

40 Jahre nach dem "Atlas über die Sonnenstrahlung in Europa": Umfang und Qualität heutiger Einstrahlungsdatensätze

Christian Reise, Elke Lorenz, Björn Müller
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
Tel. 0761 4588 5282
christian.reise@ise.fraunhofer.de
www.ise.fraunhofer.de

Von der ersten Standortauswahl über die Planung, Finanzierung und Betriebsüberwachung einer PV-Anlage spielt die Bewertung der solaren Ressourcen eine wichtige Rolle für den Projekterfolg. Dabei werden Daten der solaren Einstrahlung z.B. für die folgenden Schritte benötigt:

- Ertragsprognosen über 20 oder 25 Jahre
- Ertragskontrolle über vergangene Monate / Tage
- Leistungsprognosen über Stunden bis Tage
- Potentialstudien (gebietsbezogen oder nutzungsbezogen, z.B. PV auf LKW)
- Technologische Studien (technologiebezogen, z.B. Netzintegration von PV-Strom)

Dieser Beitrag befasst sich mit Einstrahlungsdaten für langfristige Ertragsprognosen und für eine mittelfristige Betriebsüberwachung. Hier besteht Bedarf an standortspezifischen und häufig langjährigen Zeitreihen. Die wichtigsten Parameter sind die globale Einstrahlung auf eine horizontale Fläche G_{HOR} und ihr Diffusanteil D_{HOR} , die globale Einstrahlung in Modulebene G_{MOD} (die aus den ersten beiden Größen berechnet werden kann) sowie die Umgebungstemperatur T_{LUFT} .

Die einzelnen Abschnitte beschreiben zunächst die grundlegenden Unterscheidungsmerkmale verschiedener Datensätze und die historische Entwicklung der Datenbereitstellung. Danach werden die heute erreichbaren Unsicherheiten erläutert, bevor fünf Datenquellen im Einzelnen beschrieben werden. Einige Empfehlungen zu Einstrahlungsdatensätzen finden sich schließlich im Fazit am Ende dieses Beitrags.

Eigenschaften (Metadaten)

Die Eigenschaften von Einstrahlungsdatensätzen werden sowohl durch den Ursprung der Daten und die bei der Bereitstellung verwendeten Verfahren und Modelle, aber auch durch die Anforderungen der Nutzer und den zur Erstellung notwendigen oder möglichen Aufwand bestimmt. Verschiedene aktuelle Datensätze unterscheiden sich daher grundlegend in Abdeckung und Auflösung:

- Die räumliche Auflösung kann mit $1^\circ \times 1^\circ$ (in Deutschland etwa $68 \times 111 \text{ km}^2$) sehr grob sein, aber auch Rasterweiten von 250 m erreichen.

- Die räumliche Abdeckung kann fast die gesamte Erdoberfläche, die Sichtfelder einzelner Satelliten (z.B. Europa & Afrika), einzelne Länder oder speziell begrenzte Gebiete umfassen.
- Die zeitliche Auflösung reicht von Monatssummen über Tagessummen und Stundenmittel bis hin zu Zeitreihen in 15-min-Schritten.
- Die zeitliche Abdeckung beginnt an ausgewählten Bodenstationen etwa 1960, im Bereich der Fernerkundung in den 1980er Jahren. Für Anwendungen in der PV sind allerdings oft die letzten 10 kompletten Jahre oder der jeweils letzte Monat von Bedeutung, hier ist also die Frequenz von Updates wichtig.
- Der Umfang der verfügbaren Parameter kann variieren, einige Datensätze enthalten nur Zeitreihen für eine Größe (z.B. G_{HOR}), andere liefern bis zu 20 verschiedene meteorologische Parameter. Auch die Einheiten und die Konventionen bei den Zeitstempeln der Datenreihen können unterschiedlich sein.

Entwicklung

Vor 40 Jahren wurde der erste „Atlas über die Sonnenstrahlung in Europa“ veröffentlicht [5], dies war hier die erste öffentlich verfügbare flächendeckende Abschätzung des Einstrahlungspotentials am Erdboden. Weitere drei jeweils neu erstellte Auflagen folgten bis 2000 [6][10][12]. Die Entwicklung im Bereich der Einstrahlungsdatensätze setzt sich darüber hinaus bis heute fort – dies betrifft vor allem die Verfahren der Datengewinnung.

Während früher Bodenmessdaten und Interpolationsverfahren zum Einsatz kamen, basieren heutige Datensätze fast immer auf satellitenbasierter Fernerkundung. Dabei werden flächenhafte Daten von Wetter- und anderen Erdbeobachtungssatelliten mit Messwerten an einzelnen Bodenstationen abgeglichen.

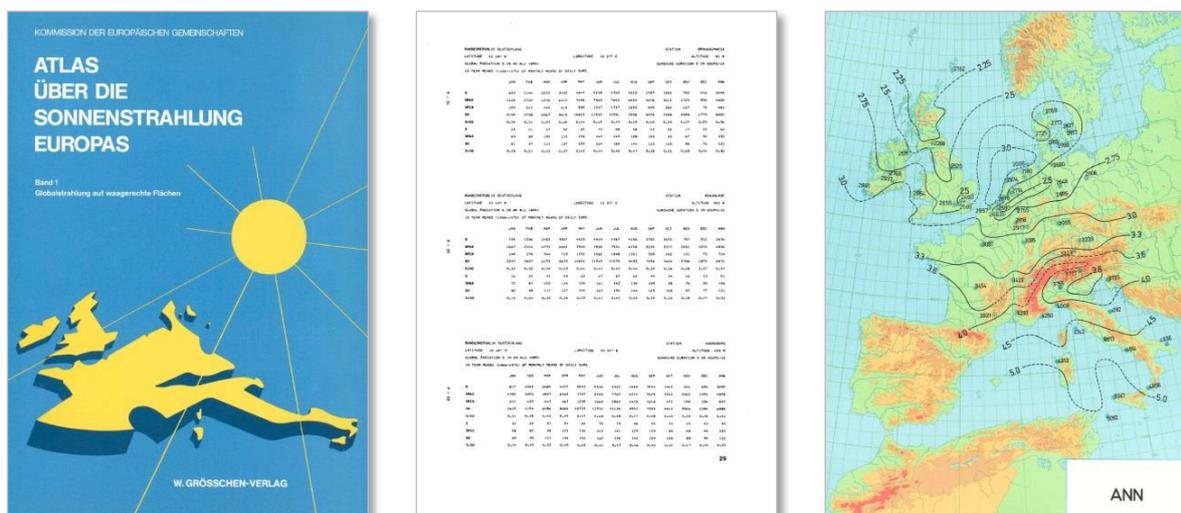


Abbildung 1: Titelseite, eine der Tabellenseiten und die Jahres-Einstrahlungskarte aus dem Atlas über die Sonnenstrahlung in Europa von 1979 [5].

Bei den Vertriebswegen ist die Entwicklung für den Anwender deutlicher sichtbar: nach gedruckten Atlanten erschienen Testreferenzjahre auf Magnetbändern oder Disketten, gefolgt von Datenbanken auf CD-ROMs. Heute werden die Datensätze fast immer per E-Mail oder per Download ausgeliefert.

Die folgende Liste nennt eine Auswahl historischer (und aktueller) Datenquellen, die jeweils für einen wichtigen Entwicklungsschritt stehen:

- Die 1. Version des erwähnten EU-Atlas von 1979 basierte auf den Messdaten von lediglich 56 Wetterstationen für die Jahre 1966 bis 1975, auf deren Basis durch „Météorologie Nationale“ in Frankreich Isolinien der Einstrahlungssummen erstellt wurden.
- Der Deutsche Wetterdienst DWD stellt ebenfalls schon lange Daten der solaren Einstrahlung für eine Reihe von Stationen bereit, wobei die Kostenmodelle mehrmals wechselten. Heute sind umfangreiche flächendeckende Datensätze kostenfrei über das Climate Data Center CDC verfügbar, ebenso werden seit 1991 Einstrahlungskarten in einem gleichbleibenden Format herausgegeben.
- Die ersten Testreferenzjahre wurden 1985 für einige europäische Länder [7] und 1986 für Deutschland [1] herausgegeben. Dies waren die ersten allgemein verfügbaren Zeitschrittdaten, allerdings am Bedarf der Klimatechniker im Bauwesen orientiert, so dass die Einstrahlungswerte lange Zeit vor allem aus eher unsicheren Modellwerten bestanden.
- Die erste Version von MeteoNorm wurde 1995 als Tabellenwerk auf Papier für das Gebiet der Schweiz veröffentlicht, aus diesem Projekt hat sich die heute bekannte und anerkannte weltweite Datenbank von Einstrahlungs- und anderen Klimaparametern entwickelt.
- Eines der ersten (kostenfreien) Internet-Angebote wird mit PV-GIS seit 2005 von der Europäischen Union (durch das Forschungszentrum in Ispra) bereitgestellt. PV-GIS ist heute in Version 5 verfügbar und erfährt weiterhin Updates.
- Ein Teil der PV-GIS-Entwickler wechselte zur Firma GeoModel Solar und hat dort 2010 das kommerzielle Produkt SolarGIS auf den Markt gebracht. Dieses Angebot stellt heute ob seines Umfangs, seiner Genauigkeit und seiner Nutzerfreundlichkeit den State-of-the-Art dar – so dass sich mittlerweile auch der Anbieter in SolarGIS umbenannt hat.

Heutige Datensätze

Flächendeckende Daten der solaren Einstrahlung werden heute fast immer aus Satelliten-Fernerkundungsdaten abgeleitet. Dies geschieht bei den meisten Verfahren in zwei Schritten. Zunächst wird die Einstrahlung berechnet, die bei wolkenlosem Himmel verfügbar wäre. In diese Rechnung geht neben dem jahres- und tageszeitlich variablen Sonnenstand vor allem der aktuelle Atmosphärenzustand ein, hier sind der Wasserdampfgehalt und der Aerosolgehalt die wichtigsten Größen. Diese Atmosphärenparameter stammen aus verschiedenen Quellen mit räumlich und zeitlich geringerer Auflösung. Anfangs standen hier nur Monatsmittel aus langjähriger Beobachtung zur Verfügung, die besten heutigen Modelle nutzen tägliche Updates zum Atmosphärenzustand. Der aktuelle Bewölkungsgrad wird dann aus hochfrequenten und hochaufgelösten Wettersatellitenbildern ermittelt und mit dem Modell des Atmosphärenzustands kombiniert. Damit können heute Zeitreihen in 15-min-Schritten

und in Rasterweiten von etwa 1 km erzeugt werden. Ein ständiger Abgleich mit Bodendaten dient der Optimierung der Modelle und der Qualitätssicherung.

Neue Ansätze nutzen auch Reanalysedaten der heute gebräuchlichen numerischen Wettermodelle. Im normalen Betrieb zur Wetterprognose werden dort Millionen von Beobachtungen assimiliert. Das Ergebnis, die resultierenden Analysen, sind dreidimensionale, konsistente Beschreibungen des atmosphärischen Zustandes. Über die Jahre wird allerdings jedes operationelle Modell weiterentwickelt, deswegen ist eine Zeitreihe von operationellen Analysen nicht zeitlich konsistent. Reanalysen berechnen die Analysen einiger Jahre bis Jahrzehnte in der Vergangenheit unter Einbezug aller jetzt vorliegenden Beobachtungen mit einem modernen Modell noch einmal neu. Auch aus diesen Daten lassen sich dann Werte der solaren Einstrahlung am Erdboden ableiten.

Typische Fragen

In Anfragen oder Diskussionen über Einstrahlungsdaten kommen immer wieder vergleichbare Fragen auf:

- Wo gibt es die besten Daten?
- Wo gibt es die preisgünstigsten Daten?
- Wo gibt es aktuelle Daten?

Die wichtigste Frage scheint zunächst die nach der Qualität – besser bezeichnet mit der Unsicherheit – der Einstrahlungswerte zu sein. Unter „guten Daten“ werden oft am Boden gemessene Einstrahlungswerte verstanden, die auch als Referenzwerte zur Validierung von Fernerkundungsdaten dienen. Erwartet werden könnte, dass die Satellitendaten ebenso genau sind, aber zusätzlich flächendeckend bereitstehen. Ungeachtet der Messunsicherheit bei den Bodendaten gibt es jedoch ein Problem bei der Bewertung: ein Satellit liefert z.B. alle 15 Minuten einen Momentanwert für ein Flächenelement von 5 x 5 km², während die Bodenmessung einen zeitlichen Mittelwert für genau einen Messpunkt produziert. Ein Teil der statistischen Abweichungen zwischen Satelliten- und Bodendaten (insgesamt rund $\pm 20\%$ bei Stundenmittelwerten) lässt sich auf diesen „Vergleich von Äpfeln mit Birnen“ zurückführen.

Allerdings wurde schon 1999 von Zelenka u.a. nachgewiesen, dass Satellitendaten die bessere Quelle für ortsbezogene Einstrahlungswerte sind, sobald die nächste Bodenmessung mehr als 30 km entfernt ist [14]. Bei langfristigen Werten, insbesondere Jahressummen, sind die Fernerkundungsdaten noch klarer im Vorteil. Heute vertreten wir die Meinung, dass Jahressummen aus Satellitendaten mit Unsicherheiten von $\pm 3\%$ (in Mitteleuropa) präziser sind als Messungen kaum gewarteter Bodenstationen am selben Ort, wie sie oft bei großen PV-Installationen zu finden sind.

Unsicherheiten

Eine exzellente Übersicht und Analyse der Abweichungen verschiedener satellitenbasierter Einstrahlungsdatensätze gegenüber sehr guten Bodenmessdaten findet sich in den Arbeiten von Ineichen [3][4]. Die folgende Tabelle gibt hiervon nur einen kleinen Teil der Ergebnisse wieder, der auch die weiter unter besprochenen Datensätze betrifft.

Table 1: Vergleich verschiedener Datenquellen mit Bodenmessungen von G_{HOR} an 18 europäischen Standorten in den Jahren 2004 bis 2010. Die statistischen Kenngrößen wurden aus den prozentualen Angaben zur mittleren Abweichung (mean bias deviation MBD) von G_{HOR} der untersuchten Einzelstandorte in Ineichen ([3], Tabelle IV, S. 31) berechnet und sind in Prozent gegeben. Die Datenquellen sind nach der berechneten mittleren quadratischen Abweichung (root mean square difference RMSD) aufsteigend geordnet.

Datenquelle	MBD %	SD %	RMSD %
SolarGIS	-0,3	2,4	2,4
MeteoNorm 7	-2,4	2,5	3,5
PVGIS CM-SAF	+0,6	4,2	4,3
NASA SSE	-2,4	5,4	5,6

Für die Datenquellen SolarGIS und PVGIS CM-SAF liegt die mittlere Abweichung innerhalb von 1%. Diese Datenquellen weisen damit keine signifikante systematische Abweichung auf. Die deutlich beste Übereinstimmung mit den Bodenmessungen im Hinblick auf die Streuung der mittleren Abweichung an den einzelnen Standorten zeigt die Datenquelle SolarGIS: Standardabweichung (SD) und mittlere quadratische Abweichung weisen für diese Datenquelle die besten Werte auf.

Damit ist die minimale Unsicherheit von Jahressummen der Einstrahlung in heute verfügbaren Einstrahlungsdatensätzen bekannt: sie liegt bei „guten“ Datensätzen um $\pm 3\%$, kann aber auch $\pm 5\%$ und mehr erreichen. Die Unsicherheiten der weiter unten besprochenen Datensätze steigen demnach in der Reihenfolge SolarGIS – MeteoNorm – PVGIS – NASA-POWER (NASA SSE ist das Vorläufer-Angebot von POWER). Die Unsicherheit der Rasterdaten (und damit auch der Karten) des DWD ist vergleichbar mit der von SolarGIS – dem DWD stehen auf der Fläche Deutschlands vergleichsweise viele Bodenstationen zum Abgleich zur Verfügung.

Einen deutlich einfacheren Vergleich von wenigen, allerdings für den Endanwender in Deutschland relevanten Datensätzen haben die Autoren dieses Beitrags bereits auf dem PV-Symposium 2008 gezeigt [8]. Hier wurde für eine Reihe exemplarischer Standorte untersucht, wie groß die Abweichungen einzelner Datenquellen untereinander sein können – ohne „wahre“ Bodenmesswerte einzubeziehen. Diesem Vergleich von 2008 (Abbildung 2) stellen wir heute in Abbildung 3 eine aktualisierte Version gegenüber. Der neue Vergleich nutzt weniger und zum Teil andere Standorte, die jedoch in beiden Darstellungen von Nord nach Süd geordnet sind und die in Deutschland mögliche Spanne von Breitengraden jeweils vollständig abdecken.

Die Streuung der Werte aus den einzelnen Datenquellen hat sich in der neuen Betrachtung für die meisten Standorte etwas verringert. Gute (überarbeitete, qualitätsgesicherte) Datensätze passen zusammen, hier SolarGIS und DWD CDC. Weniger gute Datensätze zeigen auch heute untereinander Abweichungen in einer Größenordnung, die vor 10 Jahren schon erreicht wurde.

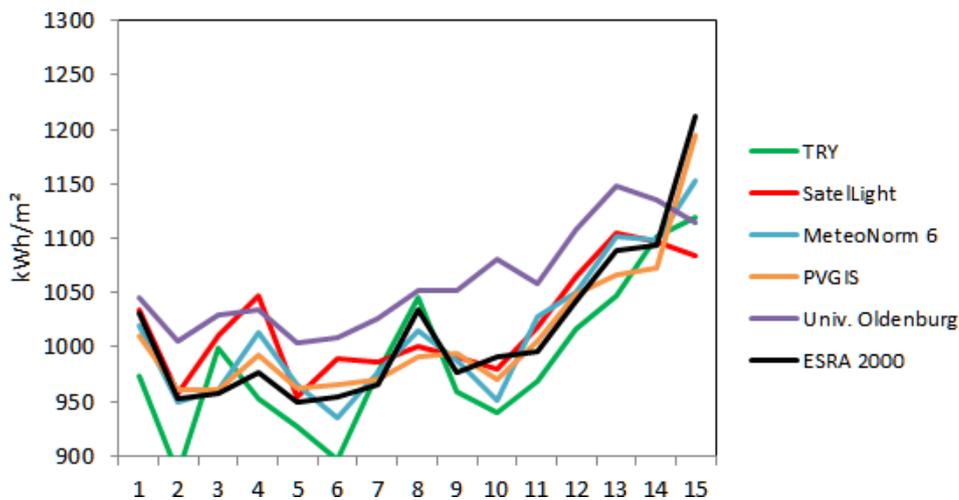


Abbildung 2: Langjährige Mittelwerte der jährlichen Globalstrahlungssummen aus verschiedenen Datenquellen für Deutschland aus der Veröffentlichung von 2008. Die Standorte sind nach Breitengrad absteigend von Nord nach Süd geordnet.

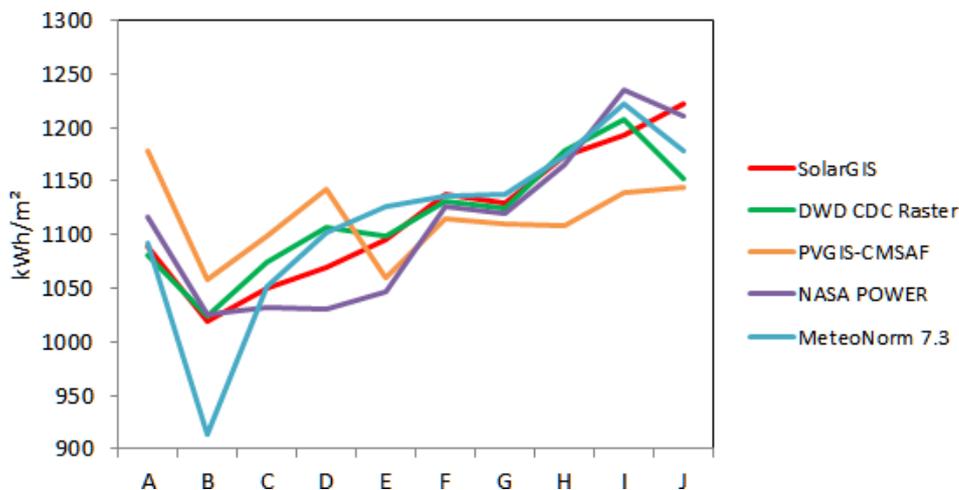


Abbildung 3: Langjährige Mittelwerte der jährlichen Globalstrahlungssummen aus verschiedenen aktuellen Datenquellen für Deutschland. Die verglichenen Zeiträume liegen nahe beieinander: SolarGIS, DWD, NASA jeweils 2008–2017, PVGIS-CMSAF 2007–2016, MeteoNorm 1991–2010. Die Standorte sind nach Breitengrad absteigend von Nord nach Süd geordnet.

Alle bis hier betrachteten Unsicherheiten gelten für die jeweils genannten historischen Referenzzeiträume. Beim Übergang zu einem Prognosezeitraum (üblicherweise die kommenden 20 oder 25 Betriebsjahre eines PV-Kraftwerks) spielen langfristige Trends der Einstrahlung eine wichtige Rolle. Solche Trends und ihre Auswirkungen auf die Unsicherheiten in der Abschätzung der zukünftig erwartbaren Einstrahlung sind z.B. bei Müller u.a. [9] beschrieben.

Für Deutschland zeigt sich eine Abnahme der solaren Einstrahlung bis etwa 1985, während die jährlichen Einstrahlungssummen ungeachtet der Jahr-zu-Jahr-Schwankungen danach wieder merkbar zunehmen. In verschiedenen Regionen der Erde werden dabei verschiedene Änderungsraten (und Vorzeichen) beobachtet, aber selbst innerhalb des Gebiets der Bundesrepublik Deutschland zeigen sich deutliche Unterschiede in der Ausprägung dieser langfristigen Trends.

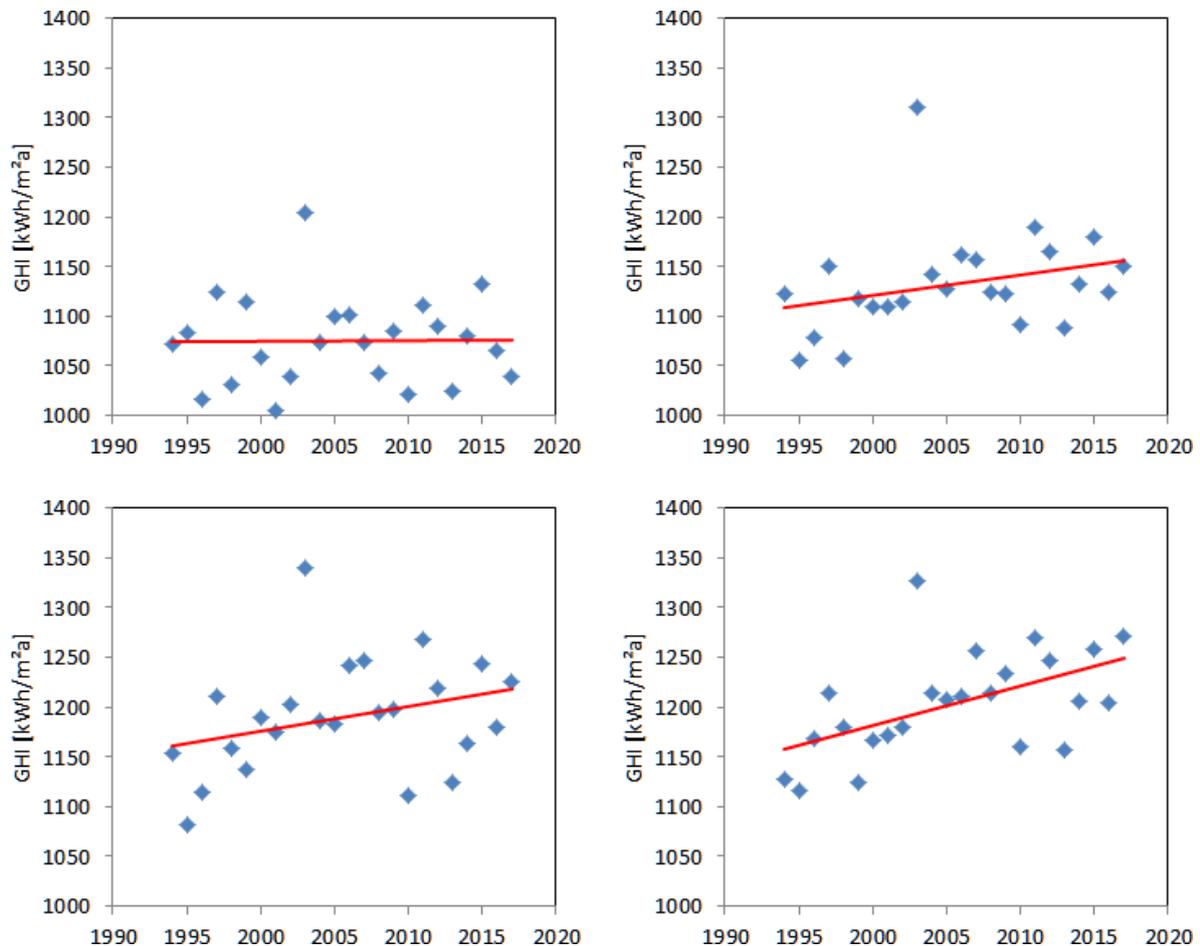


Abbildung 4: Trends der Einstrahlung auf eine horizontale Fläche in Deutschland. Die Daten der 24 Jahre von 1994 bis 2017 stammen von SolarGIS. Links oben Lindenberg (+0,1% pro Dekade), rechts oben Würzburg (+1,8% pro Dekade), links unten Hohenpeißenberg (+2,1% pro Dekade), rechts unten Konstanz (+3,3% pro Dekade).

Müller u.a. [9] empfehlen daher, den Einstrahlungs-Mittelwert der jeweils letzten 10 Jahre als Prognosewert für PV-Ertragsgutachten anzusetzen. Selbst dann können die beobachteten Trends die Gesamtunsicherheit um weitere 3% erhöhen: 3% Zunahme pro Dekade führen über 20 Betriebsjahre zu einer mittleren Erhöhung des Einstrahlungsniveaus von rund 3% – diese Unsicherheit hat damit dieselbe Größenordnung wie die oben beschriebene Unsicherheit der historischen Datensätze.

Kosten

Neben der Qualität der Daten gibt es eine Reihe weitere Faktoren, die wahlweise Kosten beim Datenanbieter erzeugen bzw. erhöhen oder aber Aufwand beim Nutzer generieren. Einstrahlungsdaten sollen komplett, qualitätsgesichert, validiert und einfach nutzbar sein. Mit öffentlichen Mitteln erfasste Wetterdaten werden oft kostenfrei bereitgestellt, können (und müssen – je nach ursprünglichen Zweck der Erfassung) aber nicht alle genannten Bedingungen erfüllen. So liegen z.B. manche Daten im Climate Data Center des DWD in (Zeit-) Reihen von großen Tabellen vor, deren Zeilen- und Spaltennummern den Bezug zum Gauss-Krüger-Koordinatensystem der Landesvermessung herstellen. Den richtigen Rasterpunkt zu einem Paar von geographischen Koordinaten zu finden, bleibt Aufgabe des Nutzers. Ebenso kann der Umgang mit Datenlücken, die zunächst bei allen Arten von beobachteten Zeitreihen auftreten, merkbar Aufwand verursachen. In diversen Datensätzen (z.B. den Tageswerten von NASA POWER) werden fehlende Werte mit „-999“ markiert – eine einfache Summe über 365 Tage kann dann unerwartete Ergebnisse liefern.

Sollen Klimaparameter aus mehr als einer Datenquelle kombiniert werden, z.B. Zeitreihen der Einstrahlung um solche der Lufttemperatur ergänzt werden, bringen möglicherweise verschiedene Mittelungsintervalle und Zeitstempel-Konventionen weitere Herausforderungen mit sich, bis beide Datenreihen tatsächlich synchron vorliegen. Kommerzielle Anbieter führen verschiedene Wetterparameter zusammen, behandeln Datenlücken, prüfen und dokumentieren, wobei sich dieser Aufwand bei professionellen Projekten schnell bezahlt macht.

Anbieter

Dieser Abschnitt stellt nur eine Auswahl aus zahlreichen verfügbaren Datenquellen vor. Hierbei legen wir Wert auf Praktikabilität: es werden nur flächendeckende Datensätze vorgestellt, keine Sammlungen von Stationsdaten. Die Daten sollen mindestens einen Zeitraum von 10 Jahren abdecken, das letzte Update soll möglichst nicht älter als 5 Jahre sein. Und die Daten sollen einfach verfügbar und nutzbar sein. Die folgenden Tabellen beschreiben 6 Datensätze in folgenden Kategorien:

- Verfügbare Parameter
- Räumliche Abdeckung und Auflösung
- Zeitliche Periode und Auflösung
- Bezugsquelle und Preise
- Beschreibung, Aufwand der Nutzung

DWD (Karten)

Parameter	G_{HOR} , D_{HOR} , I_{NORM}
Räumlich	Karten für die Bundesrepublik Deutschland
Zeitlich	Einzeljahre und Monate von 1991 bis 2018, 30-Jahres-Jahres- und Monatsmittel (1981–2010), Abweichungen einzelner Jahre vom 30-Jahres-Mittel
Bezug & Preise	www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html , kostenfrei
Beschreibung	Basis der Einstrahlungskarten des Deutschen Wetterdienstes DWD sind die Bodenwerte von Globalstrahlungs-Messstationen und Satellitendaten von METEOSAT. Daraus werden für Rasterpunkte in Deutschland im Abstand von 1 km Globalstrahlungswerte bestimmt. Diese Ergebnisse werden in Karten grafisch dargestellt.

DWD (Climate Data Center CDC)

Parameter	G_{HOR} , D_{HOR} , I_{NORM} , T_{LUFT} (mittel, max, min), Sonnenscheindauer, Anzahl der Tage mit Schneebedeckung u.v.a.
Räumlich	Gebiet der Bundesrepublik Deutschland im 1 km x 1 km Raster
Zeitlich	1991 bis Vormonat / Vorjahr in Monatsmittelwerten / Summen
Bezug & Preise	ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/ , kostenfrei
Beschreibung	<p>Der Deutsche Wetterdienst stellt hier seinen Klimadatenbestand zur freien Nutzung bereit. Der Zugang zu diesen sehr umfangreichen Datenmengen erfolgt über einen anonym nutzbaren FTP-Dienst. Die Daten stehen in der Regel in der Form bereit, wie sie innerhalb und zwischen den nationalen Wetterdiensten ausgetauscht werden; die Daten werden nicht gesondert aufbereitet. Vorkenntnisse im Umgang mit großen Datenmengen und grundlegende meteorologische Vorkenntnisse sind hier von Vorteil. Auf dem CDC-FTP-Server werden</p> <ul style="list-style-type: none">• gemessene Parameter an DWD-Stationen und abgeleitete Parameter an den Stationsstandorten,• Rasterfelder für Deutschland und• Mittelwerte für die einzelnen Bundesländer und für Gesamtdeutschland <p>in stündlicher, täglicher, monatlicher, jährlicher oder vieljähriger Auflösung zur Verfügung gestellt. Solarstrahlungs-Rasterdaten (1 x 1 km²) umfassen die Globalstrahlung (monatliche, jährliche und vieljährige Mittel), die diffuse Strahlung (monatlich, jährlich) und die direkte Strahlung (monatlich, jährlich), diese sind alle aus Satellitendaten und Bodenmessungen abgeleitet.</p>

PVGIS (CM-SAF-Datensatz)

Parameter	G_{HOR} , D_{HOR} , T_{LUFT} , V_{WIND} (10 m), Sonnenhöhe
Räumlich	Europa und Nordafrika in 1,5 Bogenminuten (etwa 2,5 km)
Zeitlich	2007 bis 2016 in Stunden-Intervallen
Bezug & Preise	http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis.html , kostenfrei
Beschreibung	PVGIS ist eine Webanwendung, die es dem Benutzer ermöglicht, Daten über die Sonneneinstrahlung für (fast) beliebige Standorte in Europa und Afrika zu erhalten. Die Nutzung ist kostenlos, ohne Einschränkungen, wofür die Ergebnisse verwendet werden können, und ohne Registrierung. Neben dem reinen Datenabruf kann z.B. die Energieproduktion von PV-Systemen berechnet werden.

NASA POWER

Parameter	G_{HOR}
Räumlich	Weltweite Abdeckung im $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -Raster, Werte der Einstrahlung jedoch nur mit $1^\circ \times 1^\circ$ Auflösung
Zeitlich	1984–Vormonat (oder Vorwoche) als Tagessummen
Bezug & Preise	https://power.larc.nasa.gov/ , kostenfrei
Beschreibung	Die meteorologischen Parameter in POWER Release 8 basieren auf einem Reanalysemodell des Goddard Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). Die Werte sind in verschiedener zeitlicher Auflösung erhältlich. Fehlende Einzelwerte sind mit „-999“ belegt, was z.B. bei der Bildung von Jahressummen aus Tageswerten beachtet werden muss.

MeteoNorm

Parameter	G_{HOR} , D_{HOR} , I_{NORM} , Sonnenstand, T_{LUFT} , V_{WIND} , u.a.
Räumlich	Weltweit, Standortdaten werden durch Interpolation gewonnen
Zeitlich	1991–2010 / 1996–2015 für Strahlungsdaten.
Bezug & Preise	https://meteonorm.com/ Einzellizenz: CHF 675 Einzelabfrage (entspricht einem Jahr Stundenwerte): CHF 200 weitere Preise: https://meteonorm.com/kaufen#lizenzen
Beschreibung	<p>MeteoNorm erzeugt repräsentative typische Jahre für jeden Standort auf der Erde. Es war das erste umfassende Werkzeug, welches Nutzer aus dem gesamten Bereich der Solarenergienutzung unterstützt. Auch heute liefert MeteoNorm seine Daten in den mit Abstand meisten Formaten für verschiedene Simulationsprogramme. MeteoNorm enthält ein globales Geländemodell mit 90 x 90 m² Auflösung sowie Werkzeuge für die Digitalisierung benutzerdefinierter Horizontlinien.</p> <p>Ein neu aufgebautes Archiv enthält Stundenwerte von 2010 bis heute und wird regelmäßig aktualisiert (aktuelle Monatswerte ab dem 8. Tag des Folgemonats). Diese Zeitreihen können direkt aus der MeteoNorm-Software heruntergeladen werden.</p>

SolarGIS

Parameter	G_{HOR} , D_{HOR} , I_{NORM} , Sonnenstand, T_{LUFT} , V_{WIND} , u.a.
Räumlich	Weltweit alle Orte zwischen 60° N und 50° S bei 250 m x 250 m Auflösung.
Zeitlich	Zeitreihen von 1994 bis zum Vormonat in 15-min-Schritten.
Bezug & Preise	www.solargis.info Einzelabfrage (langjährige 15-min-Zeitreihe für einen Ort): EUR 1.200 viele weitere Preise: https://solargis.com/pricing/evaluate/ u.a.
Beschreibung	Angebot für professionelle Anwender. Sehr nutzerfreundliche Website, umfassende Dokumentation bei jedem Datensatz. Daten für andere Weltregionen können andere zeitliche Abdeckungen und Auflösungen haben. Neben den Zeitreihen existiert ein vielseitiges Angebot von freien Einstrahlungskarten für fast alle Länder bis zu speziellen kundenspezifischen Datensätzen.

Fazit und Empfehlungen

Seit 40 Jahren profitiert die Solarstrom-Branche von der kontinuierlichen Entwicklung im Bereich der Einstrahlungsdatensätze. Der aktuelle Stand der Technik zeigt sich in den folgenden Fakten:

- Die Jahressummen von State-of-the-Art-Datensätzen zeigen in Vergleichen mit Bodenmesswerten Unsicherheiten von minimal $\pm 3\%$ – dies ist ein großer Fortschritt im Vergleich zu den groben Isolinien in den ersten Einstrahlungskarten.
- Die Jahres-Einstrahlungssummen verschiedener Datensätze können auch heute noch um bis zu 5% voneinander abweichen – die Auswahl preiswerterer Angebote kann daher die Unsicherheit erhöhen.
- Die Trends in der Solarstrahlung sind regional unterschiedlich und erschweren die Prognose eines Werts für die kommenden 10, 20 oder 30 Jahre. Auch diese Trends können die Unsicherheit um bis zu 3% erhöhen.
- Neben der Qualität der Daten gibt es eine Reihe weiterer Faktoren, die wahlweise Kosten beim Datenanbieter erzeugen bzw. erhöhen oder aber Aufwand beim Nutzer generieren.

Verschiedene Nutzergruppen können von der Diversität des Angebots profitieren, in dem sie wahlweise Kosten oder eigenen Aufwand sparen und den Aufwand auch ins Verhältnis zur erreichbaren Unsicherheit setzen.

Für die private Ertragsabschätzung einer typischen Hausdach-Anlage mit 5 bis 15 kW_p Leistung sollte das kostenfreie PVGIS ein ausreichendes Werkzeug sein, es kann bereits die Anlagenausrichtung und die wichtigsten Anlageneigenschaften berücksichtigen. Installateure, die mehrere und auch größere Anlagen errichten, nutzen oft ein Simulationsprogramm wie PV*SOL oder PVsyst, welches wiederum auf Daten von MeteoNorm zurückgreift. Bei wirklich großen PV-Kraftwerken können die standortspezifischen Datensätze von SolarGIS die Unsicherheit noch merkbar verringern, Investoren oder Finanzierer legen dann auch Wert auf unabhängige Ertragsgutachten, die auf dieser Datenbasis erstellt werden.

Für die Betriebsüberwachung privater kleiner Anlagen können – neben den Anzeigen der Wechselrichter – gut die monatlichen (Differenz-) Karten des DWD herangezogen werden. Ob der letzte Monat ein guter oder schlechter Solarmonat war, lässt sich mit diesen Karten kostenfrei ermitteln. Bei größeren Anlagen gewinnt die technische Betriebsüberwachung durch die Wechselrichter oder durch zusätzliche Gerätschaft an Bedeutung, da jeder Teilausfall Ertragsverlust bedeutet. Ob eine fehlerfrei laufende Anlage auch die erwarteten Erträge liefert, kann dann mit den DWD-Karten oder den monatsaktuellen Daten von MeteoNorm zusätzlich bewertet werden. Manche Monitoring-Portale der Wechselrichterhersteller nutzen auch die Betriebsdaten benachbarter Anlagen für eine zeitnahe Ertragskontrolle. Betreiber großer PV-Kraftwerke können auf spezielle Angebote z.B. von SolarGIS zurückgreifen, die standortbezogen die Einstrahlung der jeweils letzten Tage liefern. Allerdings werden Fernerkundungsdaten bei kleinen Zeiträumen unsicherer, so dass sich hier auch eigene Messstationen am Anlagenstandort lohnen.

Die Daten von NASA POWER eignen sich ob der groben räumlichen Auflösung nicht für ernsthafte Ertragsabschätzungen in Deutschland oder Europa, der Reiz dieses kostenfreien

Datensatzes liegt vor allem in seiner globalen Abdeckung. Auf der anderen Seite bestehen die freien DWD-CDC-Daten durch ihre hohe räumliche Auflösung und ihren Umfang, sind aber eher Forscherinnen und Entwicklern als „normalen“ PV-Anlagenbetreibern nützlich.

Literatur

- [1] K. Blümel, E. Hollan, A. Jahn, M. Kähler, R. Peter. Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland. Schlussbericht BMFT-FB-T 86-051 zum Forschungsvorhaben 03E-5280-A, 1986.
- [2] DWD: Dokumentation zum FTP-Zugang zum Climate Data Center:
ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/Liesmich_intro_CDC-FTP.pdf
- [3] P. Ineichen: Long term satellite hourly, daily and monthly global, beam and diffuse irradiance validation. Interannual variability analysis. Universität Genf, 2013. Zugriff unter <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:29606>.
- [4] P. Ineichen: Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation. Energy Procedia 48 (2014) 1586–1596.
- [5] Kommission der Europäischen Gemeinschaften, W. Palz (Hrsg.): Atlas über die Sonnenstrahlung in Europa. W. Grösschen Verlag, Dortmund, 1979. Download unter <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a86106b6-5083-4efa-beaa-695b3f1fb97d/language-de>
- [6] Kommission der Europäischen Gemeinschaften, W. Palz (Hrsg.). Atlas über die Sonnenstrahlung Europas, Band 1: Globalstrahlung auf die horizontale Empfangsebene, Band 2: Global- und Diffusstrahlung auf vertikale und geneigte Oberflächen. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1984.
- [7] H. Lund. Test reference years TRY. Report, Commission of the European Communities DG XII, Brussels, 1985.
- [8] B. Müller, Ch. Reise, G.A. Seco, E. Lorenz: Diffuse Verhältnisse bei der Einstrahlung? Über die Eingangsdaten von Ertragsprognosen. 23. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2008.
- [9] B. Müller, M. Wild, A. Driesse, K. Behrens: Rethinking solar resource assessments in the context of global dimming and brightening. Solar Energy 99 (2014), 272–282.
- [10] W. Palz, J. Greif, Commission of the European Communities (Hrsg.). European Solar Radiation Atlas, Solar Radiation on Horizontal and Inclined Surfaces. Springer, Berlin, 1996.
- [11] J. Polo, S. Wilbert, J.A. Ruiz-Arias, R. Meyer, C. Gueymard, M. Súrri, L. Martín, T. Mieslinger, P. Blanc, I. Grant, J. Boland, P. Ineichen, J. Remund, R. Escobar, A. Troccoli, M. Sengupta, K.P. Nielsen, D. Renné, N. Geuder, T. Cebecauer: Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. Solar Energy 132 (2016) 25–37.

- [12] K. Scharmer, J. Greif (Hrsg.). The European Solar Radiation Atlas. Vol. 1: Fundamentals and Maps; Vol. 2: Database and Exploitation Software. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 2000.
- [13] M. Sengupta, A. Habte, C. Gueymard, S. Wilbert, D. Renné, T. Stoffel: Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition. Technical Report NREL/TP-5D00-68886, December 2017.
- [14] A. Zelenka, R. Perez, R. Seals, D. Renné: Effective Accuracy of Satellite-Derived Hourly Irradiances. Theoretical and Applied Climatology, 62 (1999)199–207.