

Quantifizierung von Einstrahlungsüberhöhungen in hoch aufgelösten DWD-Datensätzen für verschiedene Standorte in Deutschland

Mike Zehner⁽¹⁾⁽³⁾, Mario Moll⁽¹⁾, Stefan Thaler⁽¹⁾, Oliver Schrank⁽¹⁾, Matthias Hartmann⁽¹⁾,
Bernhard Mayer⁽²⁾, Thomas Betts⁽³⁾, Ralph Gottschalg⁽³⁾, Klaus Behrens⁽⁴⁾,
Wolfgang Riecke⁽⁴⁾, Werner Knaupp⁽⁵⁾, Bodo Giesler⁽⁶⁾, Gerd Becker⁽¹⁾, Oliver Mayer⁽⁷⁾

⁽¹⁾Hochschule München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Arbeitsgruppe PV-Systeme im Studiengang Regenerative Energien
Lothstrasse 64, D-80335 München, Tel: +49 (0)89 1265-4412, mike.zehner@hm.edu

⁽²⁾Ludwig-Maximilians-Universität, Lehrstuhl für Experimentelle Meteorologie
Theresienstrasse 37, D-80333 München

⁽³⁾Centre for Renewable Energy Systems Technology (CREST), Department of Electronic
and Electrical Engineering, Loughborough University, UK

⁽⁴⁾Deutscher Wetterdienst, OT Lindenberg Richard-Aßmann-Observatory Am Observatorium 12, 15848 Tauche
bzw. Deutscher Wetterdienst, Klimabüro Hamburg, Bernhard-Nocht-Straße 76, D-20359 Hamburg

⁽⁵⁾PV-plan, Probststrasse 15, D-70567 Stuttgart

⁽⁶⁾Siemens AG, I IA CE S PV, Würzburger Strasse 121, D-90766 Fürth

⁽⁷⁾GE Global Research, Freisinger Landstrasse 50, D-85748 Garching bei München

1 Motivation und Zielsetzung

Bei der europaweiten Analyse hoch aufgelöster Messdatensätze des Baseline Surface Radiation Networks (BSRN) wurden an allen untersuchten Standorten deutliche und wiederholt auftretende Einstrahlungsspitzen (Irradiance Enhancement - IE) festgestellt [1]. Diese Überhöhungen sind auch bei mediterranen Standorten in den Messdaten nachweisbar. Anhand synoptischer Informationen lassen sich die Überhöhungen in den Einstrahlungsverläufen mit charakteristischen Wolkengattungen in Verbindung bringen. Erklären lassen sich die Überhöhungen über additive Einstrahlungseinträge durch Reflektion und Streuung. Ein Nachweis der Überhöhung funktioniert, indem man für einzelne Standorte jeweils Tagesgänge oder Verläufe für die Grenzwerte der Strahlungsdichte bei clear sky Bedingungen als Soll-Kurve rechnet [2]. Alle Einstrahlungsleistungen, die über diesen Grenzwerten liegen, können als IE-Ereignisse charakterisiert werden. Alternativ lassen sich einzelne Grenzwerte oder Tagesgänge an Grenzwerten auch aus Messdaten ableiten. Für München-Riem (PV-Anlage Neue Messe München) wurde beispielsweise in hoch aufgelösten Messdatensätzen an clear sky Tagen in den Jahren 2008 und 2009 ein Maximalwert der Einstrahlungsdichte von 930 W/m^2 (horizontal) gemessen [3], [4]. In den Messdaten beobachtet man Überhöhungen der Strahlungsleistung über diesem exemplarischen Referenzwert, die auch über etliche Minuten anstehen können. In den bisherigen Analysen wurden als Referenz typische Tagesgänge der Globalstrahlung (clear sky Tage) mit dem Programm libRadtran [5] modelliert.

Der IE-Energieanteil über gerechneten clear sky Werten für den BSRN Standort Lindenberg bewegt sich, bezogen auf den jährlichen Energieeintrag der Einstrahlungsdichte über 10 Jahre, in einem Bereich von 1,26 % bis 2,05 % (Mittelwert 1,6 %). Betrachtet man dabei nicht nur die Energie, die über die Theoriewerte hinaus ragt, sondern die gesamte IE-Einstrahlungsenergie, werden Energieanteile von 22,19 % bis 33,14 % erreicht (Mittelwert 25,3 %). Einstrahlungsüberhöhungen sind fast über die komplette Bandbreite der Strahlungsleistungen identifizierbar. PV-Module liefern unter diesen IE-Betriebsbedingungen das bis zu 1,3-fache der STC-Nennleistung. [1]

Der Deutsche Wetterdienst zeichnet deutschlandweit an 26 verschiedenen Stationen im Bundesgebiet auch hoch aufgelöste energiemeteorologische Messdatensätze (Minutenmittelwerte) zusammen mit synoptischen Informationen auf. [6] Damit können die bisherigen IE-Untersuchungen für Deutschland flächendeckender durchgeführt werden. Auf Basis verschiedener Kriterien und mit Hilfe von Klimazonen- und Einstrahlungskarten wurden zunächst für Deutschland 16 unterschiedliche Referenzstandorte ausgewählt. Bild 1 zeigt die 26 DWD-Stationen mit zugehörigen Stationskennungen. Die Referenzstationen sind mit orange eingefärbten Kreisen gekennzeichnet. Deren Datensätze werden im Hinblick auf Einstrahlungsüberhöhungen für den Zeitraum 2007 bis 2010 genauer analysiert.

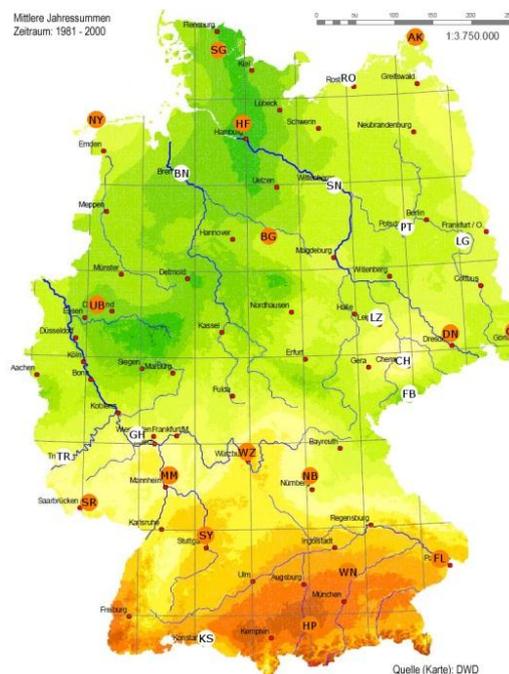


Bild 1: Dargestellt sind in der Globalstrahlungskarte des DWD mit langjährigen mittleren Energieeinträgen der Einstrahlungsdichte (von 1981 bis 2000) die 26 verschiedenen Messstationen des DWD mit hochaufgelösten Wetterdatensätzen. Die Grafik zeigt auch in orange die 16 nach verschiedenen Kriterien ausgewählten Messstationen des DWD, die als Referenzstandorte zur Untersuchung der Einstrahlungsüberhöhungen verwendet werden.

2 Analyse des IE – Effekts für die 16 Referenzstandorte

Bild 2 zeigt typische Tagesgänge für einen exemplarischen Irradiance Enhancement Referenztag (30. Juli 2010) am Standort Braunschweig. Der IE-Effekt wird in seiner Wirkung auf den exemplarischen Tagesgang der Einstrahlungsdichte (hellblaue Kurve) in Intensität, Dauer und Häufigkeit anschaulich sichtbar. Gegenübergestellt wird der Tagesgang (rot) des mit dem Programm libRadtran [5] gerechneten clear sky Tagesprofils. Die IE-Ereignisse sind in den hellblauen Kurvenanteilen über der roten Referenzkurve erkennbar. Der Tagesgang der Diffusstrahlung ist in dunkelblau dargestellt. Der Datensatz der Referenzprofile wurde für jeden auszuwertenden Standort mit libRadtran gerechnet. Zur gezielten und komfortablen Auswertung der umfangreichen Datensätzen wurden Werkzeuge in MATLAB entwickelt. Auswertungsgrafiken wie die exemplarischen Bilder 2 bis 5 sind automatisiert abrufbar.

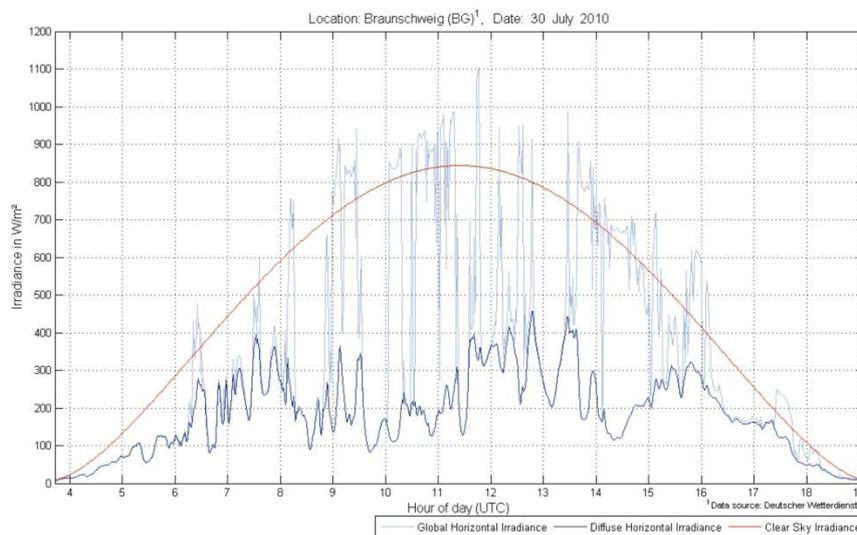


Bild 2: Zu sehen ist am Standort Braunschweig der Tagesgang der Globalstrahlung (in hellblau) für einen exemplarischen IE-Referenztag (30. Juli 2010). Die rote Kurve zeigt das Profil des als Referenz dienenden und mit libRadtran dagegen gerechneten clear sky Tages. IE-Ereignisse zeigen sich in hellblauen Kurvenanteilen über der roten Soll- und Referenzkurve.

Wie kann man eine Einstrahlungsüberhöhung quantifizieren? Dies lässt sich in Bild 2 kurz darstellen. Nachfolgend werden jeweils zwei Zahlenwerte verwendet. Sobald ein Einstrahlungsereignis dem IE-Effekt zugeordnet wird (Wert liegt über dem clear sky Wert) wird sowohl dessen absoluter Wert verwendet, als auch der Differenzbetrag zum CS. Bild 3 zeigt die Häufigkeiten der IE-Überhöhungen klassifiziert nach Ereignisdauer für vier verschiedene Standorte und für die Jahre von 2007 bis 2010. Von Nord nach Süd lässt sich eine Abnahme der IE-Ereignisse beobachten. Bild 4 zeigt in einer weiteren Analyse für die vier Standorte und denselben Zeitraum wie in Bild 3 den jährlichen Energieeintrag und die IE-Anteile am Energieeintrag für die zwei IE-Quantifizierungsdefinitionen.

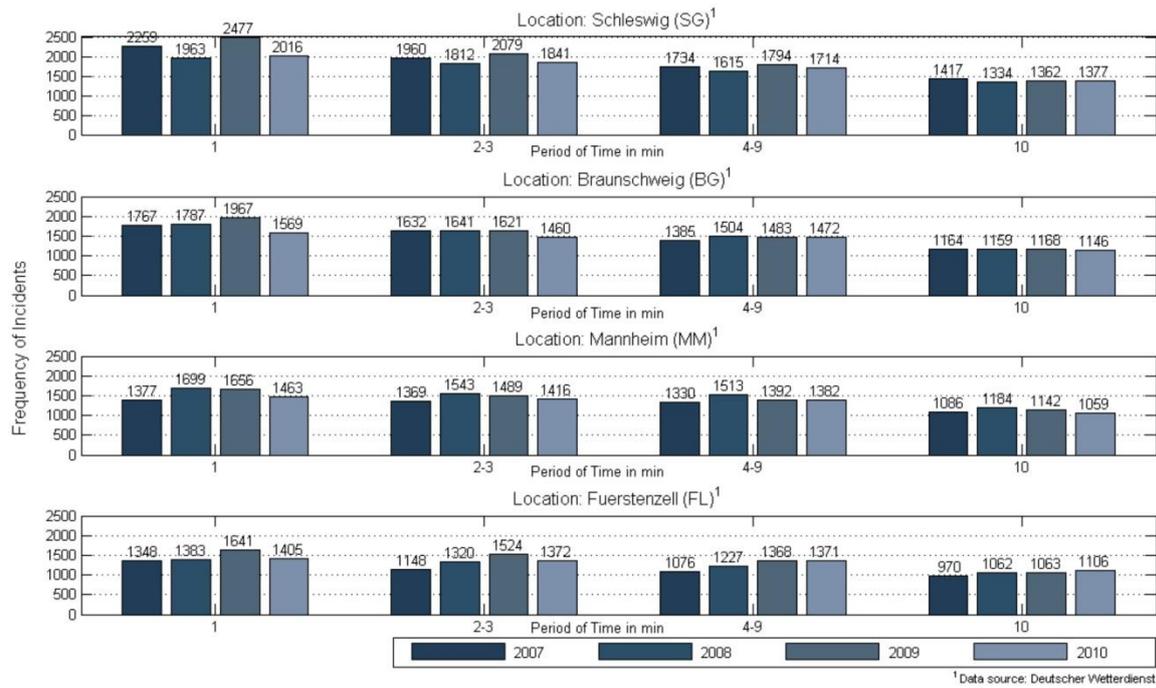


Bild 3: Die Grafik zeigt die Häufigkeitsverteilung der IE-Ereignisse klassifiziert nach Ereignisdauer für verschiedene Standorte und für die vier Jahre von 2007 bis 2010. Für die Darstellung wurden vier exemplarische Standorte (von Nord nach Süd) ausgewählt. Für die vier Jahre lässt sich nach Richtung Norden eine Zunahme der IE-Ereignisse beobachten.

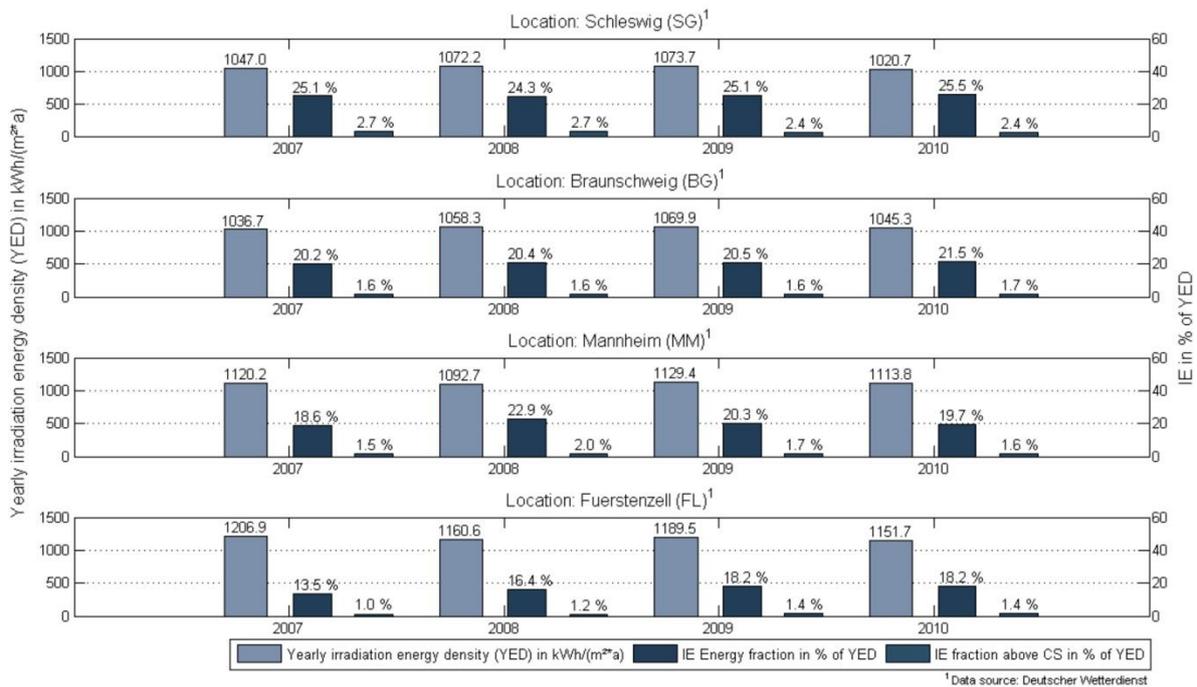


Bild 4: Die Grafik zeigt eine weitere Analyse für die vier Standorte und denselben Zeitraum aus Bild 3. Für jedes Jahr und jeden Standort zeigt der jeweils linke Balken den jährlichen Energieeintrag. Der jeweils mittlere (rechte) Balken benennt den IE-Anteil am Energieeintrag bei der Verwendung der absoluten Strahlungswerte (Strahlungswerte über dem CS-Anteil).

3 Sichtbarkeit des IE-Effekts in den Diffus- und Direktstrahlungsanteilen der Messdatensätze am Beispiel Braunschweig

Ein schon in [2] gezeigter interessanter Zusammenhang zum Verständnis des IE-Effekts lässt sich in den DWD-Messdatensätzen mit Hilfe einer weiteren Grafik nochmals belegen. Sichtbar wird die Wirkung der IE-Ereignisse auf die Diffus- und Direktstrahlungsanteile bei Betrachtung der Relation der Strahlungsanteile zum clear sky Index k_c . Der Quotient von k_c ist definiert (1), als Verhältnis der am Boden, horizontal gemessenen Globalstrahlung G_{hor} zu der gerechneten [5] Globalstrahlung G_{clear} auf die Horizontale bei clear sky Bedingungen [7]:

$$k_c = \frac{G_{hor}}{G_{clear}} \quad (1)$$

Die gerechneten Werte der Globalstrahlung G_{clear} sind zeitabhängige Ergebnisse spezifischer atmosphärischer Bedingungen des Strahlungstransfers. Durch die Division der am Boden gemessenen Globalstrahlung durch die gerechneten Globalstrahlung G_{clear} , bekommt k_c auch eine Aussage zur Wettersituation für eingeschränkte Bereiche der Sonnenhöhe. Bild 5 zeigt den exemplarischen Verlauf von Global-, Direkt- und Diffusstrahlung (Braunschweig, 2009) über dem clear sky Index k_c für einen eingeschränkten Bereich der Sonnenhöhe.

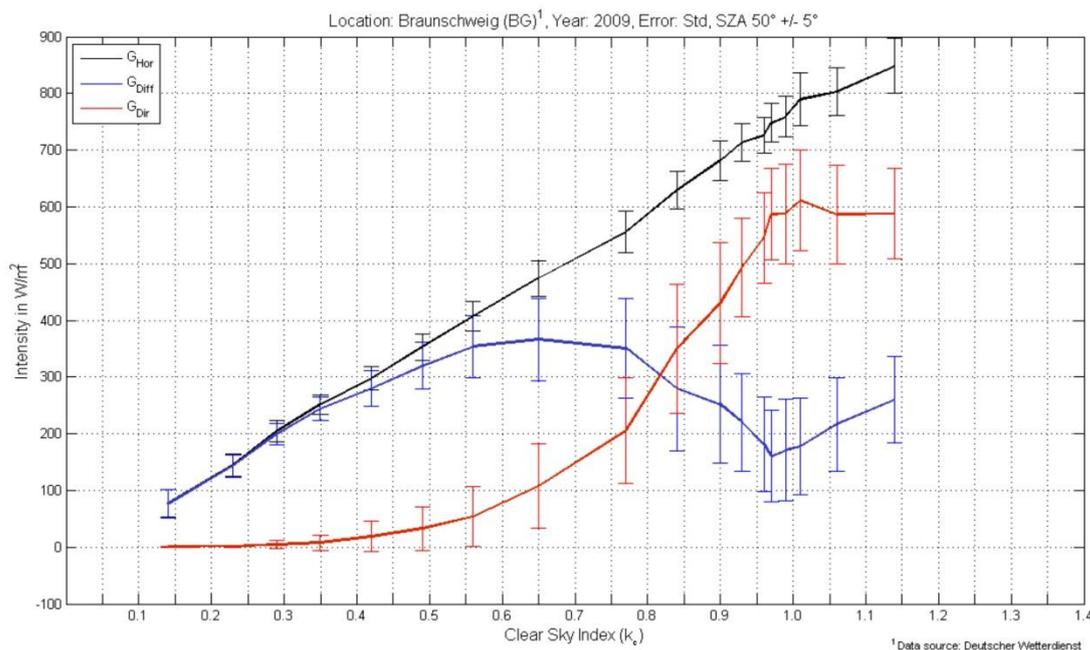


Bild 5: Exemplarischer Verlauf der Globalstrahlung (schwarz) in Horizontalebene (für das Jahr 2009 am Standort Braunschweig) und der Direkt- (rot) und Diffusstrahlungsanteile (blau) über dem clear sky Index k_c für eine Sonnenhöhe von $50^\circ \pm 5^\circ$. Gut zu sehen ist wie der Direktstrahlungsanteil mit einem clear sky Index von 1,0 ein Maximum erreicht und danach konstant bleibt. Die weitere Zunahme in der Globalstrahlung erfolgt ab diesem clear sky Index nur noch über additive Einträge in der Diffusstrahlung.

Bei $k_c = 1$ hat man unbedeckten Himmel und einen minimalen Diffusanteil. Entsprechend der Logik des Quotienten nimmt bei abnehmendem clear sky Index k_c , der Bewölkungsgrad und damit der Diffusstrahlungsanteil zu - sowie der Direktstrahlungsanteil ab. Spannend ist auch die Betrachtung der Situation der Einstrahlungsüberhöhung. Der clear sky Index k_c nimmt dabei definitionsgemäß Werte über 1 an. Der Direktstrahlungsanteil behält das bei $k_c = 1$ erreichte Maximum und die weitere Zunahme in der Globalstrahlung erfolgt ab diesem clear sky Index nur noch über additive Einträge in der Diffusstrahlung (vgl. [2]).

4 Zusammenfassung

Einstrahlungsüberhöhungen sind ein deutschlandweit, an allen untersuchten Stationen nachweisbarer Teil unseres Wettergeschehens und sollten bei der Auslegung von PV-Anlagen berücksichtigt werden. Die IE-Ereignisse sind in allen untersuchten hoch aufgelösten meteorologischen Datensätzen (Minutenmittelwerte) sehr gut darstellbar. Entgegen bisheriger Annahmen lässt sich in den Datensätzen des DWD eine Zunahme der Ereignisse von Süd nach Nord beobachten. Der Anteil der Energiemenge über clear sky (in Absolutwerten) beträgt 1,2 % (16,2 %) für Fürstenzell. Für Schleswig liegen die Werte bei 2,6 % (25 %). In Grafiken zur Relation der Strahlungsanteile zum clear sky Index k_c lässt sich der Verlauf der IE-Ereignisse in den Diffus- und Direktstrahlungsanteile sehr anschaulich darstellen.

5 Danksagung

Danke an Elke Lorenz (Uni Oldenburg) für die Diskussionen zu clearness und clear sky Index.

6 Referenzen

- [1] Zehner M., Weigl T., Hartmann M., Thaler S., Schrank O., Czakalla M., Mayer B., Betts T.R., Gottschalg R., Behrens K., König Langlo G., Giesler B., Becker G., Mayer O., Energy Loss Due to Irradiance Enhancement, 26th EU PVSEC, Hamburg (Germany) 2011,
- [2] Zehner M., Weigl T., Weizenbeck J., Mayer B., Wirth G., Prochaska H., Giesler B., Gottschalg R., Becker G., Mayer O., Systematische Untersuchung und Auswertung meteorologischer Einstrahlungseignisse, 25. PV-Symposium, Kloster Banz Bad Staffelstein 2010,
- [3] Solarenergieförderverein Bayern e.V., Messdatensätze der 1 MW PV-Anlage Neuen Messe München der Jahre 2008 und 2009, www.sev-bayern.de,
- [4] Meteorologisches Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München, Messdatensätze der Jahre 2008 und 2009, www.meteo.physik.uni-muenchen.de,
- [5] Mayer B. and Kylling A., The libRadtran software package for radiative transfer calculations: Description and examples of use, journal acp, vol. 5, 2005,
- [6] Deutscher Wetterdienst, hoch aufgelöste meteorologische Messdatensätze und synoptische Meldungen für 16 Standorte im Bundesgebiet im Zeitraum 2007 bis 2010, www.dwd.de
- [7] Satel-Light Glossary, <http://www.satel-light.com/guide/glosatod.htm>, (abgerufen am 24. Januar 2012).