

Eine Ergänzung zu den Meteosat-Strahlungskarten

Solare Strahlung auf geneigte Flächen

Die in der SONNENENERGIE veröffentlichten aktuellen Monatskarten der solaren Einstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland sind insbesondere für die Betreiber solartechnischer Anlagen von Bedeutung, da hiermit eine Bestimmung der Effizienz eines solaren Systems prinzipiell ermöglicht wird. Um aber beispielsweise die Performance Ratio einer Photovoltaikanlage als das Verhältnis aus gemessenem und nominellem Anlagenenertrag bestimmen zu können, ist auch die Kenntnis der solaren Einstrahlung in der Modulebene notwendig. Dieser Beitrag präsentiert die Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen der solaren Strahlung auf geneigte Flächen. Mit den entwickelten Diagrammen wird bundesweit eine Transformation der Monatssummen der Globalstrahlung aus den genannten Karten auf beliebig geneigte Flächen ermöglicht. Die Diagramme können darüber hinaus auch in der Planungsphase solartechnischer Anlagen sowie im Rahmen der Solararchitektur eingesetzt werden.

Die Bestimmung der globalen Strahlung auf eine geneigte Fläche erfolgt durch die Berechnung des direkten und diffusen Anteils sowie der vom Erdboden reflektierten und der betrachteten Fläche empfangenen Strahlung. Die größte Unsicherheit besteht hierbei in der Transformation des diffusen Anteils. Während die direkte Strahlung eine vektorielle Größe darstellt, muß bei der diffusen Strahlung die in der Regel anisotrope Verteilung der Strahldichte berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang wurde eine vergleichende Bewertung von sieben Modellen /1-7/ anhand von Meßdatensätzen auf verschiedenen geneigte, südlich ausgerichtete Flächen an einer Meßstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Hamburg durchgeführt /8, 9/. Insgesamt standen für die Verifikation der Modelle für jeden Neigungswinkel mindestens 20.000 Stundensummen aus sieben Jahrgängen zur Verfügung.

Die Ergebnisse zeigten, daß insbesondere die Annahme einer isotropen Verteilung der diffusen Strahldichte nach dem analytischen Ansatz von Liu & Jordan /1/ zu einer erheblichen Unterschätzung der Meßdaten führt.

Bei geringen bis mittleren Neigungswinkeln wurden die besten Ergebnisse durch das semiempirische Modell von Perez et al. /4, 5/ erzielt, welches sowohl die erhöhte Dichte der diffusen Strahlung in Sonnen- (sog. „circumsolare“ Strahlung, verursacht durch die vorwärts gerichtete Miestreuung an Aerosolen) als auch in Horizontnähe (sog. „Horizontaufhellung“, verursacht durch Rayleigh'sche

Mehrfachstreuungsprozesse im wesentlichen an den Luftmolekülen) durch einen empirischen, klimaspezifischen Koeffizientensatz, bestehend aus 48 Konstanten, berücksichtigt.

Die diffuse Strahlung auf Wandflächen wird dagegen besser durch Ansätze modelliert, welche den Effekt der Horizontaufhellung vernachlässigen /6, 7/. Für die Entwicklung monatlicher Diagramme zur Bestimmung der Globalstrahlung auf geneigte Flächen wurde das Modell nach Perez et al. ausgewählt /5/, wobei eine wesentliche Verbesserung der Ergebnisse für stark geneigte Flächen durch die Erarbeitung eines neuen Koeffizientensatzes erzielt werden konnte /10/.

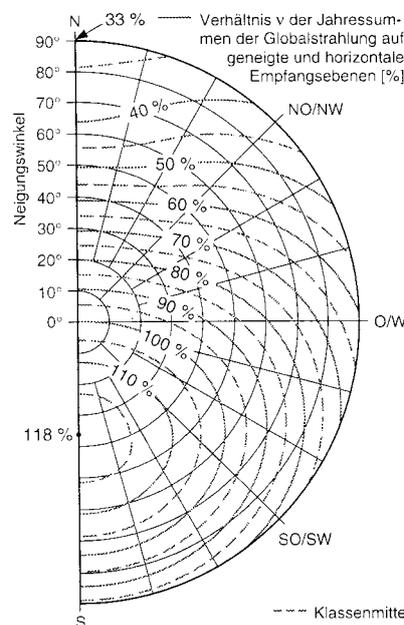


Abb. 1: Diagramm zur Bestimmung der Jahressummen der Globalstrahlung auf beliebig geneigte Flächen in der Bundesrepublik Deutschland

Die Bestimmung der Reflektionsstrahlung erfolgte unter den Annahmen, daß sowohl die direkte als auch die diffuse Strahlung am Erdboden vollständig diffus (keine spiegelnden Oberflächen) und isotrop reflektiert wird und die Albedo¹ für direkte und diffuse Strahlung gleich groß und unabhängig vom Einstrahlwinkel sowie dem solaren Strahlungsspektrum sind.

Ansätze, welche hiervon abweichende Randbedingungen annehmen (z. B. /6, 11/), sind meist nicht hinreichend verifiziert bzw. tragen aufgrund des i.d.R. geringen Beitrags zur Globalstrahlung kaum zu einer Verringerung der Abweichung gemessener und berechneter Strahlungsgrößen bei /12, 13/. Wesentlich bedeutsamer ist dagegen die richtige Wahl der Albedo. Hierfür stehen mittlerweile umfangreiche Datensammlungen zur Verfügung /11, 14/.

Die Erstellung der Diagramme erfolgte nach Umsetzung aller Teilmodelle in ein Rechenprogramm über die Transformation von gemessenen Stundensummen der globalen und diffusen Strahlung auf eine horizontale Empfangsfläche an fünf Meßstationen des DWD in der BRD, wobei insgesamt rund 500.000 Daten aus 30 Jahrgängen zur Verfügung standen.

Für jede dieser Stundensummen wurden die solaren Strahlungsanteile auf geneigte Empfangsflächen mit einer Schrittweite des Neigungswinkels von 2,5° bzw. des Ausrichtungswinkels von 10° berechnet, so daß insgesamt rd. 650 Mio. Transformationen durchgeführt wurden.

Ergebnisse

Die so berechneten Werte wurden nach einer räumlichen und zeitlichen Mittelung übersichtlich für die einzelnen Monate, das Jahr sowie für das Winter- und Sommerhalbjahr anhand einer Solinien-darstellung des prozentualen Verhältnisses aus Globalstrahlung auf eine geneigte zur Strahlung auf eine horizontale Empfangsfläche (sog. „Flächenfaktor“) in Diagrammen dargestellt. Abb. 1 bis 3 zeigen die Ergebnisse für das Jahr sowie den Zeitraum April bis September (Sommerhalbjahr) und Oktober bis März (Winterhalbjahr).

Zur Bestimmung der Reflektionsstrahlung wurde eine mittlere Albedo von $p = 0,2$ angenommen. Liegt an dem betreffenden Standort eine hiervon abweichende Albedo vor, kann das Verhältnis v aus den Diagrammen durch Gl. (1) entsprechend der tatsächlichen Albedo p und dem Neigungswinkel β korrigiert werden.

$$v = v(p=0,2) + \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)(p-0,2) \quad \text{Gl. (1)}$$

¹ Verhältnis von reflektierter zu empfangener Strahlung an nicht selbstleuchtenden Oberflächen.

Aus Abb. 1 geht hervor, daß der höchste Einstrahlungsgewinn mit 118 % bei einer südlich ausgerichteten und mit 37° geneigten Fläche erzielt wird. Im Falle aufgeständerter, netzgekoppelter Photovoltaikanlagen kann dieser Wert für abschattungsfreie Standorte bereits als Grundlage einer überschlägigen Abschätzung des Energieertrags herangezogen werden.

Technische Anwendungen, deren Energiebedarf hingegen ausschließlich im Sommerhalbjahr anfällt (z. B. solare Freibadwassererwärmung) können bei optimalen Verhältnissen lediglich mit einer Steigerung der Einstrahlung gegenüber einer horizontalen Fläche um 9 % rechnen (vgl. Abb. 2). In der Regel können bei solartechnischen Anwendungen Neigung und Ausrichtung der Modulflächen jedoch nicht gewählt werden. Hierfür bieten die Diagramme die Möglichkeit zur einfachen Ermittlung des Flächenfaktors.

Ausblick

Die entwickelten Diagramme unterliegen auf dem Gebiet der BRD sowohl einer räumlichen als auch einer zeitlichen Mittelung. Die temporären und räumlichen Schwankungen des Flächenfaktors sollten daher zukünftig detailliert untersucht werden. Bei Voruntersuchungen hat sich dabei der Klarheitsgrad, welcher als das Verhältnis der solaren Einstrahlung auf eine horizontale Fläche auf dem Erdboden und außerhalb der Erdatmosphäre definiert ist, als geeigneter Parameter zur Erfassung des Einflusses aller Fluktuationen des Flächenfaktors herausgestellt.

Die in dieser und den folgenden Ausgaben der SONNENENERGIE zusammen mit den Meteosat-Strahlungskarten abgedruckten monatlichen Diagramme liefern jedoch eine brauchbare Möglichkeit, um die Strahlung auf geneigte Flächen bestimmen zu können. Für den Betreiber einer solartechnischen Anlage kann die Effizienz des Systems bestimmt werden, für den Planer bieten die Diagramme in Verbindung mit den langjährig gemittelten Strahlungskarten (vgl. z. B. /15-17/) eine Grundlage zur Abschätzung von Solarenergieerträgen.

Danksagung

Der Inhalt dieser Veröffentlichung ist Teil des von der *Arbeitsgemeinschaft Solar Nordrhein-Westfalen* geförderten Forschungsvorhabens „Quantifizierung der solaren Einstrahlung infolge von Horizontaleinschränkungen bzw. -erweiterungen“. Besonderer Dank gilt dem Regionalgutachtenbüro Hamburg des *Deutschen Wetterdienstes (DWD)* für die Überlassung von umfangreichen Datensätzen aus dem Strahlungsnetz des DWD.

Martin Skiba, Hermann Unger

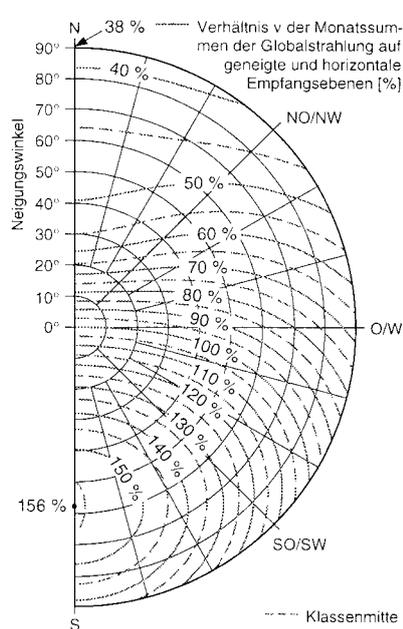


Abb. 2: Diagramm zur Bestimmung der Globalstrahlung im Sommerhalbjahr (April bis September) auf beliebig geneigte Flächen in der Bundesrepublik Deutschland

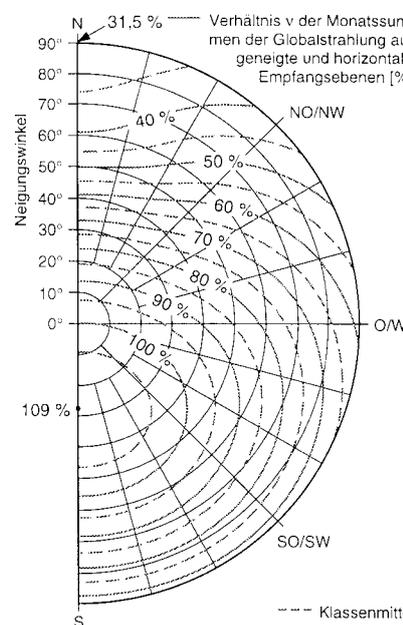


Abb. 3: Diagramm zur Bestimmung der Globalstrahlung im Winterhalbjahr (Oktober bis März) auf beliebig geneigte Flächen in der Bundesrepublik Deutschland

Literatur

- /1/ Liu, B. Y. H., Jordan, R. C., The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, *Solar Energy*, Vol. 37, pp. 147-163, 1958.
- /2/ Temps, R. C., Coulson, K. L., Solar Radiation Incident upon Slopes of Different Orientations, *Solar Energy*, Vol. 19, pp. 179-184, 1977.
- /3/ Klucher, T. M., Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces, *Solar Energy*, Vol. 21, pp. 111-114, 1979.
- /4/ Perez, R., Stewart, R., Arbogast, C., Seals, R., Scott, J., An Anisotropic Hourly Diffuse Ra-

diation Model for Sloping Surfaces, *Solar Energy*, Vol. 36, pp. 481-497, 1986.

/5/ Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces, *Solar Energy*, Vol. 39, pp. 221-231, 1987.

/6/ Gueymard, C., An Anisotropic Solar Irradiance Model for Tilted Surfaces and Its Comparison with Selected Engineering Algorithms, *Solar Energy*, Vol. 38, pp. 367-386, 1987.

/7/ Hay, J. E., Davies, J. A., Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface, Proc. 1st Canadian Solar Radiation Workshop, Toronto, 1980.

/8/ Skiba, M., Mohr, M., Unger, H., Vergleichende Bewertung von Modellen zur Bestimmung der solaren diffusen Einstrahlung auf beliebig geneigte und ausgerichtete Flächen, 3. Technischer Fachbericht zum Forschungsvorhaben „Quantifizierung der solaren Einstrahlung infolge von Horizontaleinschränkungen“, RUB E-140, Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme, Ruhr Universität Bochum, Februar 1996.

/9/ Skiba, M., Mohr, M., Unger, H., Comparative Assessment and Validation of Models Estimating Diffuse Irradiation on Inclined Planes, Proc. EuroSun'96, S. 1568-1573, Freiburg, 1996.

/10/ Skiba, M., Ein Verfahren zur Standortevaluation energetischer Nutzungsmöglichkeiten der solaren Einstrahlung, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 6, Nr. 375, VDI Verlag, Düsseldorf 1997.

/11/ Iqbal, M., An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, 1986.

/12/ Ineichen, P., Perez, R., Seals, R., The Importance of Correct Albedo Determination for Adequately Modeling Energy Received by Tilted Surfaces, *Solar Energy*, Vol. 39, pp. 301-305, 1987.

/13/ Kambezidis, H. D., Psiloglou, B. E., Gueymard, C., Measurements and Models for Total Solar Irradiance on Inclined Surfaces in Athens, Greece, *Solar Energy*, Vol. 53, pp. 177-185, 1994.

/14/ Verein Deutscher Ingenieure, VDI 3789, Blatt 2, Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 1992.

/15/ Palz, W., Greif, J., European Solar Radiation Atlas, Third Improved and Revised Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.

/16/ Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr, Bayerischer Solar- und Windenergieatlas, München, 1992.

/17/ Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Solar- und Windenergieatlas Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1994.

Über die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Hermann Unger leitet seit 1987 den Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme des Instituts für Energietechnik an der Ruhr-Universität Bochum. Dr.-Ing. Martin Skiba ist seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls.

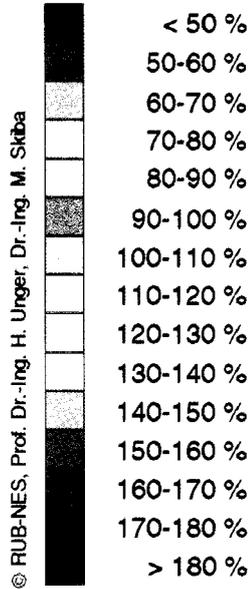
Solare Strahlung auf geneigte Flächen

Eine Ergänzung zu den Meteosat-Strahlungskarten

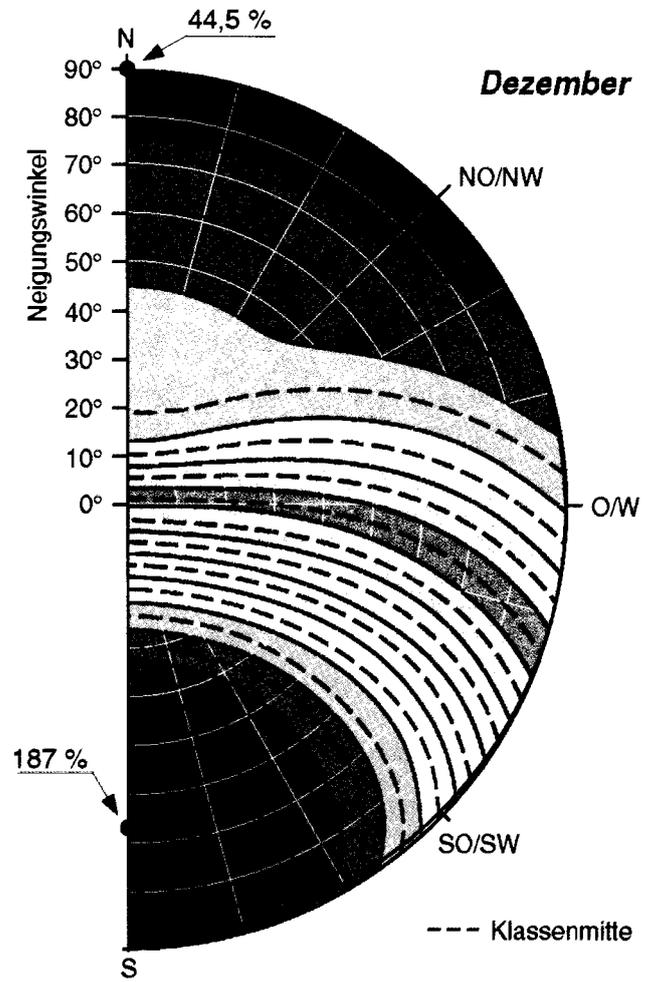
Monatsdiagramme des Flächenfaktors v für Dezember und Januar

Flächenfaktor

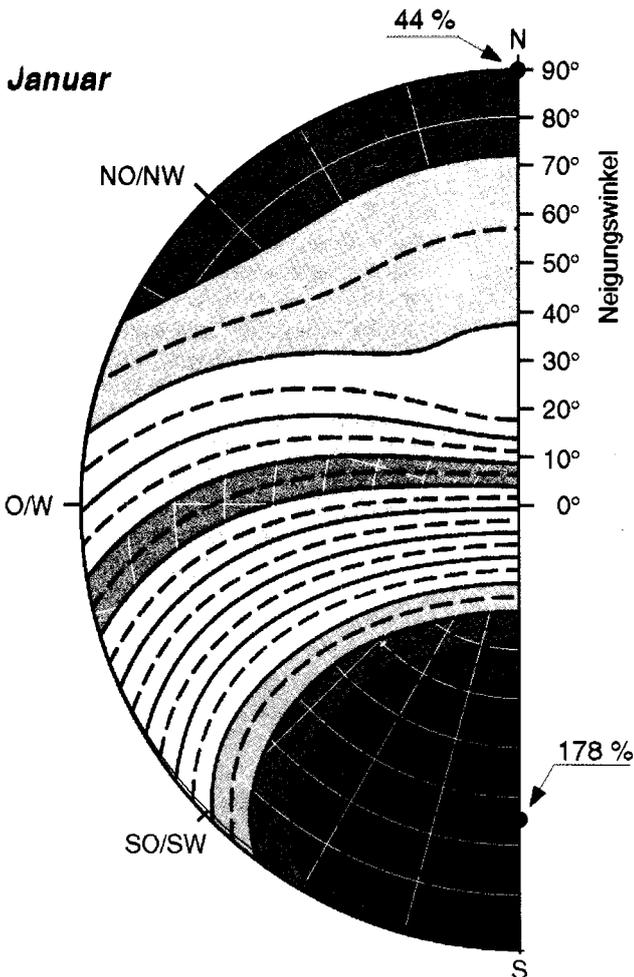
$$v = \frac{G_g}{G_h} \times 100$$



© RUB-NES, Prof. Dr.-Ing. H. Unger, Dr.-Ing. M. Sikba

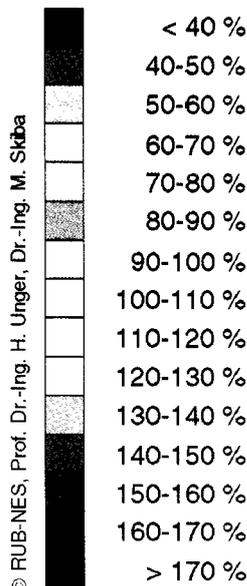


Januar



Flächenfaktor

$$v [\%] = \frac{G_g}{G_h} \times 100$$



© RUB-NES, Prof. Dr.-Ing. H. Unger, Dr.-Ing. M. Sikba

Die abgebildeten Diagramme ermöglichen für die Monate Dezember und Januar eine Transformation der Monatssummen der Globalstrahlung auf beliebig geneigte Flächen.

Anhand einer Isoliniendarstellung zeigen sie das prozentuale Verhältnis aus Globalstrahlung auf eine geneigte zur Strahlung auf eine horizontale Empfangsfläche (Flächenfaktor v).

Dargestellt ist der Mittelwert des Flächenfaktors v (Verhältnis der Monatssummen der Globalstrahlung G auf geneigte (Index g) und horizontale (Index h) Empfangsflächen).

Zur Bestimmung der Reflektionsstrahlung wurde eine mittlere Albedo von $\rho = 0,2$ angenommen. Liegt an dem betreffenden Standort eine hiervon abweichende Albedo vor, kann das Verhältnis v aus den Diagrammen durch die Gleichung

$$v = v(\rho=0,2) + \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)(\rho-0,2)$$

entsprechend der tatsächlichen Albedo ρ und dem Neigungswinkel β korrigiert werden.