

4. Sonnenstrahlung auf geneigten Oberflächen

Petros Axaopoulos, TEI - Athens Greece

Lernziele

Nach dem Durcharbeiten dieses Kapitels wird der Leser in der Lage sein:

- die direkte, diffuse und reflektierte Sonnenstrahlung an einer geneigten Oberfläche zu definieren
- die Bedeutung des Clearness Index zu kennen
- die stündliche und monatliche Sonnenstrahlung auf einer Oberfläche mit verschiedenen Ausrichtungen und Neigungen zu berechnen
- zu erklären, wie Ausrichtung und Neigungswinkel die einfallende Sonnenstrahlung beeinflussen
- zu verstehen, wie die Wahl der Ausrichtung und des Neigungswinkels eines PV-Panels dessen Leistungsfähigkeit beeinflussen kann
- den optimalen Neigungswinkel eines PV-Panels zu bestimmen, unter Berücksichtigung der geografischen Breite, der geplanten Anwendung und des beabsichtigten Nutzungszeitraums der Solaranlage

Das Wissen über die auf eine geneigte Oberfläche auftreffende Sonnenstrahlung ist notwendig für die meisten Anwendungen und Studien, in denen Solaranlagen eine Rolle spielen. Generell ist eine Methode zur Berechnung der Strahlung an einer geneigten Oberfläche auf stündlicher oder monatlicher Basis notwendig, da Wetterstationen nur die Globalstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche zur Verfügung stellen. Zu diesem Zwecke beschreiben die folgenden Abschnitte eine Vorgehensweise zur Berechnung der stündlichen und monatlichen Sonnenstrahlung auf geneigten Oberflächen.

4.1 Stündliche Strahlung auf einer geneigten Oberfläche

Die auf einer geneigten Fläche auf dem Erdboden ankommende Sonnenstrahlung besteht aus drei Bestandteilen: der von der Sonnenscheibe kommende Direktstrahlung, der vom Himmelsgewölbe abgelenkten diffusen Strahlung und der vom Boden in der Umgebung reflektierten Strahlung (Abb. 4.1).

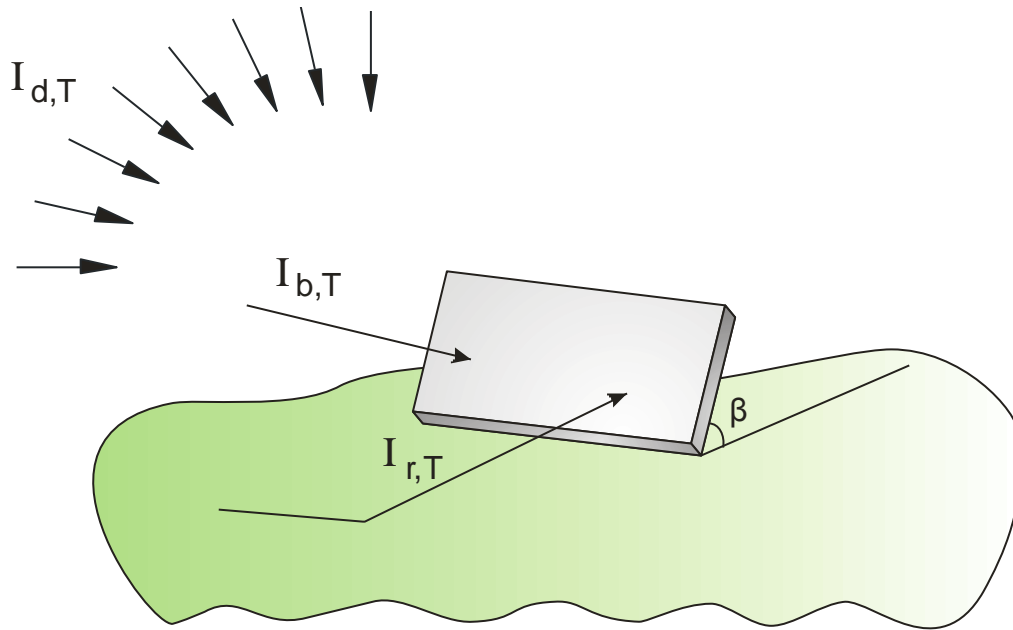


Abb. 4.1 Direkte, diffuse und reflektierte Strahlung an einer geneigten Ebene.

Die auf eine geneigte Oberfläche auftreffende Direktstrahlung hängt vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlen ab. Die auftreffende diffuse Strahlung hängt nicht von der Ausrichtung der Ebene ab und kommt nicht von gesamten Himmel oder dem Boden darum herum – sie kommt nur von dem Teil des Himmels, den die Oberfläche "sehen" kann. Daher muss für die Berechnung der Sonnenstrahlung auf einer geneigten Oberfläche ein Umrechnungsfaktor für jeden der Bestandteile berücksichtigt werden [1].

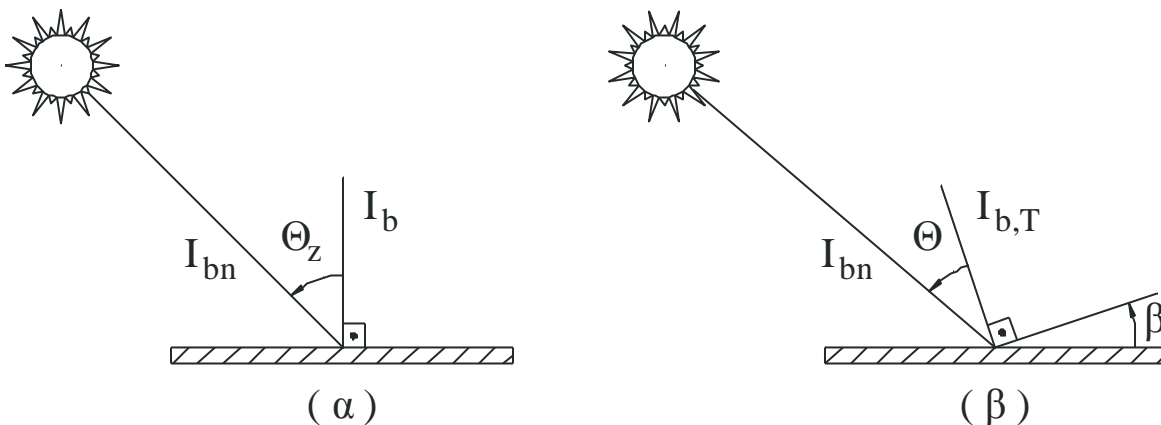


Abb. 4.2 Bestimmung der Umrechnungsfaktoren für die direkte Sonneneinstrahlung. a) Einstrahlung an einer horizontalen Oberfläche b) Einstrahlung an einer geneigten Oberfläche

Der Umrechnungsfaktor für die direkte Sonneneinstrahlung (R_b) ist das Verhältnis von direkter Sonneneinstrahlung auf einer geneigten Oberfläche ($I_{b,T}$) zu der auf einer horizontalen Oberfläche (I_b).

Aus Abb. 4.2 kann man leicht die folgende Gleichung herleiten:

$$R_b = \frac{I_{b,T}}{I_b} = \frac{I_{b,n} \cos q}{I_{b,n} \cos q_z} = \frac{\cos q}{\cos q_z} \quad (4.1)$$

Wenn wir $\cos \theta_z$ aus Gleichung 3.5 in Gleichung 4.1 einsetzen, kann die neue Gleichung geschrieben werden als:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (4.2)$$

Aus dieser Gleichung wird offensichtlich, dass der Wert R_b für einen gegebenen Ort während des Tages und des Jahres schwankt.

Die Berechnung des diffusen Strahlungsanteils beruht auf der Annahme, dass die Diffusion isotrop ist, d.h. sie wird von der gesamten Himmelskuppel gleichförmig empfangen. Der Umrechnungsfaktor für die diffuse Strahlung (R_d) ist das Verhältnis der diffusen einfallenden Strahlung auf einer geneigten Oberfläche ($I_{d,T}$) zu der auf einer horizontalen Fläche (I_d). Auf der geneigten Oberfläche kommt nur ein gewisser Prozentsatz der von der Himmelskuppel kommenden diffusen Strahlung an. Dieser Prozentsatz ist das Verhältnis des Teils des Himmels, den die geneigte Oberfläche "sehen" kann zur gesamten sphärischen Oberfläche der Himmelskuppel. Im isotropen Modell und für eine nicht abgeschattete geneigte Oberfläche am Boden mit einer Steigung β ist der Umrechnungsfaktor der Sichtfaktor zum Himmel und ist gegeben durch:

$$R_d = \frac{I_{d,T}}{I_d} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (4.3)$$

Der Umrechnungsfaktor für die reflektierte Strahlung (R_r) ist das Verhältnis der reflektierten Strahlung auf einer geneigten Oberfläche ($I_{d,T}$) zu der auf einer horizontalen Fläche (I_d). Allerdings ist die Reflexion an der horizontalen Oberfläche das Produkt der diffusen Reflexion ρ an der Umgebung und der gesamten Sonneneinstrahlung auf die Horizontale (I).

Wenn man, wie im vorigen Fall, voraussetzt, dass die reflektierte Einstrahlung isotrop ist, dann ist für eine geneigte Oberfläche mit Anstieg β von der Horizontalen der Umrechnungsfaktor der Sichtfaktor. Er ist gegeben durch:

$$R_r = \frac{I_{r,T}}{I\rho} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4.4)$$

Daher ist die gesamte Sonneneinstrahlung auf der geneigten Oberfläche I_T für eine Stunde die Summe von drei Termen:

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + I\rho R_r \quad (4.5)$$

Wenn man die Gleichungen 4.1, 4.3 und 4.4 in Betracht zieht, kann die Gleichung 4.5 umgeschrieben werden wie folgt:

$$I_T = I_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + I\rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4.6)$$

Diese Gleichung kann genutzt werden, um die gesamte stündliche Sonneneinstrahlung auf einer geneigten Oberfläche mit Anstieg β zur der Horizontalen zu berechnen, wobei die Winkel θ und θ_z dem Mittelpunkt der betrachteten Zeit entsprechen. Für die Reflexion ρ nimmt man im Allgemeinen 0,2, aber wenn die Umgebung mit Schnee bedeckt ist, kann dieser Wert sehr hoch sein. Verschiedene Werte von ρ sind in Tabelle 4.1 gegeben.

Tabelle 4.1 Reflexion an verschiedenen Oberflächen

Oberflächentyp	Reflexion
Frischer Schnee	0.87
Trockener Sand	0.18
Nasser Sand	0.09
Nadelwald	0.05
Frischer Beton	0.33
Gealterter Beton	0.23

Wenn man die beiden Seiten der Gleichung 4.6 durch I teilt und Gleichung 4.1 beachtet, erhält man die folgende Gleichung:

$$\frac{I_T}{I} = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \sigma \nu \beta}{2}\right) + \rho \frac{1 - \sigma \nu \beta}{2} \quad (4.7)$$

In Abhängigkeit vom stündlichen Clearness Index K , ist das Verhältnis I_d/I durch die folgenden Beziehungen gegeben [2].

$$I_d/I = 1 - 0.09K \text{ für } K \leq 0.22 \text{ (}\alpha\text{)}$$

$$I_d/I = 0.9511 - 0.1604K + 4.388K^2 - 16.638K^3 + 12.336K^4 \text{ für } 0.22 < K < 0.8 \text{ (}\beta\text{)}$$

$$I_d/I = 0.165 \text{ für } K > 0.8 \text{ (}\gamma\text{)} \quad (4.8)$$

Der **stündliche Clearness Index (K)** ist das Verhältnis der Globalstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche (I) zur stündlichen extraterrestrischen Strahlung auf einer horizontalen Oberfläche (I_o). Dieser Index wird als Absorptionskoeffizient der Atmosphäre betrachtet. Im Allgemeinen wird ein kleinerer Teil der Strahlung gestreut, wenn die Atmosphäre klarer ist. Außerdem ist der Clearness Index ein stochastischer Parameter, der von der Zeit im Jahr, der Jahreszeit, den klimatischen Bedingungen und der geografischen Lokalisierung abhängt.

$$K = \frac{I}{I_o} \quad (4.9)$$

Die Berechnung der stündlichen extraterrestrischen Einstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche kann durch die folgende Beziehung angenähert werden, wenn der Zenitwinkel (θ_z) dem Mittelpunkt der betrachteten Zeitspanne entspricht.

$$I_o = G_{on} \cos \theta_z \quad (4.10)$$

Die extraterrestrische Einstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche (I_o) erhält man, indem man die Gleichung 4.10 für eine Zeitspanne zwischen den Stundenwinkeln ω_1 und ω_2 integriert [2].

$$I_{o(\omega_1-\omega_2)} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G_{on} \cos \theta_z d\omega = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot n}{365}\right) \cdot \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (4.11)$$

Beispiel 4.1

Ein PV-Panel mit einer Neigung von 35° Richtung Süden soll in Ioannina, Griechenland ($\phi = 39^\circ 42'$) installiert werden. Wenden Sie das Modell der isotropen Diffusion an und

berechnen Sie die stündliche Globalstrahlung, sowie direkte, diffuse und reflektierte Strahlung, die auf dieses Panel am 3. April zwischen 10 und 11 Uhr Sonnenzeit auftrifft. Die stündliche Globalstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche beträgt 520 Wh/m^2 und die Bodenreflexionsgrad $\rho = 0,2$.

Lösung

Am 3. April ist $n = 93$ und die Sonnendeklination aus Gleichung 3.2 beträgt:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \frac{284+93}{365}\right) = 4.81^\circ$$

Der Stundenwinkel der Sonne (ω) kann als repräsentativ betrachtet werden, wenn er für den Mittelpunkt der betrachteten Zeitspanne berechnet wird. Daher ist $\omega = -22,5^\circ$. Mit den bekannten Werten von δ , ω und ϕ , kann der Sonnenzenitwinkel (θ_z) mit Gleichung 3.5 berechnet werden:

$$\cos \theta_z = \sin 4.81 \cdot \sin 39.7 + \cos 4.81 \cdot \cos 39.7 \cdot \cos(-22.5) = 40.37^\circ$$

Die extraterrestrische Sonneneinstrahlung G_{on} wird mit Gleichung 2.5 berechnet; dann ist die stündliche extraterrestrische Einstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche (I_o) gegeben durch:

$$I_o = 1365.6 \times \cos 40.37 = 1040.45 \text{ kW/m}^2$$

Hier ist es wert erwähnt zu werden, dass I_o mit der Gleichung 4.11 für die Zeitdauer von einer Stunde von ω_1 (10 Uhr) bis ω_2 (11 Uhr) berechnet werden kann. Aus Vergleichsgründen beträgt der Wert aus dieser Berechnung $I_o = 1037.71 \text{ kWh/m}^2$. Dieser Wert ist vergleichbar mit 1040.45 kWh/m^2 , wenn man voraussetzt, dass die Einstrahlung während der gefragten Zeitdauer von einer Stunde konstant ist.

K kann man mit Gleichung 4.9 berechnen.

$$K = \frac{520}{1040.46} = 0.5$$

Wenn man den Wert von K in Gleichung 4.8(β) ersetzt, ist das Verhältnis $I_d/I = 0,66$. Also:

$$I_d = 0.66 \times 520 = 343.2 \text{ Wh/ m}^2$$

$$I_b = 0.34 \times 520 = 176.8 \text{ Wh/ m}^2$$

An dieser Stelle muss der Sonneneinfallswinkel (θ) berechnet werden. Da der Sonnenzenitwinkel (θ_z) bekannt ist, kann die Sonnenhöhe mit Gleichung 3.1 wie folgt berechnet werden:

$$h = 90 - 40.37 = 49.63^\circ$$

Das Sonnenazimut (α) kann mit Gleichung 3.14 berechnet werden:

$$\sin \alpha = \frac{\cos 4.81 \cdot \sin(-22.5)}{\cos 49.63} = -36.07^\circ$$

Da $\gamma = 0$, ergibt Gleichung 3.16:

$$\cos \theta = \cos 35 \cdot \cos 40.37 + \sin 35 \cdot \sin 40.37 \cdot \cos(-36.07) = 22.42^\circ$$

Wenn man alle bekannten Werte in Gleichung 4.6 einsetzt, kann die Gesamteinstrahlung auf einer geneigten Oberfläche (I_T) berechnet werden:

$$I_T = 176.8 \frac{\cos 22.42}{\cos 40.37} + 343.2 \frac{1 + \cos 35}{2} + 520 \cdot 0.2 \frac{1 - \cos 35}{2}$$

$$I_T = 214.52 + 312.17 + 9.4 = 536.1 \text{ Wh / m}^2$$

Folglich beträgt die Gesamteinstrahlung auf dem PV-Panel $537,27 \text{ Wh/m}^2$, der Direktanteil $214,52 \text{ Wh/m}^2$, der diffuse Anteil ist $312,17 \text{ Wh/m}^2$ und der reflektierte beträgt $9,4 \text{ Wh/m}^2$.

4.2 Monatliche Strahlung auf einer geneigten Oberfläche

Die gleiche Vorgehensweise wie die zur Entwicklung der Gleichungen für I_T kann auch für die Berechnung der gesamten täglichen Sonneneinstrahlung (H_T) auf einer geneigten Oberfläche zunutze machen. Da die diffuse und die Bodenreflexionsstrahlung unabhängig vom Einfallswinkel sind, sind die Tagesumrechnungsfaktoren die gleichen wie die in den Gleichungen 4.3 und 4.4 gegebenen momentanen Umrechnungsfaktoren.

Setzt man das isotrope Modell für diffuse und globale reflektierte Strahlung analog zu Gleichung 4.6 voraus, kann man die tägliche Einstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche schreiben als:

$$H_T = H_b R_b + R_d \left(\frac{1 + \sigma \nu \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \sigma \nu \beta}{2} \right) \quad (4.12)$$

In diesem Fall ist R_b das Verhältnis der täglichen Direktstrahlung auf einer geneigten Oberfläche $H_{b,T}$ zu der auf einer horizontalen Oberfläche H_b . Daher gilt für zum Äquator geneigte Oberflächen ($\gamma = 0$) auf der Nordhalbkugel, dass dieses Verhältnis bestimmt

werden kann, indem man die Gleichung 4.2 für die geeignete Zeitdauer integriert, und zwar im Zähler vom scheinbaren Sonnenaufgang ω_{sr} bis zum scheinbaren Sonnenuntergang ω_{ss} auf der geneigten Oberfläche und im Nenner vom Sonnenaufgang ω_{sr} bis zum Sonnenuntergang ω_{ss} für die horizontale Oberfläche.

$$R_b = \frac{\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} \sigma \nu \theta d\omega}{\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} \sigma \nu \theta_z d\omega} \quad (4.13)$$

Da $\omega_{sr}' = -\omega_{ss}'$ und $\omega_{sr} = -\omega_{ss}$, kann man diesen Winkeln jeweils eine einheitliche Notation ω_s' und ω_s geben [3]:

$$R_b = \frac{\cos(f-b) \cos d \sin \omega_s' + (\rho/180) \omega_s' \sin(f-b) \sin d}{\cos f \cos d \sin \omega_s + (\rho/180) \omega_s \sin f \sin d} \quad (4.14)$$

wobei ω_s' der durch die folgende Gleichung gegebene Sonnenuntergangsstundenwinkel für die geneigte Oberfläche ist und "min" den kleineren der Werte in den Klammern meint (siehe 4.15).

$$\omega_s' = \min \left\{ \omega_s, \arccos \left(-\tan(f-b) \operatorname{erfd} \right) \right\} \quad (4.15)$$

Für Sonnenenergieanwendungen ist es in vielen Fällen notwendig, die monatliche Gesamteinstrahlung auf einer geneigten Oberfläche zu berechnen. In diesen Fällen kann eine Gleichung ähnlich wie 4.12 benutzt werden, wenn der Umrechnungsfaktor für den typischen Tag des relevanten Monats berechnet wird. So kann die monatliche Gesamteinstrahlung auf einer geneigten Oberfläche mit Hilfe der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \bar{H} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4.16)$$

Wenn man den Faktor \bar{R} als das Verhältnis des Monatsdurchschnittes der gesamten Sonneneinstrahlung auf einer geneigten Oberfläche \bar{H}_T bezüglich diesem einer horizontalen Oberfläche definiert, wird \bar{H} zu:

$$\bar{H}_T = \bar{H} \bar{R} \quad (4.17)$$

Indem man diese einfache Gleichung benutzt, kann man \bar{H}_T berechnen, wenn \bar{H} und \bar{R} für einen gegebenen Monat, Ort und Neigungswinkel bekannt sind. Für manche Städte gibt es Tabellen mit den Werten für \bar{R} , die alle Monate und verschiedene Neigungswinkel beinhalten.

In ähnlicher Weise kann Gleichung 4.16 mit Hilfe von Gleichung 4.7 folgendermaßen umgeformt werden:

$$\frac{\bar{H}_T}{H} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{H}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{H} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (4.18)$$

Verschiedene Formeln für das Verhältnis $\frac{\bar{H}_d}{H}$ sind von diversen Forschern vorgeschlagen worden [4-9], Gemäß Liu und Jordan [9], kann dieses Verhältnis mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 1.390 - 4.027\bar{K} + 5.531\bar{K}^2 - 3.108\bar{K}^3 \quad (4.19)$$

In diesem Falle ist \bar{K} der Clearness Index, gegeben als das Verhältnis des Monatsmittels der täglichen Gesamteinstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche (\bar{H}) zum Monatsmittel der täglichen extraterrestrischen Strahlung (\bar{H}_o).

$$\bar{K} = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (4.20)$$

Das Monatsmittel der täglichen extraterrestrischen Strahlung (\bar{H}_o), kann errechnet werden, indem man G_o über den Zeitraum zwischen Sonnenaufgang (ω_{sr}) und Sonnenuntergang (ω_{ss}) integriert.

$$\bar{H}_o = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} G_o \cos \theta_Z d\omega \quad (4.21)$$

Wenn die Solarkonstante in W/m^2 ausgedrückt wird und die Gleichungen 2.5 und 3.5 berücksichtigt werden, dann ergibt die folgende Gleichung für \bar{H}_o in J/m^2 :

$$\bar{H}_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta\right) \quad (4.22)$$

Das Monatsmittel der täglichen extraterrestrischen Strahlung \overline{H}_o ist eine nützliche Größe und kann mit Gleichung 4.22 für geografische Breiten im Bereich von $+60^\circ$ bis -60° errechnet werden.

Beispiel 4.2

Berechnen Sie unter der Annahme isotroper Diffusion das Monatsmittel der täglichen Gesamteinstrahlung auf einem geneigten PV-Panel mit einer Neigung von 40° nach Süden, für eine Breite von $37^\circ 06' N$. Der Bodenreflexionsgrad ist 0,2, und die monatlichen Werte für die Gesamteinstrahlung auf einer horizontalen Oberfläche finden Sie in Tabelle 4.2.

Lösung

Zuerst berechnet man die mittlere monatliche Gesamtsonneneinstrahlung auf einer geneigten Oberfläche \overline{H}_T analytisch für Januar, und dann können in ähnlicher Weise die entsprechenden Werte für die anderen Monate errechnet werden. Für den durchschnittlichen Januartag kann die Sonnendeklination errechnet werden, indem man den 17. aus Tabelle 3.1 heranzieht. Und so ergibt Gleichung 3.2 für $n = 17$:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \frac{284+17}{365}\right) = -20.92^\circ$$

Wenn man Gleichung 3.10 nutzt, ist der Stundenwinkel für den Sonnenuntergang ω_s :

$$\omega_s = \arccos \theta(-\tan 37.1 \cdot \tan(-20.92)) = 73.2^\circ$$

Da δ und ω_s nun bekannt sind, wird das Monatsmittel der täglichen extraterrestrischen Strahlung \overline{H}_o mit Gleichung 4.22 berechnet:

$$\overline{H}_o = 146.31 \text{ kWh/m}^2$$

Der Clearness Index \overline{K} kann aus Gleichung 4.20 erhalten werden:

$$\overline{K} = \frac{51}{146.31} = 0.35$$

Der Wert für den Clearness Index \overline{K} wird benutzt, um $\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}$ aus Gleichung 4.19 zu errechnen

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1.446 - 2.965 \cdot 0.35 + 1.727 \cdot (0.35)^2 = 0.62$$

Der Stundenwinkel für den Sonnenuntergang ω'_s auf der geneigten Oberfläche wird mit Gleichung 4.15 berechnet und beträgt:

$$\omega'_s = \min\{73.2, \cos^{-1}(-\tan(37.1-40) \cdot \tan(-20.92))\} = \min(73.2^\circ, 91.1^\circ)$$

\bar{R}_b wird mit Gleichung 4.14 berechnet als:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(37.1-40) \cdot \cos(-20.92) \cdot \sin 73.2 + (3.14/180) \cdot 73.2 \cdot \sin(37.1-40) \cdot \sin(-20.92)}{\cos 37.1 \cdot \cos(-20.92) \cdot \sin 73.2 + (3.14/180) \cdot 73.2 \cdot \sin 37.1 \cdot \sin(-20.92)} = 2.09$$

Mit den vorgenannten Werten kann man die mittlere monatliche Gesamteinstrahlung für die geneigte Oberfläche \bar{H}_T für Januar erhalten, indem man Gleichung 4.18 nutzt.

$$\bar{H}_T = 69.36 \text{ kWh/m}^2$$

Die Ergebnisse für die 12 Monate werden in Tabelle 4.2 gezeigt.

Tabelle 4.2

Monat	H kWh/m ²	H _o kWh/m ²	H _d /H	R _b	H _T kWh/m ²
Jan	51	146,31	0,62	2,09	69,62
Feb	67,4	172,48	0,55	1,68	84,92
Mär	111	247,38	0,46	1,32	126,54
Apr	149	294,60	0,38	1,02	147,51
Mai	193	343,48	0,32	0,84	169,84
Jun	205	347,10	0,29	0,77	170,15
Jul	212	350,30	0,28	0,80	180,20
Aug	194	318,68	0,28	0,94	184,30
Sep	161	258,90	0,27	1,19	181,93
Okt	111	207,08	0,35	1,55	148,74
Nov	75	151,50	0,40	1,97	116,25
Dez	52	134,54	0,55	2,22	78,00

4.3 Sonnenstrahlung auf Oberflächen mit verschiedenen Ausrichtungen und Neigungswinkeln

Die Sonneneinstrahlung auf einer Oberfläche hängt unter anderem von ihrer Neigung und ihrer Ausrichtung ab. Für eine Fläche an einem bestimmten Ort bewirkt die Vergrößerung ihrer Neigung im Winter den Einfall von mehr Strahlung als im Sommer. Daher sollte für Anwendungen, die vor allem im Winter auf Energie aus Solarpanels angewiesen sind, der Neigungswinkel groß sein. Wenn die Panels hingegen vor allem im Sommer genutzt werden, sollten sie eine kleine Neigung aufweisen.

Für eine maximale Energieausbeute im Winter, im Sommer und während des gesamten Jahres gibt es eine Daumenregel, die besagt, dass die Kollektorneigung jeweils etwa 10° bis 15° größer, etwa 10° bis 15° kleiner oder gleich der geografischen Breite sein sollte. Daher haben Solarpanels an verschiedenen Orten also verschiedene optimale Neigungswinkel.

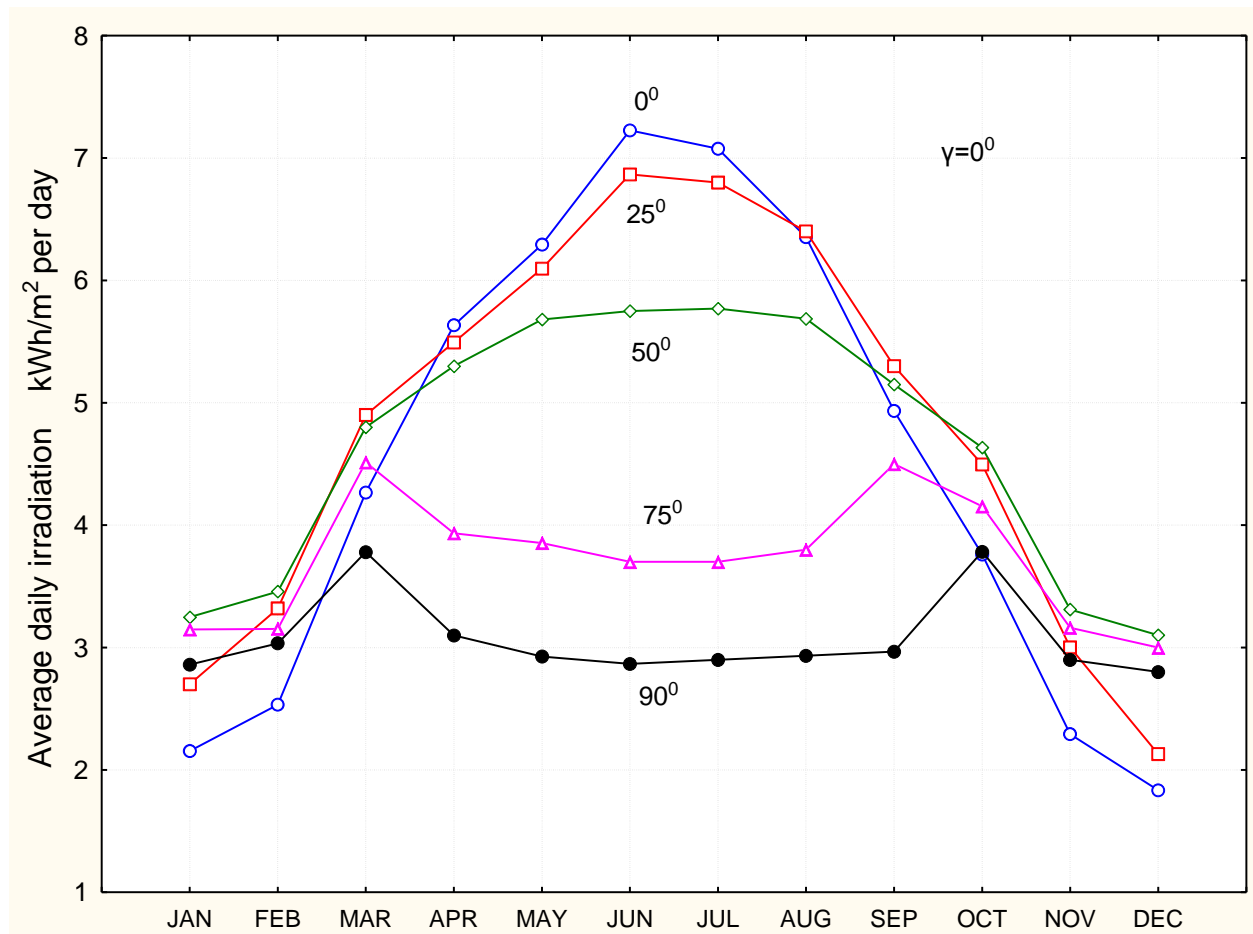


Abb. 4.3 Wirkung der Neigung der bestrahlten Fläche auf das Monatsmittel der täglichen Einstrahlung für eine geografische Breite von 38° , Bodenreflexionsgrad 0,2 und Ausrichtung genau nach Süden ($\gamma = 0$).

Abb. 4.3 zeigt das Monatsmittel der täglichen Einstrahlung auf nach Süden gerichtete Oberflächen mit verschiedenen Neigungen [10]. Diese Werte beziehen sich auf 38° N, $\rho = 0,2$ und sind Näherungswerte. Dennoch liefern sie ein vollständiges Bild des Einflusses der Neigung auf die Sonneneinstrahlung auf eine Oberfläche. Diese Abbildung bestätigt die weiter oben erwähnte Daumenregel.

Es ist bekannt, dass der Neigungswinkel des PV-Panels zum größten Teil die empfangene Strahlung bestimmt und der Primärfaktor ist, der über die Leistungsabgabe des Panels entscheidet. Da sich die Position der Sonne an der Himmelskugel während des Tages ändert und auch während des Jahres an jedem Tag einem anderen Weg folgt, wird es offensichtlich, dass die Bestimmung eines optimalen Neigungswinkels unumgänglich für die optimale Funktionsweise eines jeden PV-Systems ist.

Um die Wirkung der Neigung eines PV-Kollektors auf die elektrische Leistungsabgabe zu illustrieren, wurde zu einer bestimmten Uhrzeit, an einem Morgen in Athen, ein Experiment durchgeführt [11]. Die Leistung des PV-Panels war $55W_p$, seine Ausrichtung genau südlich, und die Neigungswinkel wurden in 10° -Schritten von 0° bis 90° gewählt. Die Ergebnisse des Experiments sind in Abb. 4.4 dargestellt. Wie man aus dieser Abbildung ersehen kann, ist der optimale Neigungswinkel um 60° herum. Oberhalb dieses optimalen Winkels fällt die Leistung schrittweise ab. Der optimale Neigungswinkel im in Abb. 4.4 gezeigten Beispiel ist hoch, da es Morgen ist (10:34 Uhr) und der Sonnenstand niedrig.

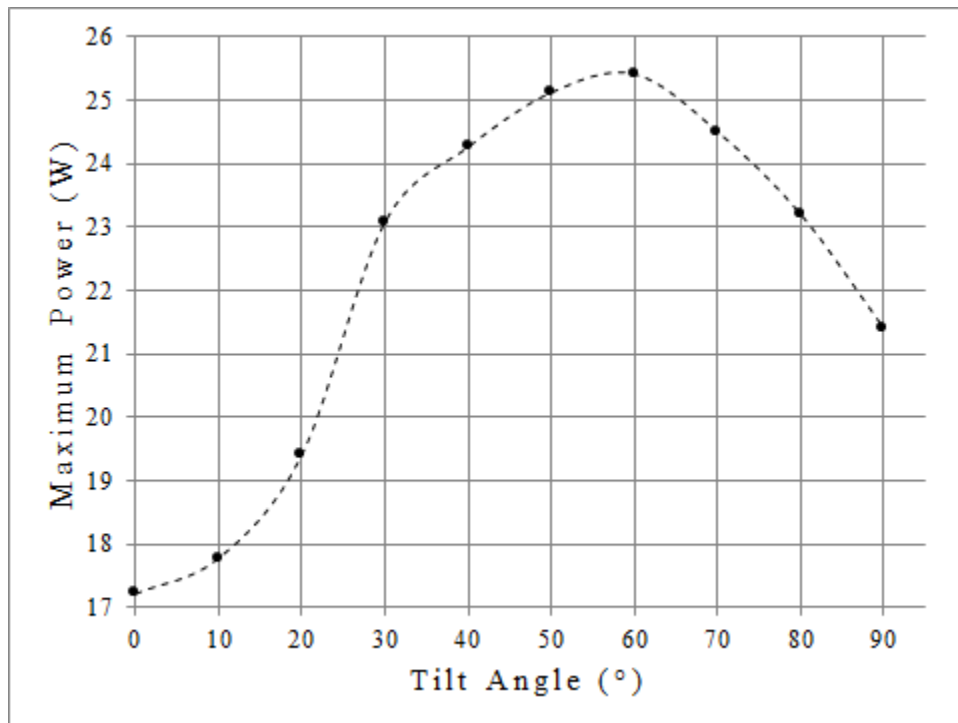


Abb. 4.4 Experimentelle Ergebnisse der maximalen Leistungsabgabe des PV-Panels bei verschiedenen Neigungswinkeln für Athen ($\phi=38^\circ\text{N}$).

Ein anderer Faktor, der den Strahlungseinfall auf einer Oberfläche beeinflusst, ist die Ausrichtung selbiger. Wenn man beachtet, dass die Sonnenstrahlung am Sonnenhöchststand symmetrisch ist, dann ist die beste Ausrichtung eines fest installierten Solarpanels die nach Süden ($\gamma = 0$). Abweichungen vom Azimut von 10° oder 20° östlich oder westlich von Süden werden nur wenig Einfluss auf die gesammelte jährliche Sonnenenergie haben. Die Ausrichtung eines Solarpanels hat auch einen Einfluss auf die Zeit, wo es Sonnenstrahlung empfängt. Zum Beispiel wird ein Panel, das nach Südosten ausgerichtet ist, den größten Teil der Sonnenstrahlung am Morgen empfangen.

Abb. 4.5 zeigt das Monatsmittel der täglichen Sonneneinstrahlung auf der horizontalen und vier vertikalen Oberflächen (Süd, Ost, Nord und West) auf der Breite von 38°N [10]. Ein Merkmal, das diese Abbildung zeigt, ist, dass alle Kurven, außer der der südlich ausgerichteten Fläche, ein Maximum zur Sommersonnenwende aufweisen. Die südlich ausgerichtete Fläche hingegen hat zwei Maxima, die den Frühjahrs- und Herbstäquinoktien entsprechen. Außerdem kann man erkennen, dass die nach Süden ausgerichtete vertikale Fläche größere Mengen Sonneneinstrahlung während der Wintermonate empfängt, während sie für die horizontale Fläche im Sommer überwiegt.

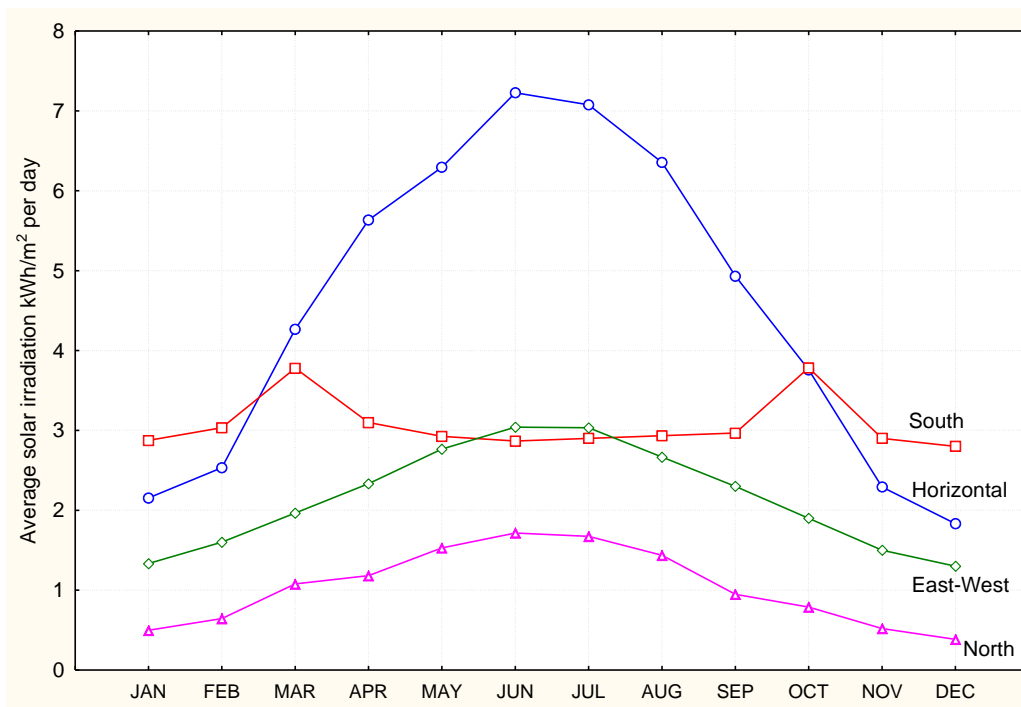


Abb. 4.5 Monatsmittel der täglichen Sonneneinstrahlung auf der horizontalen und vier vertikalen Oberflächen (Süd, Ost, Nord und West) auf der Breite von 38°N

Für eine detailliertere Betrachtung beginnen wir mit der Kurve, die die Sonneneinstrahlung auf der nordexponierten Fläche darstellt. Während der Wintermonate geht die Sonne südlich der Ost-West-Linie auf und unter, daher gibt es überhaupt keine direkte Sonneneinstrahlung auf dieser Fläche.

Die Sonneneinstrahlungs-Kurven der vertikalen nach Westen und Osten ausgerichteten Flächen haben höhere Werte als die der nach Norden ausgerichteten vertikalen Fläche. Während der Sommermonate geht die Sonne nördlich der Ost-West-Linie auf und unter, der scheinbare Weg der Sonne ist länger, daher ist die einfallende Sonnenstrahlung auf diesen Oberflächen höher als auf der vertikalen, nordexponierten Fläche.

Die horizontale Fläche erhält eine viel höhere Einstrahlung während des Sommers weil die Sonnenhöhe maximal ist.

Die Kurve, die die Sonneneinstrahlung auf der vertikalen, nach Süden ausgerichteten Oberfläche darstellt, hat eine völlig andere Form im Vergleich zu den restlichen Kurven. Die zwei Maximalwerte entsprechen den Frühjahrs- und Herbstäquinoktien. Aufgrund des niedrigen Sonnenstandes bekommt diese Oberfläche die meiste Sonneneinstrahlung während der Wintermonate. Die Kombination aus geringer Sonnenhöhe und geringer Taglänge während des Winters resultiert in der Überlegenheit der nach Süden ausgerichteten vertikalen Fläche gegenüber den anderen Ausrichtungen.

Die oben erwähnte Daumenregel für die Neigung eines fix installierten Panels ergibt gute Resultate, wenn man sie auf kleine Solarinstallationen anwendet. Im Falle von großen Solaranlagen führt allerdings schon eine kleine Änderung des Neigungswinkels zu einer großen Verschiebung der einfallenden Strahlungsmenge. Bei PV-Systemen, wo die Kosten der Panels hoch sind, ist es außerdem wichtig, die optimale Neigung für jeden einzelnen Anwendungsfall zu untersuchen. Wenn beispielsweise die PV-Panels in einem netzgekoppelten System zur Anwendung kommen, das das ganze Jahr über funktionieren soll, muss der optimale Neigungswinkel unter Berücksichtigung der maximalen Sonneneinstrahlung während eines ganzen Jahres berechnet werden. Der dafür optimale Panelwinkel ist normalerweise recht nah an der geografischen Breite. Im Falle eines Inselsystems mit Akkumulatoren als Energiespeicher könnte es allerdings sein, dass das Kriterium nicht die Gesamtsonneneinstrahlung ist, sondern die tägliche Einstrahlung während des Monats mit der geringsten Sonneneinstrahlung, um die Anforderungen an den Energiespeicher zu minimieren. Auf der Nordhalbkugel wird beispielsweise der Monat Dezember als der Monat mit der geringsten Sonneneinstrahlung betrachtet; die Panelneigung wird also größer als die geografische Breite sein. Generell muss die optimale Panelneigung anhand der geografischen Breite des Ortes, der geplanten Anwendung und des beabsichtigten Nutzungszeitraumes bestimmt werden.

Literaturnachweis

[1] Agami Reddy T. 1987. The design and sizing of active solar thermal systems, Clarendon press Oxford.

- [2] Duffie, J. A. and W. A. Beckman 2006. "Solar Engineering of thermal Processes" John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Klein S. A. 1977. "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces" Solar Energy Vol. 19, 325-329.
- [4] Collares-Pereira M. and A. Rabl 1979. "The average distribution of solar radiation-correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values". Solar Energy 22, 155 -164.
- [5] Erbs D, Klein SA, Duffie J A. 1982. "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation". Sol Energy 28(4): 293-302.
- [6] Ruth D. W. and R. E. Chant 1976. The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada. Solar Energy 18, 153-154.
- [7] Choudhury N. K. D. 1963. "Solar radiation at New Delhi". Solar Energy 7, 44 -52.
- [8] Tuller S. E. 1976. "The relationship between diffuse, total, and extraterrestrial solar radiation". Solar Energy 18, 259 -263.
- [9] Liu B.Y. H. and R.C. Jordan 1960. "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation" Solar Energy 4(3), 1-19.
- [10] Axaopoulos P. J 1995. "Renewable energy sources" in Greek. Course notes.
- [11] Axaopoulos P. J and Emmanouil D. Fylladitakis 2014. "Photovoltaic engineering e-learning applications developed for remote laboratory experimentation systems" Int Journal Energy Environ Eng 5:78.