

Vergleich und Bewertung verschiedener Verfahren zur Solarstrahlungsbestimmung

Volker Quaschnig · Norbert Geuder · Winfried Ortmanns

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. · Plataforma Solar de Almería
Apartado 39 · E-04200 Tabernas · Tel. 0034 - 950387906 · Fax: 0034 - 950365313
E-Mail: volker.quaschnig@psa.es · Internet: www.dlr.de/psa

Die Solarstrahlung ist der Treibstoff jeder Solaranlage. Für Wirkungsgradberechnungen, Ertragsprognosen aber auch garantierte Vergütungen ist eine möglichst genaue Kenntnis der Solarstrahlung am Anlagenstandort essentiell. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über Solarstrahlungsdatenbanken und beschreibt verschiedene Verfahren und Geräte zur Solarstrahlungsmessung. Eine vergleichende Bewertung zeigt, welche Datenbanken und Messgeräte für welche Einsatzzwecke die notwendige Genauigkeit liefern und auf welche Probleme zu achten ist.

Datenbanken

Verschiedene weltweite Datenbanken bieten erste Anhaltspunkte für Strahlungswerte. In Deutschland existieren für viele Standorte Messungen der Globalstrahlung des DWD. Bei Standorten außerhalb Deutschlands liegen genauere Messungen der Globalstrahlung seltener vor, oftmals werden nur Sonnenscheinstunden gemessen. Messungen der Globalstrahlung liegen deutlich seltener vor, und werden sogar Messwerte der Direktstrahlung für die Auslegung eines konzentrierenden Systems benötigt, sieht die Situation noch schlechter aus. Die meisten Datenbanken beinhalten außerdem nur Monatsmittelwerte. Werden Stundenwerte für eine Simulation benötigt, reduzieren sich die erfassten Standorte weiter. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Solarstrahlungs-Datenbanken.

Tabelle 1: Die wichtigsten Solarstrahlungs-Datenbanken im Überblick [Qua01a].

	European Solar Radiation Atlas ESRA 1996 (ISBN 3-540-61179-7)	The European Solar Radiation Atlas ESRA Mai 2000 (ISBN 2-911762-22-3)	METEONORM 4.0 (www.meteotest.ch)	Climate1 (www.climate-one.de)	S@tel-Light (www.satellight.com)	World Radiation Data Center (wrdc.ngo.inel.gov)	WetSyn 1.0 (www.ise-e-technik.fh- muenchen.de/portal)
Form	Buch mit Disk.	CD + Handb.	CD + Handb.	CD-ROM	Internet	Internet	Internet
Anbieter	Springer	Ecole de Mines	Meteotest	Uni-Flensburg	S@tel-Light	NREL	FH München
Gebiets- abdeckung	Europa und Nordafrika	Europa und Nordafrika	weltweit	weltweit	Europa und Nordafrika	weltweit	Europa und Nordafrika
Daten	G,D	G,D,T,L	G,D,T,W,F,L	G,T,W,F	G,D	G,D	G, D
Messperiode	1966-1975	1981-1990	verschieden	verschieden	1996-1997 ^a	1964-1993	verschieden
Auflösung	m	m, h ^b	m, h	m	hh	m	m, h
Standorte	340	586	> 2.400	> 1.200	250.000	1.195	20

Daten: G: Globalstrahlung, D: Diffusstrahlung, T: Temperatur, W: Windgeschwindigkeit, F: Luftfeuchte, L: Luftdruck

Auflösung: m: Monats-Mittelwerte, h: Stunden-Mittelwerte, hh: Halbstunden-Momentanwerte

^a 1998-2000 in Vorbereitung ^b Stundenwerte nur von einzelnen Standorten

Die umfangreichste Datenbasis liefert derzeit die Software METEONORM sowie die Internet-Datenbank S@tel-Light (Bild 1). Doch auch die umfangreichste Datenbank kann nur so gut sein, wie die zugrunde liegenden Daten. Bei METEONORM ist die Datenbasis in einigen Regionen relativ dünn. Vor allem die Werte der Diffusstrahlung sind hier mit Vorsicht zu genießen. Abweichungen von der Realität im zweistelligen Prozentbereich sind durchaus möglich. S@tel-Light ist auf europäische Standorte beschränkt und liefert an einigen Standorten ebenfalls Diffusstrahlungswerte mit einem großen Unsicherheitsbereich.

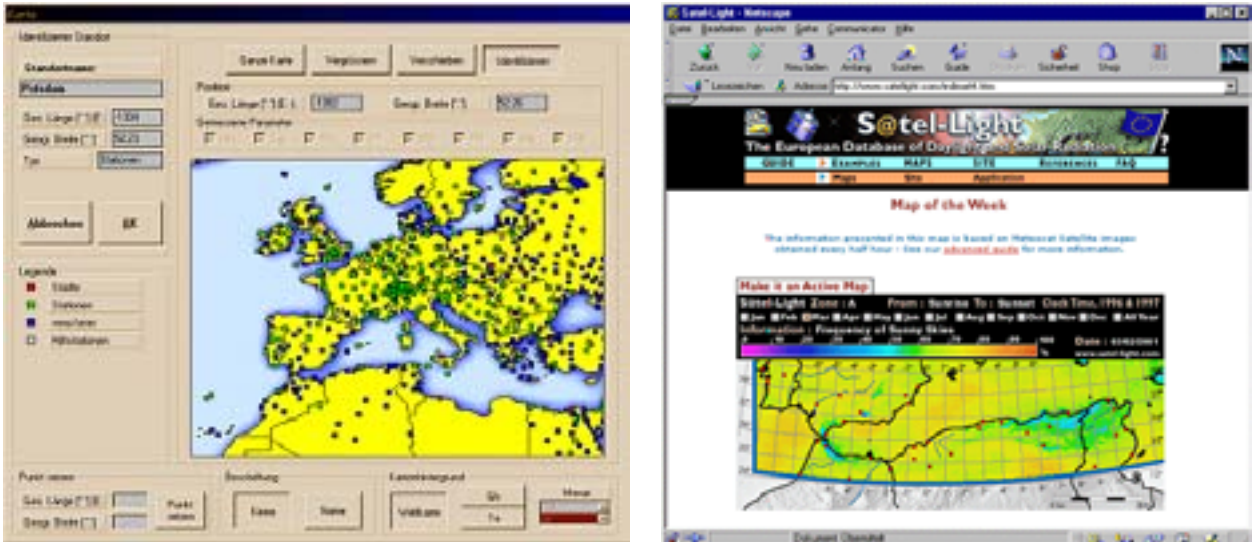


Bild 1: Screenshots verschiedener Solarstrahlungsdatenbanken (links: METEONORM, rechts S@tel-Light).

Satellit versus Bodenmessung

Bei Satellitenmessungen werden aus Satellitenbildern Reduktionen der Solarstrahlung durch Wolken und andere Einflüsse der Atmosphäre bestimmt und somit aus der bekannten extraterrestrischen Solarstrahlung die Strahlung auf dem Boden bestimmt. Der Vorteil ist die hohe räumliche Auflösung über große Gebiete, ohne Bodenmessstationen aufstellen zu müssen. Satellitenmessungen kommen beim S@tel-Light-System oder dem vom DLR angebotenen STEPS-System (www.dlr.de/TT/system/projects/Stk/steps) zum Einsatz.

Stundenwerte aus Satellitenmessungen können sich erheblich von Bodenmessungen unterscheiden. Zum einen werden bei Satellitenmessungen nur Momentaufnahmen ausgewertet, während Bodenmessungen Mittelwerte bilden. Zum anderen messen die Bodenstation die Solarstrahlung an einem konkreten Punkt, während Satellitenmessungen immer eine größere Fläche umfassen. Vor allem bei wechselnder Bewölkung können große Abweichungen entstehen. In der Monats- oder Jahressumme bewegen sich bei vielen Standorten die Abweichungen in passablen Größenordnungen. Bild 2 zeigt die Unterschiede am Standort Potsdam, die in der Jahressumme bei zwei Referenzjahren bei 1,4 % bzw. 2,8 % lagen.

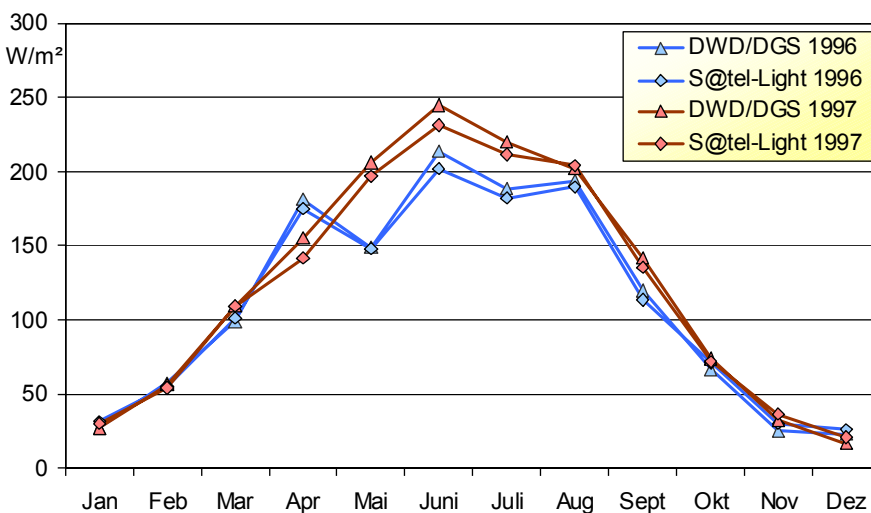


Bild 2: Vergleich von Messwerten der Monatsmittel der Globalstrahlung für die Jahre 1996 und 1997 aus Satellitenmessungen (S@tel-Light) und Bodenmessungen des DWD am Standort Potsdam.

Es gibt jedoch auch Standorte mit deutlich höheren Abweichungen. Weiterhin unterscheiden sich Messungen einzelner Jahre oft deutlich von langjährigen Mittelwerten. Bild 3 vergleicht Jahres-

summen einjähriger Mittelwerte mit verschiedenen langjährigen Bodenmessungen. Hier betragen die Abweichungen bei der Globalstrahlung bis zu 25 %, bei den Direktstrahlungswerten sogar bis über 50 %.

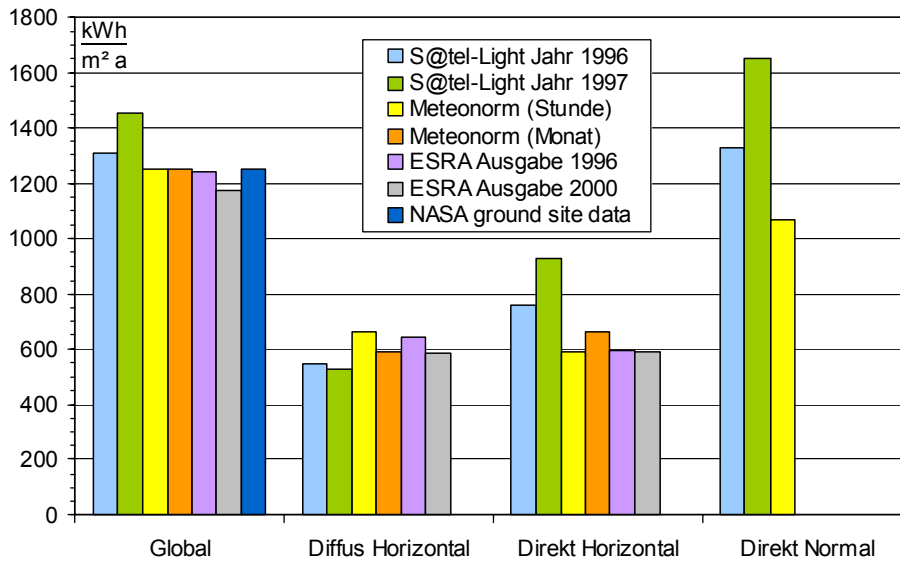


Bild 3: Vergleich von Jahressummen von S@tel-Light Satellitenmessungen mit verschiedenen langjährigen Mittelwerten verschiedener Quellen für Bodenmessungen am Standort Mailand [Qua01b].

Bild 4 zeigt, dass die maximale Abweichung der Jahressumme der Globalstrahlung verschieden langer Messperioden vom langjährigen Mittelwert mit der Länge der Messperiode deutlich abnimmt. Erst ab einer Messperiode von 8 bis 10 Jahren ergibt sich eine nur noch sehr schwach abnehmende Abweichung.

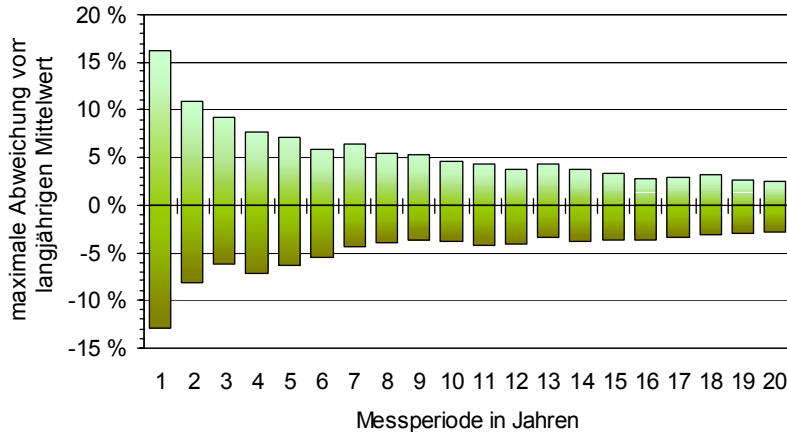


Bild 4: Vergleich der maximalen Abweichung der Globalstrahlung bei verschiedenen Messperioden vom 63-jährigen Mittelwert am Standort Potsdam.

Messung der Globalstrahlung

Messwerte der Globalstrahlung auf der Horizontalen oder einer geneigten Fläche, die für nicht-konzentrierende Photovoltaik- oder solarthermische Anlagen benötigt werden, erhält man mit sogenannten Pyranometern. Zwei Sensorarten haben sich auf dem Markt durchgesetzt (Bild 5). Halbleitersensoren – meist auf Siliziumbasis – nutzen den Photoeffekt. Dieser Sensor liefert einen zur Bestrahlungsstärke proportionalen Strom, der über einen Messwiderstand in ein Spannungssignal umgewandelt werden kann. Halbleitersensoren haben aber aufgrund unterschiedlicher Empfindlichkeit für verschiedene Wellenlängenbereiche der Solarstrahlung nur eine eingeschränkte Genauigkeit.

Deutlich präziser, aber auch teurer, sind thermische Sensoren. Eine schwarze Empfängerfläche wird durch die Solarstrahlung erwärmt. Ein Thermoelement wandelt die Temperaturdifferenz zwischen der Empfängerfläche und der Umgebung in ein Spannungssignal um.



Bild 5: Sensoren bzw. Messgeräte zur Globalstrahlungsmessung: Si-Sensor (links), einfaches Messgerät (mittig) und thermischer Sensor (rechts).

Drei verschiedene Genauigkeitsklassen sind in der internationalen Norm ISO 9060 definiert: secondary standard, first class und second class. Tabelle 2 zeigt die Anforderungen für die jeweiligen Kategorien. In der Summe addieren sich die verschiedenen Messunsicherheiten. Auch Instrumente der Secondary-Standard-Kategorie weisen deshalb vor allem in den Morgen- und Abendstunden bei geringen Einstrahlungswerten hohe relative Fehler auf.

Tabelle 2: Anforderungen an Pyranometer nach [ISO 9060].

Pyranometer-Kategorie	secondary standard	first class	second class
Ansprechzeit auf 95 % des Endwerts	< 15 s	< 30 s	< 60 s
Nullpunktfehler:			
a) Antwort auf 200 W/m ² thermische Strahlung (belüftet)	+ 7 W·m ⁻²	+ 15 W·m ⁻²	+ 30 W·m ⁻²
b) Antwort auf 5 K·h ⁻¹ Umgebungstemperaturänderung	± 2 W·m ⁻²	± 4 W·m ⁻²	± 8 W·m ⁻²
Nichtstabilität (Abweichung pro Jahr)	± 0,8 %	± 1,5 %	± 3 %
Nichtlinearität (Abweichung bezogen auf 1000 W/m ²)	± 0,5 %	± 1 %	± 3 %
Richtungseinfluss	± 10 W·m ⁻²	± 20 W·m ⁻²	± 30 W·m ⁻²
Abweichung der spektralen Empfindlichkeit (von 0,35 µm bis 1,5 µm)	± 3 %	± 5 %	± 10 %
Temperatureinfluss über einen Temperaturbereich von 50°C	2 %	4 %	8 %
Neigungswinkeleinfluss über einen Winkelbereich von 0 bis 90°	± 0,5 %	± 2 %	± 5 %

Tabelle 3: Messunsicherheiten von Pyranometern bei Tagessummen [Kip02].

Pyranometer-Kategorie	secondary standard	first class	second class
Erwartete Genauigkeit für Tagessummen	± 3 %	± 5 %	± 10 %

Auch Tagessummen sind trotz aufwändiger und teurer Messtechnik mit relativ hohen Messunsicherheiten behaftet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Messgeräte sich stets in einem guten Zustand befinden und in regelmäßigen Abständen gewartet werden. Vor allem Verschmutzung kann die Messwerte deutlich verfälschen. Darum sollte eine Reinigung der Messgeräte mindestens im wöchentlichen Abstand erfolgen, in Regionen mit geringen Niederschlägen und hoher Staubentwicklung unter Umständen sogar noch öfter.

Bild 6 zeigt den gemessenen Tagesverlauf einer Messstation in Marokko. Durch starke Staubentwicklung war der Sensor stark verschmutzt. Am späten Vormittag erfolgt die Sensorreinigung, die eine Erhöhung des Messsignals um 8 % zur Folge hatte. Dieses Beispiel zeigt deutlich, wie wichtig eine gute Wartung der Geräte bei hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit ist. Problematisch an derartigen zu Verschmutzung führenden Ereignissen ist, dass sie nicht vorhersagbar und nur bedingt aus den Messwerten ableitbar sind.

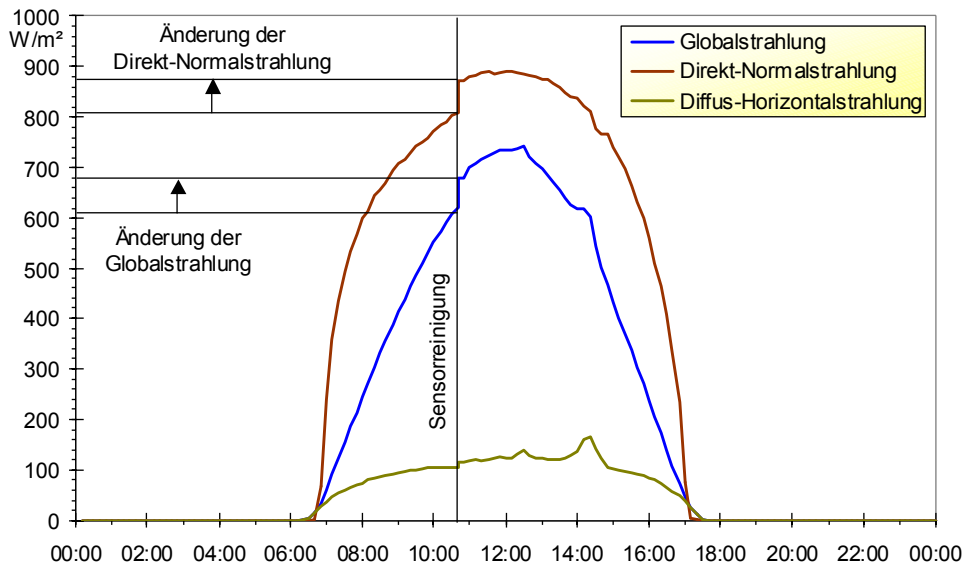


Bild 6: Änderung der Solarstrahlungsmesswerte durch Sensorreinigung an einem Oktobertag in Marokko.

Messung der Diffus- und Direktstrahlung

Bei nachgeführten oder konzentrierenden Solaranlagen reichen Messungen der Globalstrahlung nicht mehr aus. Vielmehr ist eine Differenzierung in Direkt- und Diffusstrahlung notwendig, aus denen sich die Globalstrahlung zusammensetzt. Auch für die Umrechnung der Bestrahlungsstärke auf geneigte Flächen ist die Kenntnis von Diffus- und Direktstrahlung nötig. Für nachgeführte konzentrierende Anlagen ist neben der Direktstrahlung auf der Horizontalen noch die Direkt-Normalstrahlung auf einer senkrecht zur Sonne ausgerichteten Ebene von Bedeutung. Bild 7 zeigt den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Strahlungsarten.

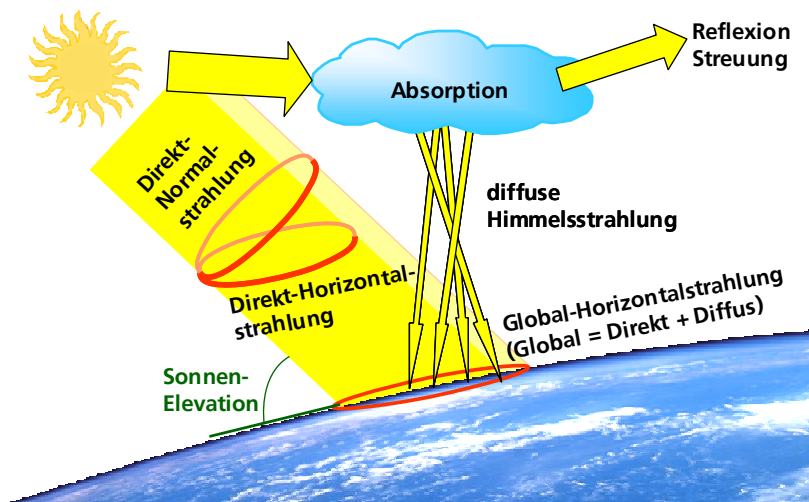


Bild 7: Bezeichnungen der verschiedenen Einstrahlungsarten.

Zur Messung der Diffusstrahlung können Pyranometer mit thermischem oder Halbleitersensor verwendet werden. Ein Schattenring, der täglich manuell nachgestellt wird oder ein automatisch nachgeführter Schattenball schatten dabei den Direktstrahlungsanteil ab (Bild 8). Bei einem rotierenden Schattenband-Pyranometer wird mit dem gleichen Sensor die Global- und Diffusstrahlung gemessen. Da der Sensor zur Messung der Diffusstrahlung ein mal pro Minute nur kurz durch das Schattenband abgeschattet wird, kommt hierfür nur ein schneller Halbleiter-Sensor in Frage. Genauere Messungen der Direkt-Normalstrahlung können durch ein Pyrheliometer erfolgen. Hier befindet sich ein thermischer Sensor am Ende eines langen Rohrs, das zweiachsig der Sonne nachgeführt wird. Durch das Rohr gelangt nur die senkrecht einfallende Direktstrahlung auf den Sensor.



*Bild 8: Messgeräte zur Messung der Diffus- und Direktstrahlung.
 Oben links: Pyranometer mit festem Schattenring;
 oben rechts: Pyranometer mit nachgeführtem Schattenball;
 unten links: zweiachsig nachgeführtes Pyrheliometer vor festem Pyranometer;
 unten rechts: rotierendes Schattenband-Pyranometer in Ruhestellung (links) und während der Rotation (rechts).*

Die beschriebenen Sensoren unterscheiden sich in Genauigkeit und Preis. Während das rotierende Schattenband-Pyranometer mit Halbleitersensor eine relativ günstige Variante darstellt, mit einem Sensor zwei Strahlungsarten zu messen, fallen für die Global-, Diffus und Direktstrahlungsmessung mit zwei Pyranometern und einem präzise zweiachsig nachgeführten Pyrheliometer durchaus Kosten in der Größenordnung eines Kleinwagens an. Die Genauigkeit steigt bei einer gut gewarteten Station zwar spürbar. Dieser Messaufwand lohnt sich jedoch nur in speziellen Fällen. Soll eine Investition in ein solares Großkraftwerk von etlichen Millionen Euro abgesichert werden, oder Daten im Rahmen eines meteorologischen Messnetzes erfasst werden, sind die Kosten sicher zu rechtfertigen. Im anderen Falle kann man sich durchaus überlegen, ob kostengünstige Satellitendaten für die gewünschte Anwendung nicht ausreichend sind.

Vergleichsmessungen

Bild 9 zeigt den Vergleich der Messwerte verschiedener Sensoren für einen Tag. Während bei der Diffus- und Globalstrahlung sich hier die Unterschiede des weniger präzisen Si-Sensors noch in einem vertretbaren Rahmen bewegen, sind bei der Direktstrahlungsmessung bereits sehr große Unterschiede zu verzeichnen.

Ein wichtiges Kriterium für eine gute Messung ist eine sorgfältige Sensor-Kalibrierung. Vor allem bei Low-Cost-Sensoren wird in diesem Punkt nicht unbedingt professionell gearbeitet. Hieraus können bereits unnötige Fehler bis zu einigen Prozentpunkten resultieren. Vor allem bei der Messung der Diffus- und Direkt-Normalstrahlung mit Hilfe von Halbleitersensoren scheint noch einiger Entwicklungsbedarf zu bestehen. Denkbar ist, die Messwerte durch eine nachträgliche Spektralkorrektur deutlich zu verbessern.

Denkt man über garantierte Erträge bei Solaranlagen nach, deren Basis immer gemessene Solarstrahlungsdaten sein werden, sind die hier dargestellten Unterschiede durchaus bedenklich.

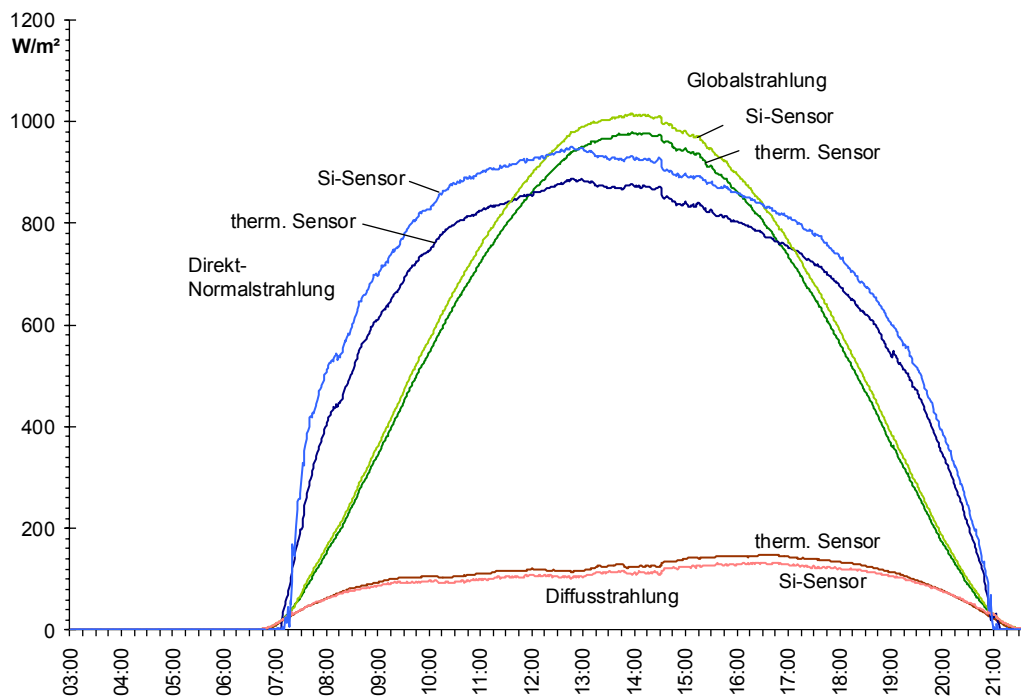


Bild 9: Vergleich der Messwerte der Globalstrahlung, Diffusstrahlung sowie Direkt-Normalstrahlung von thermischen und Si-Sensoren im Tagesverlauf.

Zusammenfassung

Die genaue Kenntnis der Solarstrahlung für einen bestimmten Standort ist nicht nur für die Projektplanung oder die Beurteilung der Anlagen von hoher Bedeutung. Eine langfristige Aussage über die zu erwartende solare Bestrahlung ist allerdings nur schwer zu treffen. Hierzu sind Messdaten in der Größenordnung von 10 Jahren notwendig mit der Hoffnung, dass Klimaveränderungen nicht auch die Bestrahlungswerte verändern werden. Allgemein verfügbare Datenbanken liefern für viele Standorte Strahlungswerte, jedoch für einige Regionen mit eingeschränkter Genauigkeit. Für hochpräzise Messwerte sollten Geräte der genauesten ISO-Klasse verwendet werden, die jedoch ihren Preis haben. Eine gute Wartung der Messstation ist dann ebenfalls unabdingbar.

Abschließend lässt sich sagen, dass in vielen Regionen der Erde eine große Unsicherheit über die tatsächliche genaue Verfügbarkeit des Treibstoffs der Zukunft besteht: Die Solarstrahlung. Es ist zu wünschen, dass diese Lücken durch internationale Projekte und Messkampagnen weiter geschlossen werden, um eine verlässliche Basis bei der Planung von Solarkraftwerken zu bekommen.

Quellenangaben:

- [ISO9060] International Organization for Standardization: *ISO 9060: Solar Energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. Genf, 1990.
- [Kip02] Kipp & Zonen: *Standard CM Pyranometer Series Specifications*. Delft, 2002.
- [Qua01a] Quaschnig, V.: Datenbanken für Solarstrahlung. *Sonne Wind & Wärme* 8/2001, S. 39-41.
- [Qua01b] Quaschnig, V.: Unstete Plangröße – Wo Sie Daten für die Sonneneinstrahlung finden. *Sonnenenergie* Juni 2001, S.24-27.