joule, Watt & Co" haben wir versucht, dies auch für Nicht-Physiker zu veranschaulichen und "griffig" zu machen. *("Newton, Joule, Watt & Co.", Arbeitshilfe in der Reihe "Natur und Technik", www.schulbiologiezentrum.info)*

Die wichtigsten und gebräuchlichsten Einheiten sind Newton, Joule, Watt und Kilowattstunden. Wie hängen sie zusammen?

Eine Masse von 100 g (z.B. eine Tafel Schokolade) wird von der Erde mit einer Gewichtskraft von etwa 0,98 Newton angezogen. Das kann man mit einem Kraftmesser feststellen. Wenn man vereinfachend auf 1 Newton aufrundet folgt:

- Wenn mir jemand eine Tafel Schokolade auf meine ausgestreckte Hand legt, brauche ich eine zusätzliche Kraft von ungefähr 1 Newton damit sie nicht herunterfällt.

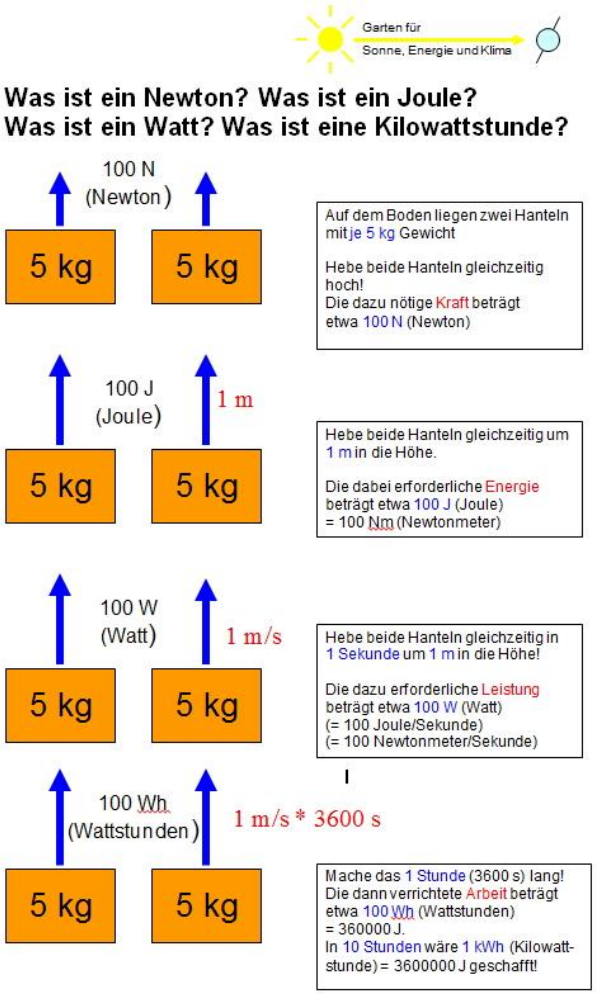
- Wenn ich die Schokolade meinem auf einer Leiter einen Meter über mir stehenden Kollegen reichen soll brauche ich 1 Joule Energie.

- ER soll sie bekommen, nicht ich! Wenn ich ihn ärgern will und den Arm pro Sekunde einmal anhebe und dann wieder absenke leiste ich 1 Watt.

- Wenn ich das 1000mal mache, habe ich 1000 Watt geleistet, also ein Kilowatt.

- Und wenn ich das in einer Stunde schaffe ist das die Arbeit einer Kilowattstunde...

10 kg ≙100 N 100N * 1m = 100 J 100J / 1s = 100W	100W*1h = 100Wh = 0,1 KWh 100W*10h = 1000Wh = 1kWh



Aus der Zeit der EXPO 2000 stammt dieses damals im Energiegarten des Schulbiologie-zentrums aufgestellte Plakat:

Mit zwei Hanteln kann man erfahren:

Durch Halten in der Luft:

- **Kraft**
  (Newton)

Durch Anheben um eine bestimmte Höhe:

- **Energie**
  (Joule= Newton x Meter))

Durch mehrfaches Heben innerhalb einer bestimmten Zeit:

- **Leistung**
  (Watt = Joule / Zeit)

Durch längere Betätigung:

- **Arbeit**
  (Watt x Zeit)

Strom selbst gemacht: Unsere "Muskelkraftwerke"

Muskelkraftwerk im Energie-LAB

Mit dem "Muskelkraftwerk" im Energie-LAB, einem mit Gleichstrom-Generator versehenen Ergometer, lassen sich z.B. Glühlampen zum Leuchten bringen.

Die umgesetzte Leistung wird mit einem Volt- und einem Amperemeter kontrolliert.

Die Leistung (Watt) ist das Produkt aus Spannung (Volt) und Strom (Ampere).

Mehrere parallel geschaltete Glühlampen benötigen zusammen 100 Watt. Das ist für Jugendliche locker zu schaffen. In 10 Stunden käme dann 1 Kilowattstunde zusammen. Oder man tritt gleichzeitig in 10 "Kraftwerke".

Wie auch immer, der Erlös betrüge nach heutigen Preisen etwa 25 Cent.

Was kann man mit 1000 Watt machen?

Wie lange dauert es, 1 Liter Wasser (20°C = 20K) mit einem 1000W-Wasserkocher zum Sieden zu bringen?

Wie groß ist der Anteil der elektrischen Energie der tatsächlich in Wärme verwandelt wird?

Wie lange würde es dauern wenn der Wirkungsgrad 100% betrüge?

$$E = m * \Delta T * 4{,}2J$$

E ist die Energie in Joule, m die Masse des Wassers in Gram und ΔT die Temperaturdifferenz in °C oder Kelvin. Um 1g Wasser um 1°C (=1K) zu erwärmen sind dem Wasser 4,2 Joule Energie zuzuführen.

$$E = 1000g * 80°K * 4{,}2J = 336000J$$

Der Kocher leistet 1000 Watt, das sind 1000 Joule pro Sekunde.

Damit müsste das Wasser nach 336 Sekunden (etwa 5 ½ Minuten) sieden.

Aus der tatsächlich dafür notwendigen Zeit (Sekunden) und elektrischen Arbeit (Wh) lässt sich der Wirkungsgrad des Kochers bestimmen.

Wie viel Watt lässt die Sonne vom Himmel fallen?

In der Schule gibt es mehrere Möglichkeiten, dies zu messen bzw. anderweitig herauszufinden

- Mit Sensoren (Foto- oder Solarzellen) und daran angepasste Voltmeter
- Mit professionellen Messgeräten (z.B. Pyranometern)
- Durch Kalorimetrie, die aber (je nach Verlusten) nur eine Mindestleistung erfassen kann.
- Mit dem Taschenrechner: Horizontwinkel der Sonne in Formel einsetzen
- Mit Messgeräten die auf der Basis dieser Formel konstruiert sind
- Mit Computerprogrammen
- Im Internet

Stimmen die theoretischen Erwartungen mit den tatsächlichen Messungen überein?

Und wenn: Wie viel Sonnenenergie steht an anderen Orten und zu anderen Zeiten zur Verfügung?

- Was würden an den Polen installierte Solarmodule bringen? In der ein halbes Jahr währenden dunklen Polarnacht natürlich nichts, aber was ist, wenn die Sonne im

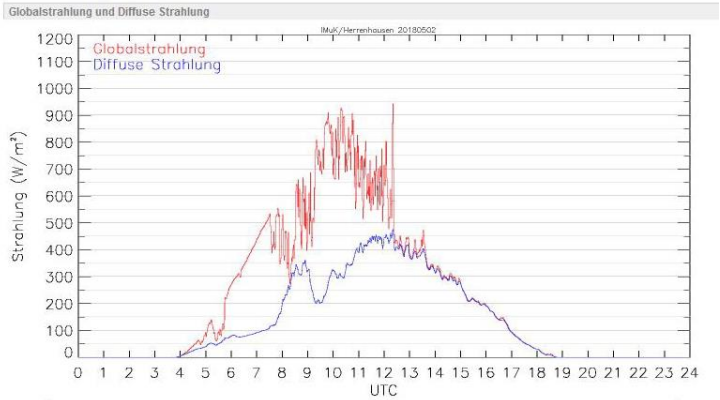
Polarsommer 24 Stunden lang scheint und man die Module nachführt? Und welcher Neigungswinkel wäre dann optimal?

- Oder wären die Tropen besser als die mittleren Breiten, weil die Sonne dort höher steht und der von der Strahlung durch die Atmosphäre zurückzulegende Weg kürzer ist? Dafür sind die Tage in den Tropen kürzer als bei uns im Sommerhalbjahr.
- Wie sollte ein Solarmodul oder Thermokollektor ausgerichtet sein um über einen längeren Zeitraum einen optimalen Ertrag zu liefern?

Fragen wie diese verknüpfen den forschenden Physik-Unterricht mit der Geographie und sind damit ganz im Sinne eines problemorientierten Unterrichts fächerübergreifend. Die hinter den Lösungen stehenden Winkelfunktionen (SIN, COS, TAN) sind mit Taschenrechnern oder Tabellenkalkulationsprogrammen (z.B. Excel) relativ leicht umzusetzen.

Wir und die Daten der "Profis"

Alle nachfolgenden Vorschläge müssen sich natürlich daran messen lassen, in wie weit sie die tatsächlichen, d.h. wissenschaftlich fundierten Daten abbilden. In Hannover gibt es eine gute Quelle: Das Institut für Klimatologie und Meteorologie (IMUK) der Leibniz Universität stellt die Messergebnisse ihrer Stationen in Herrenhausen bzw. Ruthe unter https://www.muk.uni-hannover.de/258.html ins Netz.



	Maximum (UTC)	Tagessumme
Globalstrahlung	943 W/m² (12:21)	5229 Wh/m²
Diffuse Strahlung	476 W/m² (12:21)	3096 Wh/m²
Sonnenscheindauer *		8.1 h

* Die Sonnenscheindauer ist die Zeit, an denen die direkte Strahlung mehr als 120 W/m² beträgt.
Die direkte Strahlung (auf einer Fläche senkrecht zur Sonne) wurde aus der Globalstrahlung, der diffusen Strahlung und der Sonnenhöhe

Die Spitzenwerte der Strahlung am späten Vormittag des 2. Mai 2018 korrespondieren recht gut mit den Werten in unserer Wetterhütte.

Globalstrahlung minus Diffuse Strahlung = Direkte Strahlung

Stimmen die Verläufe der Strahlungswerte mit den Anzeigen in unserer Wetterhütte überein? Und: Können wir mögliche Abweichungen erklären?

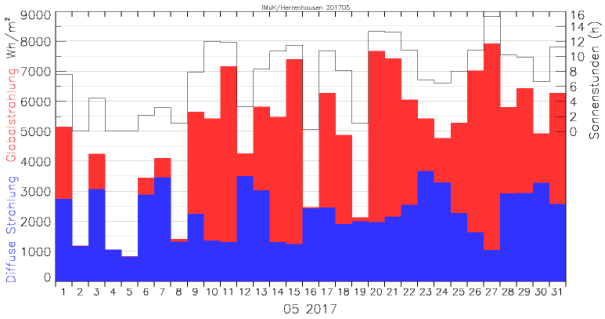
Wir sind keine Profis und haben als schulische Einrichtung natürlich kein teures, wissenschaftliches Instrumentarium zur Hand. Unsere Zielgruppe ist die Schule und hier geht es mehr um die Motivation und die einfache, möglichst selbst erlebbare Untersuchung naturwissenschaftlicher Fragestellungen als um die Objektivität von Daten. Aber:

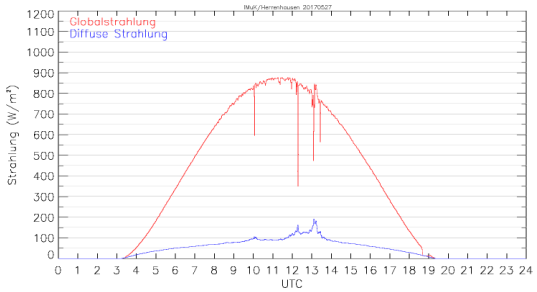
Den Übereinstimmungsgrad der "einfach" gewonnenen Ergebnisse mit wissenschaftlichen Daten kann man heute mit einem Smartphone überprüfen.

Im Anhang finden Sie die vom IMUK gemessenen und in Monatsübersichten dargestellten Tagessummen der Globalstrahlung (Wh/m^2) des Jahres 2017 und die Tageskurve (W/m^2) des sonnigsten Tages im Monat. Die Globalstrahlung setzt sich zusammen aus der Direkten und der Diffusen, z.B. an Wolken gestreuten indirekten Strahlung. Der Anteil der Direktstrahlung ist in den Diagrammen rot, der der indirekten Strahlung blau dargestellt

Die auf geometrische Weise bestimmten Werte erfassen nur die Direktstrahlung (Globalstrahlung - Diffuse Strahlung).

Mai





Vergleich der mit unserem eigenen Programm errechneten Daten und der vom IMUK gemessenen Direktstrahlung (jeweils in zeitlicher Nähe des mittleren Meridiandurchgangs der Sonne in Hannover = 12:21)

	Berechnet (EXCEL)			IMUK 2017						
Monat	21. des Monats, 12:21			Sonnigster Tag des Monats, ca. 12:21		Datum	Global ∑Monat	Diffus ∑Monat	Direkt ∑Monat	Ø/Tag
	W/m^2	Wh/m^2/d		W/m^2	Wh/m^2/d		Wh/m^2	Wh/m^2	Wh/m^2	Wh/m^2/d
Januar	199	893		230	900	20.01.	21300	13200	8100	261
Februar	356	1976		300	1900	15.02.	28700	18800	9900	367
März	546	3627		610	4200	27.03.	78400	43200	35200	1135
April	737	5706		720	5800	30.04.	111200	64300	46900	1563
Mai	852	7283		780	6800	27.05.	153500	69700	83800	2703
Juni	892	7924		800	6900	19.06.	155800	86700	69100	2303
Juli	859	7397		760	5700	18.07.	143800	80900	62900	2029
August	748	5836		640	4700	23.08.	126700	68200	58500	1887
September	561	3765		740	3500	04.09.	78900	49400	29500	983
Oktober	356	1980		470	2700	15.10.	46700	28400	18300	590
November	199	895		230	1000	17.11.	19300	14800	4500	150
Dezember	147	587		200	600	29.12.	9900	8400	1500	48

Direkte und Diffuse Strahlung (https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov)

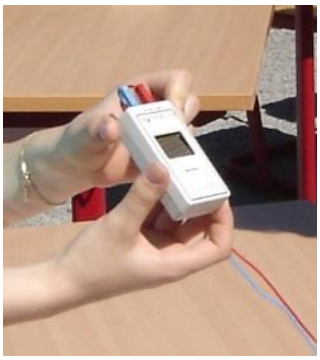
Monthly Averaged Direct Normal Radiation (kWh/m^2/day)

Lat 52 Lon 8	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	1,12	1,90	2,19	3,09	3,57	3,32	3,39	3,48	2,72	1,96	1,17	0,90	2,40

Monthly Averaged Diffuse Radiation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m^2/day)

Lat 52 Lon 8	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	0,50	0,85	1,43	2,09	2,55	2,75	2,64	2,25	1,56	0,93	0,57	0,40	1,55

Leistungscheck mit elektrischen Messgeräten

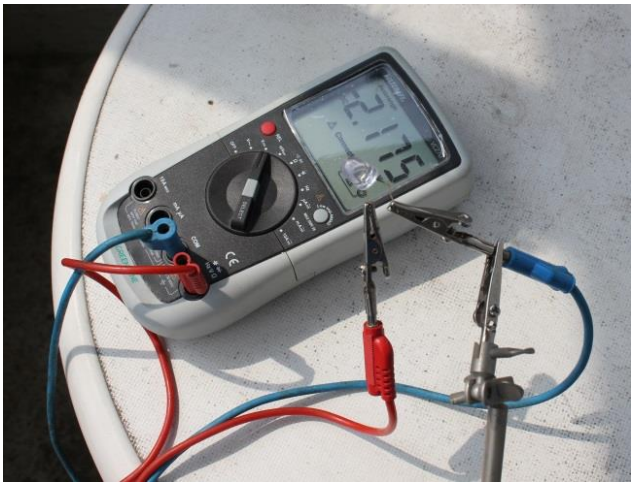


Der im Schulbiologiezentrum in mehreren Exemplaren ausleihbare "IKS Solartrainer Junior" enthält einen Sensor der in Verbindung mit dem Multimeter (Spannungs-messung, mV) die solare Einstrahlung direkt in Watt/m^2 anzeigt. Dieser Experimentierkasten eignet sich hervorragend für die Gruppenarbeit.

Im Energie-LAB benutzen wir seit Jahren einen Datenlogger der die vom beleuchteten Sensor erzeugte Spannung zum Beispiel in aktuelle Werte (W/m^2) und in über längere Zeiträume auflaufende Erträge (Wh/m^2) erfassen kann.

In der Wetterhütte im Energiegarten des Schulbiologiezentrums wird die mit einem Pyranometer gemessene solare Einstrahlung auf einem analogen Messgerät angezeigt. Dies berücksichtigt sowohl die direkte als auch die diffuse Strahlung.

Aus www.schulbiologiezentrum.info, "Wetterseite"



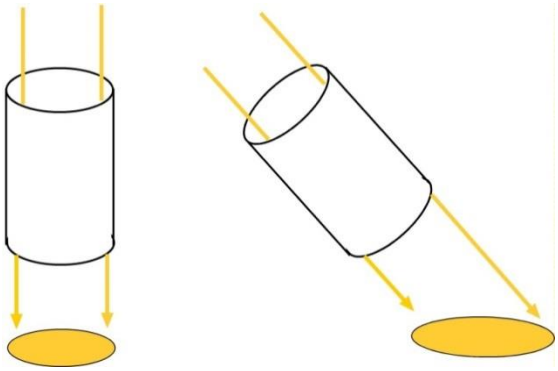
Aus einer weißen LED und einem Spannungsmessgerät kann man ein einfaches Strahlungsmessgerät herstellen. Ein parallel gelegter hochohmiger Widerstand (>100 MΩ) leitet einen Teil des Stroms am Messgerät vorbei. Wird dieser "Shunt" durch einen in weiteren regelbaren Widerstand ergänzt lässt sich das "Messgerät" sogar eichen.
Wichtig ist, dass man dabei im linearen Bereich der Dioden-Kennlinie bleibt.

Bestimmung der maximal möglichen Leistung mit Hilfe der Geometrie

Die zu einem bestimmten Zeitpunkt auf die Erdoberfläche fallende Sonnenenergie (genauer Strahlungsleistung) hängt ab von der Höhe der Sonne über dem Horizont und damit vom Ort (Länge/Breite), der Jahreszeit (Datum) und der Uhrzeit. Je größer der Horizontwinkel, desto größer ist die auf eine horizontale Fläche eingestrahlte Leistung.

Ein einfacher Versuch verdeutlicht den Zusammenhang:

- Nehmen Sie eine Röhre und halten diese so, dass die „Sonnenstrahlen“ parallel zu ihrer Oberfläche hindurchfallen. Die Röhre darf nur einen schmalen Schattenring auf den Boden werfen. Dort erscheint eine Ellipse, deren Form sich, je höher die Sonne steht, einem Kreis nähert. Der Kreis ist der Sonderfall wenn die Sonne im Zenit, also genau über ihnen steht, was nur in den Tropen zwischen den Wendekreisen möglich ist.



Wie hängen der Einfallswinkel des Lichts und die Größe der beleuchteten Fläche zusammen?

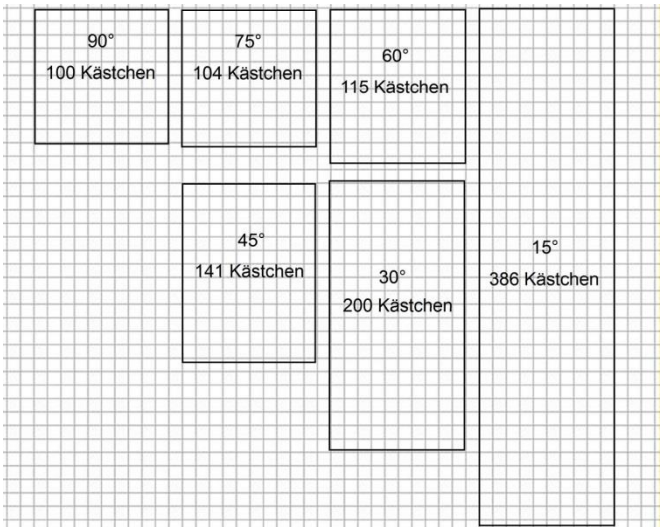
Wie könnte die Formel lauten, die die maximale Leistung bei senkrechter Einstrahlung in eine Beziehung zur tatsächlichen "Höhe" der Sonne setzt?

Um das herauszufinden, braucht man Karopapier und eine Pappröhre, und zwar eine mit quadratischem Querschnitt. Jede der vier Seiten ist 10 Karos lang.

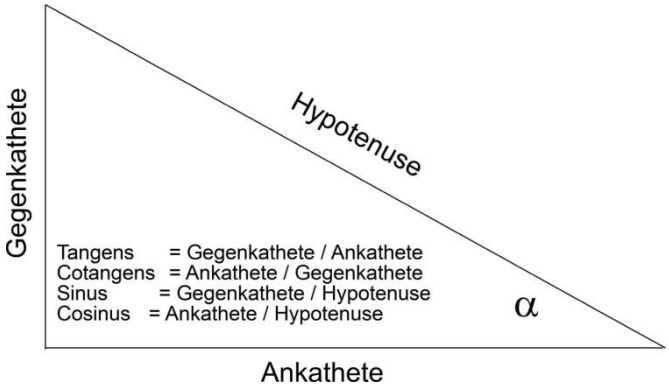
Fällt das Licht auf das senkrecht zur Einfallsrichtung gehaltene Papier - umfasst der ganz schmale (!) Schattenrand 100 Kästchen. Genau so viele wie in die Querschnittsfläche der Röhre hineinpassen würden.

Bei senkrechter Einstrahlung (90°) ist das Verhältnis 1:1. Wird der Winkel verringert wird die bestrahlte Fläche größer, zunächst nur geringfügig, mit weiter fallendem Winkel immer stärker.

Das Verhältnis zwischen Einfallswinkel und ausgeleuchteter Fläche ist nicht linear: Eine Halbierung des Winkels hat keine Verdoppelung der Fläche zur Folge.



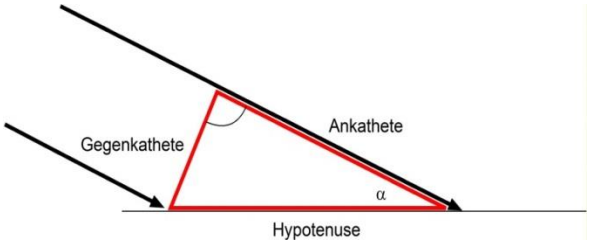
Winkel	Kästchen	Faktor
90°	100	1,00
75°	104	1,04
60°	115	1,15
45°	141	1,41
30°	200	2,00
15°	386	3,86
0°	-	-



Der Taschenrechner wirft folgende Werte aus:

α	tan	cot	sin	cos
90°	-	0,00	1,00	0,00
75°	3,73	0,27	0,97	0,26
60°	1,73	0,58	0,87	0,5
45°	1,00	1,00	0,71	0,71
30°	0,58	1,73	0,5	0,87
15°	0,27	3,73	0,26	0,97
0°	0,00	-	0,00	1,00

Rechtwinkliges Dreieck und Winkelfunktionen



Wenn man die Länge der bestrahlten Fläche als Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiecks betrachtet der Querschnitt der Messhilfe (= Gegenkathete) unverändert bleibt sollte es sich um eine Sinusfunktion handeln.

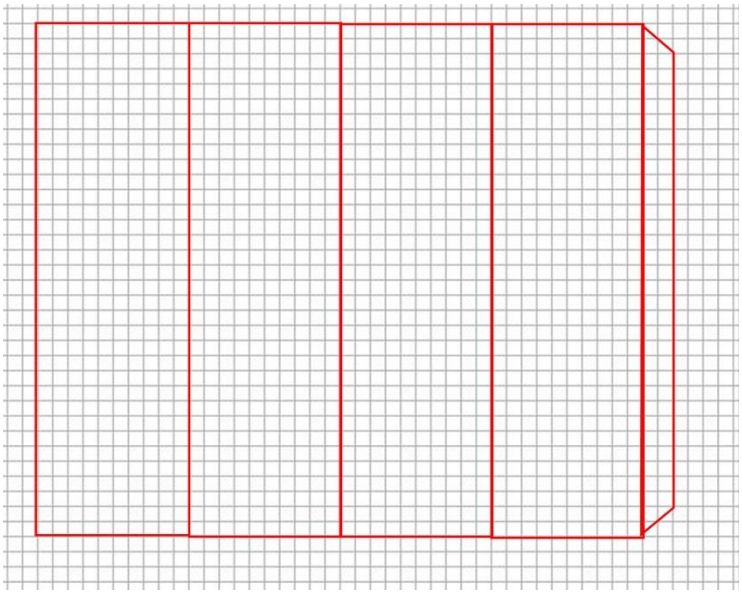
$$Anzahl\ Kästchen = \frac{1}{\sin a} * 100$$

Mit kleinerem Einfallswinkel wird die Energie auf eine immer größere Fläche verteilt. Die Energie die auf eine bestimmte. z.B. 100 Kästchen große Fläche fällt wird immer kleiner.

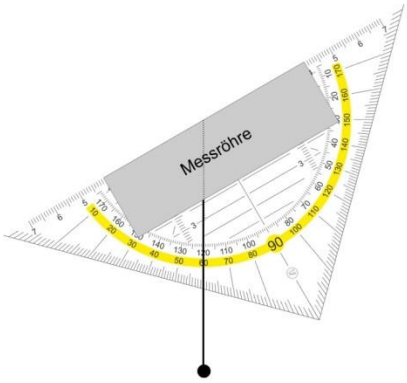
Daraus folgt:

$$Leistung: Leistung_{(max\,)} * \sin a$$

Die maximale auf der Erde mögliche Leistung tritt bei senkrechter Einstrahlung auf: Dann, wenn die Sonne irgendwo zwischen den Wendekreisen mittags im Zenit steht. Daher ist es in den Tropen wärmer als bei uns.



Im Anhang finden Sie einen Ausschneidebogen für eine Messhilfe und ein kariertes "Messfeld".



Wenn Sie die vierseitige "Messröhre" parallel zur "Hypotenuse" eines Geodreiecks kleben und im Nullpunkt ein mit einem Gewicht beschwerten Faden anbringen lässt sich der Einfallswinkel direkt ablesen.

Am besten befestigen Sie das Geodreieck drehbar in einem Stativ.

Wenn die maximale Leistung der senkrecht über unseren Köpfen stehenden Sonne 1000W/m^2 betrüge, dann sind abhängig vom Winkel α geometrisch möglich:

$$P_{max} = 1000W/m^2 \times \sin \alpha$$

Beispiel:

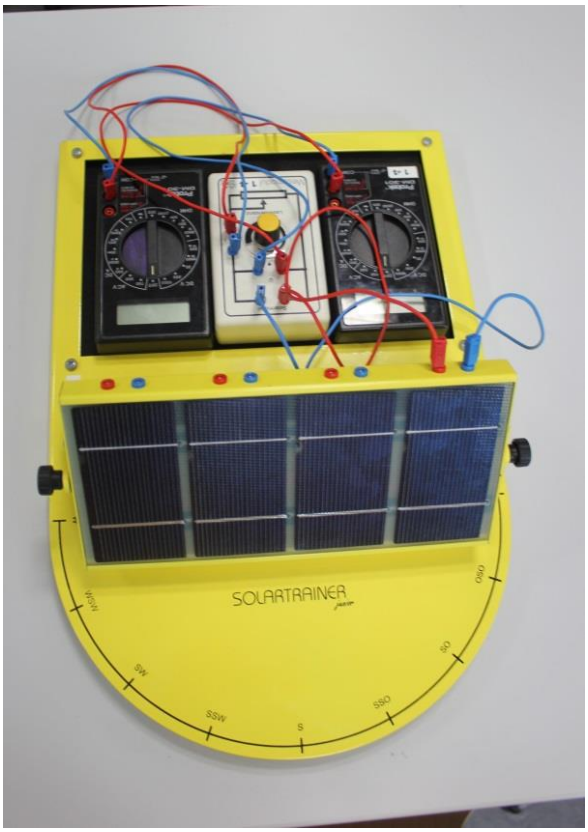
$$P_{max} = 1000W/m^2 \times \sin 45 = 707\ W/m^2$$

Messreihe: Zusammenhang zwischen Leistung und Einfallswinkel:

Befestigen Sie den Sensor in alle Richtungen drehbar an einem Stativ und richten Sie ihn so aus, dass er genau auf eine Leuchte zeigt. Notieren Sie die maximale Leistung (W/m^2). Neigen Sie ihn und protokollieren Sie Winkel und Leistung.

Ein Geodreieck mit Senklot ist dabei sehr hilfreich.

Lässt sich die Formel $P = P_{max} * \sin \alpha$ bestätigen?



Fotos: Ingo Mennerich

Für diese Messreihe empfehlen wir den IKS-Solartrainer: Hier lässt sich sowohl das Solarmodul neigen (mit Winkelanzeige) als auch der Strahler so bewegen, dass das Licht aus verschiedenen Himmelsrichtungen einfällt.

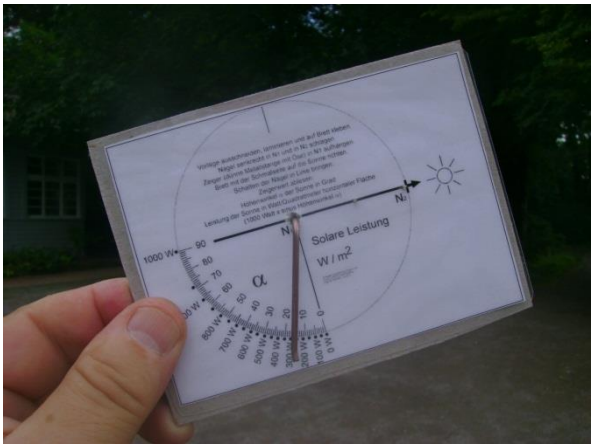
Mit flacherem Einfall der Strahlung wird das Licht zunehmend reflektiert und steht der Solarzelle nicht zur Verfügung. Dann wird der gemessene Wert geringer ausfallen als es die Formel vorhersagt.

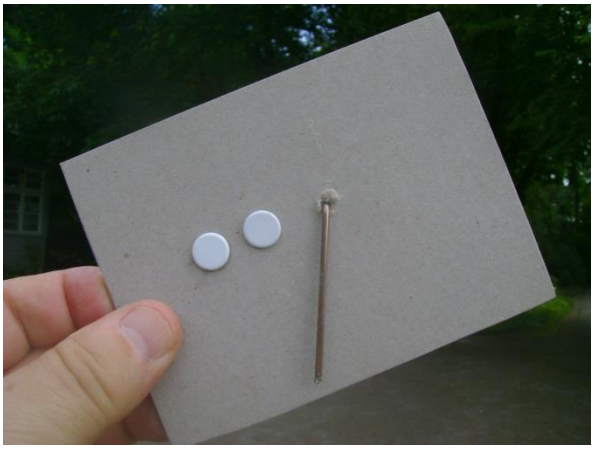
Die Abbildung zeigt die Messung der maximalen Leistung (MPP) einer Solarzelle (dazu unten mehr).

Messhilfe zum Bestimmen des Horizontwinkels der Sonne

Der einfache Quadrant ("Viertelkreis") zeigt mit Hilfe des stets senkrecht hängenden Zeigers die "Höhe", d.h. den Horizontwinkel der Sonne an. Die Ausrichtung der Messhilfe erfolgt ohne die Sonne direkt anpeilen zu müssen, einfach dadurch, dass die Schatten der Spitzen zweier durch das Gerät gesteckter Reißzwecken "in Linie stehen" und überdecken.

Die Druckvorlage dazu finden Sie im Anhang.





Fotos: Ingo Mennerich

Die Messhilfe zeigt nicht nur den Winkel sondern als groben Richtwert auch die solare Leistung an, die maximal auf einen Quadratmeter (horizontalen) Erdboden fallen könnte.

Diese Darstellung vereinfacht die wirklichen Verhältnisse:

Sie zeigt nur die geometrischen Verhältnisse zwischen der quer zur Einstrahlung liegenden und der horizontalen Fläche. Der vom Horizontwinkel abhängige Weg der Sonnenstrahlen durch die Erdatmosphäre und die diffuse Strahlung sind nicht berücksichtigt.

Foto oben: Gruppenmaterial zum Nachbau der Messhilfe (Energie-LAB, 2016)

Einfache Kalorimetrie

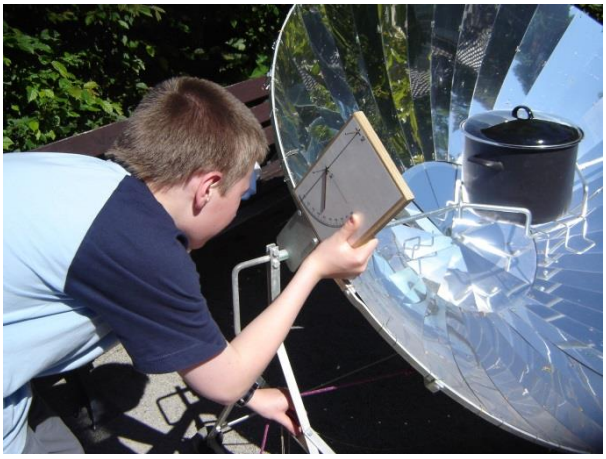
Um Wasser zu erhitzen, muss ihm Energie zugeführt werden. Früher galt: 1 Kalorie pro Gramm und Grad Celsius. Heute hat das Joule die Kalorie abgelöst und da 1 cal etwa 4,2 J entspricht, gilt:

- Um ein Gramm Wasser um 1 Grad zu erwärmen, sind 4,2 Joule Energie nötig.

"Kalorimetrie" heißt nichts weiteres, als dass aus der Menge (besser: Masse) und Temperaturzunahme des Wassers geschlossen wird, wie viel Energie "verbraucht" wurde.

Dabei müssen die Verluste möglichst klein gehalten werden.

Kalorimetrie mit dem Solarkocher



Mit unseren brennstoff- und emissionsfreien Solarkochern kann man Suppe, Würstchen, Reis, Spaghetti oder Kartoffeln erhitzen.
Der schwarze Topf steht im Focus der spiegelnden Schüssel.
Wichtig ist die gute und immer wieder nachgeführte Ausrichtung auf die Sonne.
Das wird hier mit einem selbstgefertigten Quadranten kontrolliert.

Fotos: Ingo Mennerich

Eine polierte, wie ein Hohlspiegel wirkende Satellitenschüssel erzeugt, auf die Sonne ausgerichtet, im Brennpunkt sehr hohe Temperaturen. Damit lässt sich, hier in einer schwarzen Dose, Wasser zum Sieden bringen.
Aus der Fläche des Parabolspiegels, der Masse des Wassers, dem Temperaturanstieg und der Zeit lässt in erster Näherung bestimmen wie groß die solare Leistung pro Quadratmeter ist.
Anders als in der Abbildung zu sehen muss die Dose gut isoliert sein. Nur der schwarze, stark absorbierende und genau im Fokus liegende Boden darf freiliegen.

Die Querschnittsfläche entspricht einem Kreis mit der Formel

$$A = \pi * r^2$$

Der Durchmesser unseres ausleihbaren Solar-Parabolkochers ist 90 cm, die Fläche also 0,636m^2.

Unter der Voraussetzung, dass die aufgefangene Strahlung verlustlos in Wärme umgewandelt wird lässt sich die Zeit bestimmen, die notwendig wäre um eine bestimmte Wassermenge (Masse) um einen bestimmten Betrag zu erwärmen.

Die vom Wasser aufgenommene Energie:

$$E = m * \Delta T * 4{,}2J$$

Wobei *m* die Masse des Wassers und ΔT die Temperaturdifferenz ist. Um 1g Wasser um 1°C (=1K) zu erwärmen sind dem Wasser 4,2 Joule Energie zuzuführen.

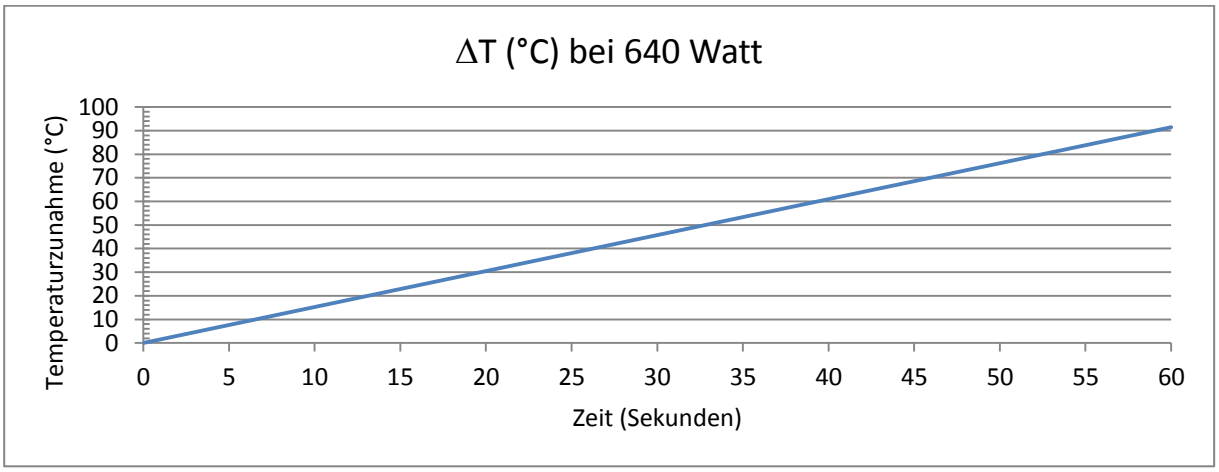
Die Leistung (*P*) ist die Energie (*E*) die pro Zeiteinheit (*t*) umgesetzt wird

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

1 Watt = 1 Joule / Sekunde

1000 Watt = 1000 Joule / Sekunde

Da die Querschnittsfläche des Parabols nur ≈0,64 m^2 beträgt die Leistung des Spiegels nur 640 Watt pro Quadratmeter.



Alternativ lässt sich das auch mit einem normalen Parabolspiegel und einem Schmelzlöffel durchführen den man vorher in eine Flamme gehalten hat (Ruß absorbiert gut).

Wer sich die Mühe macht, die Temperaturerhöhung zu protokollieren, die Energiezufuhr und den Wirkungsgrad zu berechnen wird feststellen, dass der "Solarkocher" recht ineffizient ist. Das Wasser braucht viel länger als erwartet um heiß zu werden.

Daraus ergeben sich interessante Fragestellungen:

- Welchen Einfluss haben die Wassermenge, Ausgangs- und Umgebungstemperatur auf das Ergebnis?
- Große Volumina werden nur teilweise vom Brennpunkt getroffen haben eine größere Oberfläche, nehmen Wärme dafür langsamer auf, geben sie dafür aber auch langsamer wieder ab.
- Kleinere Volumina lassen sich besser mit der Größe des Brennpunktes in Übereinstimmung bringen, ihre relativ große Oberfläche sorgt für schnelle Wärmeaufnahme aber auch schnellere Energieabgabe.
- Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Umgebungstemperatur, desto größer der Wärmeabfluss pro Zeiteinheit.

"Kalorimetrie" mit Lupe und Wassertropfen

Kann man einen Wassertropfen im Brennpunkt einer Lupe zum Kochen bringen? Ja, man kann!

Foto: Ingo Mennerich

Ein mit einer Einmal-Pipette dosierter Tropfen (0,5 ml) wird mit Hilfe einer das Sonnenlicht bündelnden Lupe erhitzt. Als Unterlage dient angebohrter ein Flaschenkorken. Kork ist nur schwer entzündlich und leitet Wärme nur schlecht. Kunststoffkorken sind brennbar was aber keine Rolle spielt, solange sie durch das Wasser unter der Entzündungstemperatur gehalten werden. Um die Umgebung des Tropfens besser absorbieren zu lassen wird die Vertiefung vorsichtig mit der Lupe "angekokelt" und so geschwärzt.

Die Lupe muss senkrecht zur Einfallsrichtung der Sonnenstrahlen. Der Brennpunkt sollte etwa so groß sein wie die Oberfläche des Tropfens. So kann das Tropfenvolumen kann schnell erhitzt werden ohne dass es dabei zu großen Verlusten kommt. Die Kontaktfläche zur Luft ist klein und die unmittelbare aber schlecht wärmeleitende Umgebung des Tropfens wird schnell die Temperatur des Wassers annehmen.

Das abgebildete, mit einem Drahtfühler ausgestattete Digital-Thermometer GTH 1150 kann Temperaturen von über 1000°C messen. Im Brennpunkt einer einfachen Leselupe sind Werte um 500°C

nicht ungewöhnlich. Lupe und Drahtfühler werden mit Stativmaterial fixiert und Spitze des Fühlers genau in den Brennpunkt gebracht.

Wenn das 20°C warme Wasser nach 80 Sekunden siedet (100°C) lässt sich folgende Rechnung aufstellen:

Querschnittsfläche der Lupe (Ø 7 cm, r = 3,5 cm)

$$A = \pi * r^2$$

$$A = 0{,}003848m^2$$

Wassertropfen 0,5 ml = 0,5 g

Energieaufnahme bei Temperaturanstieg von 80°C (80K)

$$E = m * \Delta T * 4{,}2J$$

$$E = 0{,}5 * 80 * 4{,}2J$$

$$E = 168\,J$$

Annahme: Wasser kocht in 80 Sekunden:

Dann nimmt das Wasser pro Sekunde 168 J / 80 s = 2,1 Joule Energie auf

Die Lupe liefert also mindestens 2,1 Watt Leistung

$$\frac{2{,}1W}{0{,}003848m^2} = 546W/m^2$$

Die wirkliche Leistung wird höher sein, weil auf dem Weg zwischen Lupe und Wassertropfen Energie verloren geht, z.B. weil

- die Lupe das Licht nicht zu 100% durchlässt
- der Brennpunkt möglicherweise kleiner ist als der Tropfen, ihn also nur teilweise erhitzt so dass sich die Wärme erst einmal verteilen muss. Man sollte den Tropfen entsprechend klein machen.
- der Tropfen, während er Wärme aufnimmt gleichzeitig Wärme an die Umgebung abgibt. Das Verhältnis lässt sich aber optimieren.

Der Tropfen liegt horizontal auf dem Korken. Daher wird der Brennpunkt auf der Korkoberfläche nicht kreisförmig sein, sondern eine je nach Einstrahlungswinkel mehr oder weniger lange Ellipse bilden. Die Fragestellung könnte daher lauten: Wie viel Leistung bringt die Sonne auf eine horizontale Fläche?

Die zum Versuchszeitpunkt am 04. Mai um 15:30 bei 38° Sonnenhöhe ermittelte direkte Einstrahlung senkrecht zur Einfallsrichtung betrug 920 W/m^2, auf einer horizontalen Fläche 570 W/m^2.

Unabhängig von der Genauigkeit des Ergebnisses: In wie weit der Versuch geeignet ist, die solare Leistung zu bestimmen, ist von vielen Faktoren abhängig. Es lohnt sich die Störfaktoren herauszuarbeiten und diese gegebenenfalls durch Veränderungen des Aufbaus zu reduzieren.

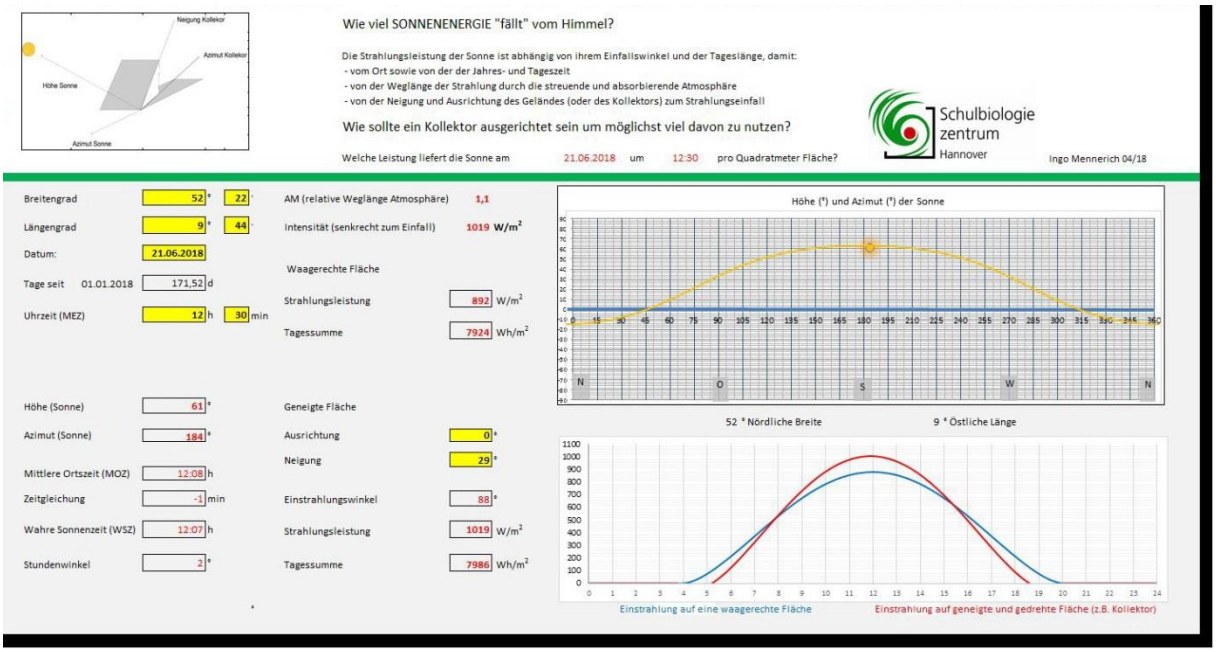
Die Versuchskritik und -optimierung sind viel wichtiger als das im stattdessen Internet leicht abfragbare Ergebnis!

Ein Programm zur Ermittlung der möglichen solaren "Ausbeute"

Das in EXCEL geschriebene Programm ermittelt die solare Leistung, die an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Datum und zu bestimmter Zeit theoretisch und bei gutem Wetter zur Verfügung steht. Vorausgesagt wird die Leistung die auf entweder auf eine horizontale, zum Einfall senkrecht stehende oder in einem bestimmten Winkel dazu geneigte und gedrehte Fläche fällt.

Das Programm kann und soll Schülerinnen und Schüler bei den hier beispielhaft vorgestellten praktischen Messungen unterstützen, diese aber nicht ersetzen.

Das leistet unser Programm:



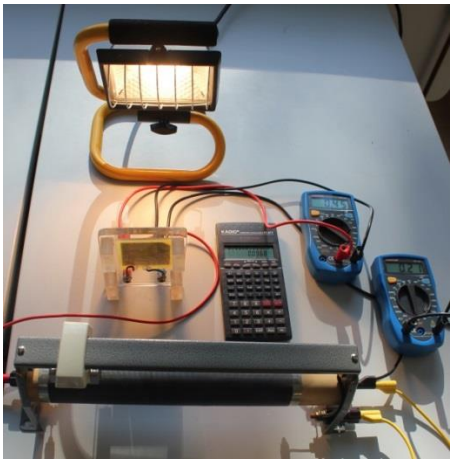
Berechnet und dargestellt werden

- Höhe und Azimut (Kompassrichtung) der Sonne (abhängig von der geographischen Breite und Länge, dem Datum und der Uhrzeit)
- Die relative Weglänge (Luftmasse: Air Mass, AM) die die Strahlung durch die absorbierende und streuende Atmosphäre zurücklegt (je geringer die Winkelhöhe der Sonne, desto länger der Weg)
- Die Leistung, die auf eine senkrecht zur Einstrahlung stehende Fläche fällt (abhängig von der Winkelhöhe der Sonne über dem Horizont und von der Weglänge durch die Atmosphäre). Diese schwankt im Laufe des Jahres um etwa ±3,4% der Solarkonstanten (elliptische Umlaufbahn der Erde)
- Die daraus folgende Leistung, die auf eine horizontale Fläche fällt
- Die Leistung die auf eine in bestimmten Winkel zu Höhe und Azimut gedrehte Fläche (z.B. einen Kollektor) fällt
- Die von Ort, Datum und Uhrzeit abhängige aktuelle Position der Sonne (Höhe, Azimut)

- Den vom Ort abhängige Tag-und Nachtbogen der Sonne (Höhe, Azimut versus Zeit)
- Die Leistungskurve einer horizontalen bzw. in bestimmten Winkel zum Strahlungseinfall geneigten und gedrehten Fläche.

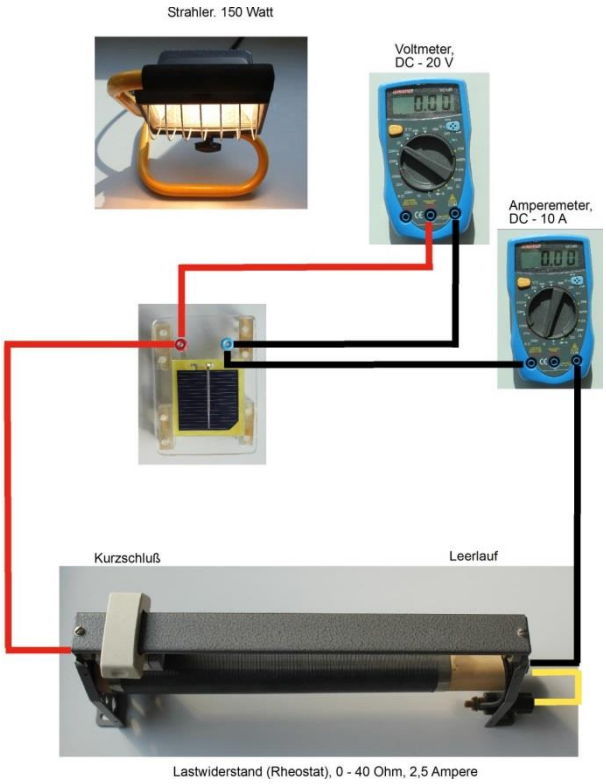
Praktische Messungen an Solarmodulen

Stimmt die Leistung mit den Herstellerangaben überein? Messung an 10 Watt modulen an einem sonnigen Tag
Fotos: Ingo Mennerich



Messung an einer Solarzelle mit Hilfe eines Strahlers

Solarzellen verwandeln nur einen Teil der auf die Erde fallenden elektromagnetischen Strahlung in Strom. Der Wirkungsgrad eines Solarmoduls lässt sich in der Schule relativ einfach bestimmen in dem seine experimentell ermittelte maximale Leistung auf einen Quadratmeter Modulfläche hochgerechnet und diese mit der tatsächlich eingestrahlten Leistung in Beziehung gesetzt wird.

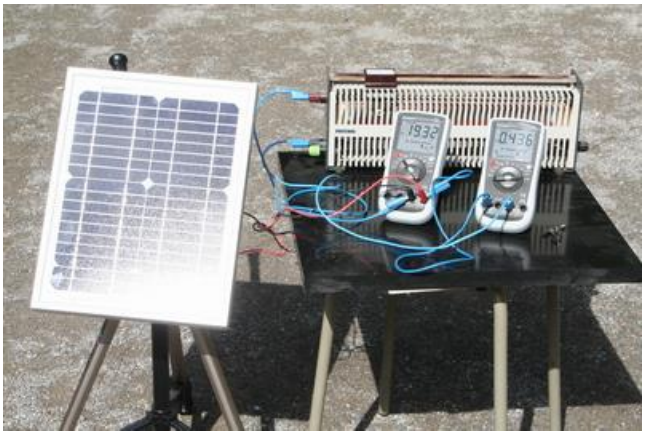


Aufbau zum Messen einer Solarzelle

- Strahler oder (besser!) Sonne
- Solarzelle
- Voltmeter (Messbereich - 20V, DC)
- Amperemeter (Messbereich - 10A)
- Schiebewiderstand 0 - 40 Ohm, 2,5A

Das die Spannung messende Voltmeter liegt parallel zur Solarzelle, das den Stromfluss erfassende Amperemeter und der mit ihm in Reihe liegende Schiebewiderstand bilden einen zweiten Stromkreis.

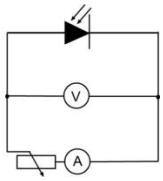
Wird der Widerstand erhöht sinkt der Stromfluss (weniger Ampere), die Spannung steigt (mehr Volt).
Wird der Widerstand verringert steigt der Strom, während die Spannung sinkt.



Einfacher Messaufbau im Energie-LAB
Foto: Ingo Mennerich

Die Bestimmung der tatsächlichen, im Augenblick der Messung maximal möglichen Leistung eines Solarmoduls (MPP, Maximum Power Point) ist in der Schule relativ leicht mit einem Voltmeter, einem Amperemeter und einem passenden Schiebewiderstand durchzuführen. Der MPP liegt dort wo das Produkt U x I den höchsten Wert erreicht. Aus der so bestimmten maximalen Leistung und der Fläche des Moduls lässt sich im Vergleich mit dem möglichen Gesamt-Strahlungsangebot der Wirkungsgrad ermitteln.

(Alle dazu notwendigen Elemente sind ausleihbar)

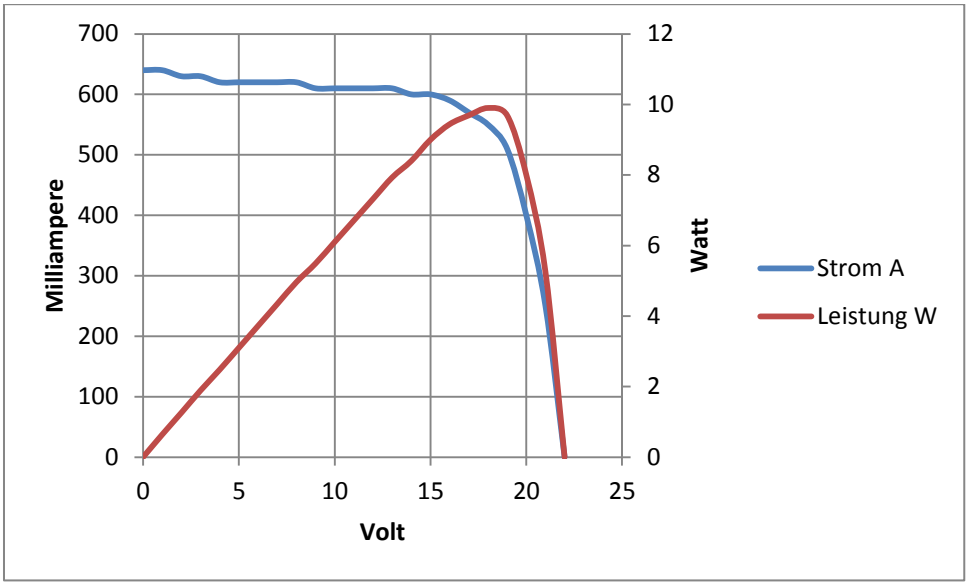


Beispiel:

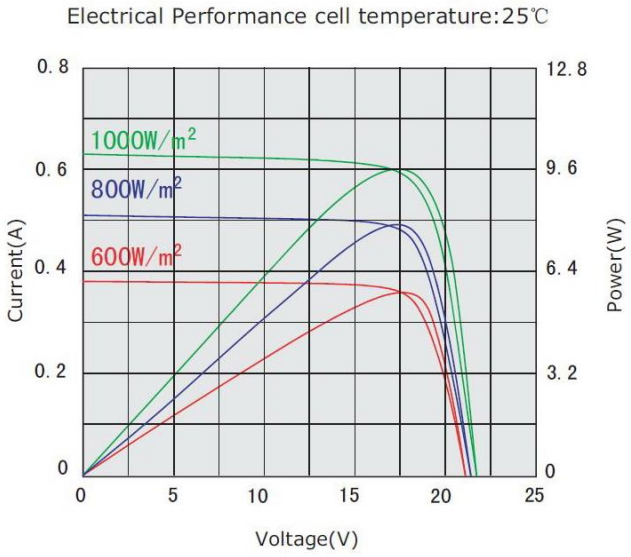
- Messreihe Spannung/Strom bei einem 10 Watt Solarmodul ET-M53610
- Bestrahlung senkrecht zur Oberfläche
- Der Widerstand wird schrittweise von Null (maximaler Strom, minimale Spannung) auf den höchsten Wert gebracht (minimaler Strom, maximale Spannung)

Spannung V	Strom A	W	Spannung V	Strom A	W	Spannung V	Strom A	W
0	0,64	0	8	0,62	4,96	16	0,59	9,44
1	0,64	0,64	9	0,61	5,49	17	0,57	9,69
2	0,63	1,26	10	0,61	6,10	18	0,55	9,90
3	0,63	1,89	11	0,61	6,71	19	0,51	9,69
4	0,62	2,48	12	0,61	7,32	20	0,40	8,00
5	0,62	3,10	13	0,61	7,93	21	0,25	5,25
6	0,62	3,72	14	0,60	8,40	22	0,00	0,00
7	0,62	4,34	15	0,60	9,00			

Daraus ergeben sich mit EXCEL die Kennlinien (Leistungskurve) des Moduls



Grafik: Ingo Mennerich



Laut Herstellerangabe liegt der MPP bei 17,82 V (V_{mp}) und 0,57 A (I_{mp}).

Bei einer Modulfläche von etwa 0,1 m^2 würden 10 Module eine Fläche von 1 m^2 bedecken und 10 x 10 W = 100 Watt liefern, also 1/10 der möglichen 1000 W Leistung. Der Wirkungsgrad betrüge also 10%.

Umgekehrt könnte einem angenommenen Wirkungsgrad von 10% auf eine Einstrahlung von 1000W/m^2 geschlossen werden.
Der Vertreiber *Renugen* gibt 8,73% an.
(*http://www.renugen.co.uk/et-solar-et-m53610-10-watt-solar-panel-module/*)

Aus:
Wie viel Leistung setzt ein Solarmodul um? (www.schulbiologiezentrum.info,"Sonnenseite")

Excel-Programm zur Ermittlung der maximalen Leistung des Solarmoduls

Schulbiologie zentrum Hannover

ENERGIE LAB HANNOVER

Kennlinien, maximale Leistung und Wirkungsgrad einer Solarzelle/eines Solarmoduls

Ingo Mennerich 03/15

Das Programm berechnet die Leistung einer Solarzelle/eines Solarmoduls auf der Grundlage von an einem regelbaren Lastwiderstand ermittelten Messwertpaaren (Spannung/Strom).

Formel: $P_{[Leistung]} = U_{[Spannung]} * I_{[Strom]}$

Die maximale Leistung im **Maximum Power Point (MPP)** ergibt sich aus dem höchstmöglichen Produkt aus Spannung und Strom.

Der **Wirkungsgrad** ist der Quotient aus der gemessenen und auf einen Quadratmeter Fläche umgerechneten elektrischen Leistung (W/m²) und der gemessenen solaren Leistung (W/m²) bei senkrechter Einstrahlung. Er wird in Prozent angegeben.

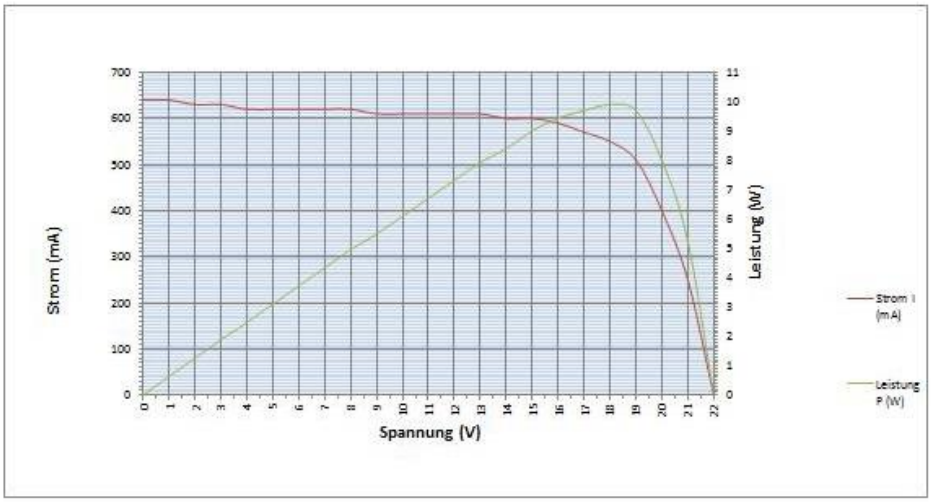
Eingabe:
Spannung U in Volt (V)
Strom I in Milliampere (mA)

Ausgabe:
Leistung P in Watt (W)

Maße des Solarmoduls		
Länge (cm)	30	
Breite (cm)	20	
Fläche (m²)	0,06	
Max. Leistung (Solarmodul)	9,9	W
Max. Leistung (m²)	165	W

Wirkungsgrad		
Solare Leistung	930	W/m²
Elektrische Leistung	165	W/m²
Wirkungsgrad	17,7	%

Spannung U (V)	Strom I (mA)	Leistung P (W)
0	640	0,00
1	640	0,64
2	630	1,26
3	630	1,89
4	620	2,48
5	620	3,10
6	620	3,72
7	620	4,34
8	620	4,96
9	610	5,49
10	610	6,10
11	610	6,71
12	610	7,32
13	610	7,93
14	600	8,40
15	600	9,00
16	590	9,44
17	570	9,69
18	550	9,90
19	510	9,69
20	400	8,00
21	250	5,25
22	0	0,00



Nicht konstant: Die Solarkonstante

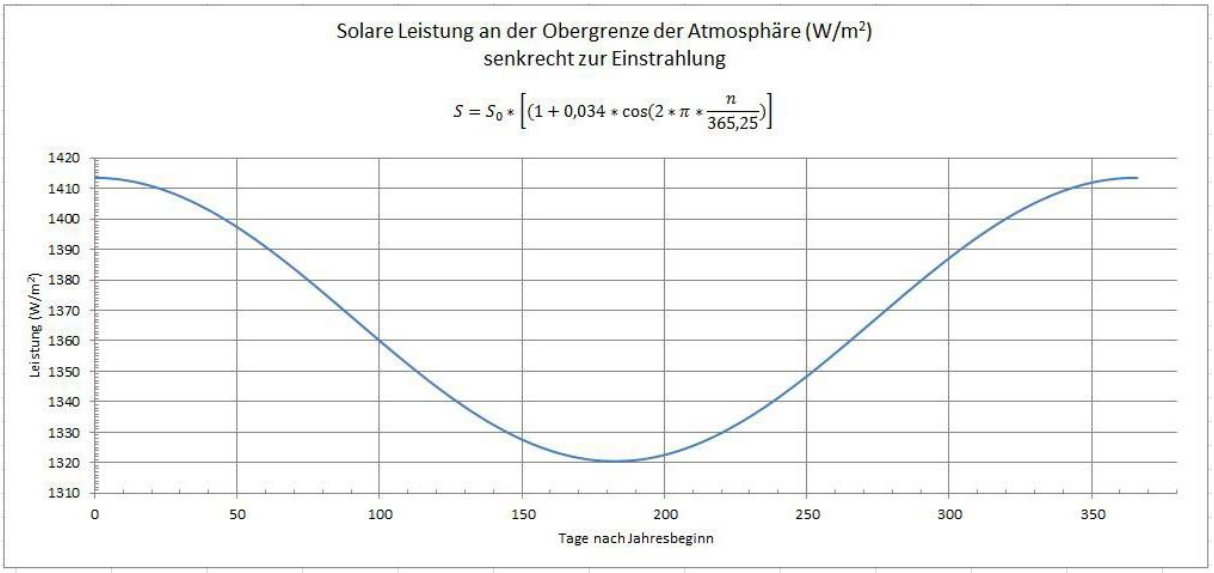
Eine senkrecht zur Einstrahlung stehende Fläche an der Außengrenze unserer Atmosphäre empfängt im Jahresmittel 1367 Watt pro Quadratmeter (= Solarkonstante). Durch die leicht elliptische Umlaufbahn der Erde schwankt die Distanz Sonne - Erde zwischen etwa 147,1 Millionen Kilometern Anfang Januar und 152,1 Mill. Km Anfang Juli. Dadurch variiert die Strahlungsleistung im Laufe um etwa ±3,3% um den Mittelwert herum.

Eine einfache Formel ist

$$S = S_0 * \left[(1 + 0{,}034 * \cos(2 * \pi * \frac{n}{365{,}25})\right]$$

Wobei *n* die Anzahl der seit Jahresbeginn vergangenen Tage ist

Formel: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance



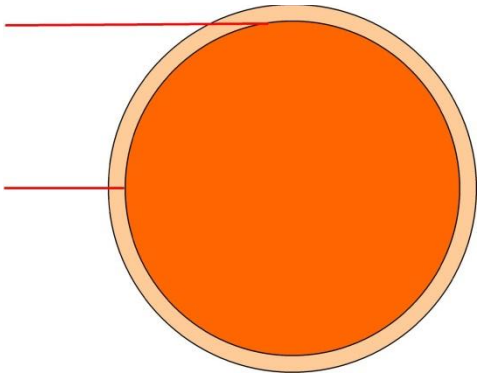
Grafik: Ingo Mennerich

Klimatisch interessant: Die relative "Nähe" zur Sonne im Januar führt übrigens dazu, dass die Winter auf der Nordhalbkugel nicht ganz so kalt ausfallen, obwohl hier im Vergleich zur Südhemisphäre viel mehr Landflächen vorhanden sind.

Sonnenstrahlen und ihr Weg durch die Atmosphäre

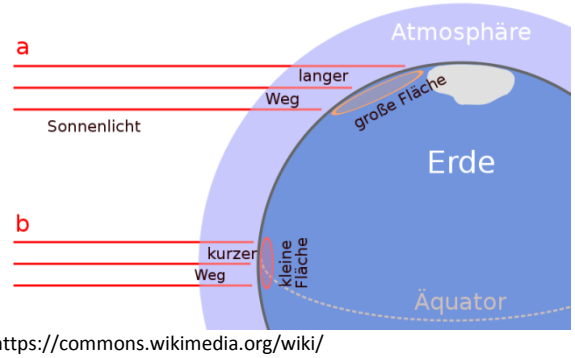
Die Höhe der Sonne bestimmt auch die Weglänge der Sonnenstrahlen durch die Erdatmosphäre. Je tiefer sie steht, desto länger der Weg.

Hier gibt es eine einfache Analogie:



Wenn Sie mit einer Nadel senkrecht zur Oberfläche in eine Apfelsine stecken spritzt ihnen schnell der Saft entgegen. Stechen Sie die Nadel schräg ein ist der Weg zum saftigen Inneren erheblich länger.

Die Erdatmosphäre schwächt die direkte Strahlung durch Absorption und Streuung.

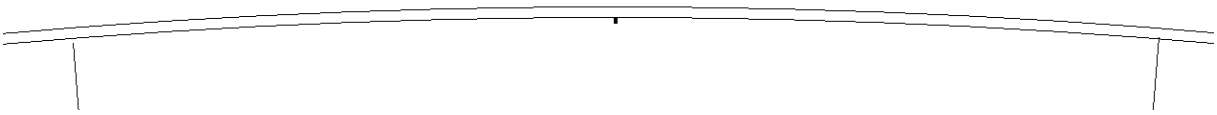


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oblique_rays_04_Pengo_DE.svg

Die Leistung, die auf eine senkrecht zur Einstrahlung stehende Fläche fällt, steigt bzw. sinkt mit der Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre und folglich mit dem Horizontwinkel der Sonne. Daran gebunden ist auch die Leistung, die einer horizontalen Fläche zur Verfügung steht.
Der Zusammenhang zwischen der Höhe der Sonne über dem Horizont und der Weglänge bzw. Luftmasse (Air Mass, AM) die die Strahlung durchquert lässt sich zeichnerisch und rechnerisch bestimmen:

Die 12742 km im Durchmesser große Erde ist von einer "nur" 9 km dicken Atmosphäre umgeben. Das Verhältnis Radius / Atmosphäre ist damit etwa 708. Das ist mit dem Zirkel nur schwer dazustellen, deshalb haben wir ein Zeichenprogramm (Freehand) zu Hilfe genommen. 1000 km des Erdumfangs entsprechen einem Kreisausschnitt von 360° : 40000 km = 9°. Wird ein Geodreieck mit dem Nullpunkt auf die Zeichnung (Markierung) gelegt kann man die Weglängen bei unterschiedlicher Höhe der Sonne abschätzen.

1000 km



Arbeitsblatt im Anhang!

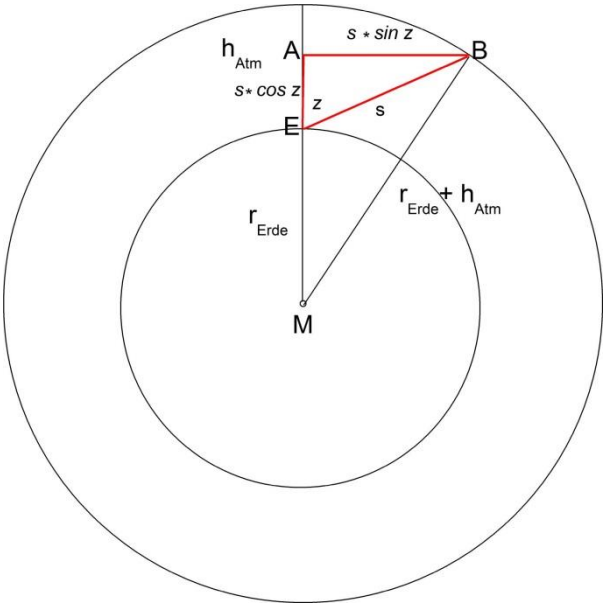
Rechnerisch ermittelte ideale Werte wären (gerundet)

Winkel	Kilometer
90°	9
75°	9
60°	10
45°	13
30°	18
15°	34
0°	339

Aus dieser Zahlenreihe sollte deutlich hervorgehen weshalb die Sonne beim Auf- und Untergang nur schwach zu leuchten scheint und wenig "Kraft" hat.

Die recht anspruchsvolle rechnerische Lösung basiert auf dem Pythagoras:

Die Zeichnung dazu ist nicht maßstabgerecht!



Grafik Ingo Mennerich

z
Zenitwinkel der Sonne
(90° - Horizontwinkel der Sonne)

r
Erdradius (6371 km)

h
Höhe der Atmosphäre (≈ 9 km)

s
Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre

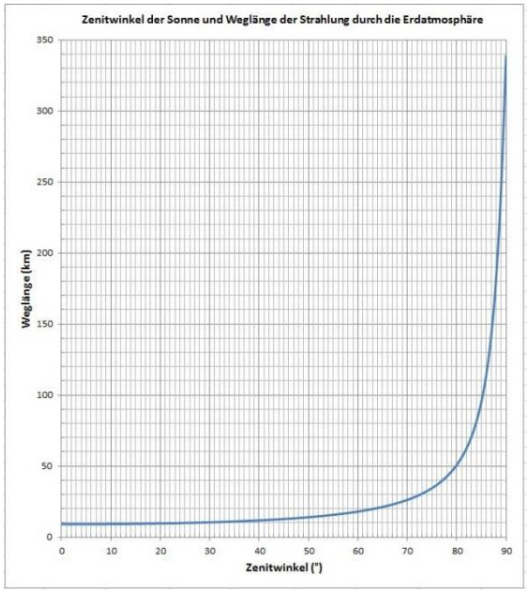
Für die rechtwinkligen Dreiecke MAB und EAB gilt der Pythagoras.
Die Gleichung für das Dreieck MAB muss nach der Strecke s aufgelöst werden.

$$(r_{Erde} + s * cos\ z)^2 + (s * sin\ z)^2 = (r_{Erde} + h_{atm})^2$$

Die Formel für die "Weglänge" s lautet daher:

$$s = \sqrt{(r_{Erde} * cos\ z)^2 + 2 * r_{Erde} * h_{atm} + {h_{atm}}^2} - r_{Erde} * cos\ z$$

EXCEL:
=WURZEL((6371*COS(BOGENMASS(*z*)))^2+2*6371*9+9^2)-6371*COS(BOGENMASS(*z*))



Grafik Ingo Mennerich

Bei senkrechter Einstrahlung (Zenitwinkel 0) beträgt die Wegstrecke 9 km und bei aufgehender oder untergehender Sonne (Zenitwinkel 90°) 338 km.

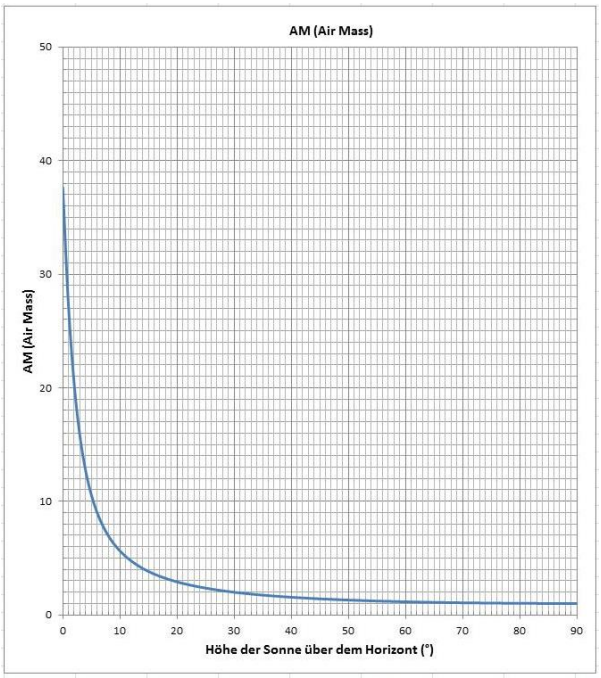
Die zur Auflösung nach s notwendigen Schritte finden Sie im Anhang!

Air Mass (AM):
Ein Maß für die Weglänge des Lichts durch die Erdatmosphäre

Das Sonnenlicht erreicht die Erdoberfläche erst nachdem es die Erdatmosphäre durchquert hat. Dabei wird ein Teil der Strahlung und damit der Energie absorbiert bzw. gestreut. Dieser Anteil ist abhängig vom Einstrahlungswinkel. Je tiefer die Sonne steht, desto länger ist der Weg des Lichts und desto stärker wird der kurzwellige gestreut. Deshalb geht die Sonne im Idealfall rot auf und unter. Die Luftmasse AM (Air Mass)

AM = 0	Spektrum außerhalb der Atmosphäre (extraterrestrisches Spektrum) im Weltraum, die Strahlungsleistung beträgt dort 1367 W/m^2 (=Solarkonstante)
AM = 1	Spektrum der senkrecht auf die Erdoberfläche fallenden Sonnenstrahlen, d. h. die Sonne muss dafür genau im Zenit stehen;
AM = 1,5	Spektrum bei einem Zenitwinkel von etwa 48,2°. (= 42,8° Winkelhöhe zum Horizont). Globale Bestrahlungsstärke 1000 W/m²; AM = 1,5 ist Standardwert für die Vermessung von Solarmodulen eingeführt

QUELLE: WIKIPEDIA, https://de.wikipedia.org/wiki/Luftmasse_(Astronomie)



Grafik Ingo Mennerich

Der Wert für die von der direkten Strahlung zu durchquerenden Luftmasse AM (Air Mass) folgt der Formel

$$AM = \sqrt{(K * \cos z)^2 + 2K + 1} - K * \cos z$$

K ist das Verhältnis des Erdradius (6371 km) zur Höhe der Atmosphäre (≈9 km) ≈ 708

z ist der Zenitwinkel.

Eine andere besonders für horizontnahe Positionen optimierte Formel (nach Pickering 2002) lautet

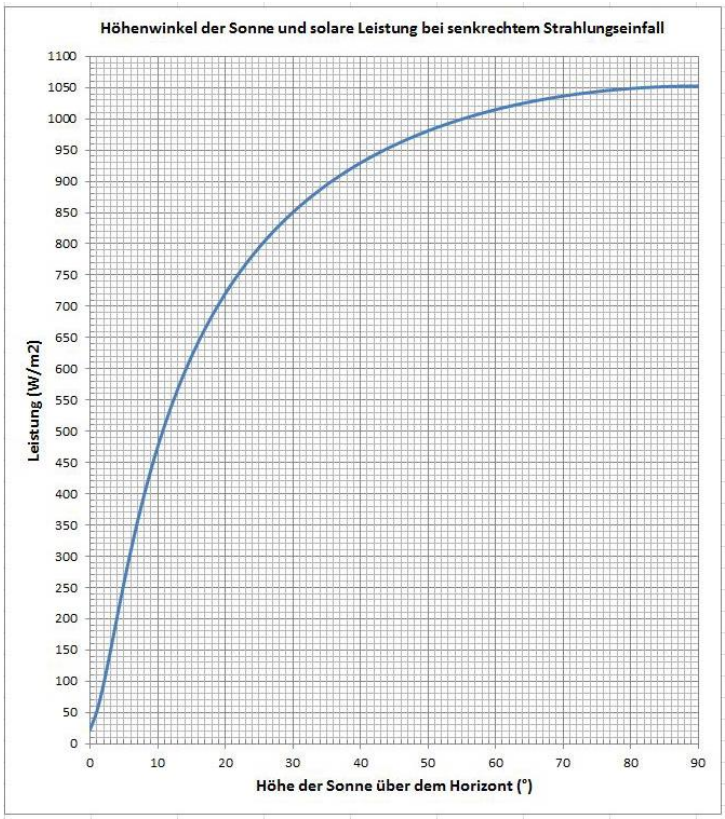
$$AM = \frac{1}{\sin(h + \frac{244}{165 + 47h^{1,1}})}$$

https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_%28astronomy%29

h = Winkelhöhe der Sonne über dem Horizont

EXCEL:
=1/SIN(BOGENMASS(h+244/(165+47*h^1,1)))

Air Mass (AM) und Strahlungs-Intensität



Grafik Ingo Mennerich

Die vom Zenit- bzw. Horizontwinkel der Sonne und von der Weglänge der Strahlung abhängige solare Leistung - senkrecht zur Einfallsrichtung - lässt sich mit folgender Formel erfassen:

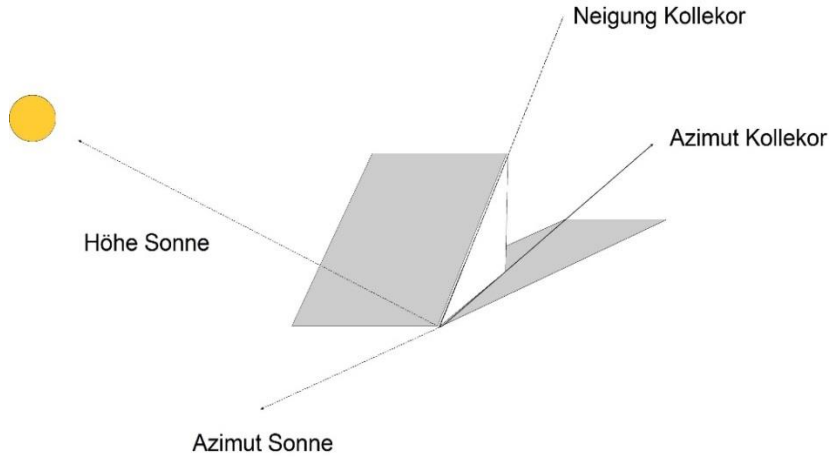
$$I = 1{,}1 * I_0 * 0{,}7^{(AM^{0{,}678})}$$

I_0: Intensität an der Obergrenze der Atmosphäre, vertikal zur Einstrahlung (1353 W/m^2).
Der Faktor 1,1 berücksichtigt die diffuse Strahlung (10% der direkten Strahlung)

EXCEL:
=1,1*1353*0,7^(AM^0,678)

Was ist, wenn der Kollektor "schief" zur Sonne steht?

Ist die Sonnenenergie empfangende Fläche in Bezug auf den Strahlungseinfall geneigt und gedreht (und damit nicht optimal ausgerichtet) ergeben sich noch komplexere Verhältnisse. Bei nicht nachgeführten Systemen stimmt die Ausrichtung genau genommen höchstens zweimal pro Jahr mit der Einfallsrichtung der Strahlung überein. Sonst bildet die Senkrechte zur Fläche, der "Himmelspunkt", einen mehr oder weniger großen Winkel zum Strahlungseinfall.



Je geringer dieser Winkel, desto höher die Ausbeute.
Hier muss man einen Kompromiss zwischen dem jahres- und tageszeitlich sich verändernden Strahlungsangebot und der Ausrichtung wählen.

In Hannover (52° Nord) variiert die Mittagshöhe der Sonne zwischen 14° im Winter und 61° im Sommer. Die Tageslänge im Winter liegt bei 8, im Sommer bei 16 Stunden.

In der Praxis hat sich eine Ausrichtung nach Süden und eine Neigung von etwa 35° zur Senkrechten bewährt.

Der Himmelspunkt des Kollektors setzt sich zusammen aus der Neigung zur Senkrechten und dem Winkel zur Südrichtung

$$\Theta = Arcos(-cos\gamma_{Sonne} * sin\gamma_{Kollektor} * \cos(a_{Sonne} - a_{Kollektor}) + sin\gamma_{Sonne} * cos\gamma_{Kollektor})$$

EXCEL:
=GRAD(ARCCOS(-COS(BOGENMASS(Höhe Sonne,°))*SIN(BOGENMASS(Neigung Kollektor))*COS(BOGENMASS(Azimut Sonne-horizontale Ausrichtung Kollektor))+SIN(BOGENMASS(Höhe Sonne,°))*COS(BOGENMASS(Neigung Kollektor))))

Neigung des Kollektors zur Senkrechten

Horizontale Ausrichtung des Kollektors (Winkel zur Südrichtung, Osten -90, Westen +90)

Formel: Volker Quaschning
http://www.volker-quaschning.de/download/abschattungsverluste.pdf
https://www.photovoltaikforum.com/sonstiges-f13/sonnenstandsberechnung-probleme-t107428.html

Einfache Messhilfe zur Bestimmung des "Fehlwinkels"

Der "Fehlwinkel" lässt sich mit einer einfachen Messhilfe bestimmen:

Sie besteht aus konzentrischen Kreisen und einem mittig und zur Fläche senkrecht eingesetzten, 2 cm herausragenden Nagel.

Die Radien der Kreise sind so gewählt sind, dass man aus der Schattenlänge des Nagels den "Fehlwinkel" ablesen kann.

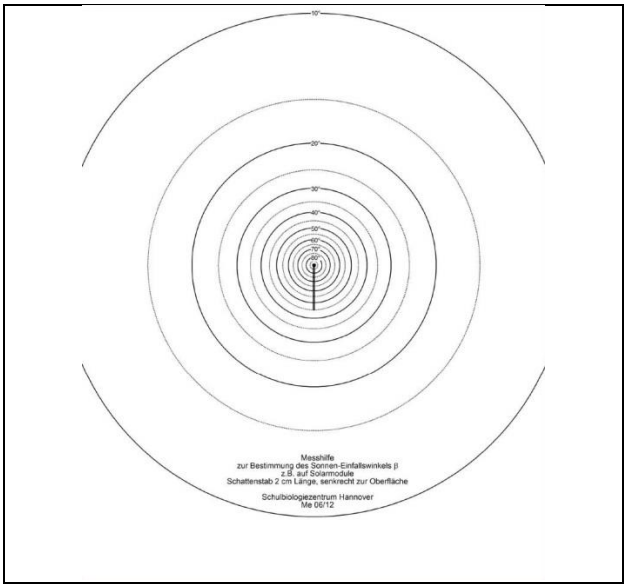
Die durch den "Fehlwinkel" verminderte Leistung lässt sich mit einem Solar-Wattmeter und einem Taschenrechner bestimmen:

Foto Ingo Mennerich

Beispiel:

Das Solarmodul ist so ausgerichtet, dass die direkte Strahlung in einem Winkel von 70° einfällt.
Das Solar-Wattmeter zeigt bei zum Sensor senkrechter Einstrahlung 800 Watt/m^2 an.
Die auf die Modulfläche fallende Leistung ist dann

$$P = 800 * \sin(70) = 752\ W/m^2$$



Winkel β	tanβ	Schattenlänge	Durchmesser Kreis
0	0	∞	∞
5	0,08748866	22,90	45,80
10	0,17632698	11,34	22,69
15	0,26794919	7,46	14,93
20	0,36397023	5,49	10,99
25	0,46630766	4,29	8,58
30	0,57735027	3,46	6,93
35	0,70020754	2,86	5,71
40	0,83909963	2,38	4,77
45	1	2,00	4,00
50	1,19175359	1,68	3,36
55	1,42814801	1,40	2,80
60	1,73205081	1,15	2,31
65	2,14450692	0,93	1,87
70	2,74747742	0,73	1,46
75	3,73205081	0,54	1,07
80	5,67128182	0,35	0,71
85	11,4300523	0,17	0,35
90	∞	0	0

Die nähere Beschreibung der Messhilfe und eine Druckvorlage finden Sie auf www.schulbiologiezentrum.info, "Unsere Sonnenseite"

Solare Leistung auf horizontaler Fläche

Die Leistung die auf eine waagerechte Fläche fällt ist abhängig vom Horizontwinkel der Sonne und von der Weglänge der direkten Strahlung durch die Atmosphäre. Die in der Solartechnik gebräuchliche Faustformel

$$P_{hor} = 1000W * \sin(Horizontwinkel)$$

geht aus von einem Kilowatt Leistung pro Quadratmeter bei zur Erdoberfläche senkrechter Einstrahlung. Die Multiplikation mit dem Sinus des Horizontwinkels berücksichtigt nur den geometrische Aspekt: Je flacher der Horizontwinkel (<90°) desto größer ist die ausgeleuchtete Fläche und desto geringer ist die Leistung pro Flächeneinheit.

Absorption, Streuung und die indirekte diffuse Strahlung gehen darin nicht ein.

Die auf eine horizontale Fläche fallende Leistung P_{hor} ist

$$P_{hor} = P_{(quer)} * \sin(Horizontwinkel)$$

wobei P(quer) die effektive Leistung senkrecht ("quer") zur Einstrahlung ist.

Da die waagerechte Fläche nur ein Sonderfall der Neigung ist erhalten wir das gleiche Ergebnis wenn wir den Kollektor in die Horizontale bringen.

Solarer Leistungsanzeiger

Foto: Ingo Mennerich

Die im Energiegarten des Schulbiologie-zentrums auf einem Podest stehende Platte hat die Größe eines Quadratmeters. In der Mitte steht ein vertikaler Schattenwerfer.

Auf der Basis der oben genannten Faustformel
$P_{hor} = 1000W * \sin(Horizontwinkel)$
und passend zur Länge des Schattenwerfers haben wir konzentrische Ringe in die Platte gefräst.
Der der Sonne folgende Schatten zeigt (als groben Wert) die Leistung an, die gerade auf den "Quadratmeter" fällt.

Bei - in Europa nicht möglicher - senkrechter Einstrahlung und keinem Schattenwurf könnte man mit etwa 1000 Watt rechnen. Von innen nach außen folgen die Ringe im Abstand von 100 Watt.

Aus Platzgründen und weil nur selten jemand bei Sonnenaufgang oder -untergang damit umgeht endet die Skala bei 200 Watt pro Quadratmeter.

Die Vorlage des Solaren Leistungs-anzeigers können Sie ausdrucken, auf eine Unterlage kleben und mit einem Schattenwerfer Ihrer Wahl versehen.

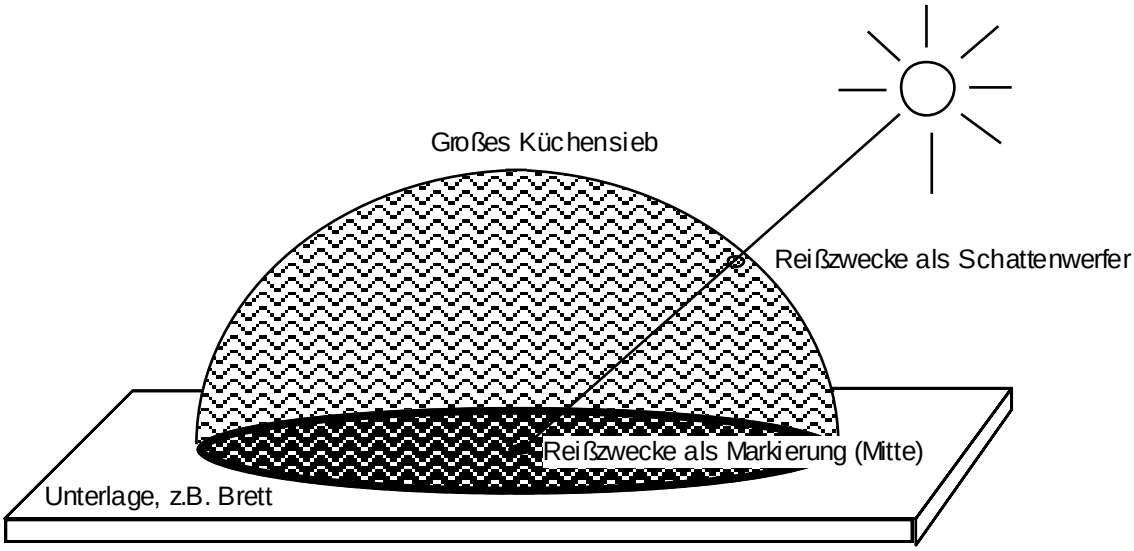
Die Kreise und der Schattenwerfer stehen in einem festen Verhältnis:
Achten Sie also darauf, dass der Schattenwerfer genau so lang ist wie in Ihrem vielleicht skalierten Ausdruck.

Bestimmen der solaren Tagesleistung (kW/m^2/d)

Mit geeigneten Messgeräten lassen sich viele Werte aufnehmen aus denen man die gesamte Tagesleistung errechnen kann. Es wird aber kaum jemanden geben, der die Zeit dafür hat.

Eine einfache Methode um wenigstens einen Teil des Tagbogens der Sonne aufzunehmen haben wir Stellen Sie ein großes engmaschiges und halbkugelförmiges Küchensieb auf ein Brett. Kleben Sie einen Punkt genau unter der Mitte des Siebs. Ziehen Sie mit einem Stift einen Kreis um das Sieb damit es seinen festen Platz auf dem Brett behält. Nun stellen Sie das Ganze in die Sonne und stecken eine Reißzwecke so in das Sieb, dass ihr Schatten genau auf den Klebepunkt fällt. Nach einiger Zeit ist der Schatten aus der Mitte herausgewandert und sie korrigieren das mit einer zweiten Reißzwecke. Viel Zeit und Geduld vorausgesetzt entsteht so eine "Kette" in Form des Tagbogens.

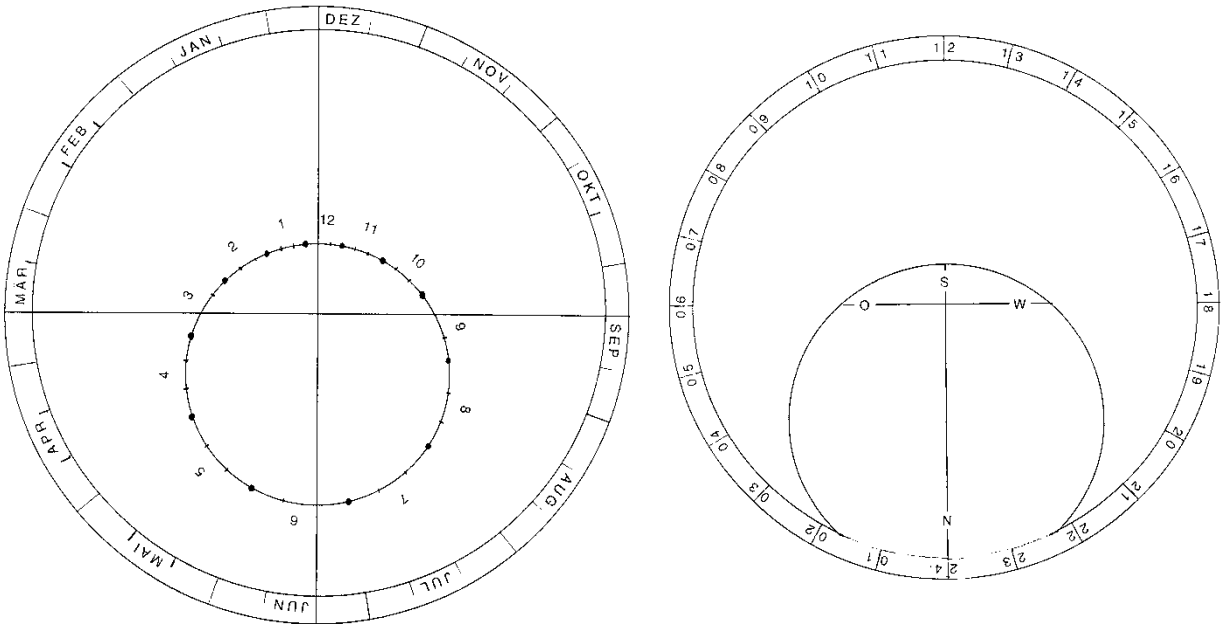
Mit einer einfachen selbst gefertigten Skala lesen sie die "Höhen" der Sonne ab. Dazu schneiden Sie einen schmalen Papierstreifen zurecht der genau zwischen Rand und der höchsten Stelle des Siebs passt und teilen die Länge in 90° auf.



Aus: www.schulbiologiezentrum.info, Arbeitshilfe 19.34 Sonne und Zeit: Der Lauf der Sonne

Unsere Abwandlung der von Hobbyastronomen verwendeten "Drehbaren Sternkarte" ermöglicht das Verfolgen des Sonnenlaufs (geltend für Hannover) auch bei bedecktem Himmel am Schreibtisch:

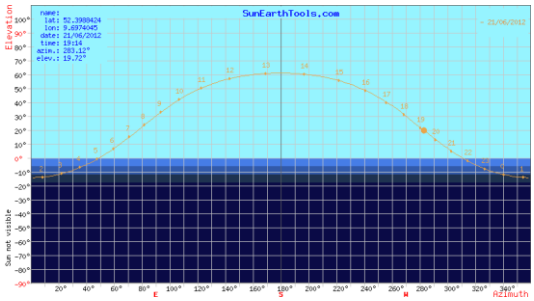
Die Arbeitshilfe "Wann und wo geht die Sonne auf und unter und wie hoch steht sie etwa über dem Horizont? Eine einfache Orientierungshilfe zum Selbstbau" (mit Schnittmuster) finden Sie unter www.schulbiologiezentrum.info



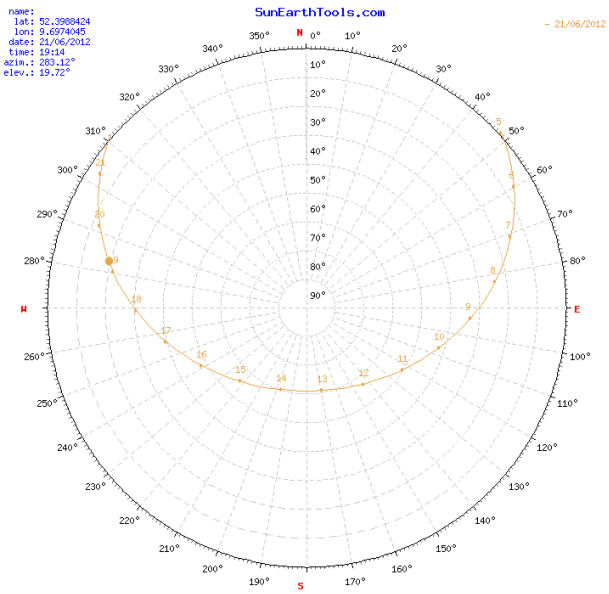
Aus: www.schulbiologiezentrum.info, Arbeitshilfe 19.47 Wann und wo geht die Sonne auf und unter und wie hoch steht sie etwa über dem Horizont?

Man kann den Tagesgang auch mathematisch berechnen ("2 x halber Tagbogen")

Im Internet stehen auf mathematischen Formeln basierende Anwendungen ("tools") bereit. Hier kann man Ort und Datum eingeben und erhält grafische Darstellungen des Tagesgangs inklusive Höhe und Azimut (Richtung). Hier als Beispiel "SunEarthTools" und das Ergebnis für Hannover Vinnhorster Weg (Schulbiologiezentrum) am 21.06.12:



http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=de

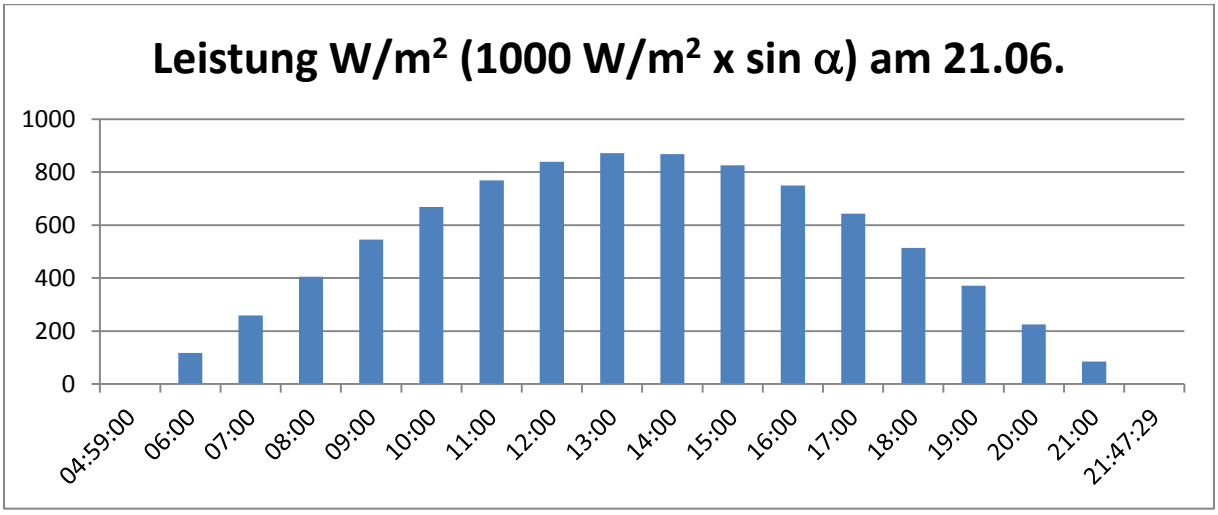


Die Grafiken lassen sich eine Tabelle entwickeln mit Hilfe derer man die Tagesleistung bestimmen kann (oder man nutzt die auf der Webseite angezeigte Tabelle, die sich aber nicht in Excel verwandeln lässt):

Es handelt sich natürlich wieder um die astronomisch maximale Leistung bei durchgängig blauem ungetrübtem Himmel! Die Effekte der Atmosphäre (siehe Air Mass) sind nicht berücksichtigt.

21.06. Hannover (52° Nord)

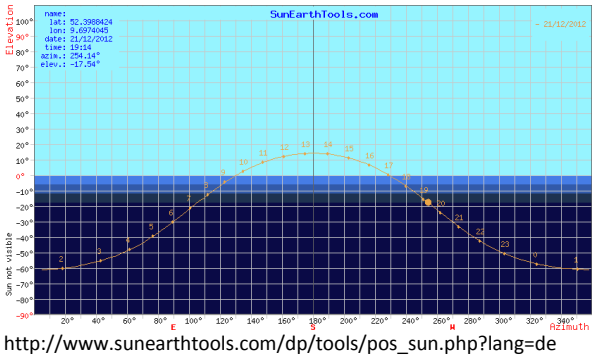
Uhrzeit (MESZ)	Höhe α (°)	Leistung W/m^2 (1000 W x sin α)	Uhrzeit (MESZ)	Höhe α (°)	Leistung W/m^2 (1000 W x sin α)
04:59	-0,8°	0	14:00	60,2°	868
6:00	6,7°	117	15:00	55,7°	826
7:00	15,0°	259	16:00	48,5°	749
8:00	23,9°	405	17:00	40,0°	643
9:00	33,0°	545	18:00	30,9°	514
10:00	42,0°	669	19:00	21,8°	371
11:00	50,3°	769	20:00	13,0°	225
12:00	57,0°	839	21:00	4,9°	85
13:00	60,7°	872	21:47	-0.8°	0



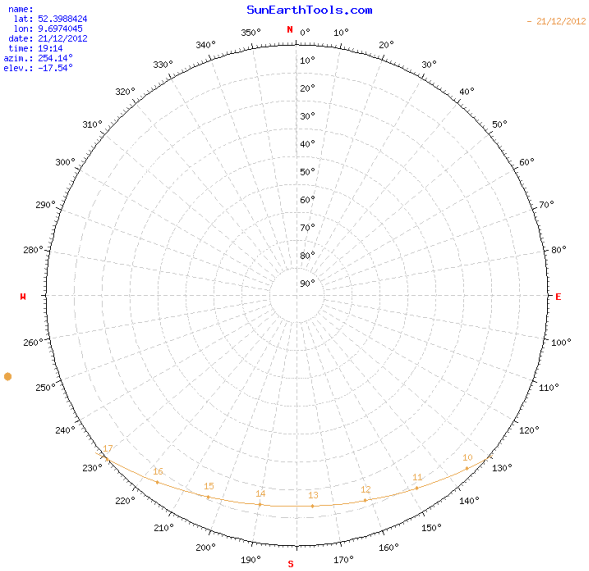
Aus dem Tages-Mittelwert von 486 W/m^2 und der Zeit zwischen Sonnenauf- und untergang (16 h 48 min = 60420s) folgen 29390705 Ws

Da eine Wattstunde (Wh) 3600 Ws entspricht errechnen sich 8164,1 Wh oder etwa 8 kWh.

Das heißt, eine Fäche von 1/8 m^2 (25 x 25 cm) empfängt am längsten Tag des Jahres etwa 1 kWh pro Tag.

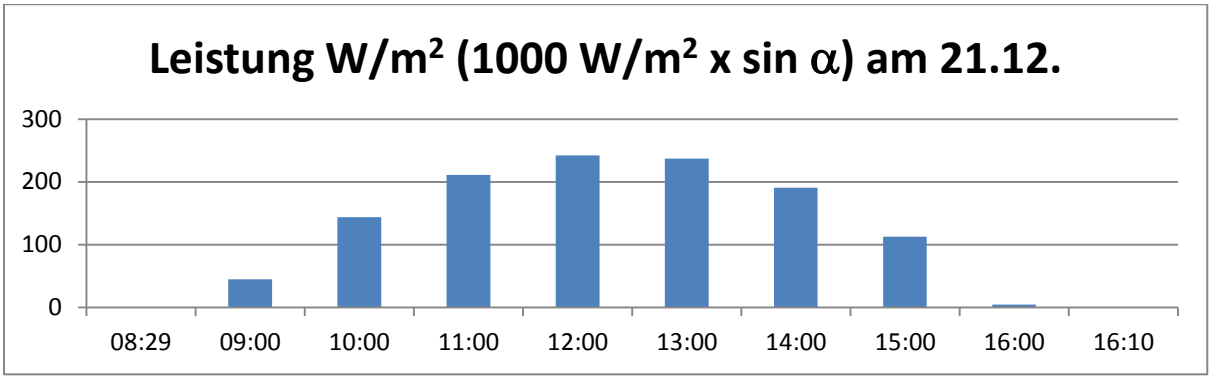


http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=de



21.12. Hannover (52° Nord)

Uhrzeit (MESZ)	Höhe α (°)	Leistung W/m^2 (1000 W x sin α)	Uhrzeit (MESZ)	Höhe α (°)	Leistung W/m^2 (1000 W x sin α)
08:29	-0,8°	0	13:00	13,7°	237
9:00	2,6°	45	14:00	11,0°	191
10:00	8,3°	144	15:00	6,5°	113
11:00	12,2°	211	16:00	0,3°	5
12:00	14,0°	242	16:10	-0,8	0

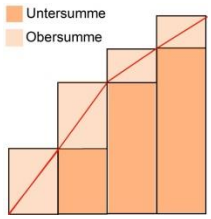


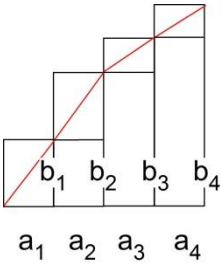
Aus dem Tages-Mittelwert von 118 W/m^2 und der Zeit zwischen Sonnenauf- und untergang (7 h 41 min = 27660s) folgen 3263880 Ws

Da eine Wattstunde (Wh) 3600 Ws entspricht errechnen sich 906,6 Wh oder weniger als 1 kWh/d.

Das heißt, eine Fäche von 1 m^2 empfängt am kürzesten Tag des Jahres etwas weniger als 1 kWh pro Tag.

Berechnung der Tagesummen mit EXCEL





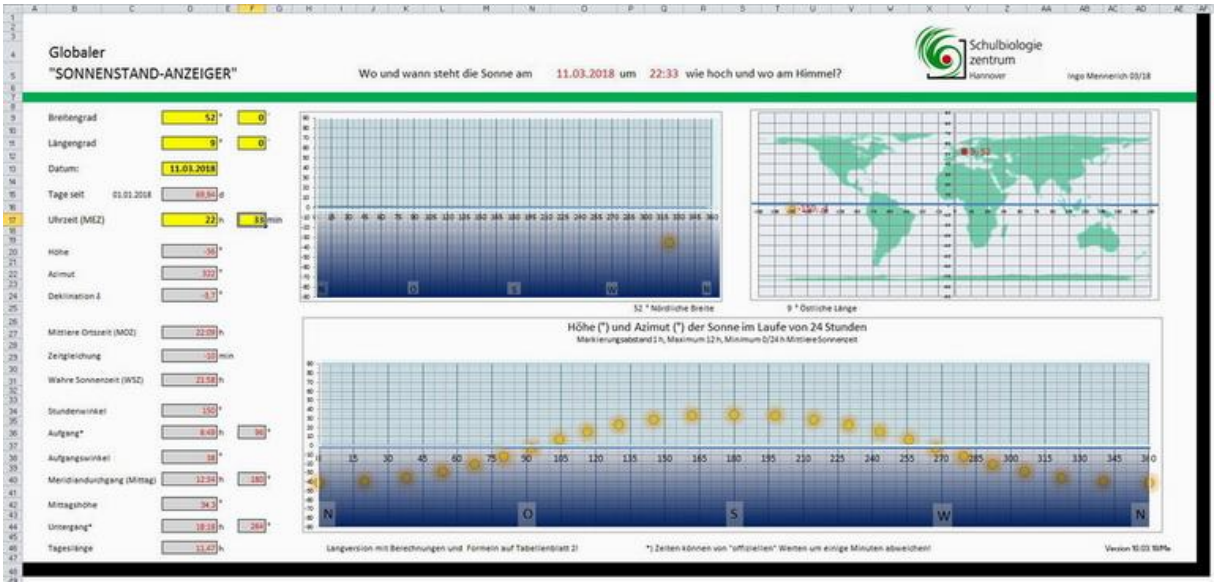
Die Tagesleistung (kWh/m^2) entspricht der Fläche unter der Leistungskurve. Solche Flächen müssten eigentlich mit Hilfe der Integralrechnung bestimmt werden. Vereinfachend berechnet unser Excel-Programm die Summe der Flächen gedachter, unter der Kurve liegender Streifen (Ober-/Untersummen von Leistung*Zeit). Das ist natürlich nur eine, hier allerdings wohl vertetbare Annäherung. Da der 24stündige Tag hier rechnerisch in 240 Einzelwerte aufgelöst wird ist das Resultat für unsere Zwecke hinreichend genau.

$$A_{ges} = \frac{a_1 * b_1}{2} + \left[a_2 * b_2 - \frac{a_2 * b_2 - a_1 * b_1}{2}\right] + \left[a_3 * b_3 - \frac{a_3 * b_3 - a_2 * b_2}{2}\right] + \cdots$$

Der Sonne auf der Spur: Unser globaler "Sonnenstand-Anzeiger"

Auf www.schulbiologiezentrum.de finden Sie ein relativ einfaches Programm das nach Eingabe von Ort, Datum und Zeit die Höhe, den Azimut und den Lauf der Sonne über oder unter dem Horizont darstellt. Zusätzlich wird die Position angezeigt über der die Sonne zur eingegebenen Zeit senkrecht steht.
Durch Abwandlung der geographischen Koordinaten (Länge, Breite) können Sie den Sonnenkauf an jedwedem anderen Ort der Erde verfolgen, z.B.

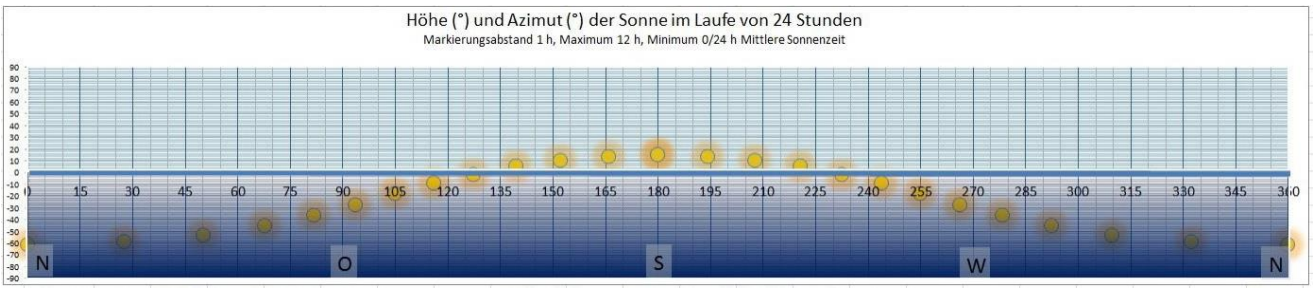
- während an den Polen (Polartag, -nacht, Polarkreis)
- in den Tropen (Tageslänge, Wendekreise)
- auf der Nord- und Südhalbkugel (entgegengesetzte Jahreszeiten) usw.



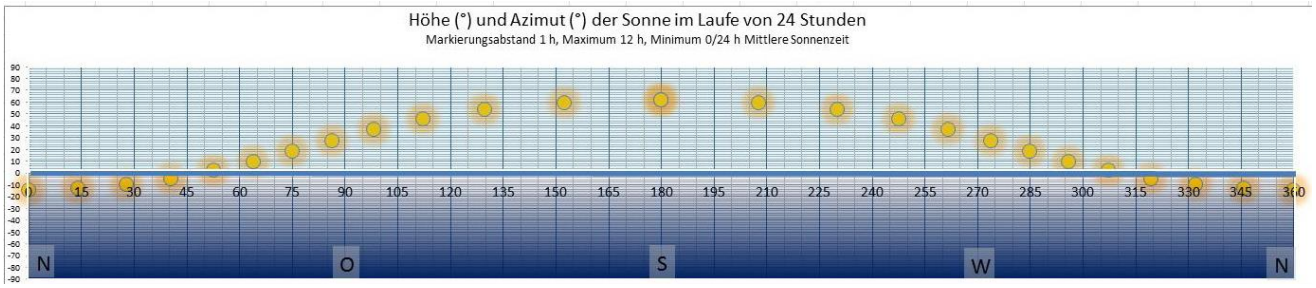
Aus: www.schulbiologiezentrum.info, "Unsere Sonnenseite"

Im Anhang haben wir die Tagbögen in Hannover für alle vier Jahreszeiten abgedruckt.

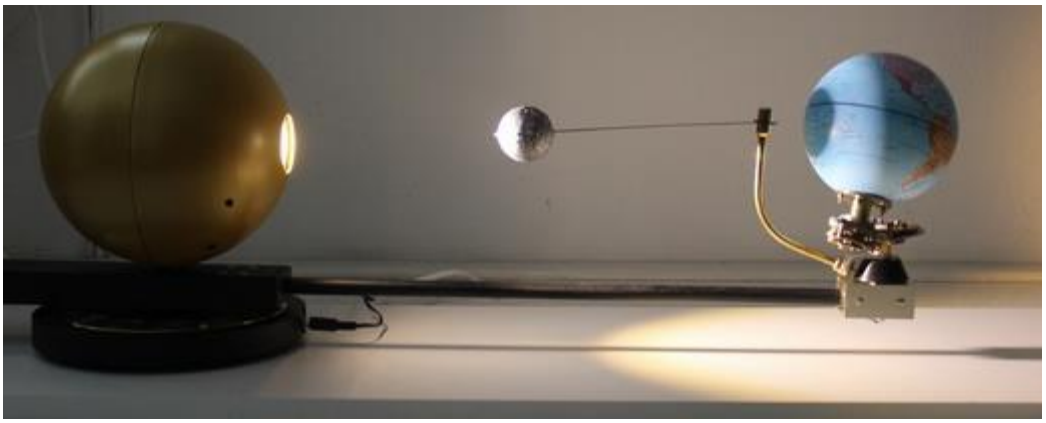
Dezember



Juni



Tellurium zur Darstellung der Jahreszeiten auf der Erde



"Totale Sonnenfinsternis"

Das im Schulbiologiezentrum ausleihbare Tellurium zeigt anschaulich, wie Jahreszeiten, Mondphasen und Finsternisse entstehen. Angetrieben wird das komplizierte Räderwerk durch einen Elektromotor.
Man kann aber auch jederzeit in den Handbetrieb übergehen.

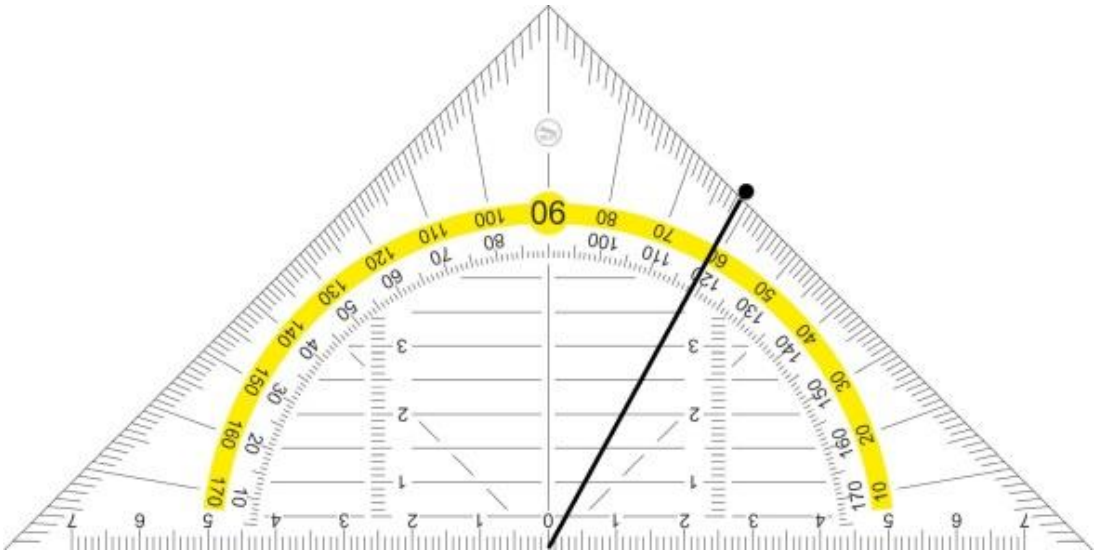
Ingo Mennerich, Dezember 2018

ANHANG:

Vorschläge für den Einsatz im Unterricht:

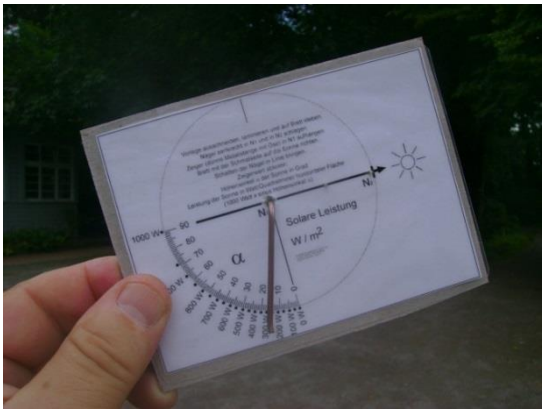
Horizontwinkel ("Höhe") der Sonne

- Miss die "Höhe" der Sonne,
  z.B. mit einem Geodreieck und einem dünnen Stift



- Stelle die lange Seite des Geodreiecks ("Lineal") so auf den waagerechten Boden, dass es nur einen schmalen Schatten wirft. Dann zeigt eine Schmalseite zur Sonne.

- Führe den Stift an der Schmalseite entlang bis der Schatten genau auf den Nullpunkt fällt und lies den Winkel ab.oder der selbst gebauten Handmesshilfe.



Halte die Messhilfe so, dass sie auf beiden Seiten keinen Schatten wirft. Der aufgedruckte Pfeil und die "Sonne" zeigen dann in die Richtung aus der die Sonne scheint.
Neige die Messhilfe so, dass die Schatten der Reißzweckenspitzen auf einer Linie liegen.

Lies den Winkel ab.

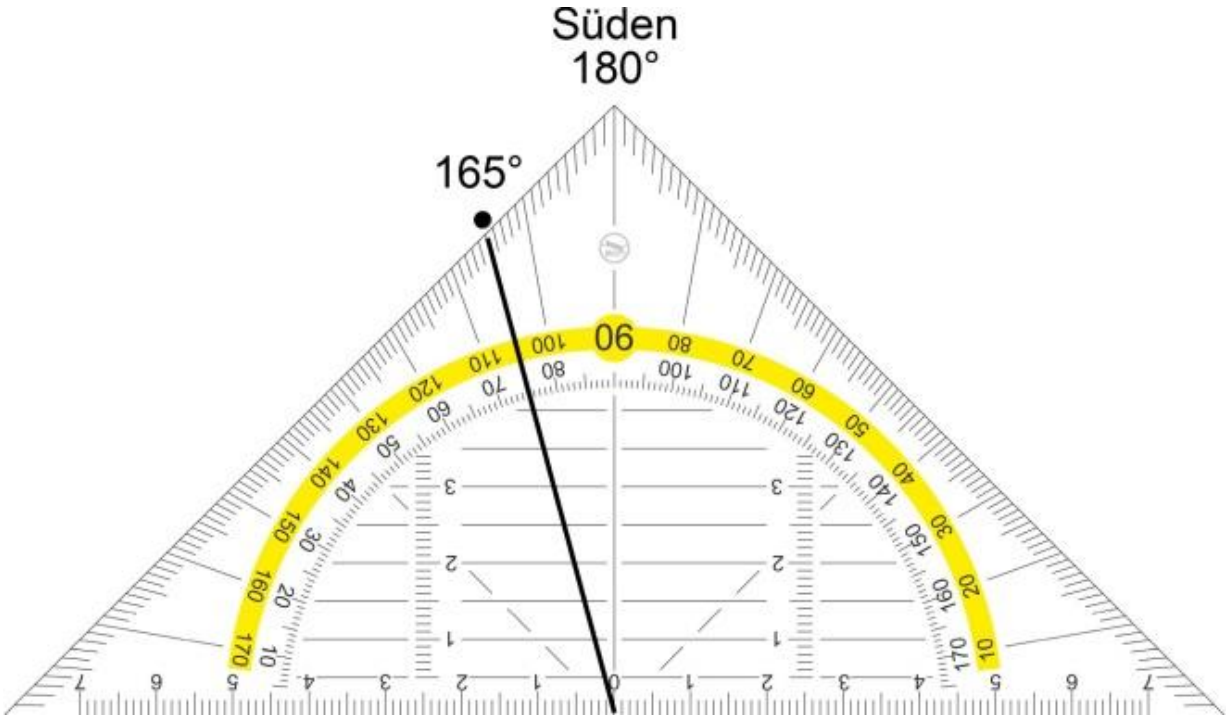
Bestimme die solare Leistung die auf einen Quadratmeter waagerechten Bodens fällt mit Hilfe des gemessenen Winkels

$$P_{W/m^2} = 1000W * \sin(Horizontwinkel)$$

Wie verändert sich die Leistung bei tiefer oder höher stehender Sonne?

Azimut ("Kompassrichtung") der Sonne

- Bestimme die Himmelsrichtung ()den Azimut) der Sonne, z.B. mit dem Kompass, dem Geodreieck und einem Stift



- Bestimme die Südrichtung mit dem Kompass.
- Lege das Geodreieck mit der Spitze nach Süden zeigend auf den Boden.
- Führe den Stift an der Schmalseite entlang bis sein Schatten auf den Nullpunkt des Geodreiecks fällt.

Lies den Winkel zur Südrichtung ab.

Datum und Uhrzeit

Notiere das Datum und die Uhrzeit der Messung

Geographische Koordinaten des Ortes

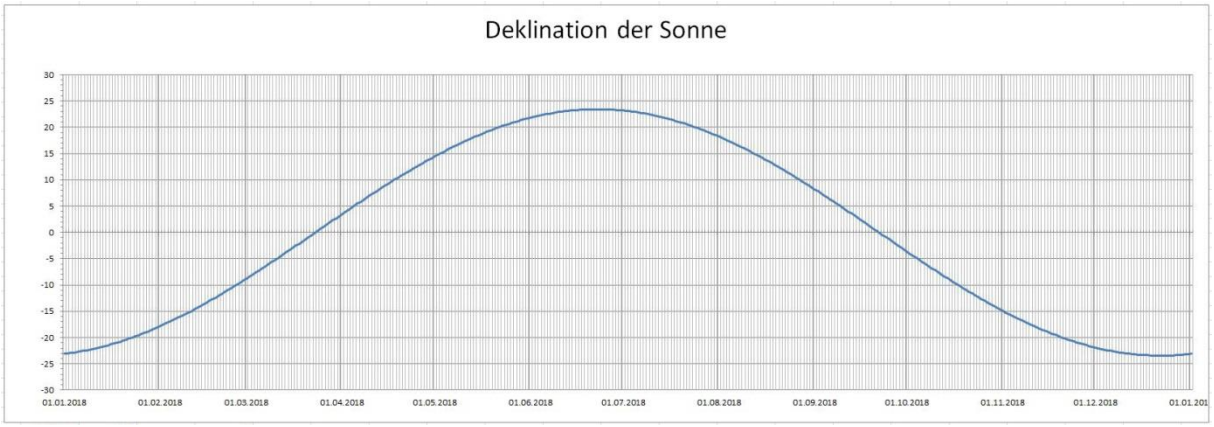
Suche im Atlas die geographische Länge und Breite deines Ortes heraus

Mittagshöhe der Sonne

Bestimme die "Höhe" die die Sonne am heutigen Tag mittags erreichen wird oder erreicht hat.

DEKLINATION der Sonne

Der Ort über dem die Sonne mittags senkrecht über der Erdoberfläche steht schwankt zwischen dem nördlichen Wendekreis (23,5° Nord) im Juni und dem südlichen Wendekreis (23,5° Süd) im Dezember. Im März und September kreuzt sie den Äquator (0°).



Lies die zum aktuellen Datum passende Deklination im Diagramm ab.

Die Mittagshöhe der Sonne kannst du mit dieser Formel bestimmen:

$$Mittagsh\ddot{o}he = 90° - Geographische\ Breite + Deklination$$

Achtung:

- Nördliche Breiten sind positiv, südliche Breiten negativ
- Das gilt auch für die Deklination (23,5° Süd = - 23,5°)

Energie- und Leistungsberechnung Solarkocher (Oktober 2007)

Wieviel Strahlung fällt auf den Sonnenspiegel?

Miss den Durchmesser des Spiegels

D = 140 cm = r = 70 cm

Berechne die **Querschnittsfläche** nach der Formel: $A = \pi r^2 = 3{,}14 \times 0{,}7^2 = 1{,}54\ m^2$

Energie: $\boldsymbol{E} = c \times m \times (T_2 - T_1)$

Beispiel: Mit dem Sonnenspiegel werden 2 Liter 20°C warmes Wasser zum Kochen gebracht. Wieviel Energie steckt im heißen Wasser?

Lösung: $\boldsymbol{E} = c \times m \times (T_2 - T_1) = 4{,}19$ kJ x 2kg x (100°C - 20°C) = 670,4 kJ

Leistung: $P = E : t$

Beispiel: Mit dem Sonnenspiegel werden 2 Liter 20°C warmes Wasser in 20 Minuten zum Kochen gebracht. Bestimme die Leistungsaufnahme.

Lösung: $\boldsymbol{E} = c \times m \times (T_2 - T_1) = 4{,}19$ kJ x 2kg x (100°C - 20°C) = 670,4 kJ

$P = E : t$ = 670400 J : (20 x 60s) = 558,7 W

(Effektive) Leistung pro Quadratmeter: $P_m{}^2 = \mathbf{P} \times (1 : A)$

$P_m{}^2$ = 558,7 W x (1 : 1,54) = 362,8 W

Lasse das kochende Wasser abkühlen. Drehe den Sonnenspiegel dazu ganz aus der Sonne heraus. Miß, um wieviel Grad die Temperatur in der Zeit sinkt, die gebraucht wurde, um das Wasser zum Kochen zu bringen

Die Umgebungstemperatur des Topfes sollte so hoch sein wie beim Aufheizen.

Beispiel: Nach 20 Minuten ist die Temperatur von 100°C auf 35°C gesunken

Lösung: Der Energieverlust des Wassers beträgt $\boldsymbol{E} = c \times m \times (T_2 - T_1) =$

4,19 x 2 kg x (100°C - 35°C) = 544,7 kJ

Die Leistungsabgabe durch Abstrahlung beträgt $P = E : t$ = 544700 J : (20 x 60s) = 453,9 W

Bestimmung der aufgefangen Strahlungsleistung:

Zur Leistung beim Aufheizen muss die Verlustleistung in der gleichen Zeit addiert werden! 558,7 W + 453,9 W = 1012,6 W

Bezogen auf einen Quadratmeter Fläche: $P_m{}^2$ = 1012,6 W x (1 : 1,54) = 657,5 W

Solarer Leistungsanzeiger

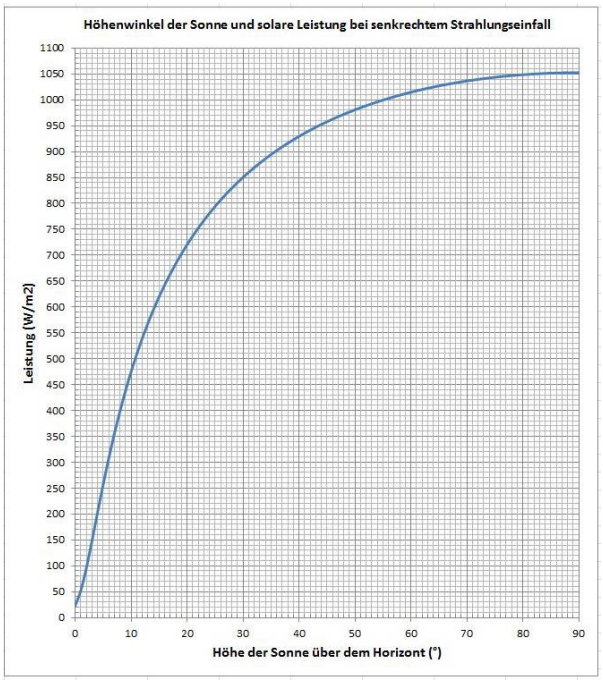
So viel Leistung bringt die Sonne auf die Erde

- Lege das Blatt waagerecht auf den Boden
- Stelle den Schattenstab senkrecht auf den Mittelpunkt der Kreise
- Das Ende des Schattens zeigt an, welche Leistung auf 1 m^2 eingestrahlt wird

Bestimme die Leistung, die auf einen Quadratmeter Erdboden fällt:

Solare Leistung senkrecht zur Strahlung und auf dazu geneigten Flächen

Bestimme die Leistung, die auf einen Quadratmeter Modulfläche fällt



Bestimme die "Höhe" der Sonne, d.h. den Horizontwinkel α.

- Lies im Diagramm ab, wie viel solare Leistung (P_{quer}) ein quer zur Einfallsrichtung der Strahlung liegender Quadratmeter empfängt.
- Lege die Messhilfe auf das Modul und bestimme, unter welchem Winkel die Sonnenstrahlen auf das Modul treffen
- Errechne daraus die Leistung (P_{Mod}), die auf einen Quadratmeter Modulfläche fällt.

$$P_{Modul} = P_{quer} * \sin(\alpha)$$

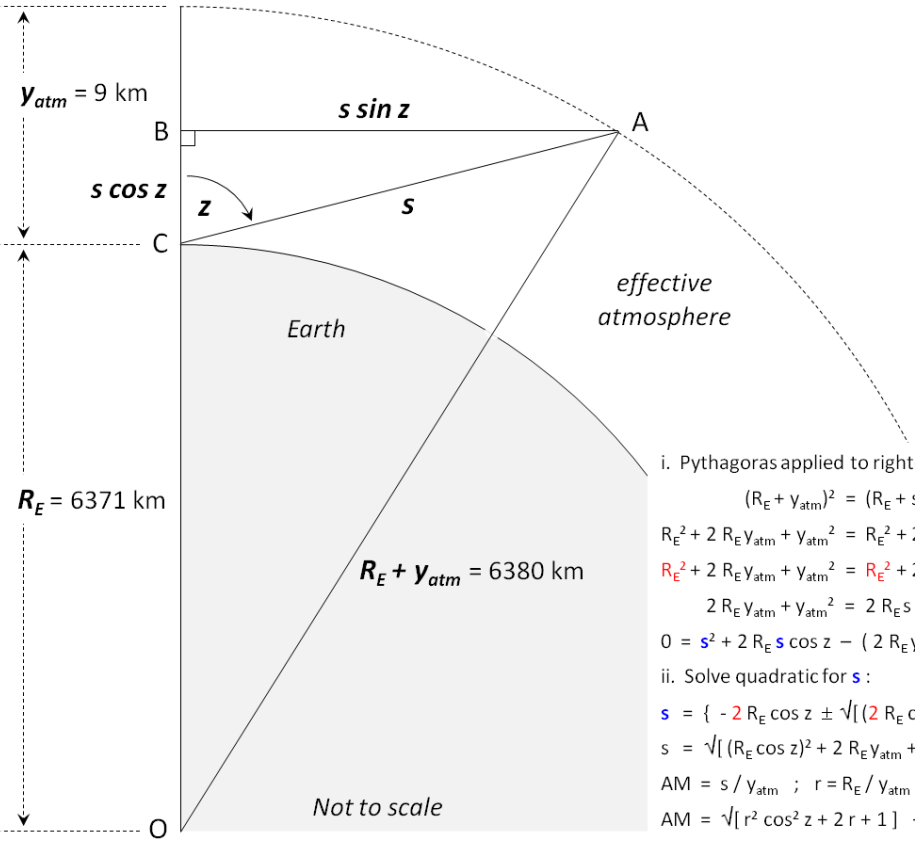
- Bestimme die Modulfläche und berechne die einfallende Leistung

Beispiel:

Horizontwinkel 45°, Neigung zur Einfallsrichtung 30°, Modulfläche 0,50m^2
P_{quer}: 960 W/m^2
P_{Modul}: 960 x sin30 x Modulfläche = 480 W/m^2 x 0,5m^2 = 240 W

Weglänge der direkten Strahlung durch die Atmosphäre

Berechnung der Weglänge (s) der direkten Strahlung der Sonne in Abhängigkeit vom Zenitwinkel (*z*) der Sonne nach dem Pythagoras.



i. Pythagoras applied to right-angle triangle OAB :

$$(R_E + y_{atm})^2 = (R_E + s\cos z)^2 + (s\sin z)^2$$

$$R_E^2 + 2R_E y_{atm} + y_{atm}^2 = R_E^2 + 2R_E s\cos z + s^2\cos^2 z + s^2\sin^2 z$$

$$R_E^2 + 2R_E y_{atm} + y_{atm}^2 = R_E^2 + 2R_E s\cos z + s^2(\cos^2 z + \sin^2 z)$$

$$2R_E y_{atm} + y_{atm}^2 = 2R_E s\cos z + s^2$$

$$0 = s^2 + 2R_E s\cos z - (2R_E y_{atm} + y_{atm}^2)$$

ii. Solve quadratic for s :

$$s = \{ -2R_E\cos z \pm \sqrt{[(2R_E\cos z)^2 + 4(2R_E y_{atm} + y_{atm}^2)]} \} / 2$$

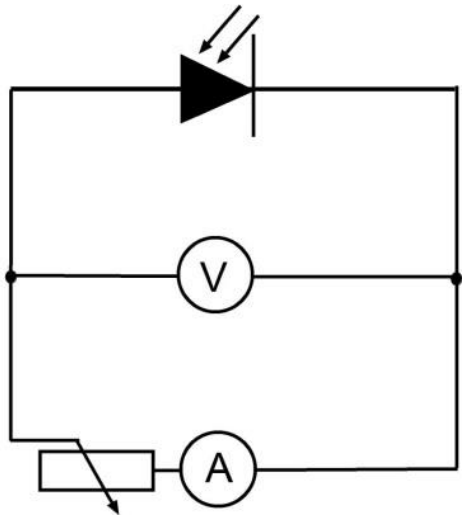
$$s = \sqrt{[(R_E\cos z)^2 + 2R_E y_{atm} + y_{atm}^2]} - R_E\cos z$$

$$AM = s / y_{atm} \quad ; \quad r = R_E / y_{atm} \approx 708$$

$$AM = \sqrt{[r^2\cos^2 z + 2r + 1]} - r\cos z$$

https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_%28solar_energy%29#/media/File:Airmass_geometry.png

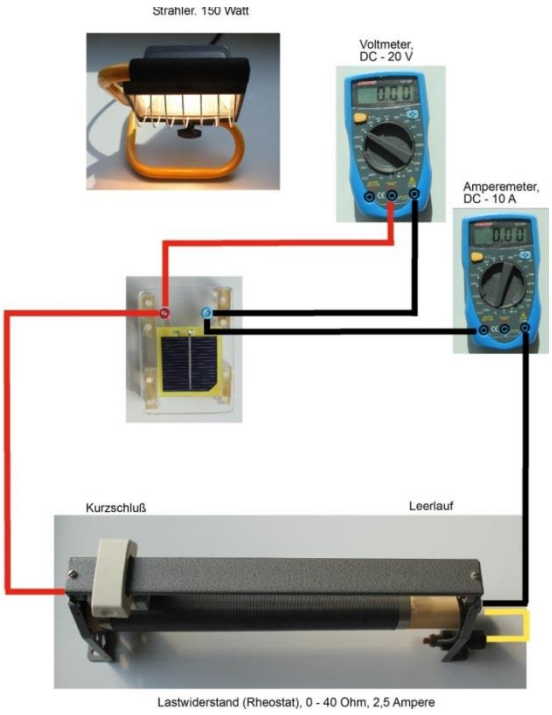
Solarzelle: Kennlinien, Leistungsmessung und Bestimmung des Wirkungsgrades



Material:

- Strahler 150 Watt
- Multimeter, DC -20V
- Multimeter, DC -10A
- Solarzelle
- Last-/Schiebewiderstand (Rheostat), 40 Ohm, 2,5 Ampere
- Messkabel

Aufbau und Verkabelung



Einstellung der Messgeräte:

- Spannung DC - 20V
- Strom DC 10 A (Im Messbereich "200mA" ist der mit dem Solarmodul in Reihe liegende Innenwiderstand des Messgerätes zu hoch.
- Achtung: Auf richtigen Anschluss (10A) achten!
- Volt min Millivolt verwandeln!

Abstand Strahler - Solarzelle etwa 25 cm
Solarzelle darf nicht heiß werden (Effizienzverlust)

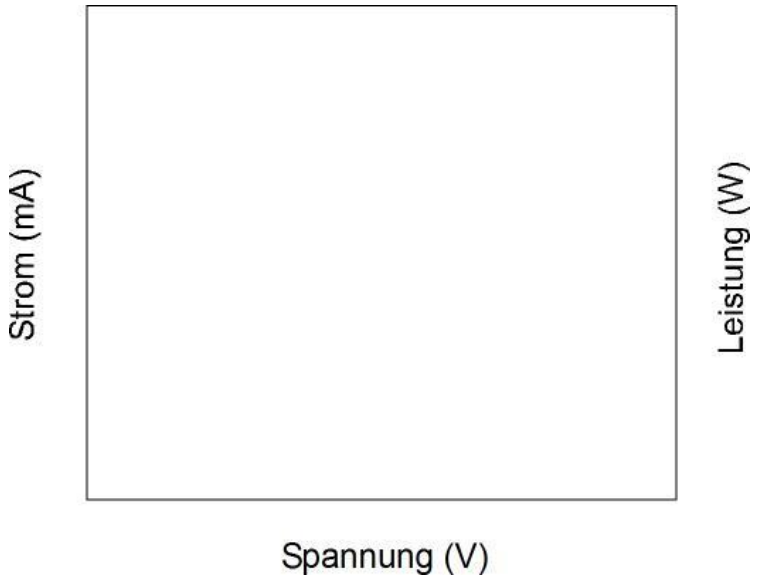
Solarzelle: Kennlinien und maximale Leistung

Messwerte Spannung-/Strom

U (V)									
I (A)									

U (V)									
I (A)									

Tabellenwerte bitte hier in Graphen umwandeln. Auf passenden Maßstab und Einteilungen achten!



Der **Maximum Power Point** (MPP) als Produkt von U und I liegt bei etwa _____V x _____A = _____ W

Maße und Fläche der Solarzelle: ___ cm x ___ cm = ___cm^2 = _____m^2

Das entspricht 1/_____ eines Quadratmeters.

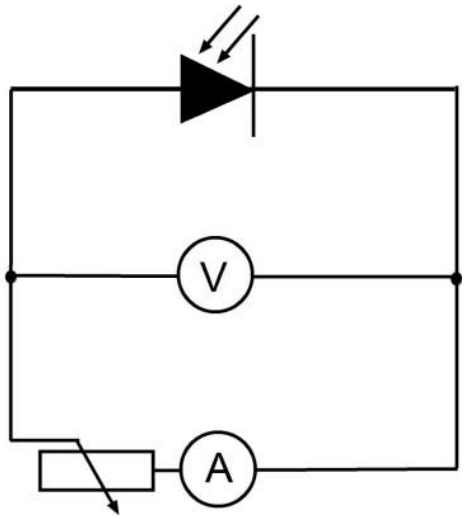
_____ Solarzellen mit einer Gesamtfläche von 1 m^2 würden _____W x _____ = _____ Watt liefern

Die Messsonde im IKS-Solartrainer zeigt bei gleicher Distanz zum Strahler _____W/m^2 an.

Daraus folgt ein **Wirkungsgrad** von

$$— * 100\% = _____\%$$

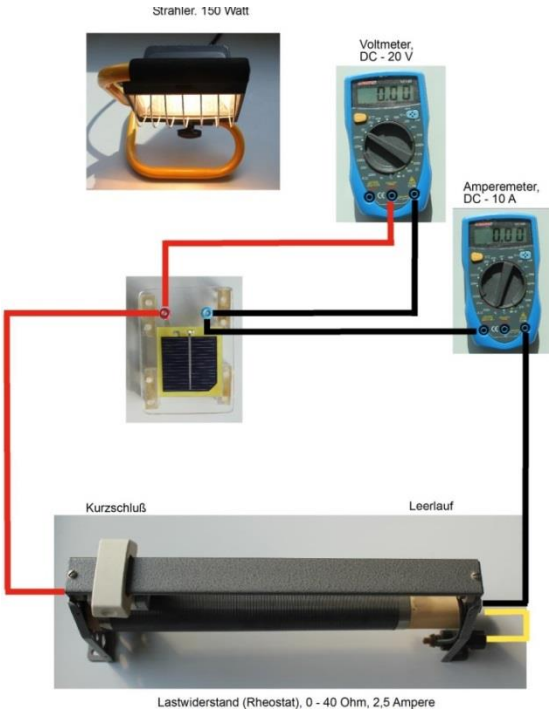
Solarzelle: Kennlinien, Leistungsmessung und Bestimmung des Wirkungsgrades



Material:

- Strahler 150 Watt
- Multimeter, DC -20V
- Multimeter, DC -10A
- Solarzelle
- Last-/Schiebewiderstand (Rheostat), 40 Ohm, 2,5 Ampere
- Messkabel

Aufbau und Verkabelung



Einstellung der Messgeräte:

- Spannung DC - 20V
- Strom DC 10 A (Im Messbereich "200mA" ist der mit dem Solarmodul in Reihe liegende Innenwiderstand des Messgerätes zu hoch.
- Achtung: Auf richtigen Anschluss (10A) achten!
- Volt min Millivolt verwandeln!

Abstand Strahler - Solarzelle etwa 25 cm
Solarzelle darf nicht heiß werden (Effizienzverlust)

Solarzelle: Kennlinien und maximale Leistung

Typische Messwerte Spannung-/Strom

U (V)	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51
I (A)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09

U (V)	0,51	0,50	0,49	0,48	0,44	0,33	0,26	0,13	0,00
I (A)	0,11	0,13	0,17	0,21	0,27	0,30	0,32	0,33	0,34

Der **Maximum Power Point** (MPP) als Produkt von U und I liegt bei etwa 0,44V*0,27A = 0,118 W

Maße und Fläche der Solarzelle: 5 cm x 5 cm = 24cm^2 = 0,0025m^2

Das entspricht 1/400 eines Quadratmeters.

400 Solarzellen mit einer Gesamtfläche von 1 m^2 würden 0,1Wx 400 = 40 Watt liefern

Die Messsonde im IKS-Solartrainer zeigt bei gleicher Distanz zum Strahler 480W/m^2 an.

Daraus folgt ein **Wirkungsgrad** von

$$\frac{40}{480} * 100\% = 8{,}3\%$$

Bei direkter Besonnung im Freien und senkrechtem Einfallswinkel (gemessen: 953W/m^2) liegt der MPP der Zelle bei 0,3 Watt (0,5V/0,63A). Damit erhöht sich der Wirkungsgrad auf

$$\frac{120}{953} * 100\% = 12{,}6\%$$

Achtung: Die Fensterscheiben im Energie-LAB lassen nur etwa 17% der Strahlung hindurch:
Typische Messwerte: 169W/m^2 im Raum gegenüber 953W/m^2 vor dem Gebäude.

Leistung und Wirkungsgrad unserer in Experimenten eingesetzten 10W-Module:

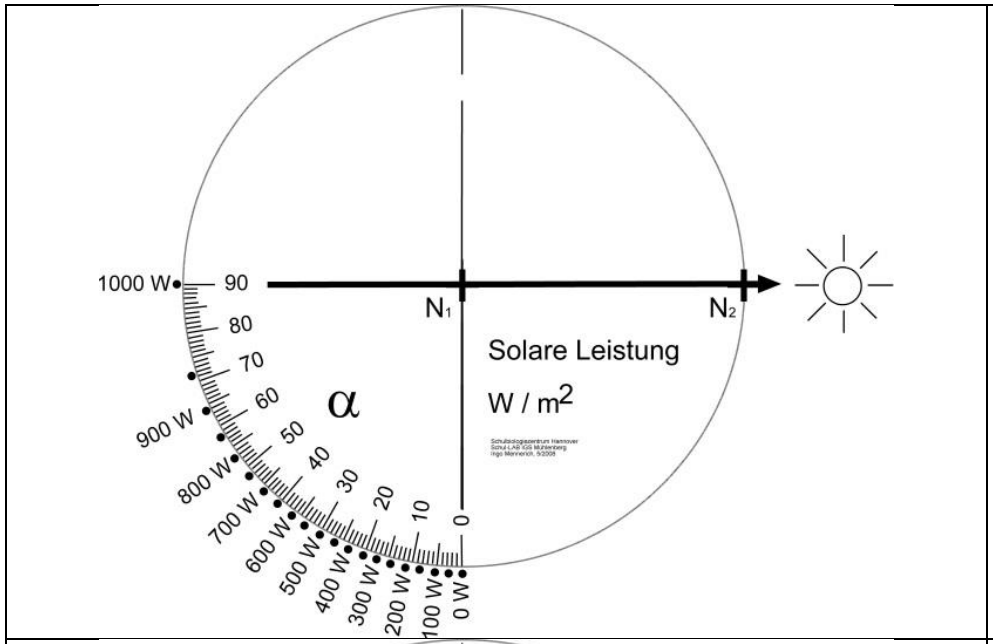
(ET-M53610 10Wp)

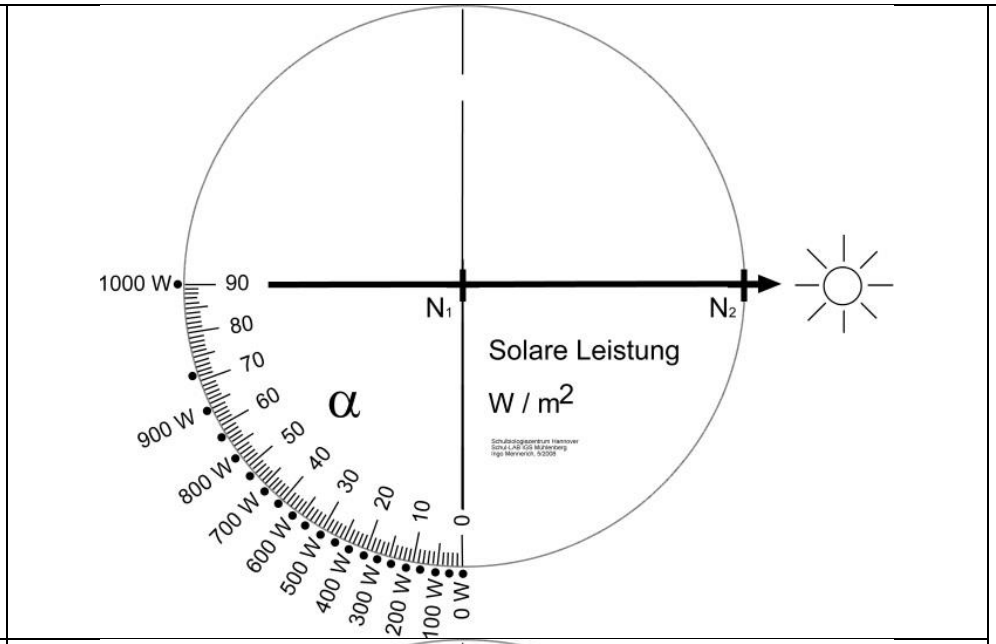
Werte nach Datenblatt:

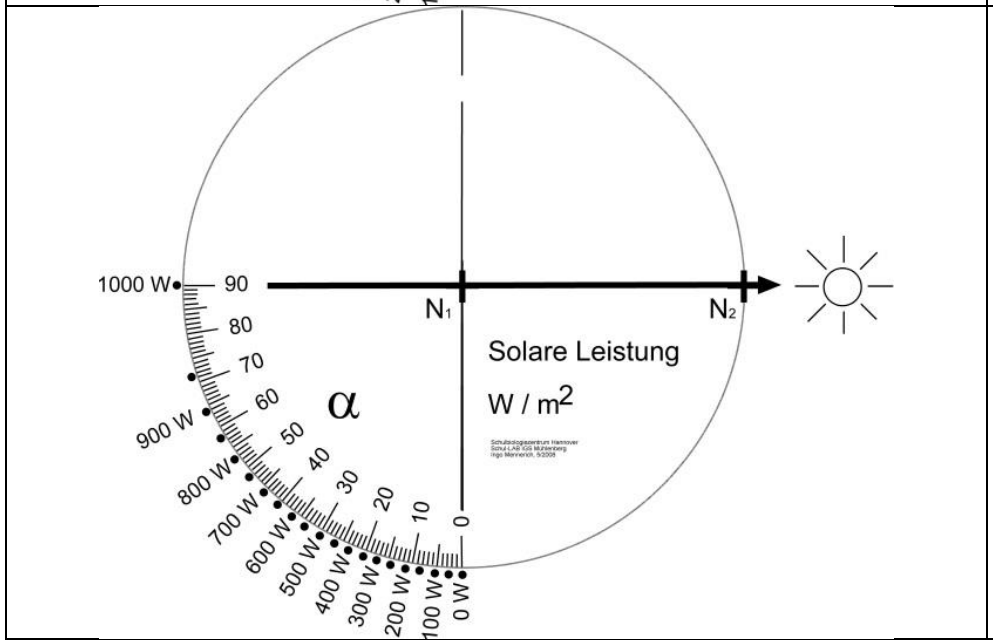
Max Spannung:	17,82 V
Max Strom:	0,57 A
P_{max}:	10,2 W

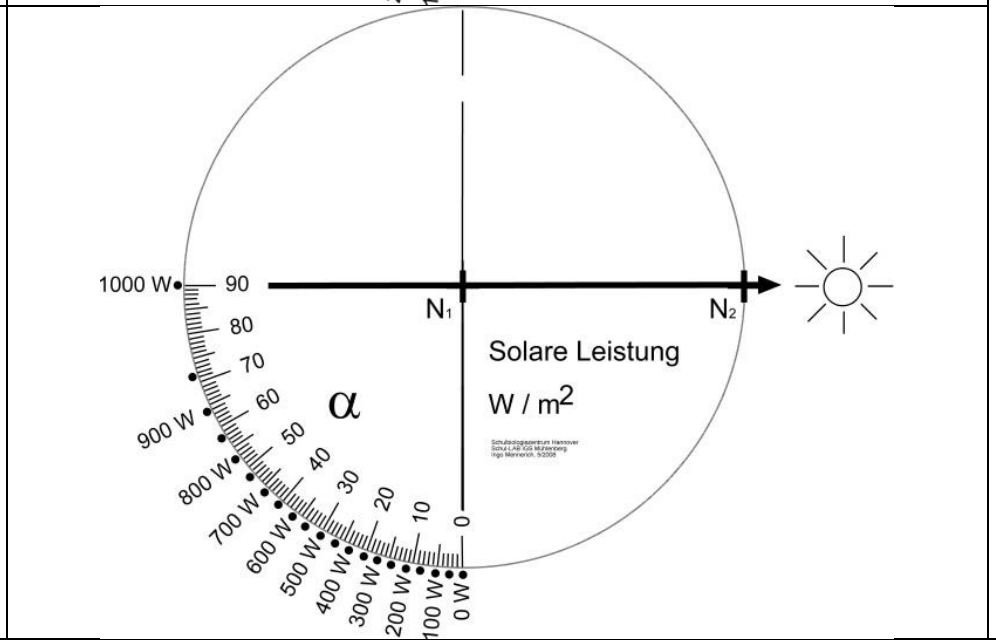
Fläche: 20 x 30 mm = 0,06 m^2

Handmesshilfe zur Bestimmung der "Hohe" der Sonne

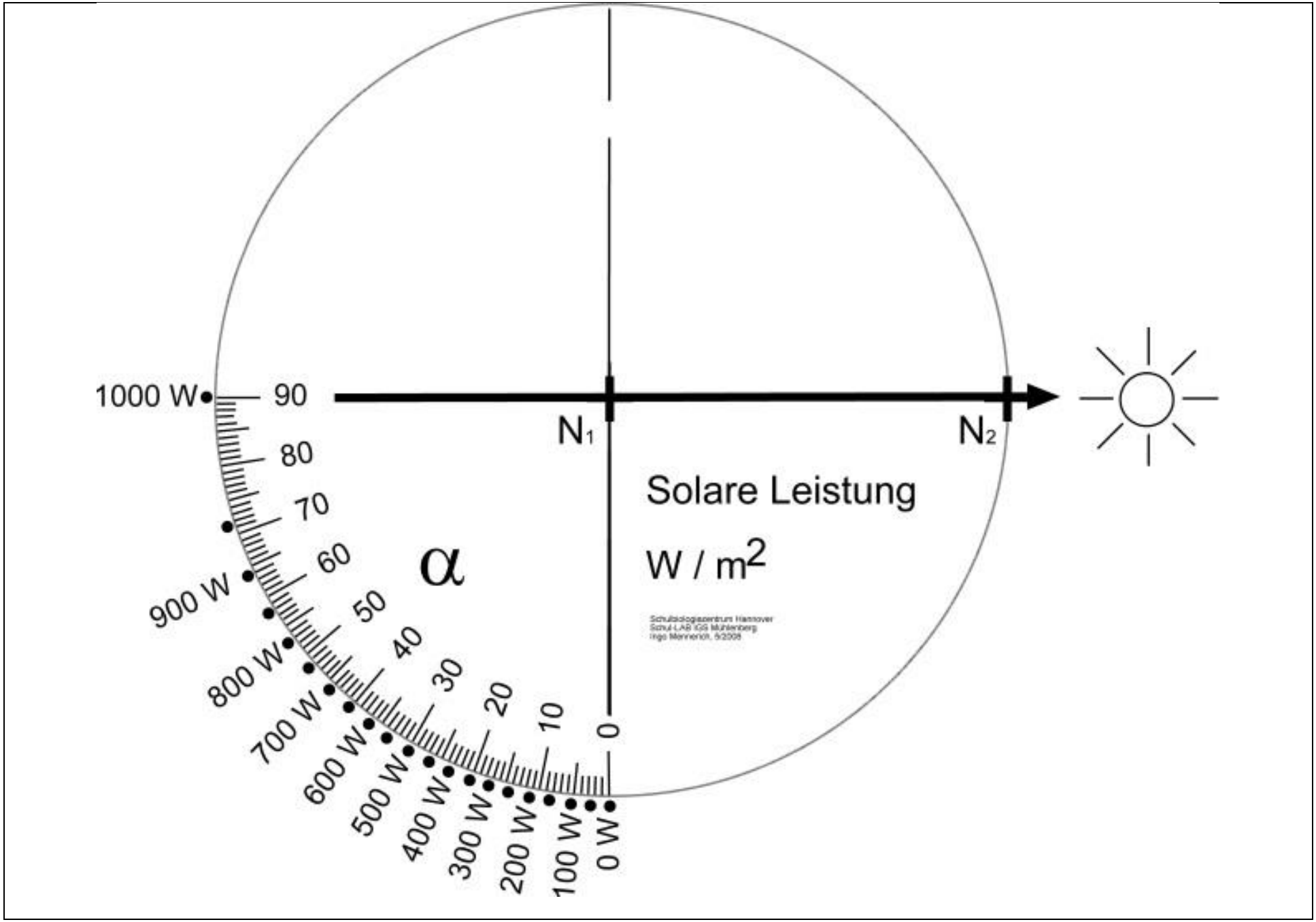








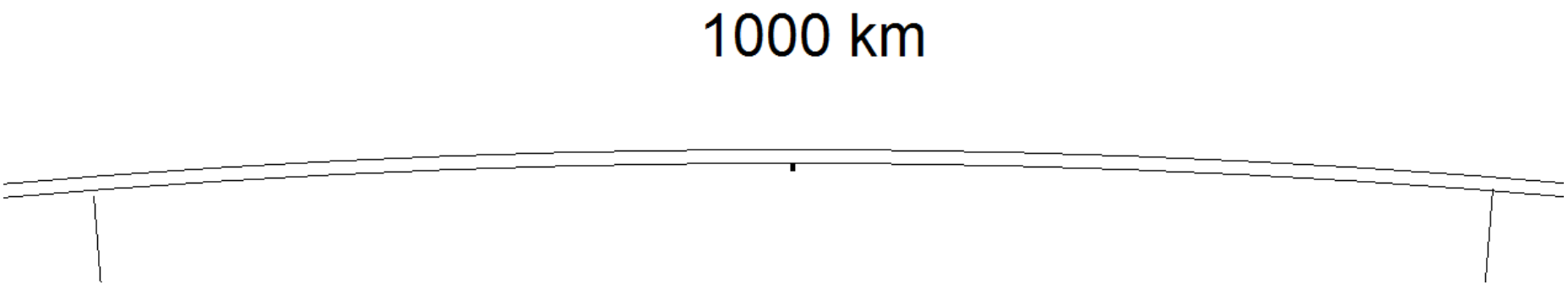
Aus: Solarer Leistungsmesser 2 (Handmesshilfe, "Quadrant"), Schulbiologiezentrum Hannover 2010


1000 W
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
900 W
800 W
700 W
600 W
500 W
400 W
300 W
200 W
100 W
0 W
α
N1
N2
Solare Leistung
W / m2
Schulbiologiezentrum Hannover
Schul-LAB IGS Mühlenberg
Ingo Menneriott, 5/2008

Der manchmal lange und manchmal kurze Weg der Sonnenstrahlen durch die Lufthülle der Erde

Hier sind maßstabgerecht die Erdoberfläche auf einer Länge von 1000 km und die darüber liegende, etwa 9 km dicke Atmosphäre abgebildet:

Lege ein Geodreieck auf die Zeichnung und bestimmtze die Weglänge der Sonnenstrahlen bei unterschiedlichen Höhen der Sonne.



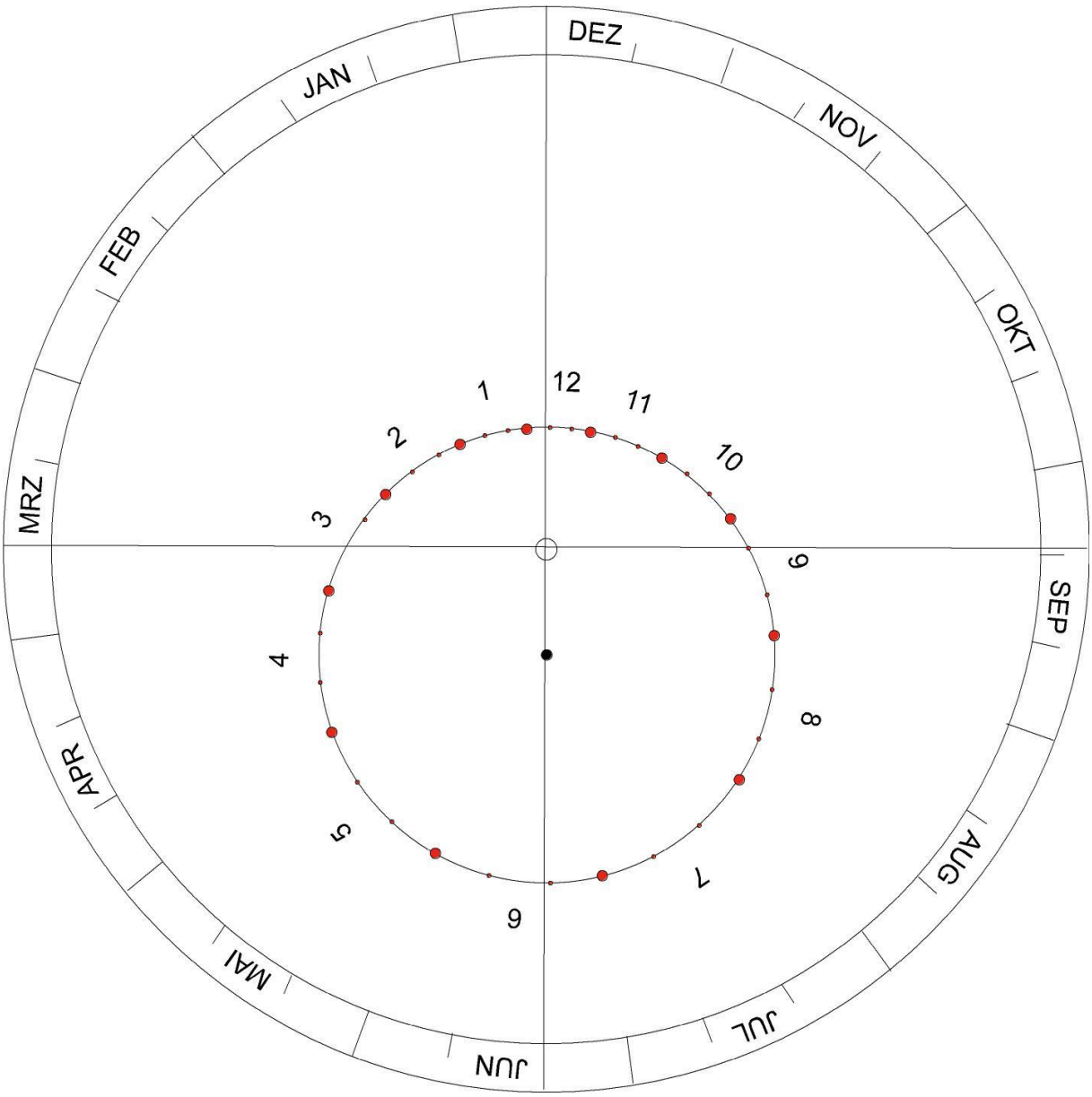
Winkel	Kilometer
90°	
75°	
60°	
45°	
30°	
15°	
0°	

Drehscheiben Jahreszeiten und Sonnenlauf

Ausschneidebogen (Mehr dazu: AH 19.47 Sonnenauf-/untergang)

Grundscheibe, Deckscheibe mit "Himmelsfenster" und darauf liegenden "Höhenlinien"

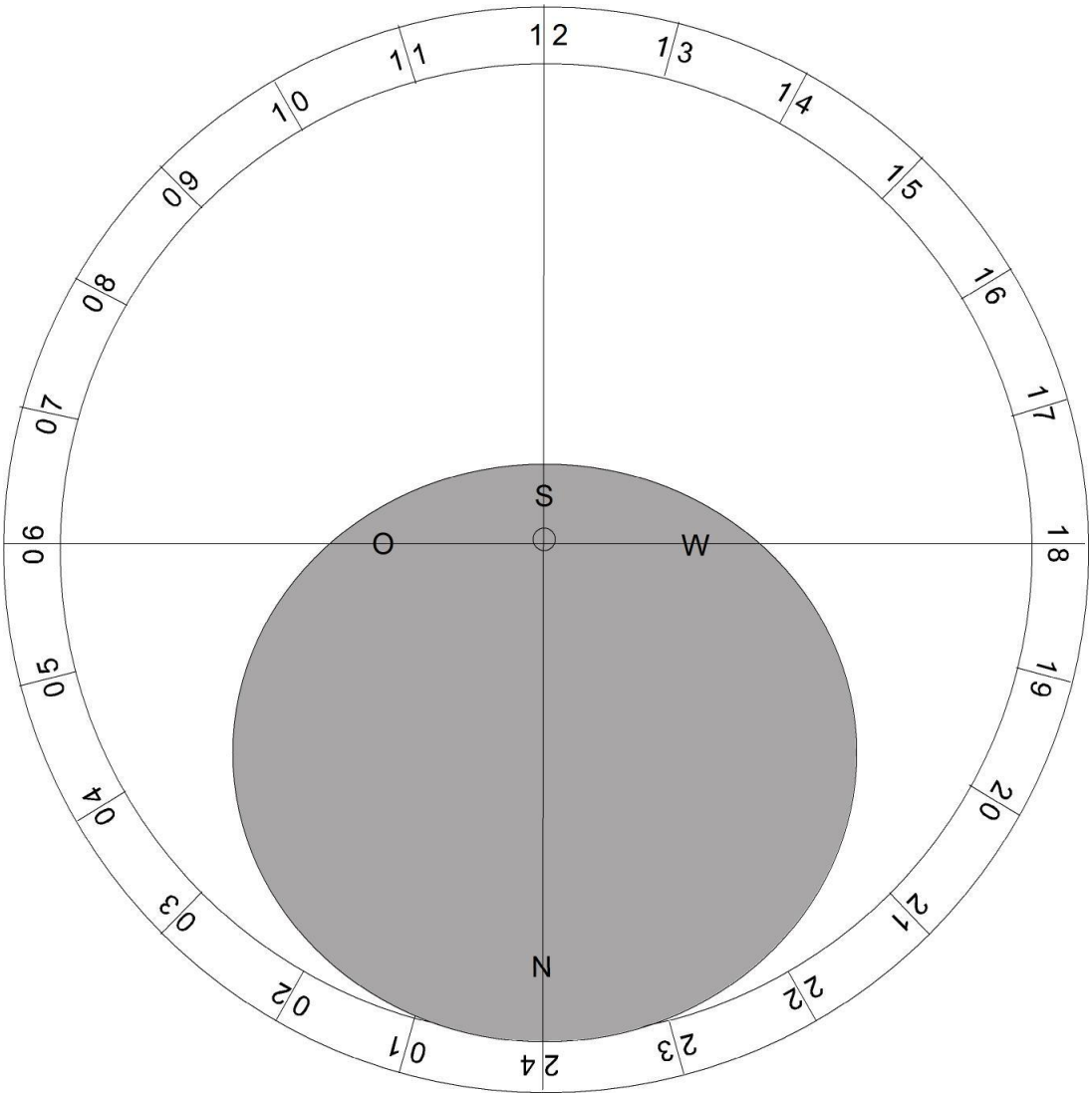
GRUNDSCHEIBE

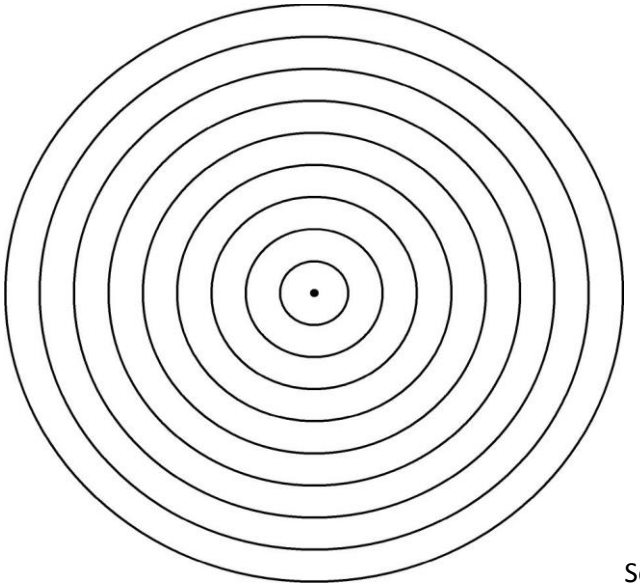


Ausschneiden und auf Papp- oder Holzscheibe kleben

DECKSCHEIBE

Ausschneiden und dunkle Fläche herausschneiden. Optional: Laminieren

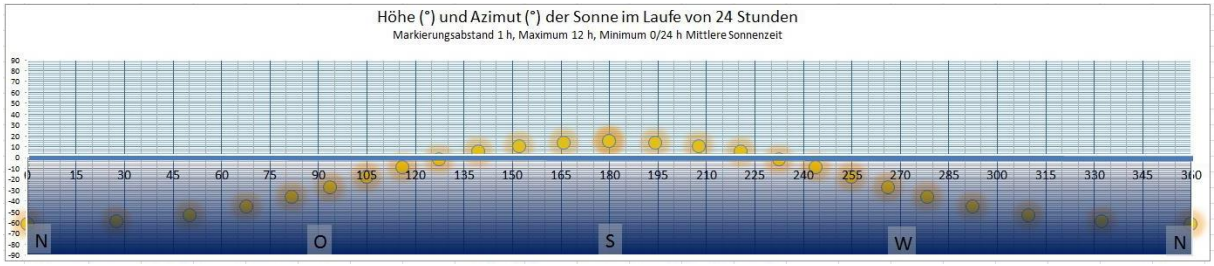




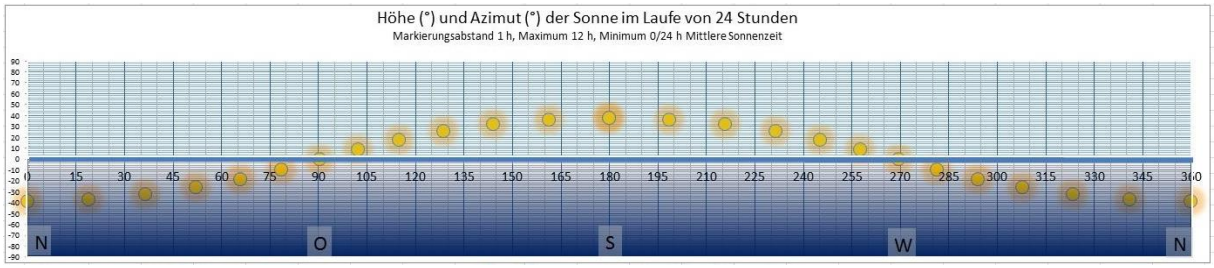
Sonnenhöhe

Tagbögen der Sonne in Hannover (52° Nord)

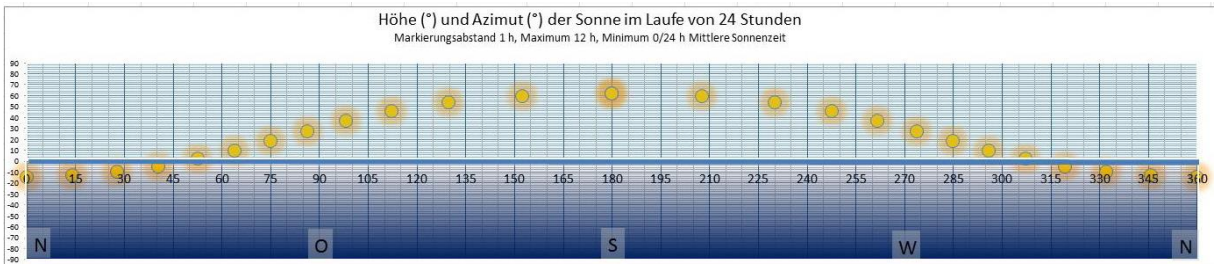
Dezember



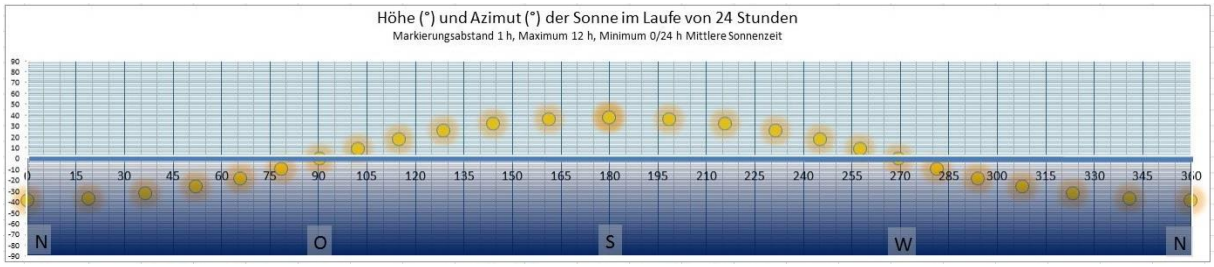
März



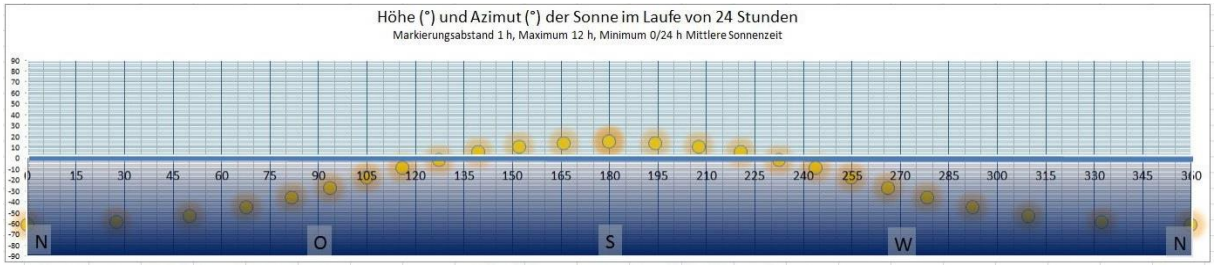
Juni



September



Dezember



Geographische Breite und Länge einiger Orte auf der Erde

Addis Abeba	9°02´N	38°47´O	Kairo	30°03´N	31°15´O
Adelaide	34°56´S	138°36´O	Kapstadt	33°55´S	18°27´O
Agadez	17°00´N	7°56´O	Kiew	50°26´N	30°31´O
Algier	36°48´N	3°06´O	Kopenhagen	55°40´N	12°35´O
Amsterdam	52°23´N	4°53´O	Lissabon	38°44´N	9°10´W
Anchorage	61°13´N	149°53´W	London	51°24´N	0°06´O
Ankara	40°08´N	33°00´O	Los Angeles	34°03´N	118°14´W
Athen	38°06´N	23°48´O	Madrid	40°24´N	3°41´W
Auckland	36°51´S	174°45´O	Manila	14°35´N	121°02´O
Bagdad	33°18´N	44°24´O	Marseille	43°18´N	5°24´O
Barcelona	41°24´N	2°12´O	Miami	25°47´N	80°12´W
Beijing	39°54´N	116°28´O	Montreal	45°10´N	71°25´W
Beograd	44°48´N	20°30´O	Moskau	55°45´N	37°34´O
Bergen	60°24´N	5°18´O	München	48°09´N	11°37´O
Berlin	52°30´N	13°24´O	Murmansk	69°00´N	33°15´O
Bern	46°57´N	7°26´O	Neapel	40°52´N	14°15´O
Bombay	19°06´N	72°48´O	New Orleans	29°57´N	90°04´W
Boston	42°21´N	71°03´W	New York	40°44´N	73°59´W
Brasilia	15°47´S	47°55´W	Oslo	59°55´N	10°44´O
Brüssel	50°55´N	4°23´O	Paris	48°54´N	2°24´O
Budapest	47°30´N	19°04´O	Perth	31°57´S	115°51´O
Buenos Aires	34°16´S	58°22´W	Prag	50°04´N	14°27´O
Chicago	41°58´N	87°38´W	Quito	0°13´S	78°30´W
Dehli	28°22´N	77°13´O	Reykjavik	64°01´N	21°57´W
Dublin	53°20´N	6°15´W	Rio de Janeiro	22°54´S	43°13´W
Frankfurt a.M.	50°07´N	8°42´O	Rom	41°53´N	12°30´O
Gdansk	54°24´N	18°40´O	San Francisco	37°47´N	122°25´W
Glasgow	55°51´N	4°16´O	Singapur	1°17´N	103°51´O
Göteborg	57°43´N	11°58´N	Sofia	42°41´N	23°19´O
Hamburg	53°33´N	9°58´O	St. Petersburg	59°55´N	30°15´O
Hannover	52°22´N	9°43´O	Stockholm	59°21´N	18°05´O
Hanoi	21°02´N	105°51´O	Suva	18°08´S	178°25´O
Havanna	23°08´N	82°22´W	Sydney	33°52´S	151°12´O
Helsinki	60°10´N	24°58´O	Tokyo	35°35´N	139°45´O
Hongkong	22°16´N	144°08´O	Warschau	52°15´N	21°00´O
Honululu	21°19´N	157°51´W	Wellington	41°17´S	174°46´O
Irkutsk	52°16´N	104°20´O	Wien	48°14´N	16°20´O
Johannesburg	26°12´S	28°06´O	Wladiwostok	43°08´N	131°54´O

Horizontwinkel der Sonne, Air Mass und solare Leistung

1	Horizontwinkel der Sonne (°)
2	Auf horizontale Fläche fallende Leistung (W/m^2, ohne Atmosphäre) =$P_{MAX(AM)}$ *SIN(BOGENMASS(Horizontwinkel))
3	Weglänge der direkten Strahlung durch die Atmosphäre (≈9km) =WURZEL((6371*COS(BOGENMASS(Zenitwinkel)))^2+2*6371*9+9^2)-6371*COS(BOGENMASS(Zenitwinkel))
4	AM, Air Mass (Formel Pickering, 2002) =1/SIN(BOGENMASS(Horizontwinkel+244/(165+47*Horizontwinkel^1,1)))
5	Auf senkrecht zur Einfallsrichtung fallende Leistung (W/m^2, mit Atmosphäre) =1,1*Solarkonstante*0,7^(Air Mass^0,678)
6	Auf horizontale Fläche fallende Leistung (W/m^2, mit Atmosphäre) =Leistung(senkrecht zur Einstrahlung)*SIN(BOGENMASS(Horizontwinkel))
7	Solare Leistung: Verhältnis mit/ohne Atmosphäre in Prozent

1	2	3	4	5	6	7
°	W/m^2	km	AM	W/m^2	W/m^2	%
0	0	338,8	38,7	21	0	2
1	18	245,4	26,6	55	1	5
2	37	182,9	19,6	103	4	10
3	55	141,9	15,3	156	8	15
4	73	114,4	12,4	211	15	20
5	92	95,2	10,3	265	23	25
6	110	81,2	8,9	315	33	30
7	128	70,7	7,7	361	44	34
8	146	62,5	6,9	404	56	38
9	165	56,0	6,2	443	69	42
10	183	50,7	5,6	479	83	45
11	201	46,3	5,1	512	98	49
12	219	42,6	4,7	543	113	52
13	237	39,5	4,4	571	128	54
14	255	36,8	4,1	597	145	57
15	272	34,4	3,8	622	161	59
16	290	32,4	3,6	645	178	61
17	308	30,6	3,4	666	195	63
18	325	28,9	3,2	686	212	65
19	343	27,5	3,0	704	229	67
20	360	26,2	2,9	722	247	69
21	377	25,0	2,8	738	264	70
22	394	23,9	2,7	754	282	72
23	411	22,9	2,5	768	300	73
24	428	22,0	2,4	782	318	74
25	445	21,2	2,4	795	336	76
26	461	20,5	2,3	807	354	77
27	478	19,8	2,2	819	372	78
28	494	19,1	2,1	830	390	79
29	510	18,5	2,1	841	408	80
30	526	18,0	2,0	851	425	81
31	542	17,4	1,9	861	443	82
32	558	17,0	1,9	870	461	83
33	573	16,5	1,8	878	478	83
34	589	16,1	1,8	887	496	84
35	604	15,7	1,7	895	513	85
36	619	15,3	1,7	902	530	86
37	633	14,9	1,7	910	547	86
38	648	14,6	1,6	917	564	87
39	662	14,3	1,6	923	581	88
40	677	14,0	1,6	930	598	88
41	691	13,7	1,5	936	614	89
42	704	13,4	1,5	942	630	89
43	718	13,2	1,5	947	646	90

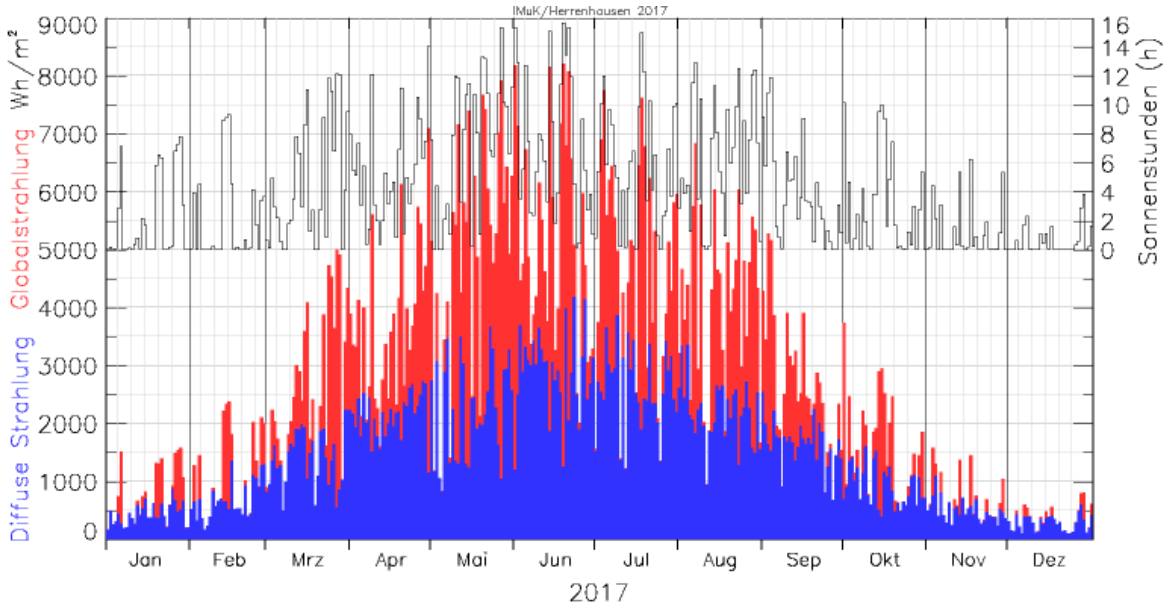
44	731	12,9	1,4	953	662	91
45	744	12,7	1,4	958	677	91
46	757	12,5	1,4	963	693	91
47	770	12,3	1,4	968	708	92
48	782	12,1	1,3	972	723	92
49	794	11,9	1,3	977	737	93
50	806	11,7	1,3	981	752	93
51	818	11,6	1,3	985	766	94
52	829	11,4	1,3	989	779	94
53	841	11,3	1,3	993	793	94
54	852	11,1	1,2	996	806	95
55	862	11,0	1,2	1000	819	95
56	873	10,9	1,2	1003	832	95
57	883	10,7	1,2	1006	844	96
58	893	10,6	1,2	1009	856	96
59	902	10,5	1,2	1012	868	96
60	912	10,4	1,2	1015	879	96
61	921	10,3	1,1	1018	890	97
62	929	10,2	1,1	1020	901	97
63	938	10,1	1,1	1023	911	97
64	946	10,0	1,1	1025	921	97
65	954	9,9	1,1	1027	931	98
66	962	9,9	1,1	1029	940	98
67	969	9,8	1,1	1031	949	98
68	976	9,7	1,1	1033	958	98
69	983	9,6	1,1	1035	966	98
70	989	9,6	1,1	1037	974	98
71	995	9,5	1,1	1038	982	99
72	1001	9,5	1,1	1040	989	99
73	1007	9,4	1,0	1041	996	99
74	1012	9,4	1,0	1043	1002	99
75	1017	9,3	1,0	1044	1008	99
76	1021	9,3	1,0	1045	1014	99
77	1026	9,2	1,0	1046	1019	99
78	1030	9,2	1,0	1047	1024	99
79	1033	9,2	1,0	1048	1029	100
80	1037	9,1	1,0	1049	1033	100
81	1040	9,1	1,0	1049	1037	100
82	1042	9,1	1,0	1050	1040	100
83	1045	9,1	1,0	1051	1043	100
84	1047	9,0	1,0	1051	1045	100
85	1049	9,0	1,0	1052	1048	100
86	1050	9,0	1,0	1052	1049	100
87	1051	9,0	1,0	1052	1051	100
88	1052	9,0	1,0	1052	1052	100
89	1052	9,0	1,0	1053	1052	100
90	1053	9,0	1,0	1053	1053	100

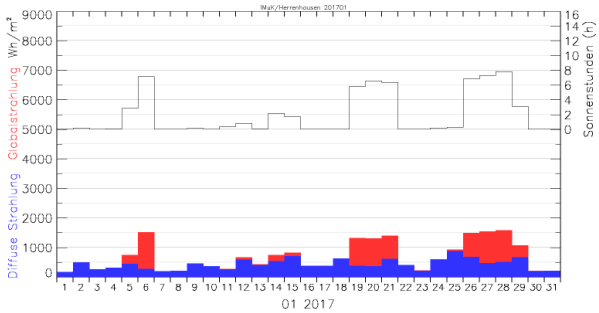
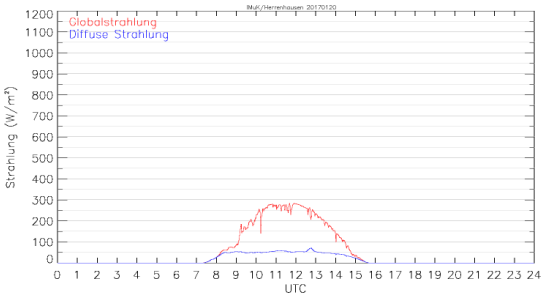
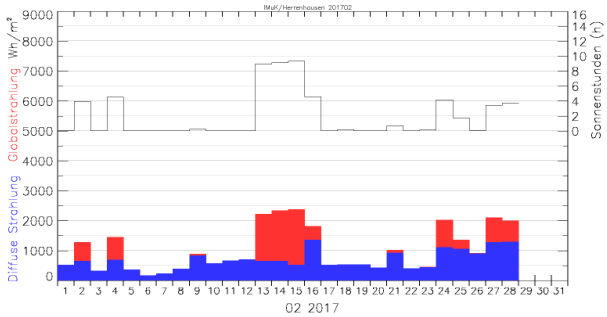
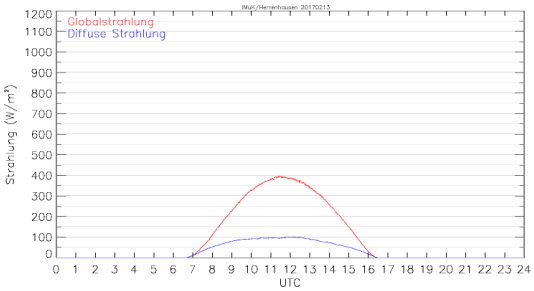
Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMUK), Leibniz Universität Hannover

Strahlungswerte 2017, Herrenhausen

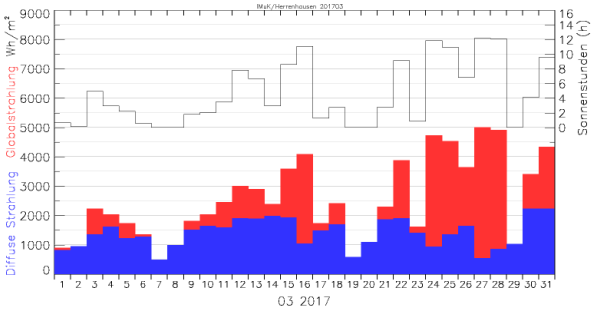
Jahresübersicht:

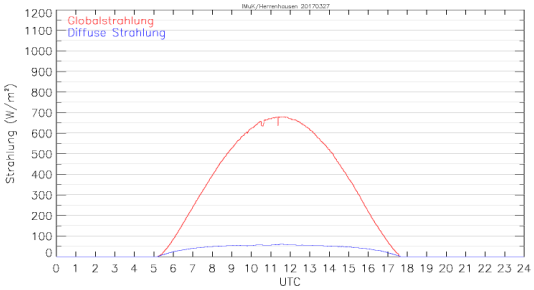
Globalstrahlung, Diffuse Strahlung und Sonnenstunden



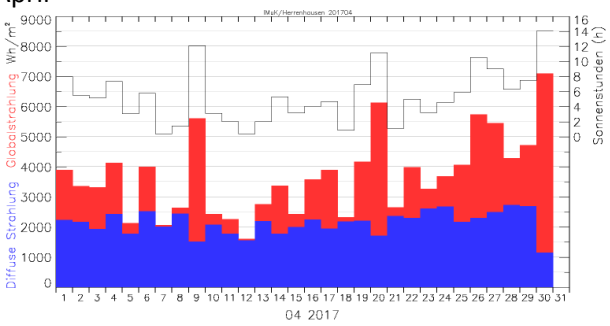
Monatswerte (Wh/m²/Tag) und Sonnenstunden	Sonniger Tag: Globalstrahlung/Diffuse Strahlung
Januar 	
Februar 	

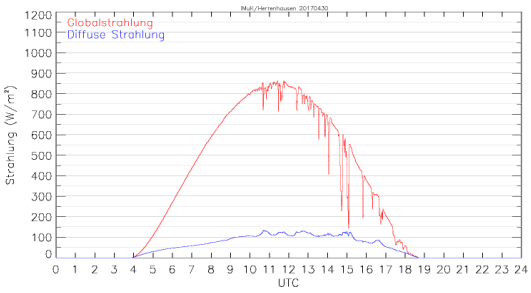
März



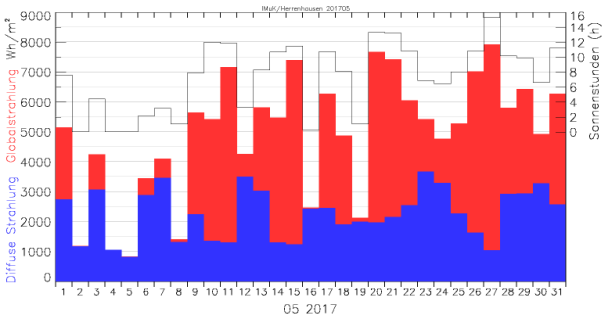


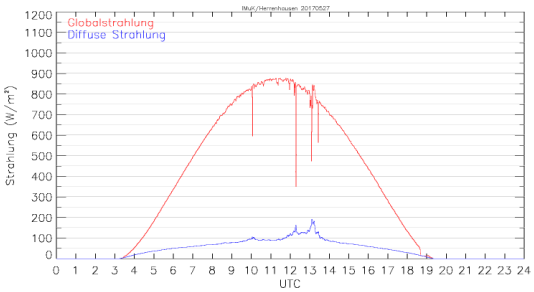
April



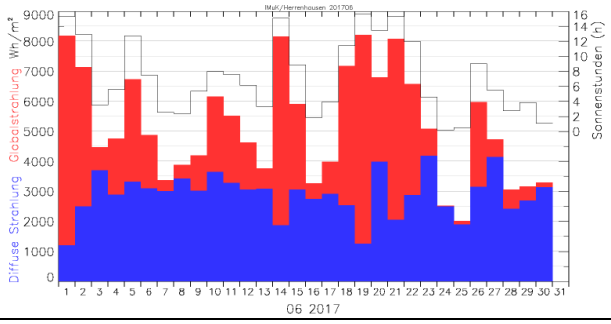


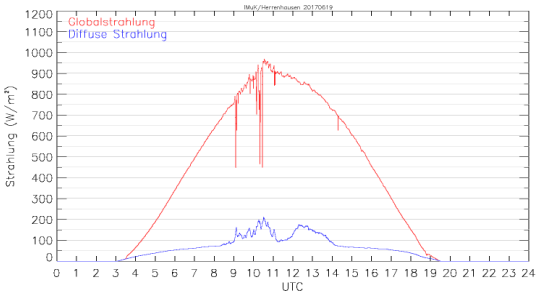
Mai



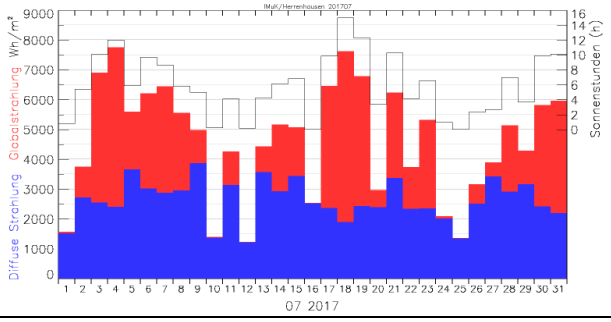


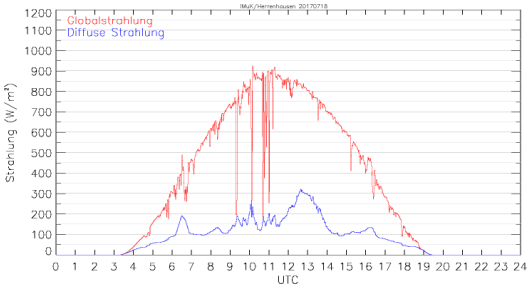
Juni



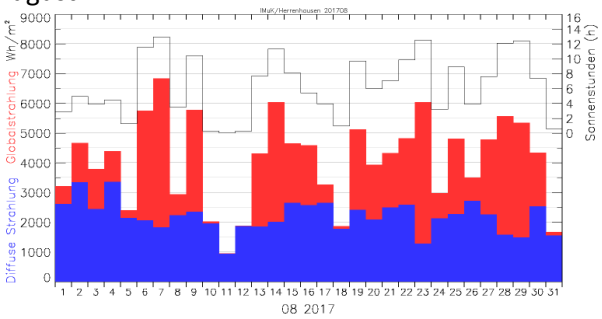


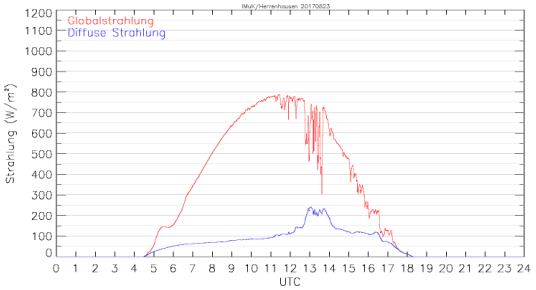
Juli



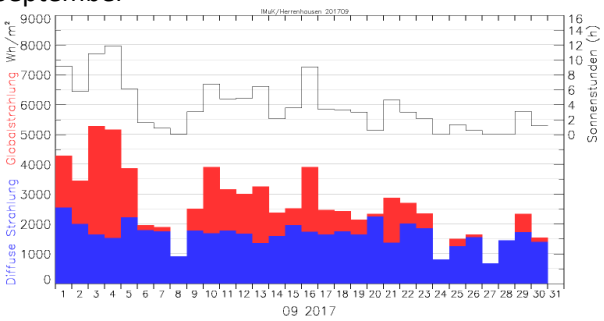


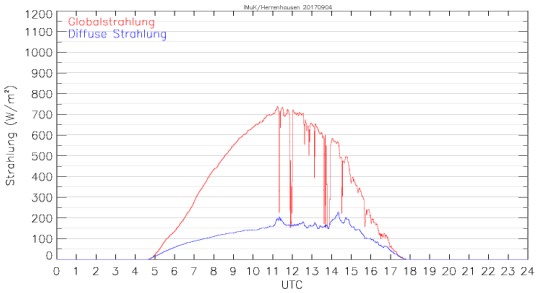
August



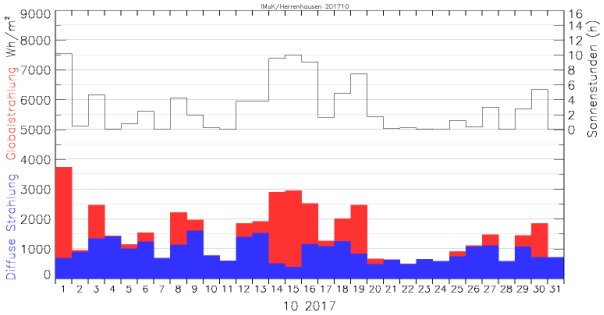


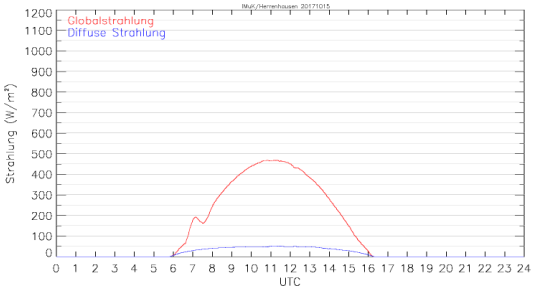
September



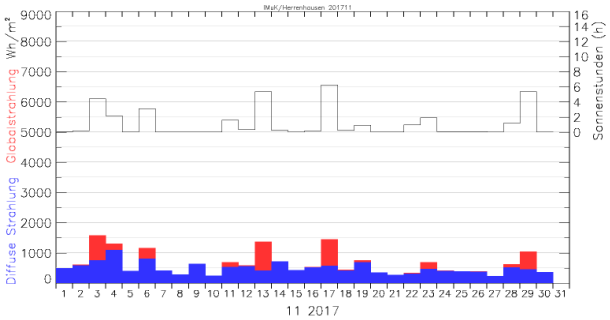


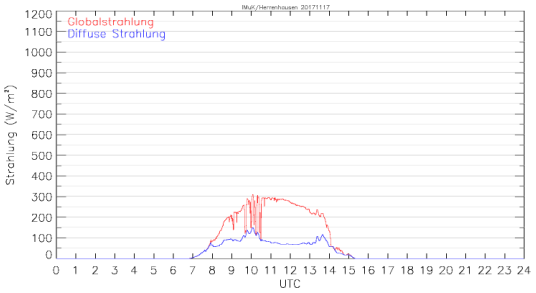
Oktober



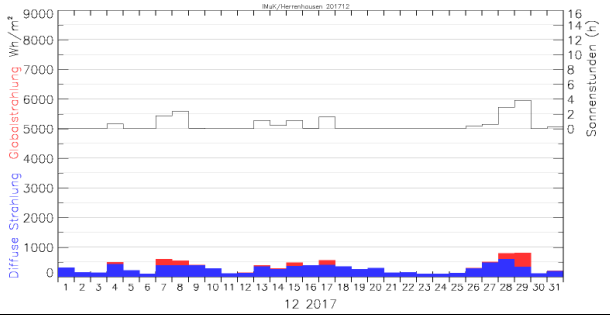


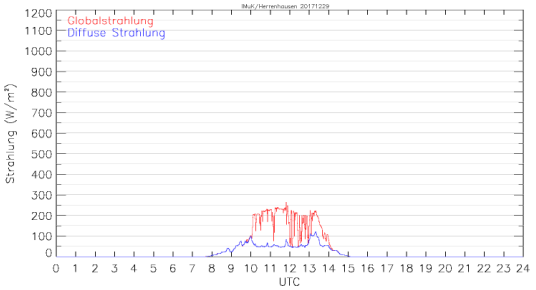
November





Dezember





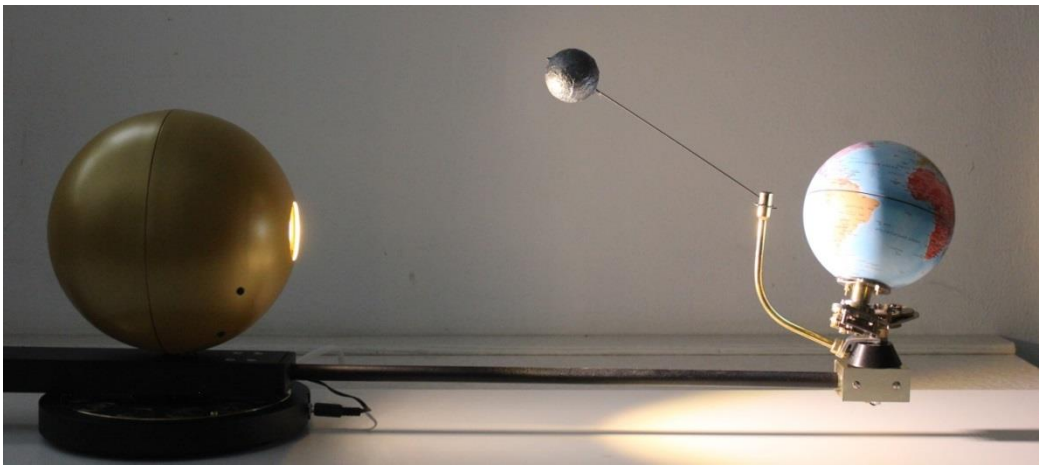
Tellurium

Me08/17

Tellus *(lateinisch „Erde“) ist in der römischen Mythologie die Gottheit der mütterlichen Erde, daher auch oft Terra Mater genannt, und entspricht der griechischen Gaia. (***Wikipedia)**

Das Tellurium veranschaulicht die Entstehung der

- Jahreszeiten
- Mondphasen
- Sonnen- und Mondfinsternisse
- Gezeiten



Das Tellurium besteht aus einer leuchtenden "Sonne", der "Erde" und einem um sie kreisenden "Mond". Der den Mond tragende Stab muss in den "Mond-Arm" eingehängt werden.

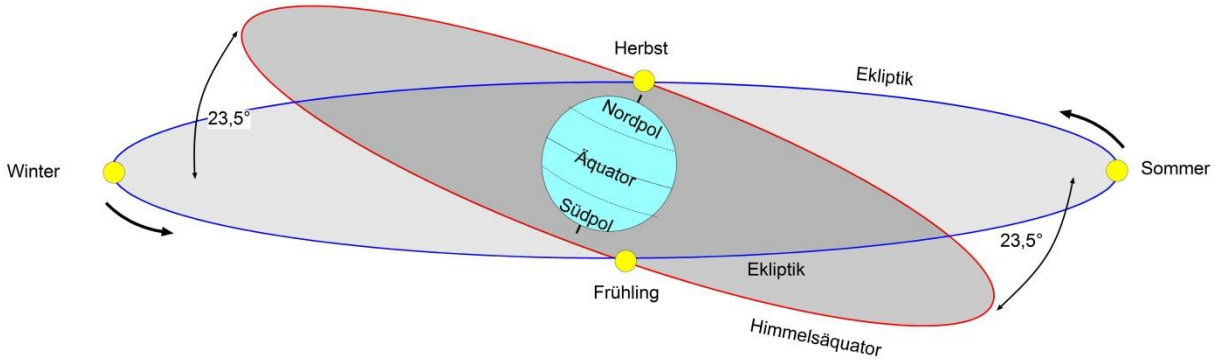
Ein unter der Erde montierter elektrischer Motor und ein Getriebe sorgen für die Rotation der Erde und für den Mondumlauf (beide gegen den Uhrzeigersinn, von oben gesehen). Etwa 30 Drehungen der Erdachse entsprechen der Zeitspanne zwischen zwei gleichen Mondphasen (z.B. Neumond - Neumond). Das lässt sich auch im Handbetrieb zeigen (Getriebe dazu vorsichtig auskuppeln!).

Die tatsächlichen Größen- und Abstandsverhältnisse von Sonne, Erde und Mond bildet das Tellurium aus Platzgründen nicht ab.

- Wenn man sich von der "Sonne" so weit entfernt, dass ihre Größe der wirklichen Sonne am Himmel entspricht (etwa ½° oder etwa die Größe eines Kirschkerns zwischen den Fingern der ausgestreckten Hand) erhält man ein realistisches Verhältnis zwischen der Größe der Sonne und ihrer Distanz zur Erde.
- Das gilt auch für den Mond: Wenn man sich vom "Mond" so weit entfernt, dass er so groß erscheint wie der wirkliche Mond auf der Erde entspricht die Distanz der Entfernung Erde - Mond in Bezug auf die Größen der Erde und des Mondes
- Das Größenverhältnis Erde / Mond entspricht der Wirklichkeit: Der Durchmesser des Mondes ist etwa so groß wie Europa.

Jahreszeiten:

Die Erde umkreist die Sonne im Laufe eines Jahres auf einer leicht elliptischen Bahn, der Ekliptik (Sonnennähe Anfang Januar, Sonnenferne Anfang Juli). Ihre Drehachse ist gegen ihre Umlaufbahn um etwa 23,5° geneigt und zeigt stets in die gleiche Richtung (zum Himmelsnordpol, Polarstern). Das hat zur Folge, dass im Nordwinter vor allem die Südhalbkugel und im Nordsommer die Nordhalbkugel beleuchtet wird. An den Polen ist es dann entweder ganztägig hell oder ganztägig dunkel.

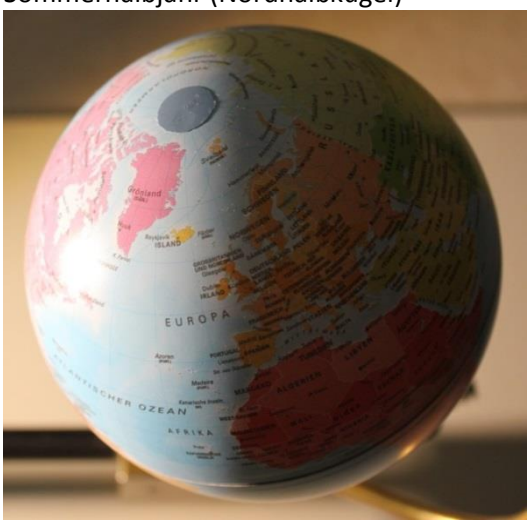


Im Modell stehen Sonne und Erde auf einer, ihre Mittelpunkte verbindenden Ebene, der "Ekliptik".

Den Umlauf der Erde kann man simulieren, in dem man die Erde mit dem Mond manuell gegen den Uhrzeigersinn um die Sonne herumführt. Achten sie dabei aber darauf, dass die Orientierung der Erdachse erhalten bleibt.

Ob die Erde sich in stehender Position drehend oder mit der Hand um die Sonne herum geführt wird: Der Nordpol ist entweder beleuchtet (Sommerhalbjahr auf der Nordhalbkugel) oder liegt im Dunkeln (Winterhalbjahr). Der Übergang dazwischen markiert den Frühling bzw. den Herbst.

Sommerhalbjahr (Nordhalbkugel)



Nordpolarzone wird beleuchtet
(Polartag = Sonne ganztägig über dem Horizont)

Winterhalbjahr (Nordhalbkugel)

Nordpolarzone liegt im Dunkeln (Polarnacht)

Im Frühjahr und im Herbst liegt der Schatten auf dem Nordpol (Beginn oder Ende des Polartags).

Mondphasen:

Der Mond bewegt sich im Laufe etwa eines Monats von oben gesehen, entgegen des Uhrzeigersinns um die Erde.

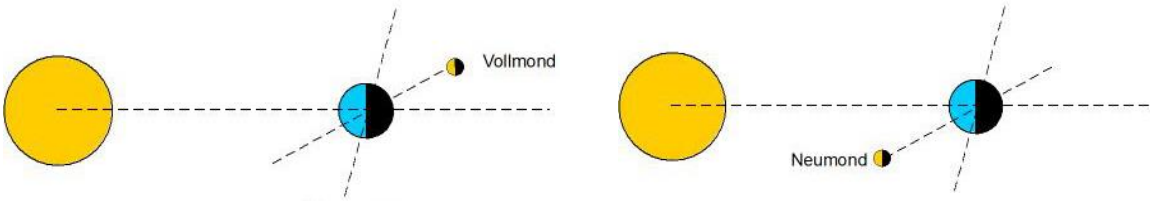
Als "Neumond" liegt er zwischen Sonne und Erde, als "Vollmond" hinter der Erde. Die Phasen dazwischen erscheinen aus der Perspektive der Erde als zunehmender bzw. abnehmender Halbmond (Erstes und Letztes Viertel).

Neu- und Vollmonde können sich auf der Erde in bestimmten Fällen als Sonnen- bzw. Mondfinsternis zeigen. Dies aber nur, wenn Sonne, Mond und Erde bzw. Sonne, Erde und Mond eine Linie bilden.

Ekliptik, Mondbahn und Finsternisse

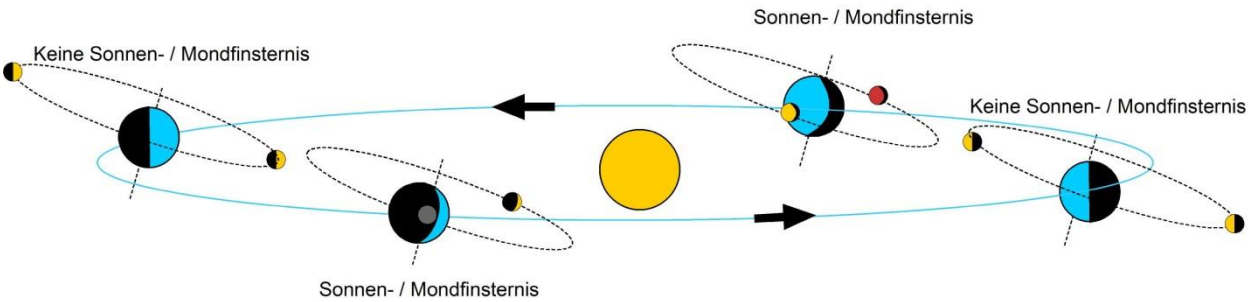
Die Umlaufbahn des Mondes um die Erde ist gegen die Ekliptik um etwa 5° geneigt. Das hat zur Folge, dass sich der Mond etwa zwei Wochen lang "über" und dann zwei Wochen lang "unter" der Ekliptik befindet. Nur selten werden beim Kreuzen der Ekliptik die Sonne oder die Planeten verdeckt, die sich auf dieser Ebene bewegen.

Die Erde umkreist zusammen mit dem Mond in einem Jahr die Sonne. Die Achsen der Mondbahn im Raum ändern sich dabei nur relativ wenig, so dass ein Vollmond in größter Nordbreite nach etwa zwei Wochen zum Neumond in größter Südbreite wird:



Im gezeigten Beispiel kreuzt der Mond die Ekliptik im Ersten und Letzten Viertel. Es kommt weder zu einer Sonnen- noch zu einer Mondfinsternis.

Nach etwa einem Vierteljahr hat die Erde ungefähr 90° ihres Weges um die Sonne zurückgelegt. Jetzt fallen die Neu- und Vollmondtermine mit dem Kreuzen der Ekliptik zusammen und es kann zu einer Sonnen- und zwei Wochen vorher oder nachher zu einer Mondfinsternis kommen.



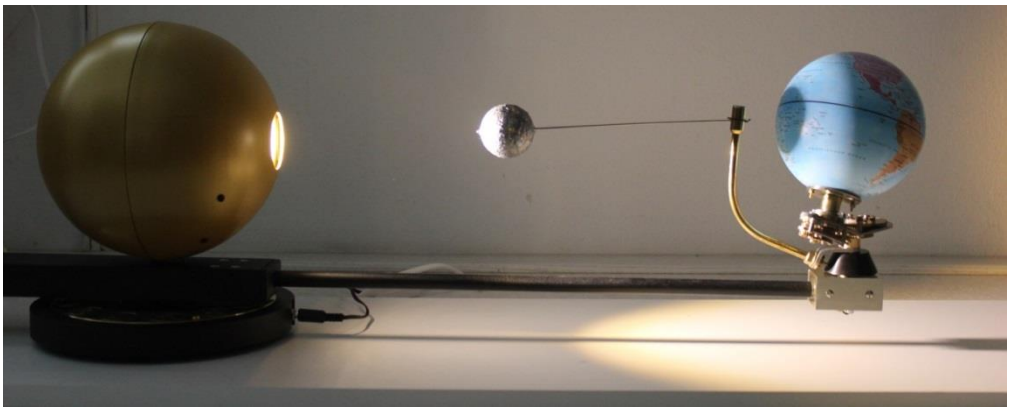
Die Positionen der Knoten wandern im Laufe mehrerer Jahre um die Erde herum was dazu führt, dass sich die Finsternisse von Jahr zu Jahr verfrühen. Nach etwa 19 Jahren (Saros-Zyklus) wiederholen sich die Finsternisse wieder zur gleichen Zeit.

Ein Exzenter unter dem Getriebe sorgt dafür, dass sich der an einem um die Erde rotierenden Arm angebrachte "Mond" während eines Umlaufs nach oben, nach unten und wieder nach oben bewegt (Größte Nord- bzw. größte Südbreite, relativ zur Ekliptik).

Nur wenn die Schnittpunkte zwischen Mondbahn und Ekliptik (Mondknoten) mit der Neu- oder Vollmondphase zusammenfallen, können Sonnen- bzw. Mondfinsternisse auftreten.

Der schwarze Exzenter lässt sich vorsichtig manuell verstellen. Dabei auftretende Knackgeräusche entstehen beim Einrasten in die vorgegebenen Positionen.

Sonnen- und Mondfinsternisse



Hier kreuzt der Mond auf seiner Bahn um die Erde die Ekliptik genau in der Neumondphase.

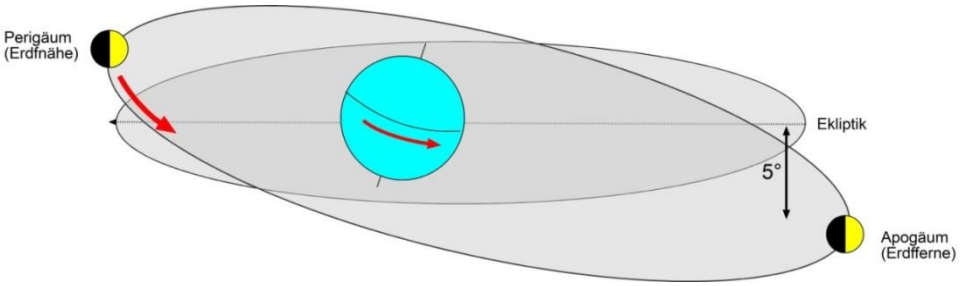
Dann wirft er einen Schatten auf die Erde. Diese Situation kann zweimal pro Jahr auftreten.

Der Schatten dieser "Sonnenfinsternis" ist aufgrund der Größen- und Abstandsverhältnisse des Modells viel größer als in Wirklichkeit: Im Modell ist der Schatten etwa so groß wie Europa, tatsächlich ist er nur ein bis zwei hundert Kilometer breit. Deutlich wird, dass er von Westen nach Osten fortschreitet.

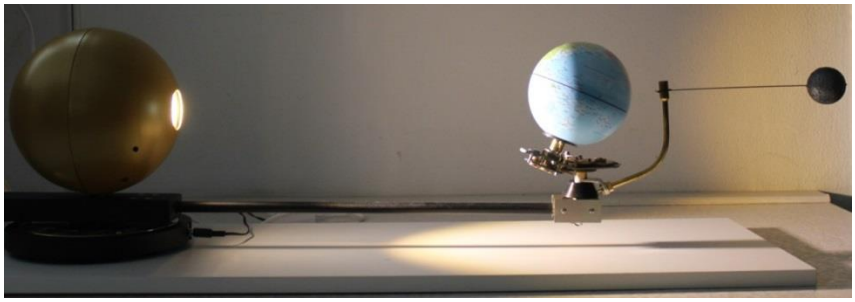
Die relative Nähe des Modellmondes zur Erde lässt auch keinen deutlichen Unterschied zwischen Kernschatten (totale Sonnenfinsternis) und Halbschatten (partielle Sonnenfinsternis) erkennen. Zu beobachten aber ist, dass der Rand des Schattens unscharf ist.

Die elliptische Mondbahn führt dazu, dass der Mond in der Neu- oder Vollmondphase der Erde mal näher und mal ferner ist und damit größer oder kleiner erscheint. Sonnenfinsternissen sind total, wenn die Mondscheibe die Sonnenscheibe vollständig abdeckt (Erdnähe), anderenfalls ist die Finsternis ringförmig (Erdferne). Dies kann das Modell nicht darstellen.

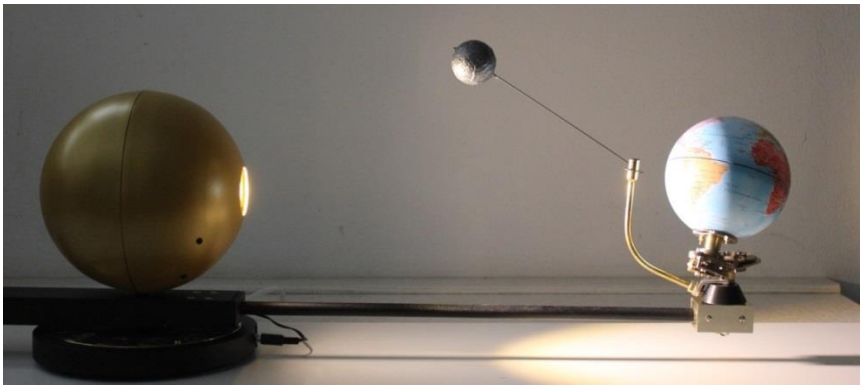
Elliptische Mondbahn:



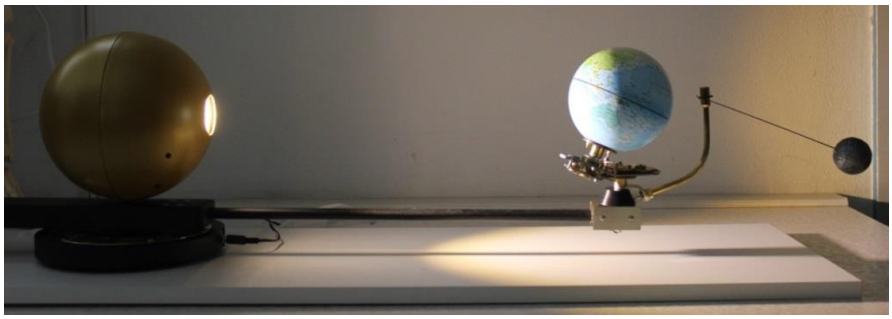
Mondfinsternisse entstehen, wenn der Mond in seiner Vollmondphase durch einen der beiden Knoten seiner Bahn geht. Da die Erde größer als die Sonne ist und einen entsprechend größeren Schatten wirft, sind Mondfinsternisse häufiger als Sonnenfinsternisse.



Neu- und Vollmond, aber keine Finsternisse:



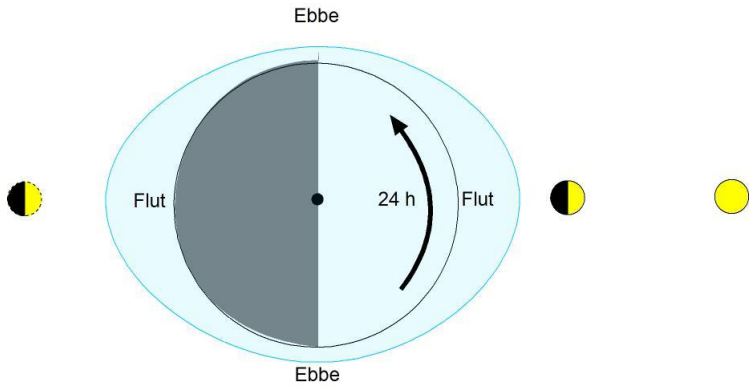
Hier erreicht der Neumond seine größte Nordbreite und liegt damit aus der Erdperspektive "über" der Sonne. Sein Schatten fällt nicht auf die Erde (keine Sonnenfinsternis).



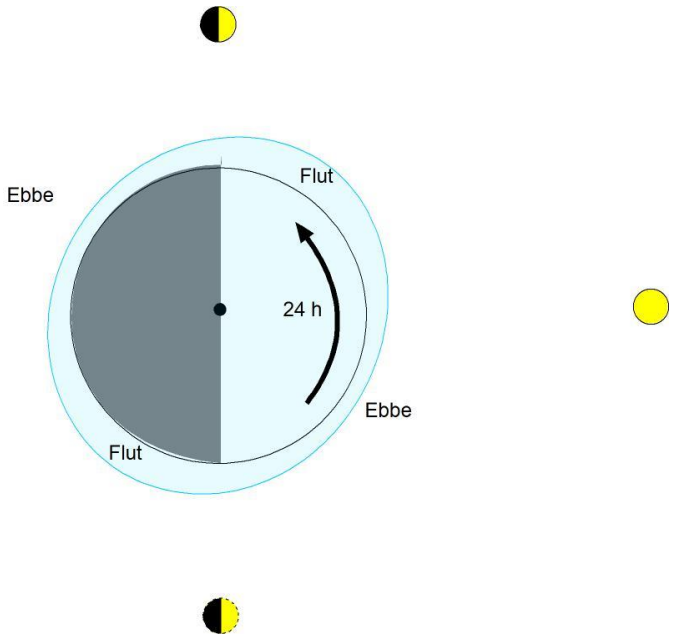
Der Vollmond befindet sich hier in seiner größten Südbreite und läge in Wirklichkeit "unter" dem Erdschatten. Durch seinen geringen Abstand im Modell wird er dennoch teilweise verfinstert.

Gezeiten

Dort wo Sonne, Mond und Erde etwa eine Linie bilden sind die, der Sonne zugewandten bzw. abgewandten Flutberge höher (Springflut). Ihre Scheitel liegen in einer Linie mit der Sonne und dem Mond bzw. diesen gegenüber.



Steht der Mond im 90° Winkel zur Sonne, sind die Flutberge niedriger ("Nippflut"). Ihre Scheitel liegen dann zwischen Mond und Sonne (Mehr zum gezeitenwirksameren Mond gerichtet).



Die Erde dreht sich in etwas mehr als einem Tag unter den beiden Flutbergen hindurch. An vielen Küsten der Erde ist ein zweimaliger Wechsel von Ebbe und Flut zu beobachten. Weil der Mond sich täglich etwa um ein 1/29 auf seiner Bahn weiterbewegt, treten Ebbe und Flut von Tag zu Tag im Schnitt 50 Minuten später auf (24 h / 29 ≈ 0,83 h).

Text, Fotos und Grafik: Ingo Mennerich, August 2017