

# Systematische Untersuchung und Auswertung meteorologischer Einstrahlungsereignisse

Mike Zehner<sup>(1)</sup> • Toni Weigl<sup>(1)</sup> • Josef Weizenbeck<sup>(1)</sup> • Bernhard Mayer<sup>(2)</sup> • Georg Wirth<sup>(1)</sup>  
Helga Prochaska<sup>(1)</sup> • Bodo Giesler<sup>(3)</sup> • Ralph Gottschalg<sup>(4)</sup> • Gerd Becker<sup>(1)</sup> • Oliver Mayer<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup>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

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

<sup>(3)</sup>Siemens AG, I IA CE S PV, Würzburger Strasse 121, D-90766 Fürth

<sup>(4)</sup>Centre for Renewable Energy Systems Technology (CREST), Department of Electronic  
and Electrical Engineering, Loughborough University, UK

<sup>(5)</sup>GE Global Research, Freisinger Landstrasse 50, D-85748 Garching bei München

## 1 Motivation und Zielsetzung

Durch die detaillierten Auswertungen von Messdatensätzen zum Betrieb netzgekoppelter PV-Anlagen entwickelten sich schon Mitte der neunziger Jahre neue Theorien zur elektrischen Auslegung von PV-Systemkonfigurationen. Bei diesen Auslegungen geht es um die optimale Abstimmung von PV-Generator und Wechselrichter auf Basis standortspezifischer Wetterprofile und der Gegebenheiten vor Ort, welche die charakteristischen Betriebsbereiche und Betriebssituationen berücksichtigen. 1997 wurde die damals weltweit größte Aufdachanlage (1 MW, Neue Messe München) errichtet mit einem Überwachungssystem auf Kraftwerksstandard (WinCC<sup>1</sup>). Basierend auf den Sekundenmesswerten des WinCC-Systems konnte Systemverhalten in hoher Auflösung analysiert und die Theorien zur Wechselrichterauslegung und Optimierung weiter verfeinert werden. Auf Basis dieser Theorien entstanden seit Anfang 2001 Auslegungsprogramme bei der Solarschmiede GmbH<sup>2</sup> für verschiedene Wechselrichterhersteller und Systemhäuser. Bei der Analyse der hochaufgelösten Messdatensätze wurden, als Teil der Theorien zur Systemoptimierung, deutliche und wiederholt auftretende Einstrahlungsspitzen festgestellt. Diese Einstrahlungsüberhöhungen sind Ereignisse, bei denen die Werte der Strahlungsdichte über den zugehörigen theoretisch berechneten Leistungswerten bei klarer Atmosphäre, dem Clear Sky Tag liegen. Diese werden im Folgenden in ihren meteorologischen Ursachen erläutert und in ihren unterschiedlichen Korrelationen und Profilen (Höhe, Dauer) und damit in ihrer Bedeutung systematisch untersucht.

---

<sup>1</sup> Simatic WinCC ist ein PC-basiertes Prozessvisualisierungs- und -leitsystem der Siemens AG

<sup>2</sup> Solarschmiede GmbH, Infanteriestrasse 19 / Geb. 1A, 80797 München, <http://www.solarschmiede.de>

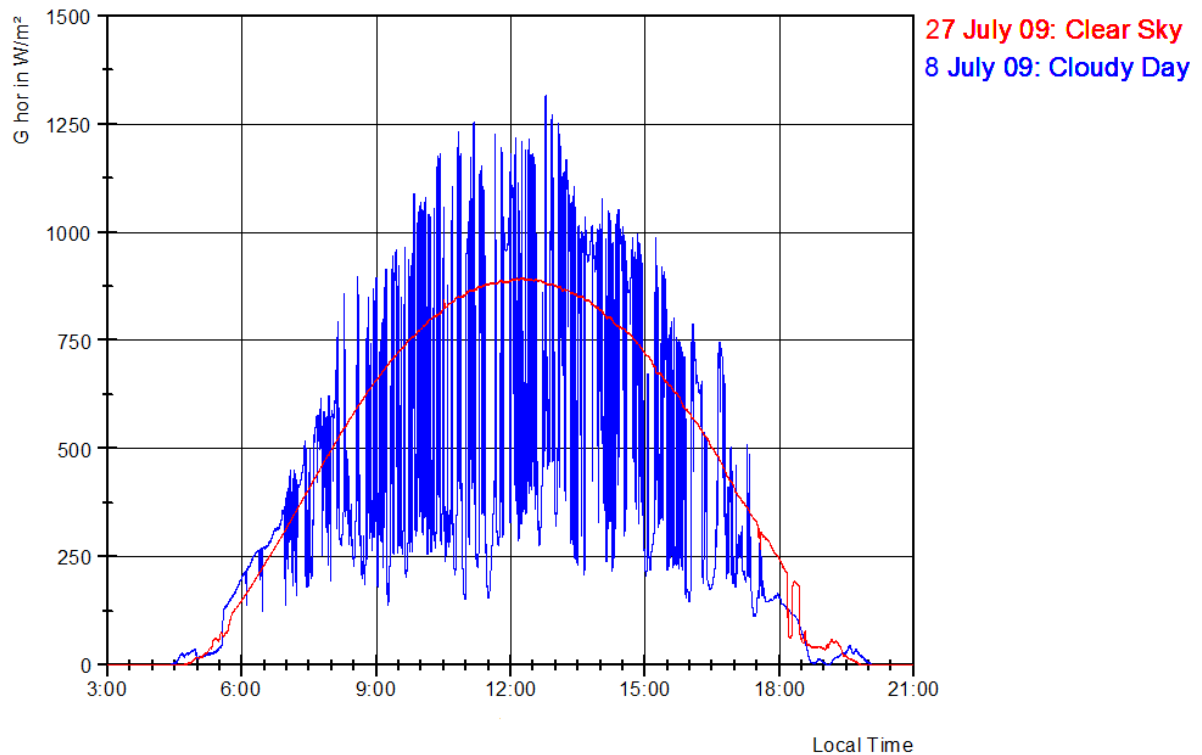
## 2 Meteorologischer Hintergrund und Modellierung

Die beobachteten Einstrahlungsüberhöhungen, in ihrer Größenordnung teilweise sogar über der Solarkonstante liegend, sind in der Meteorologie in bestimmten Spektralbereichen bekannt und dort auch ergründet worden [Lov-05] [Sab-03]. Die erhöhten Globalstrahlungswerte werden im Wesentlichen durch Reflexionen an Cumulus Wolken verursacht. Im Englischen wird dieser Effekt als Cloud Enhancement bezeichnet. Cumulus Wolken werden auch als Haufen-, Quell- oder Schäfchenwolken benannt sowie als Schönwetterwolken, da eine Konvektionsströmung (Thermik) zu ihrer Entstehung führt. Diese Wolken bilden sich manchmal in Reihen (Wolkenstraßen) parallel zur Windrichtung. Cumulus Wolken gehören zur Wolkenfamilie der tiefen Wolken, im Bereich bis 2 km, können aber auch über dieses Wolkenstockwerk (Höhenbereich) hinauswachsen. 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. Cumulus Wolken erscheinen als isolierte und durchweg dichte Wolken, die in der Vertikalen blumenkohlartige Formen annehmen. Die von der Sonne beschienenen Teile leuchten meist sehr weiß durch Strahlungsreflexionen. Die Untergrenze verläuft relativ glatt und fast horizontal am Kondensationsniveau entlang. Durch den Eigenschatten ist die Wolkenbasis sichtbar leicht abgedunkelt. Umgebende Wolken findet man bei ähnlicher Luftschichtung auf etwa gleicher Höhe. [DWD-91] [Häk-04]

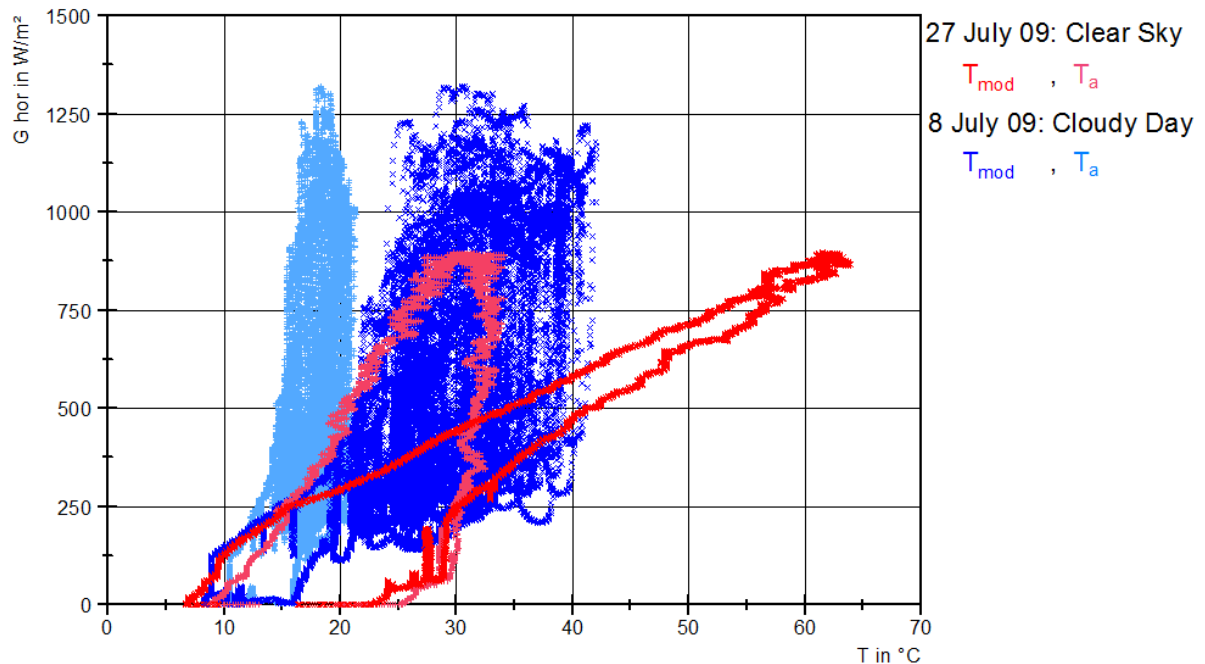
Cumulus Wolken können eine Verweilzeit von bis zu 30 min aufweisen, sich in unter 10 min bilden und genau so schnell verschwinden. Wo und wann sich diese Wolkentypen bilden, ist nicht sicher vorhersagbar. Allerdings kann man auf Basis der Luftfeuchte in diesen Höhen auf eine Wahrscheinlichkeit schließen. Die angesprochenen scharfen Konturen der Wolke am Rand führen zu Strahlungsreflexionen und damit zu den Einstrahlungsüberhöhungen, die beispielsweise in München durch die geringe Wolkengeschwindigkeiten bis zu einigen Minuten dauern. Typische Tagesgänge der Globalstrahlung, deren spezifische Ausprägung als Clear Sky Tag und als Profil mit Cloud Enhancements sind mit dem Programm libRadtran [MAY-05] modellierbar<sup>3</sup>. Die in den folgenden Grafiken verwendeten Clear Sky Tage wurden mit libRadtran berechnet. Für die Berechnung wurde ein Standardaerosoltyp [SHE-89] verwendet und die Parameter für die Absorption durch Wasserdampf, Ozon, CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> mit der 32-Band k-Verteilung nach [KAT-99] parametrisiert. Die Berechnungen wurden mit dem disort solver durchgeführt [STA-88].

---

<sup>3</sup> libRadtran - library for radiative transfer, <http://www.libradtran.org>



*Bild 1: Die Grafik zeigt an einem Standort Nähe München zwei exemplarische Tagesgänge der Globalstrahlung in Horizontalebene am 8. (blau) und 27. Juli 2009 (rot). Gemessen wurde mit einem CMP 21 von Kipp & Zonen.*



*Bild 2: Die beiden Tagesgänge der Modultemperaturen für die Tage aus Bild 1. In die Grafik integriert sind in jeweils helleren Farbtönen auch die Tagesgänge der Außentemperaturen. Gemessen werden Modultemperaturen mit Referenzmodulen mit einlaminieren PT100 und Außentemperaturen mit ventilierten Lufttemperatursensoren von Thies Klima.*

### 3 Systematische Analyse des Cloud Enhancements

#### 3.1 Korrelationen und Profile in Tagesgängen

In den folgenden Berechnungen und Analysen zum Cloud Enhancement wurden Messdatensätze des Solarenergiefördervereins Bayern (MW-Anlage der Messe München) [SEV-09] und des Meteorologischen Instituts der Universität München [MIM-09] verwendet. Bild 1 zeigt exemplarisch den Effekt des Cloud Enhancements. Dargestellt werden zwei exemplarische Tagesgänge der Globalstrahlung in Horizontalebene am 8. Juli in blau und am 27. Juli 2009 in rot. 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.

Neben vielen, vereinzelt auch längeren Einstrahlungsspitzen, wurde ein Anwachsen der Maximalwerte von  $900 \text{ W/m}^2$  um 8 Uhr, bis zu einem Maximum von  $1260 \text{ W/m}^2$  aufgezeichnet. In Korrelation zur Globalstrahlung lässt sich nun noch ein weiteres Phänomen bei den Außen- und Modultemperaturwerten beobachten. Bild 2 zeigt die an den beiden Tagen aufgezeichneten zugehörigen Außen- und Modultemperaturen. In rot aufgetragen ist der typische Hystereseverlauf der Modultemperatur an einem Clear Sky Tag. Blau sichtbar ist die Modultemperatur bei fluktuierender Einstrahlungsdichte. Deutlich wird eine um bis zu dem Faktor 0,5 niedrigere Modultemperatur als an dem Tag mit Clear Sky Bedingungen. Bei fluktuierender Einstrahlung erreichen die Module nicht die gleiche Spitzentemperatur, da sie durch die geringere Einstrahlung während einer Wolke abkühlen und das Aufheizen in den Einstrahlungsspitzen durch die thermische Masse der Module verlangsamt wird. Hohe Werte der Strahlungsdichte treffen auf niedrige Werte der Modultemperatur.

Bild 3 verdeutlicht in den Tagesgängen der Strahlungsanteile die Entstehungsursachen der Einstrahlungsüberhöhungen. Die schwarze Kurve zeigt den Tagesgang der Globalstrahlung am 30.5.09. In hellgrau zu sehen ist der mit libRadtran berechnete Clear Sky Tag. Zieht man von dieser Kurve einen für diesen Zeitraum typischen Tagesgang der Diffusstrahlung an einem unbewölkten Tag ab (konst. etwa  $80 \text{ W/m}^2$ , 23.5.09, hellrot), erhält man die hellblaue Kurve als neuen Direktstrahlungsanteil des Clear Sky Tags. Diese Kurve ist zugleich Hüllkurve für die Direktstrahlungsanteile des bewölkten Tags (dunkelblau). Die Spitzen der Einstrahlungsüberhöhungen werden nun in den Messwerten der Diffusstrahlung mit Werten bis zu über  $500 \text{ W/m}^2$  (rot) sichtbar, da die Wolken über Reflektion zum Einstrahlungseintrag beisteuern. Zur hohen Diffusstrahlung kommt dann dieselbe Direktstrahlung wie an dem unbewölkten Tag. Daraus folgen die überhöhten Werte der Einstrahlungsdichte von bis zu  $1300 \text{ W/m}^2$  in schwarz. Die Werte über der Clear Sky Kurve zeigen im Schnitt etwa 40% mehr Leistung als nach dem Clear Sky Tag zu erwarten gewesen wäre.

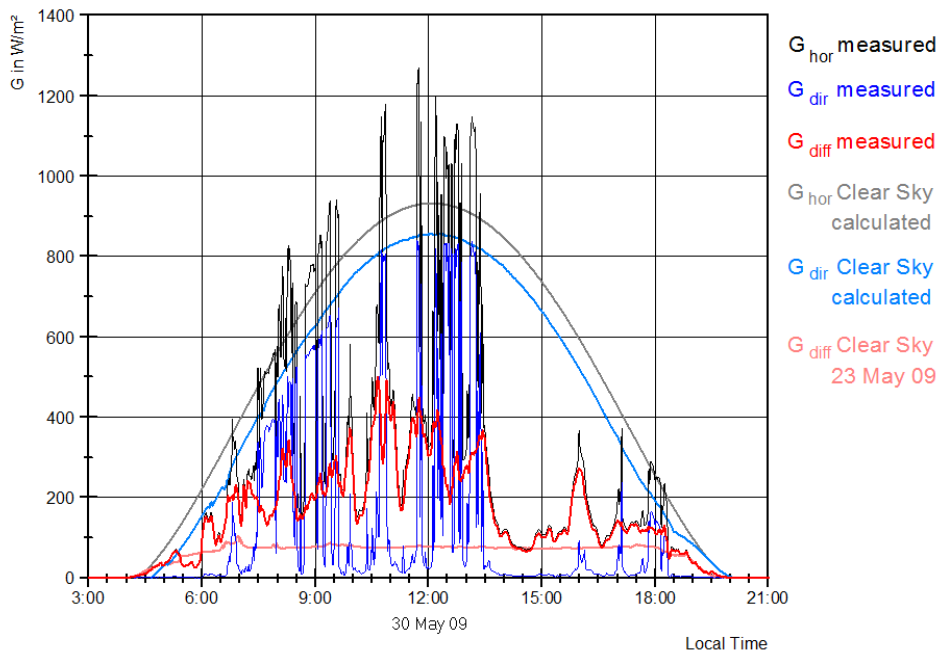


Bild 3: Die schwarze Kurve zeigt den Tagesgang der Globalstrahlung am 30. Mai 2009. In hellgrau (hellblau) zu sehen ist der berechnete(korrigierte) Clear Sky Tag. Der korrigierte Clear Sky Tag ist Hüllkurve für die Direktstrahlungsanteile (dunkelblau). Die Spitzen der Einstrahlungsüberhöhungen werden in den Messwerten der Diffusstrahlung (rot) sichtbar.

### 3.2 Statistische Analyse der Ereignisse im Jahresverlauf

Die Bilder 4 bis 6 erläutern die Ereignisse der Einstrahlungsüberhöhungen für die Jahre 2008 und 2009 für München. Bild 4 zeigt Einstrahlungsüberhöhungen über  $900 W/m^2$ , klassifiziert nach ihrer Dauer, in ihrer Häufigkeit und ihrem Energieinhalt. Bild 5 zeigt die mit libRadtran berechneten Isolinien der Clear Sky Tagesgänge im Jahresverlauf. Überlagert wurden die Ereignisse der Einstrahlungsüberhöhung für 2009 sichtbar in Dauer und Länge.

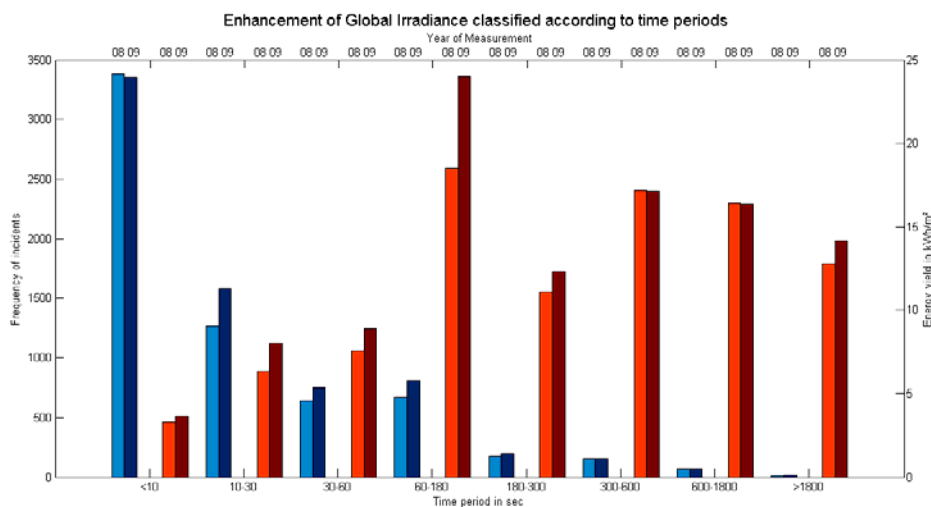


Bild 4: Einstrahlungsüberhöhungen (Standort aus Bild 1) über  $900 W/m^2$ , klassifiziert nach Dauer, in ihrer Häufigkeit (blau, y1-Achse) und ihrem Energieinhalt (rot, y2-Achse). Der hellere (dunklere) Farbton steht für das Jahr 2008 (2009).

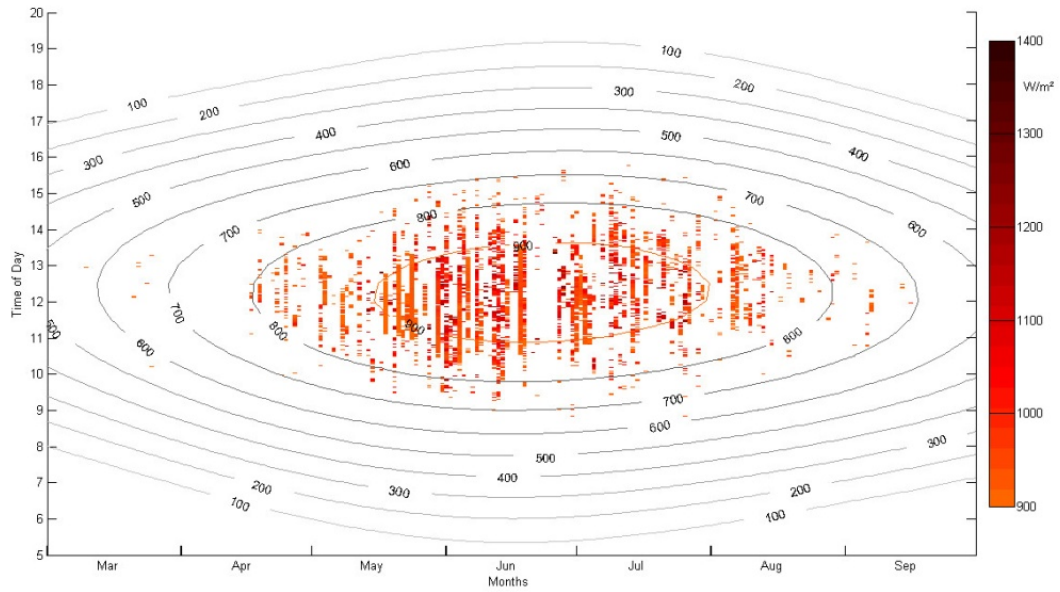


Bild 5: Die Isolinien zeigen berechnete Clear Sky Tagesgänge im Jahresverlauf. Überlagert wurden die Ereignisse der Einstrahlungsüberhöhung für 2009 sichtbar in Dauer und Länge.

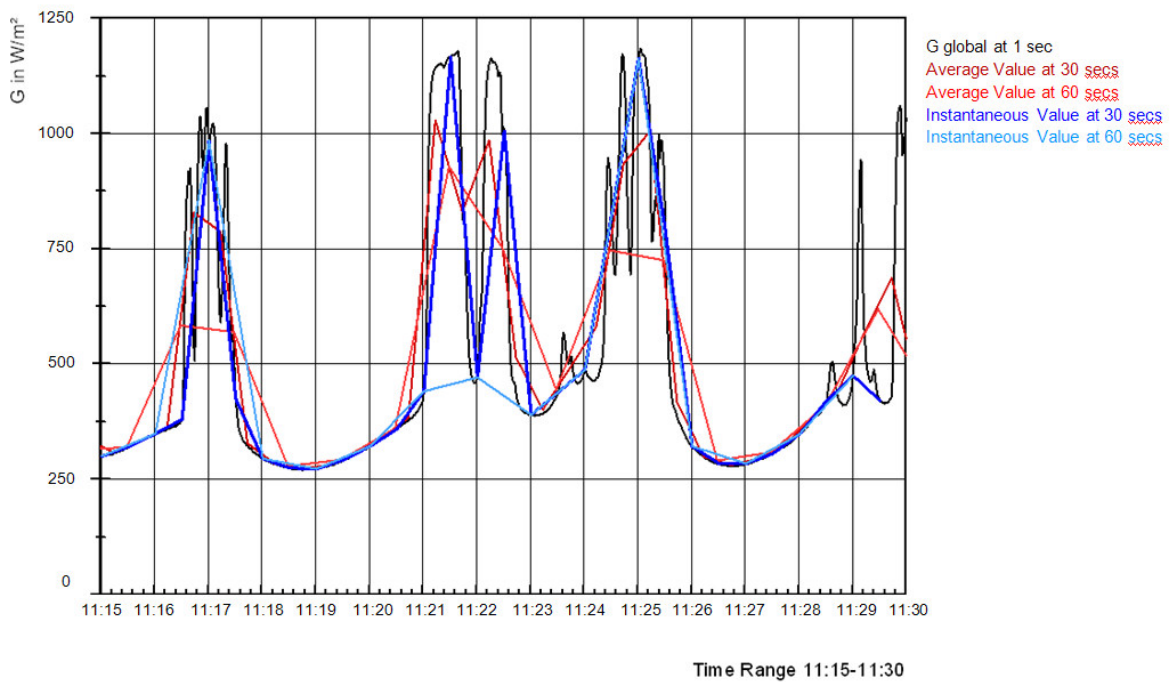


Bild 6: Die Grafik zeigt anhand eines exemplarischen Tages- und Zeitbereichs die Wirkung von Messwertauflösung und Messverfahren auf die Aussagegenauigkeit. Schwarz ist die Referenzkurve, rot (blau) die Mittelwerte (Momentanwerte) in verschiedenen Auflösungen.

## 4 Messwertaufzeichnung und schließende Messdatenstatistik

Zusätzlich wurden bei der Messdatenanalyse Aussagen zur Wirkung der Wahl der Zeitschrittweite und des Verfahrens bei der Messwertaufnahme getroffen. Bild 6 zeigt anhand eines exemplarischen Tages- und Zeitbereichs die Wirkung verschiedener Messwertaufösungen und -verfahren. Es wird deutlich, dass zur korrekten Wiedergabe der Spitzen eine hohe zeitliche Auflösung (Sensorreaktionszeit, Abtasttheorem) benötigt wird, und ferner Momentanwerte den Globalstrahlungsverlauf besser wiedergeben als Mittelwerte. Weitere Grafiken zur Analyse der Art der Messwertaufzeichnung in ihrer Wirkung (Integral der Messwerte über den Tag oder die unterschiedlichen Häufigkeitsverteilungen über das Jahr) sind auf dem Poster zu finden.

## 5 Zusammenfassung

Der Effekt der Einstrahlungsüberhöhungen wird in der Photovoltaik bislang unterschätzt. Die Analyse der Profile des Effekts zeigt deren Bedeutung. Diese Überhöhungen korrelieren typischerweise mit niedrigen Modultemperaturen. Ursache sind Reflexionen an tiefen Wolken den sogenannten Cumulus Wolken.

## 6 Referenzen

[Lov-05] Lovengreen C., Fuenzalida H., Videla L., On the spectral dependency of UV radiation enhancements due to clouds in Valdivia, Chile, *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, 2005,

[Sab-03] Sabburg J.M., Parisi A.V., Kimlin M.G., Enhanced spectral UV irradiance: a 1 year preliminary study, *Atmospheric Research*, vol. 66, 2003,

[Häk-04] Häkel Hans, *Wolken*, Eugen Ulmer GmbH, Stuttgart 2004,

[DWD-91] Deutscher Wetterdienst, *Vorschriften und Betriebsunterlagen Nr. 12, Teil 1: Internationaler Wolkenatlas*, Deutscher Wetterdienst, 2. Auflage, 1991,

[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,

[SHE-89] Shettle, E.P., *Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies*, book title *Atmospheric propagation in the uv*, AGARD Conference Proceedings, 1989,

[KAT-99] Kato, S. and Ackerman, T.P. and Mather, J.H. and Clothiaux, E.E., The k-distribution method and correlated-k approximation for a shortwave radiative transfer model, *journal J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 62, 1999,

[STA-88] Stamnes, K. and Tsay, S.C. and Wiscombe, W. and Jayaweera, K., A numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media, *journal ao*, vol. 27, 1988,

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

[MIM-09] Meteorologisches Institut der Universität München, *Messdatensätze der Jahre 2008 und 2009*, [www.meteo.physik.uni-muenchen.de](http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de)