

Die Physik einer Photovoltaikanlage

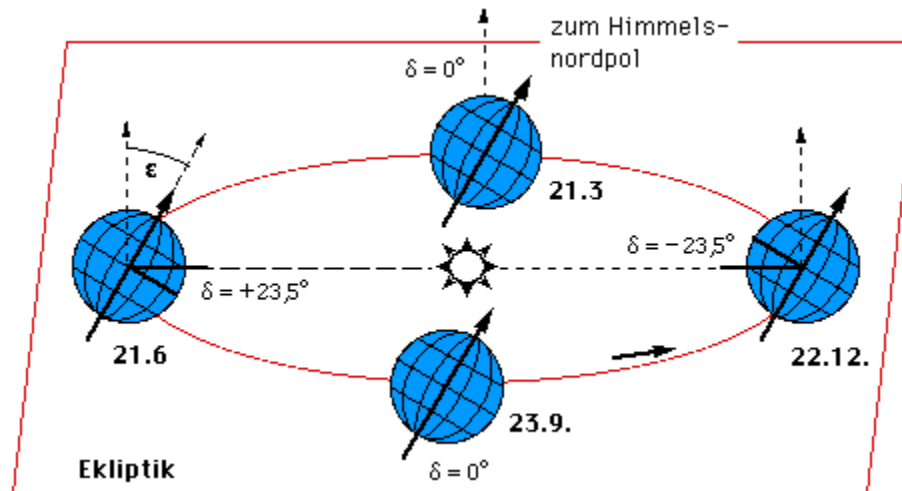
Die Effizienz einer Solaranlage hängt entscheidend von der Sonneneinstrahlung ab. Diese ist geografisch sehr unterschiedlich verteilt. Viele Regionen der Erde weisen eine deutlich höhere Sonneneinstrahlung als Deutschland auf.

Der Bezugswert der Sonneneinstrahlung für die Erde ist mit der Solarkonstante festgelegt. Sie hat den Wert

1.37 Kilowatt pro Quadratmeter (1.37 kW/m^2)

für senkrecht zur Probestfläche einfallendes Licht ohne atmosphärische Einflüsse, also außerhalb der Atmosphäre. Dieser Wert gilt also für die Verhältnisse im Weltraum. Bei unbedecktem Himmel, trockener Luft und am Erdboden ist der Wert der sogenannten *terrestrischen* Solarkonstante 1 kW/m^2 . Für Deutschland kann der Wert auch nur $0,8 \text{ kW/m}^2$ sein.

Der Einfallswinkel der Strahlung auf die PV-Module kann anhand der geometrischen Begebenheiten berechnet werden.



Wie man aus dem Bild erkennen kann, ist die Rotationsachse der Erde gegenüber der Umrundungsebene um die Sonne um $23,5^\circ$ geneigt.

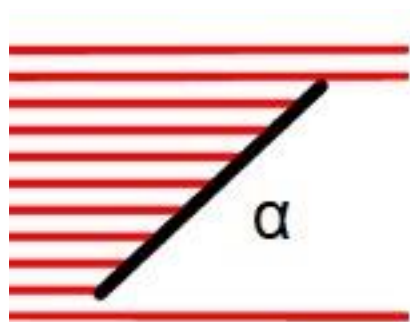
Die Erde rotiert in 24 Stunden um die eigene Achse und in 365 Tagen einmal um die Sonne. Die Neigung der Erdachse nennt man Ekliptik. Die Erde hat im Jahr vier markante Stellungen. Am 21.3 und am 23.9 ist Tag und Nacht gleich lang. Es ist der Frühlingspunkt und der Herbstpunkt. Am 21.6 ist der längste Tag und am 22.12 der kürzeste Tag auf der Nordhalbkugel.

Diese Betrachtung aus dem Weltraum gesehen ist sehr einleuchtend. Aber wie stellt sich die Situation auf der Erde dar? Es hängt also sehr davon ab, auf welchem Breitengrad der Beobachter steht. Egal wo der Beobachter sich befindet, immer senkrecht über ihm ist der Zenit, sein Zenit. Und wenn sich ein Beobachter um die eigene Achse dreht, sieht er waagrecht zum Horizont. Das ist sein Bezugssystem. In Abhängigkeit davon wird er über den Tag den Lauf der Sonne beobachten. Der Stand der Sonne kann durch zwei Größen gemessen werden. Es ist der Azimut-Winkel und der Elevations-Winkel. Der Azimut-Winkel ist die Drehung in der Waagrechten bezüglich der Nordrichtung und der Elevations-Winkel stellt die Sonnenhöhe bezüglich der Waagrechten dar.

Eine Simulation kann hier im [Sonnenlauf](#) beobachtet werden.

Hinweis: Unten in der Darstellung lässt sich der Breitengrad und die Jahreszeit einstellen. Ferner kann oben rechts unter „Wähle Art der Projektion“ auch eine 3-dimensionale Darstellung einstellen. Allerdings benötigt man dazu eine Rot-Grün-Brille. Unten links ist der Startbutton der Simulation. Beobachten Sie auch den Azimut- und den Elevationswinkel.

Wieviel Strahlungsleistung und damit auch wieviel Energie über die Zeit auf eine Photovoltaikfläche ankommt, hängt also sehr vom Einstrahlungswinkel ab.



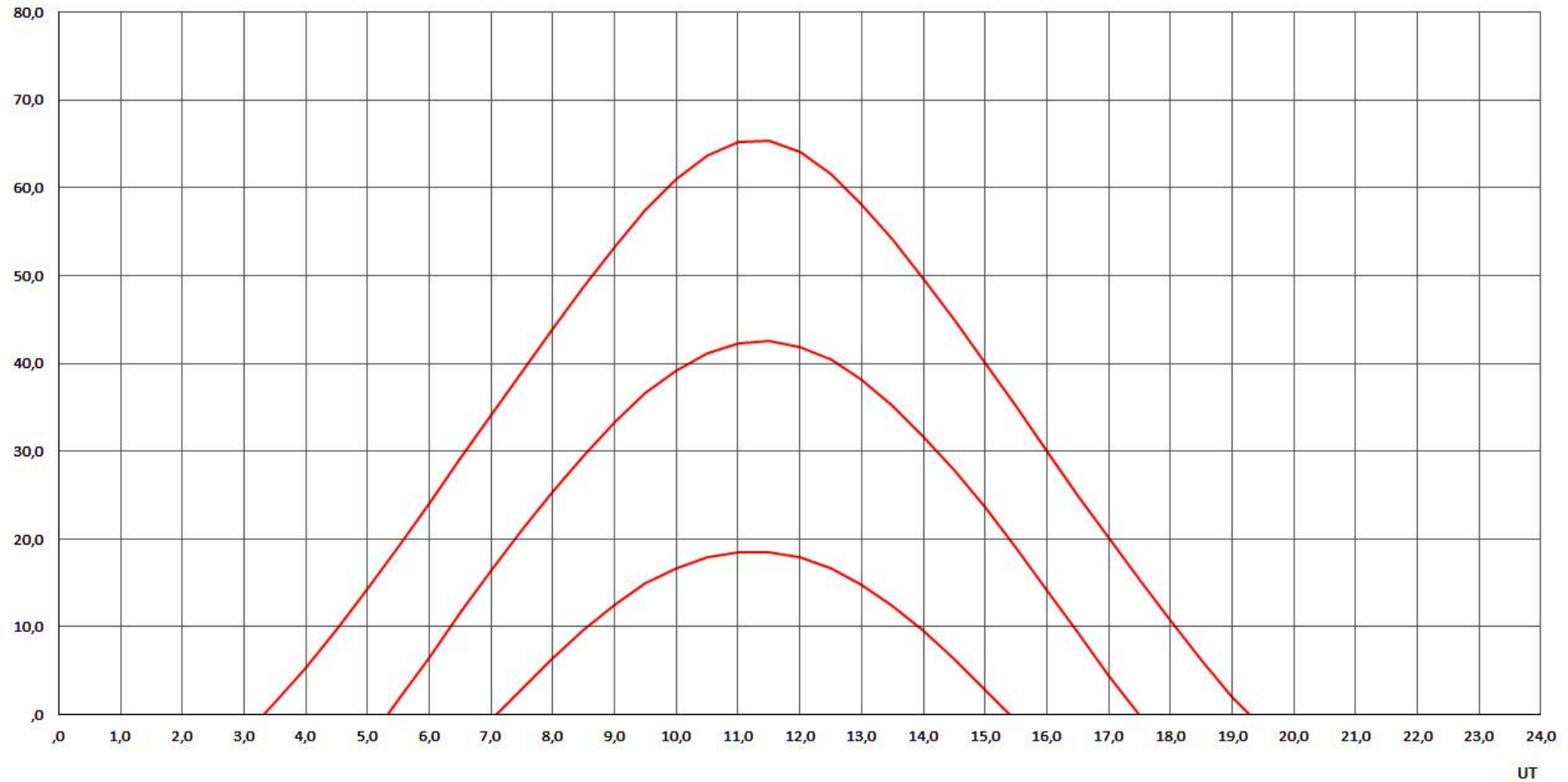
Die Strahlungsstromdichte lässt sich mit dem Lambert'schen Gesetz berechnen:

$$J_{\alpha} = J_{90^{\circ}} * \sin(\alpha)$$

Der Winkel α gilt sowohl für den Azimut-Winkel wie auch für den Elevationswinkel. Die Berechnung für die Strahlungsstromdichte wird interessant, da sowohl Tageszeit und auch die Jahreszeit eine Rolle spielen.

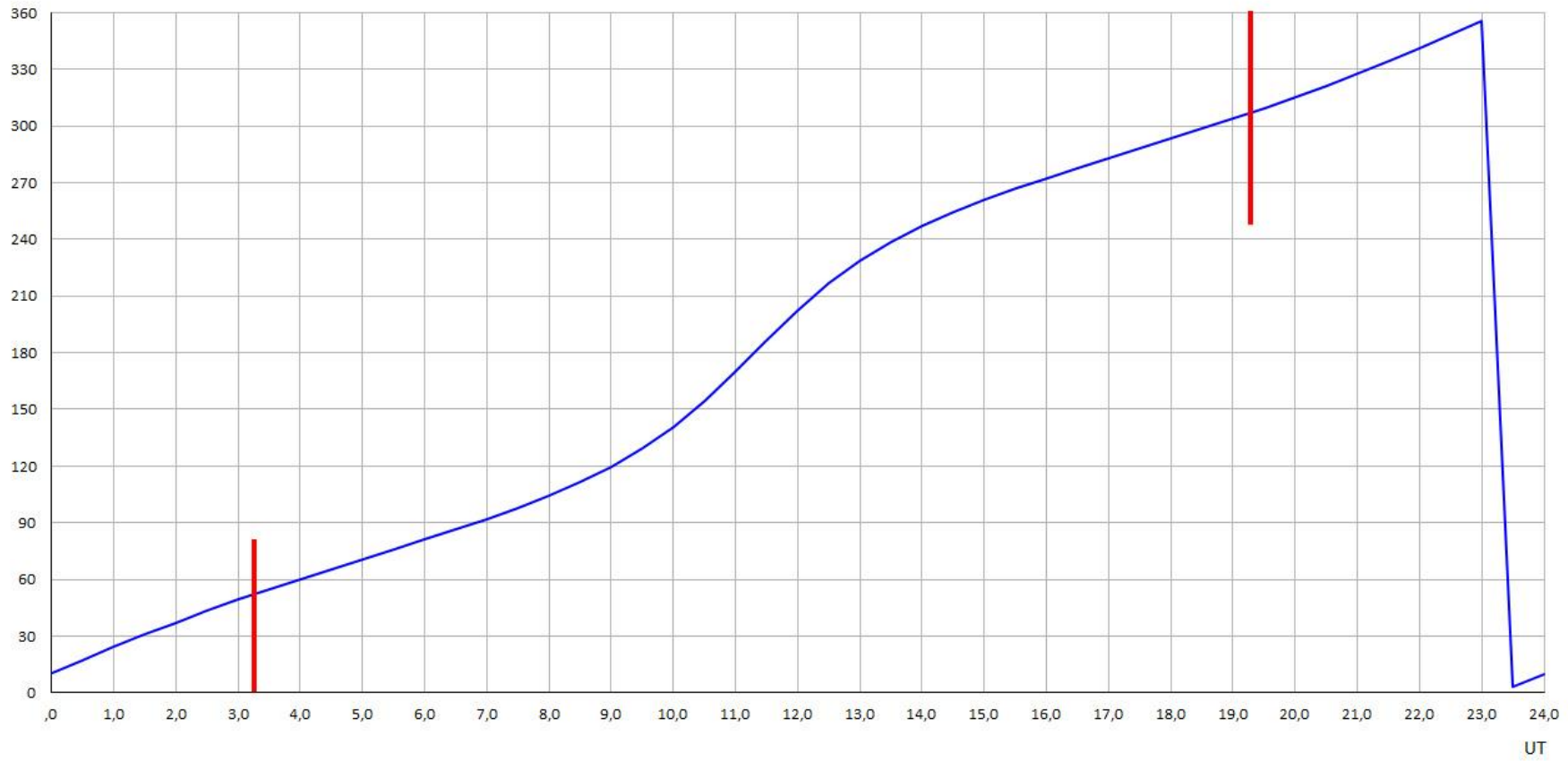
Die Berechnungen dafür sind nicht trivial.

Elevation Sonne



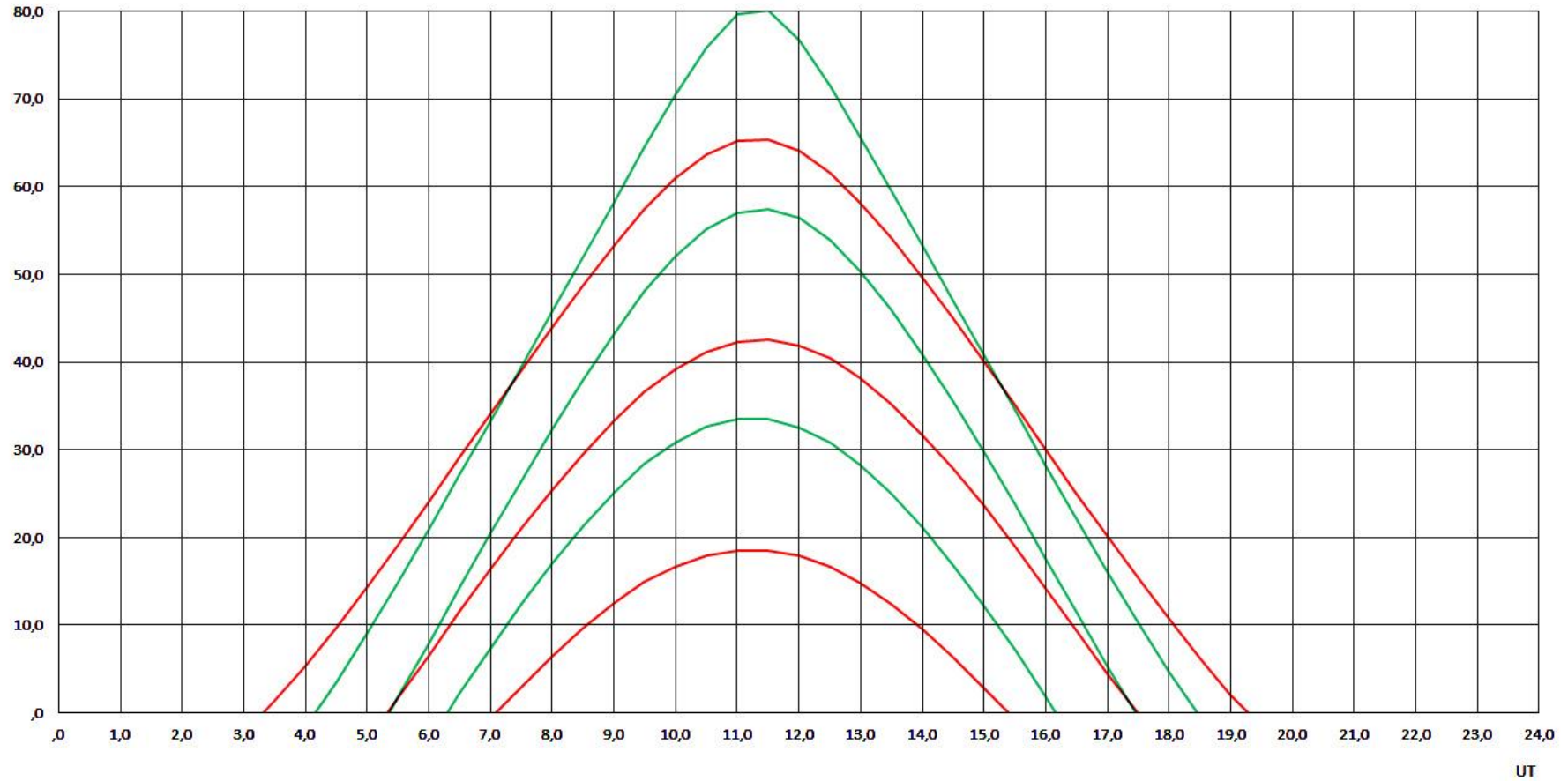
Die Abbildung zeigt den Elevations-Winkel der Sonne für Süddeutschland (Nähe Ammersee). Auf der x-Achse ist die UT-Zeit aufgetragen (Universal-Greenwich-Time) und auf der y-Achse der Elevations-Winkel für den kürzesten Tag, für den Frühlingspunkt bzw. Herbstpunkt und dem längsten Tag. Man kann jeweils die Zeit für den Sonnenaufgang bzw. für den Sonnenuntergang ablesen.

Azimut Sonne



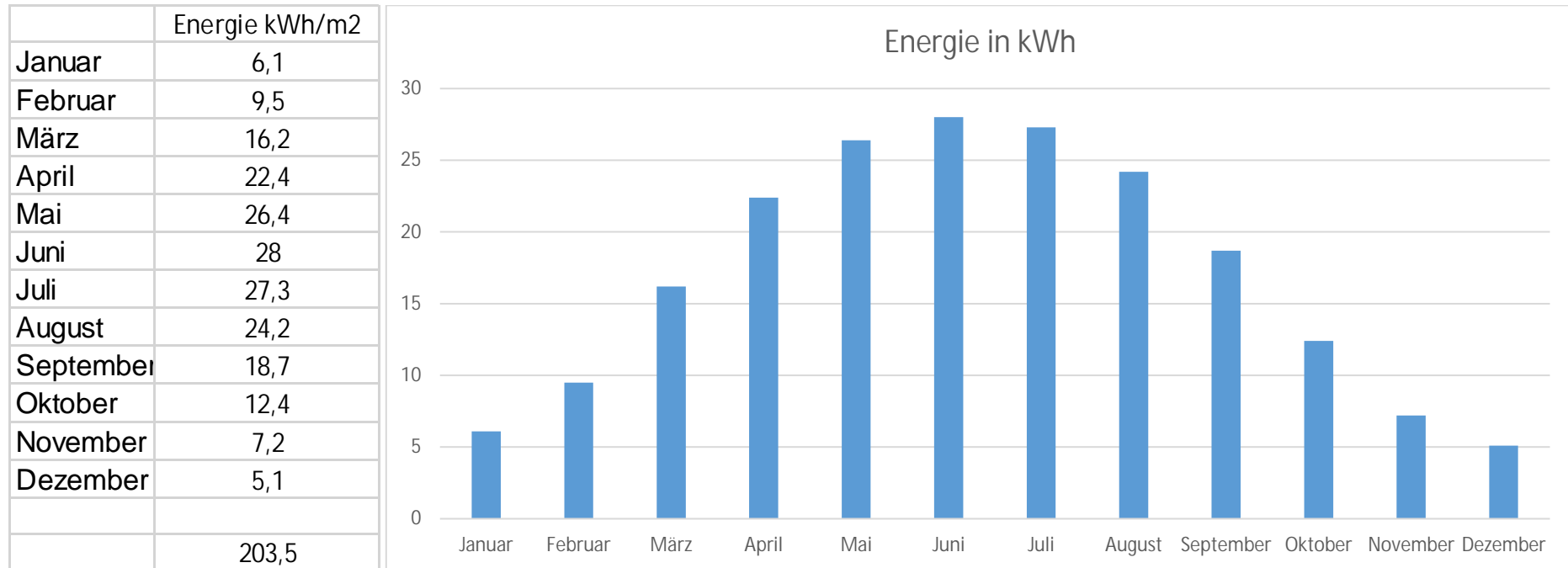
Nur für den längsten Tag ist in der obigen Abbildung der Azimut-Winkel aufgetragen. Die roten Linien sind die Begrenzungen für Sonnenaufgang und Sonnenuntergang.

Elevation Sonne



Diese Abbildung zeigt einen Vergleich des Sonnenstandes in Süddeutschland (rote Linien) und in Tunesien (grüne Linien). Gerade in der Winterzeit ist der Sonnenstand in Tunesien deutlich höher als in Deutschland.

Heutige monokristalline Module haben einen Wirkungsgrad $\eta = 0,15$. Mit diesem Wert werden die weiteren Berechnungen durchgeführt. Ferner wird angenommen, dass die Module nach Süden ausgerichtet sind und eine für Deutschland optimale Neigung von 30° haben. Aus der Tabelle kann man entnehmen, dass bestenfalls eine Energie von 203 kWh pro Quadratmeter pro Jahr zu gewinnen sind. Die Werte ergeben sich bei einer *terrestrischen* Solarkonstante 1kW/m^2 .



Berücksichtigt man die Regentage, Wolken, Nebel, Reflexionsverluste und noch weitere Verluste, die hier nicht aufgeführt sind, dann bedeutet das ein Energiegewinn von ca. 120 kWh pro Quadratmeter und Jahr. Das sind Erfahrungswerte.

Anlagen im Sonnengürtel der Erde haben mindestens eine doppelt so hohe Ausbeute.

Falls man in Deutschland den Strom vollständig über Solarzellen erzeugen wollte, kann man die dazu benötigte Solarzellenfläche berechnen. Pro Bundesbürger werden im Durchschnitt 7000 kWh Strom benötigt (nicht nur Haushaltsstrom). Auf einem Quadratmeter

werden etwa 1000 kWh Sonnenenergie eingestrahlt, bei einem Wirkungsgrad von 10% von der Solarzelle bis zum Verbraucher können also mit einem Quadratmeter Solarzellen 100 kWh Strom pro Jahr erzeugt werden. Also benötigt man pro Bundesbürger etwa 70 Quadratmeter Solarzellenfläche. Dies würde zudem voraussetzen, dass eine Speicherung des Stroms – diese mit einem Wirkungsgrad von praktisch 100 Prozent – zur Überbrückung der Dunkelzeiten – Nacht, Schlechtwetterperioden, dunkle Jahreszeit – technisch realisierbar wäre. Es würde sich dann eine Fläche von 600 km² ergeben.

Vergleich: Bei der Gewinnung von Biogas können etwa 1,9 – 3,2 kWh elektrische Energie pro Quadratmeter und Jahr erzeugt werden. Photovoltaik ist deutlich besser, also kein Anlass zur Vermaisung der Landschaft.

(Berechnung: Silomais erzeugt pro Hektar pro Jahr ca. 7000 -10500 m³ Biogas. Mit 1 m³ Biogas können je nach Methananteil 1,9 – 3,2 kWh elektrische Energie erzeugt werden.)

Die Funktionsweise einer Solarzelle kann auf verschiedenen Internetseiten nachgelesen werden. Eine besonders einfache und übersichtliche Darstellung findet man unter [Link1](#) oder [Link2](#).