

Europaweite Untersuchung des Irradiance Enhancement Effects und erste Analysen der Bedeutung im PV-System

Mike Zehner⁽¹⁾ • Toni Weigl⁽¹⁾ • Matthias Hartmann⁽¹⁾ • Bernhard Mayer⁽²⁾ • Thomas Betts⁽³⁾
Ralph Gottschalg⁽³⁾ • Heinz Lößlein⁽²⁾ • Bodo Giesler⁽⁴⁾ • Gerd Becker⁽¹⁾ • Oliver Mayer⁽⁵⁾

⁽¹⁾Hochschule München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Arbeitsgruppe des SE-Labors im Studiengang Regenerative Energien

Lothstraße 64, D-80335 München, Tel: +49 (0)89 1265-4412, zehner@ee.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⁾Siemens AG, Würzburger Straße 121, D-90766 Fürth

⁽⁵⁾GE Global Research, Freisinger Landstraße 50, D-85748 Garching bei München

1 Motivation und Zielsetzung

Bei der Analyse hochaufgelöster Messdatensätze für den Standort München wurden deutliche und wiederholt auftretende Einstrahlungsspitzen festgestellt [1]. Diese Einstrahlungsüberhöhungen sind Ereignisse, bei denen die Werte der Strahlungsdichte über den zugehörigen theoretisch berechneten Leistungswerten bei klarer Atmosphäre, dem Clear Sky Tag liegen. Die erhöhten Globalstrahlungswerte werden im Wesentlichen durch Reflexionen an Cumulus Wolken verursacht. Cumulus Wolken erscheinen als isolierte und durchweg dichte Wolken, die in der Vertikalen blumenkohlartige Formen annehmen. Die Wolke liegt in ihrer Höhe meist unter der 0 °C Schwelle und besteht damit hauptsächlich aus Wassertröpfchen, wodurch sich ihre Ränder überall scharf gegen den Hintergrund abheben. Die scharfen Konturen der Wolke führen zu Strahlungsreflexionen also additiven Strahlungseinträgen und damit zu den Einstrahlungsüberhöhungen (Irradiance Enhancement Effect, IE). Diese können beispielsweise in München durch die geringen Wolkengeschwindigkeiten bis zu einigen Minuten dauern. In der Analyse des Effekts lässt sich noch ein korrelierendes Phänomen zu den Überhöhungen bei der Bestrahlungsstärke beobachten. Sichtbar wurde eine deutlich niedrigere Modultemperatur als an Tagen mit Clear Sky Bedingungen (kürzere Energieeinträge, träge thermische Masse des Moduls und niedrigere Umgebungstemperaturen). Diese energiemeteorologischen Beobachtungen wurden um Analysen von hoch aufgelösten Messdatensätzen an weiteren Standorten in Deutschland und europaweit mit Standorten in Dänemark, Niederlande, Spanien, Italien und Griechenland ergänzt. Die Analysen und Thesen sollen damit eine bessere Aussagekraft und Präzision bekommen. Auf Basis dieser Ergebnisse werden erste systemtechnische Auswirkungen des Effekts gerechnet und simuliert.

2 Irradiance Enhancement - Ursache und Wirkung

Es sind typische aber oft nicht richtig wahrgenommene Wetterbedingungen, die zu den beobachteten Überhöhungen der Einstrahlungsdichte führen. Die Bildabfolge 1a bis 1e zeigt in Momentaufnahmen für einen exemplarischen Irradiance Enhancement Referenztag (8. Juli 2009) Cumulus Wolken, die sich in Reihen (Wolkenstraßen) parallel zur Windrichtung bewegen. Bild 2 analysiert den Effekt in seiner Wirkung auf einen Tagesgang der Einstrahlungsdichte an einem weiteren IE-Referenztag (30. Mai 09). Gegenübergestellt wird der Tagesgang (rot) des mit dem Programm libRadtran [MAY-05] gerechneten (korrigierten) Clear Sky Tags¹. Der additive Energieeintrag durch die Spitzen der Einstrahlungsüberhöhungen ist in lila sichtbar.



Bild 1a bis 1e: Momentaufnahmen verschiedener Wettersituationen durch die Webcam des Meteorologischen Instituts am Standort München zur Darstellung des Tagesverlaufs für den 8. Juli 2009 als exemplarischer Irradiance Enhancement Referenztag [MIM-09a].

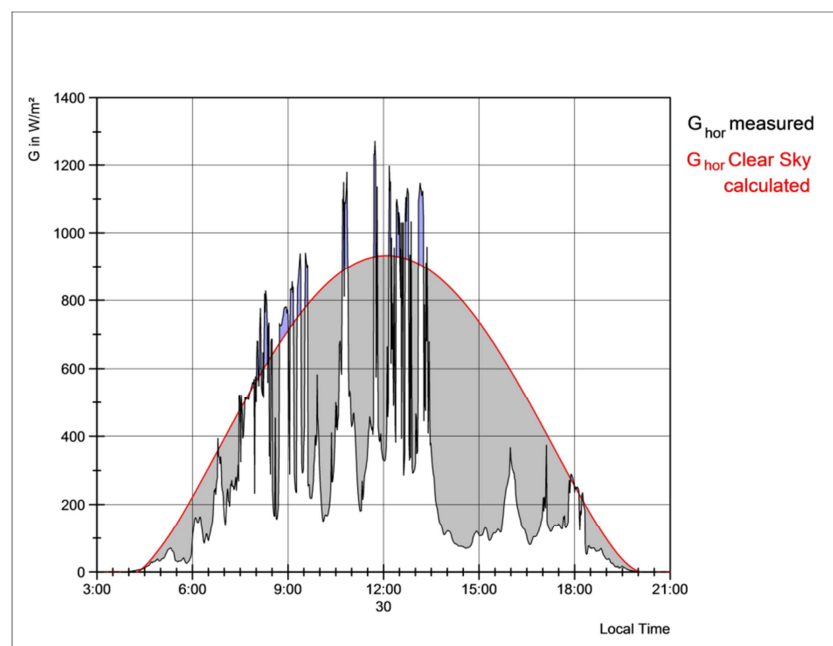


Bild 2: Zu sehen ist der Tagesgang der Globalstrahlung (schwarz) für einen weiteren IE-Referenztag (30.5.09). Die rote Kurve zeigt das Profil des dagegen gerechneten (korrigierten) Clear Sky Tags. Der Energieeintrag durch Einstrahlungsüberhöhungen ist in lila sichtbar.

¹ libRadtran - library for radiative transfer, <http://www.libradtran.org>

3 Irradiance Enhancement – Bedeutung im PV-System

In den folgenden Berechnungen und Analysen für die Simulation der PV-Module wurden Messdatensätze des Solarenergiefördervereins Bayern (MW-Anlage der Messe München) [SEV-09] und des Meteorologischen Instituts der Universität München [MIM-09b] verwendet. Grundlage sind zwei unterschiedliche energiemeteorologische Sommersituationen und damit Einstrahlungs- und Temperaturtagesgänge. Eingesetzt werden die zwei exemplarischen Tagesgänge der Globalstrahlung und Außentemperatur vom 8. und 27. Juli 2009. Während der Tagesgang am 27. Juli die typische partikuläre Ausprägung eines Clear Sky Tags zeigt, ist der willkürlich ausgewählte 8. Juli ein Tag mit fluktuierender solarer Einstrahlungsdichte (IE).

Die Anwendung einer Simulationssprache oder eines Simulationssystems bietet eine ideale Plattform, um auf einer fundierten und validierten Basis ein System zu modellieren. Das ‚PV-Modul‘ kann in einer Simulationssprache zur Durchführung von Parametervariationen zielführend flexibel und schnell angepasst oder auch ausgetauscht werden. Die Simulationssprache INSEL² dient als Basis für die Parametervariationen. Zunächst wurden marktübliche PV-Module mit unterschiedlichen Zelltypen gesucht. Exemplarisch vorgestellt werden hier nun die Berechnungsergebnisse für das Modul Trina TSM 170 D01³ als monokristallines Beispiel.

Der Tag mit den fluktuierenden Einstrahlungsspitzen zeigt viele, vereinzelt auch längere Einstrahlungsüberhöhungen. Im Tagesverlauf zeigt der IE-Referenztag ein Anwachsen der Maximalwerte von 900 W/m² um 8:00 Uhr, bis zu einem Maximum von 1260 W/m² in den Mittagsstunden. Bild 4 zeigt für die beiden Referenztage die zugehörigen Außen- und Modultemperaturwerte. Der Clear Sky Tag weist einen typischen Hystereseverlauf in der Modultemperatur auf. Hohe Werte der Strahlungsdichte treffen auf niedrige Werte der Modultemperatur. Dies zeigt sich auch in den Grafiken zum Betriebsverhalten des Moduls. Das Modul wird dazu im MPP-Betrieb modelliert. Die Grafen zu den elektrischen Kenngrößen (Bild 3 und 4) zeigen sehr schön die Parameterkorrelationen für ein monokristallines PV-Modul. In der Leistungsbeschreibung des PV-Moduls über die Form der Punktwolke ist die Temperaturabhängigkeit von der Spannung schön zu sehen. Beim Strom ist dessen proportionale Abhängigkeit von der Einstrahlungsdichte deutlich sichtbar. Der Verlauf der MPP-Leistungen mit beiden Tagesgängen ist interessant. Am IE-Tag reicht die Leistung deutlich weiter. Dabei zeigt sich der Leistungsabfall des Moduls durch die Temperaturabhängigkeit am Clear-Sky-Tag auch in der niedriger verlaufenden Hysteresekurve.

² Insel in der Version 8.0.1, doppelintegral GmbH, Baumreute 86, 70199 Stuttgart, www.insel.eu

³ Trina Solar Limited (TSL), Changzhou (China), www.trinasolar.com

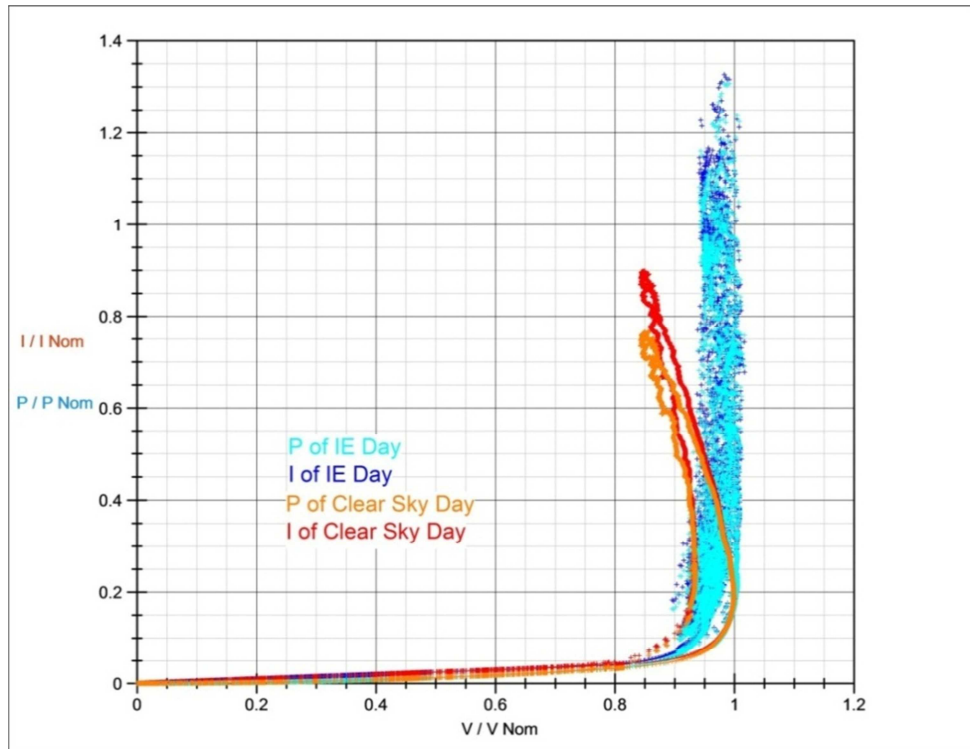


Bild 3: Die Grafik zeigt die Punktwolken für Strom und Leistung über der Spannung (alle Größen normiert) für die zwei exemplarischen Tagesgänge des monokristallinen Trina TSM 170 D01. Die blauen und türkisen Punkte stehen für die modellierten Werte des 8. Juli während in rot und orange der Clear-Sky-Tag am 27. Juli 2009 dargestellt wird.

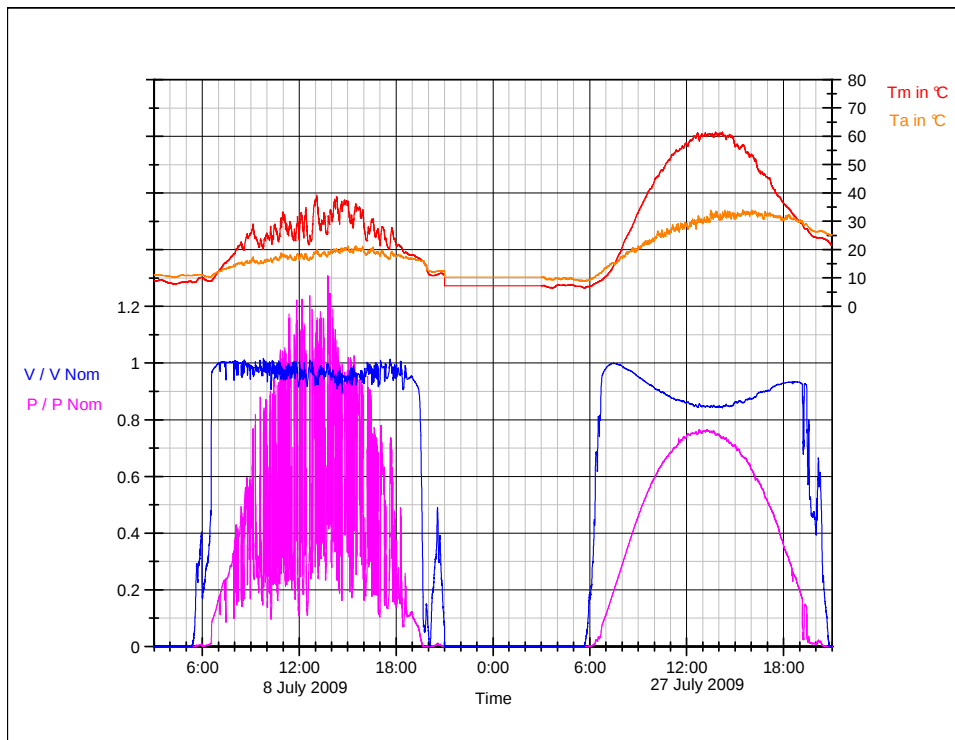


Bild 4: Gegenüberstellung der zwei Tagesgänge von Spannung und Leistung (Trina TSM 170 D01) mit den Eingangsgrößen der Modellierung: Einstrahlungsdichte und Außentemperatur.

4 Analyse hoch aufgelöster Messdatensätze weiterer Standorte

In Deutschland wurde die Datenbasis um Datensätze aus Kassel (IWES Kassel) und Oldenburg (Uni Oldenburg) erweitert. In Orientierung an den Klimazonen in Europa und entsprechend der zur Verfügung stehenden Kontakte wird die Datenbasis auch international stetig erweitert. Bild 5 zeigt den aktuellen Status Quo. Die Auswertung und Analyse läuft auch beständig weiter. Für Hinweise auf weitere hoch aufgelöste energiemeteorologische Datensätze sind wir sehr dankbar.

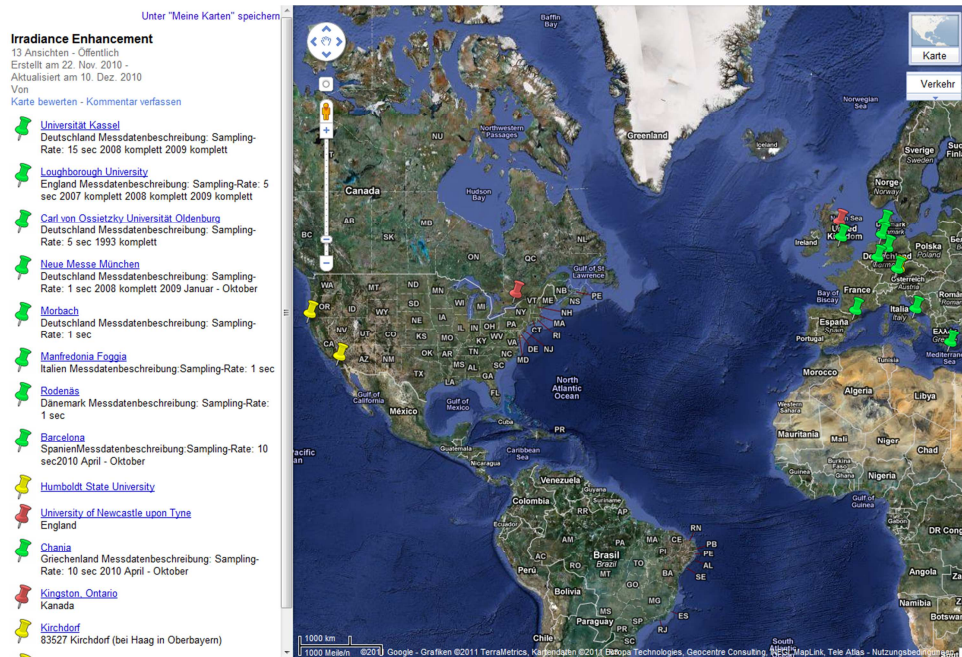


Bild 5: Internationalisierung der Datenbasis – Status Quo des Data Minings (Januar 2011)

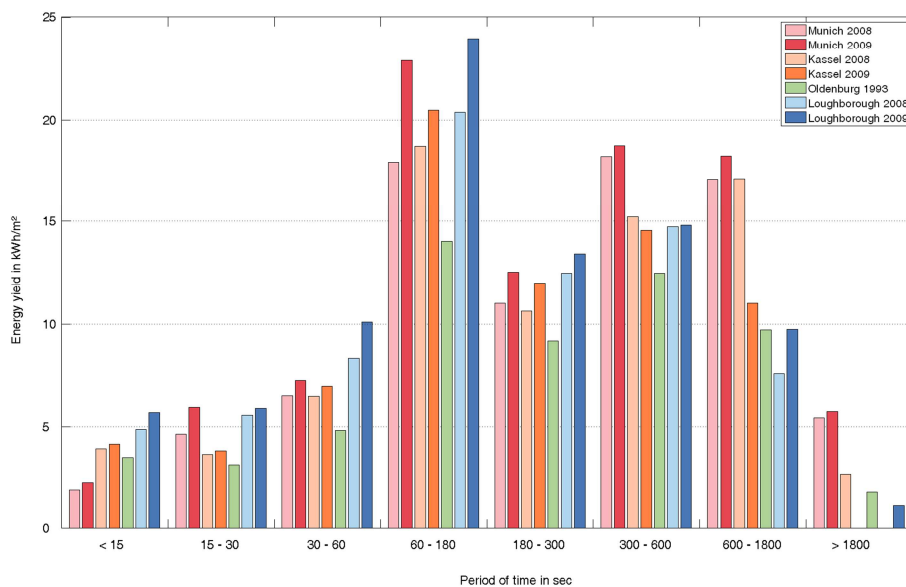


Bild 6: Der Energieinhalt der Einstrahlungsüberhöhungen über 900 W/m^2 für verschiedene Standorte klassifiziert nach Dauer. Die hellere (dunklere) Farbe steht für das Jahr 08 (09).

Bild 6 zeigt die Energieinhalte der Einstrahlungsüberhöhungen über 900 W/m^2 für verschiedene Standorte, klassifiziert nach ihrer Dauer. Wenn verfügbar wurden Datensätze aus den Jahren 2008 und 2009 verwendet. Im Vergleich zu dem küstennahen Standort Oldenburg profitiert München von den geringeren Windgeschwindigkeiten, sichtbar in der höheren Anzahl der Einstrahlungsereignisse mit einer Dauer länger als 300 sec. Dies könnte natürlich auch regionale Ursachen haben wie die größere Heterogenität im Voralpenraum, bei der sich Wolken bevorzugt an bestimmten Stellen bilden. In Deutschland scheint es auch einen Gradienten von Süd nach Nord zu geben was die Häufigkeit länger andauernder Einstrahlungsüberhöhungen angeht. Arbeiten zu den Ursachen und weitere Analysen zu den Daten finden aktuell statt. Auch in Loughborough (England) ist der Effekt der Einstrahlungsüberhöhungen schön zu sehen. Die Verteilung ist eher analog zu dem Kurvenverlauf von Oldenburg. Die Ergebniswerte der Integrale der Energieinhalte über alle Klassen für die verschiedenen Standorte zeigen die Bedeutung des Effekts.

5 Zusammenfassung

Einstrahlungsüberhöhungen werden in allen untersuchten hoch aufgelösten meteorologischen Datensätzen sehr schön darstellbar. Diese Überhöhungen korrelieren typischerweise mit niedrigen Modultemperaturen und führen so auch zu entsprechenden Spitzen der MPP-Leistung der Module. Simulationsrechnungen mit der Simulationssprache INSEL zeigten in der Leistungsbeschreibung für exemplarische, marktübliche Module (unterschiedlichen Zelltyps) das bis zu 1,3 fache der Nennleistung eines PV-Moduls.

6 Referenzen

[Zeh-10] 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 Einstrahlungsereignisse, 25. PV-Symposium, Kloster Banz Bad Staffelstein 2010,

[MAY-05] Mayer, B. and Kylling, A., The libRadtran software package for radiative transfer calculations: Description and examples of use, journal acp, vol. 5, 2005,

[MIM-09a] Meteorologisches Institut der Universität München, Wetterbeobachtungsfilme für verschiedene Tage des Jahres 2009, www.meteo.physik.uni-muenchen.de

[SEV-09] Solarenergieförderverein Bayern e.V., Messdatensätze der 1 MW PV-Anlage Neuen Messe München der Jahre 2008 und 2009, www.sev-bayern.de

[MIM-09b] Meteorologisches Institut der Universität München, Messdatensätze der Jahre 2008 und 2009, www.meteo.physik.uni-muenchen.de

[SEV-09] Fraunhofer IWES Kassel, Messdatensätze von 2008 und 2009, www.iwes.fraunhofer.de

[SEV-09] University of Oldenburg, Messdatensatz des Jahres 1992, www.energy-meteorology.de

[Lou-10] Loughborough University, Messdatensätze der Jahre 2008 and 2009, www.lboro.ac.uk