

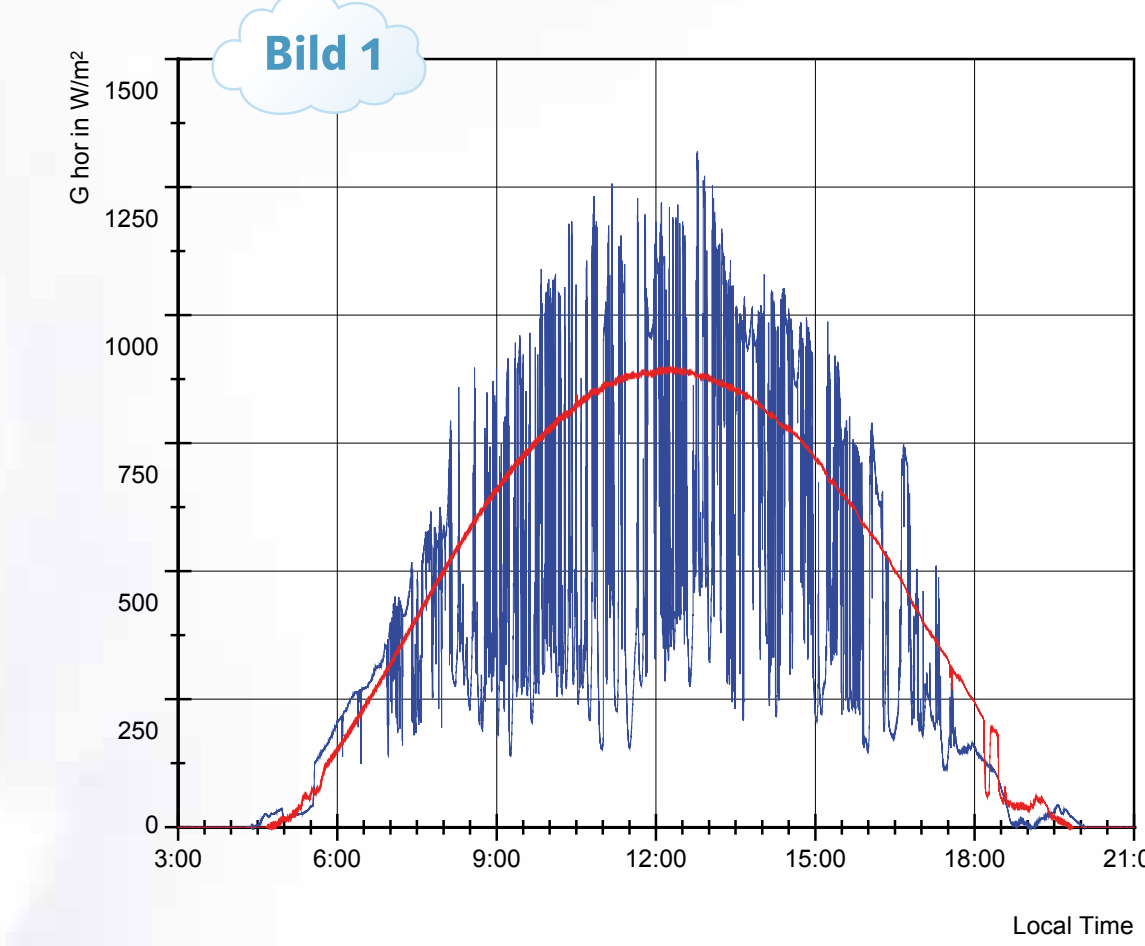
# SYSTEMATISCHE UNTERSUCHUNG UND AUSWERTUNG METEOROLOGISCHER EINSTRALUNGSEREIGNISSE

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> | BODO GIESLER<sup>3</sup> | RALPH GOTTSCHALG<sup>4</sup> | GERD BECKER<sup>1</sup> | OLIVER MAYER<sup>5</sup>

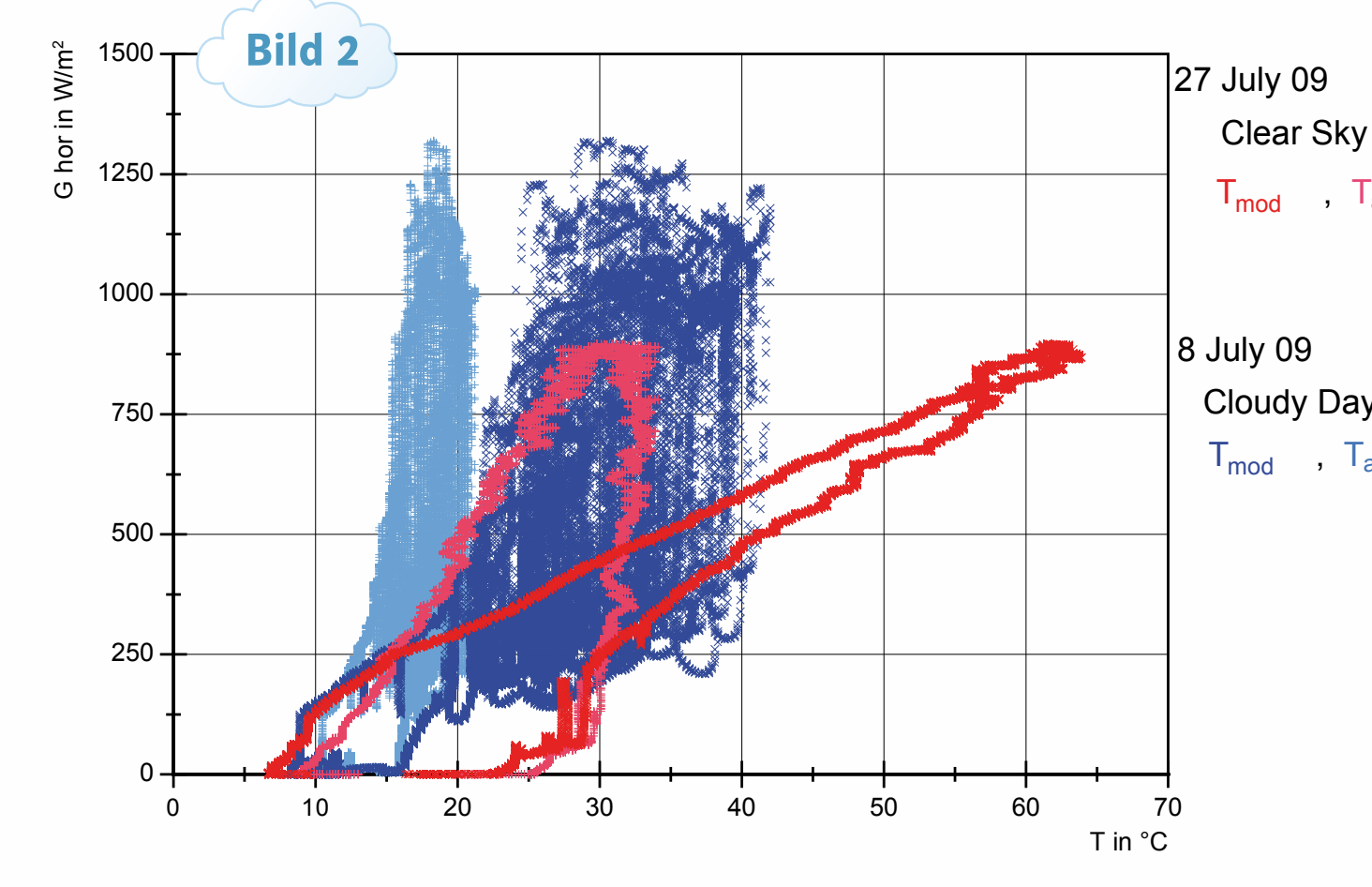
## 1 Motivation und Zielsetzung

1997 wurde die damals weltweit größte Aufdachanlage (1 MW, Neue Messe München) mit einem Überwachungssystem auf Kraftwerksstandard errichtet. Basierend auf Sekundenmesswerten konnte damit Systemverhalten in hoher Auflösung analysiert und die Theorien zur Wechselrichterleistung und Optimierung weiter verfeinert werden.

Bei der Analyse der hochaufgelösten Messdatensätze wurden 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 liegen.



Zwei exemplarische Tagesgänge der Globalstrahlung in Horizontalebene am 8. (blau) und 27. Juli 2009 (rot) an einem Standort Nähe München. Gemessen wurde mit einem CMP 21 von Kipp & Zonen.



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 einlaminierten PT100 und Außentemperaturen mit ventilierten Lufttemperatursensoren von Thies Klima.

## 2 Meteorologischer Hintergrund und Modellierung

Die beobachteten Einstrahlungsüberhöhungen, in ihrer Größenordnung teilweise sogar über der Solarkonstante liegend, werden im Wesentlichen durch Reflexionen an Cumuluswolken verursacht. Im Englischen wird dieser Effekt als Cloud Enhancement bezeichnet. Cumuluswolken können eine Verweilzeit von bis zu 30 Minuten aufweisen, sich in unter 10 Minuten bilden und genau so schnell verschwinden. Die scharfen Konturen der Wolke führen zu Strahlungsreflexionen und damit zu den Einstrahlungsüberhöhungen. Die Dauer des Effekts ist von der Wolkeneschwindigkeit abhängig.

## 3 Systematische Analyse des Cloud Enhancements

### 3.1 Korrelationen und Profile in Tagesgängen

In den Berechnungen und Analysen zum Cloud Enhancement wurden Messdatensätze des Solarenergiefördervereins Bayern (MW-Anlage der Messe München) und des Meteorologischen Instituts der Universität München verwendet. Bild 1 zeigt den Effekt des Cloud Enhancements. Dargestellt werden die Tagesgänge der Globalstrahlung am 8. und am 27. Juli 2009. Während der Tagesgang am 27. Juli die typische partikuläre Ausprägung eines Clear Sky-Tages zeigt, ist der 8. Juli ein Tag mit fluktuierender solarer Einstrahlungsdichte.

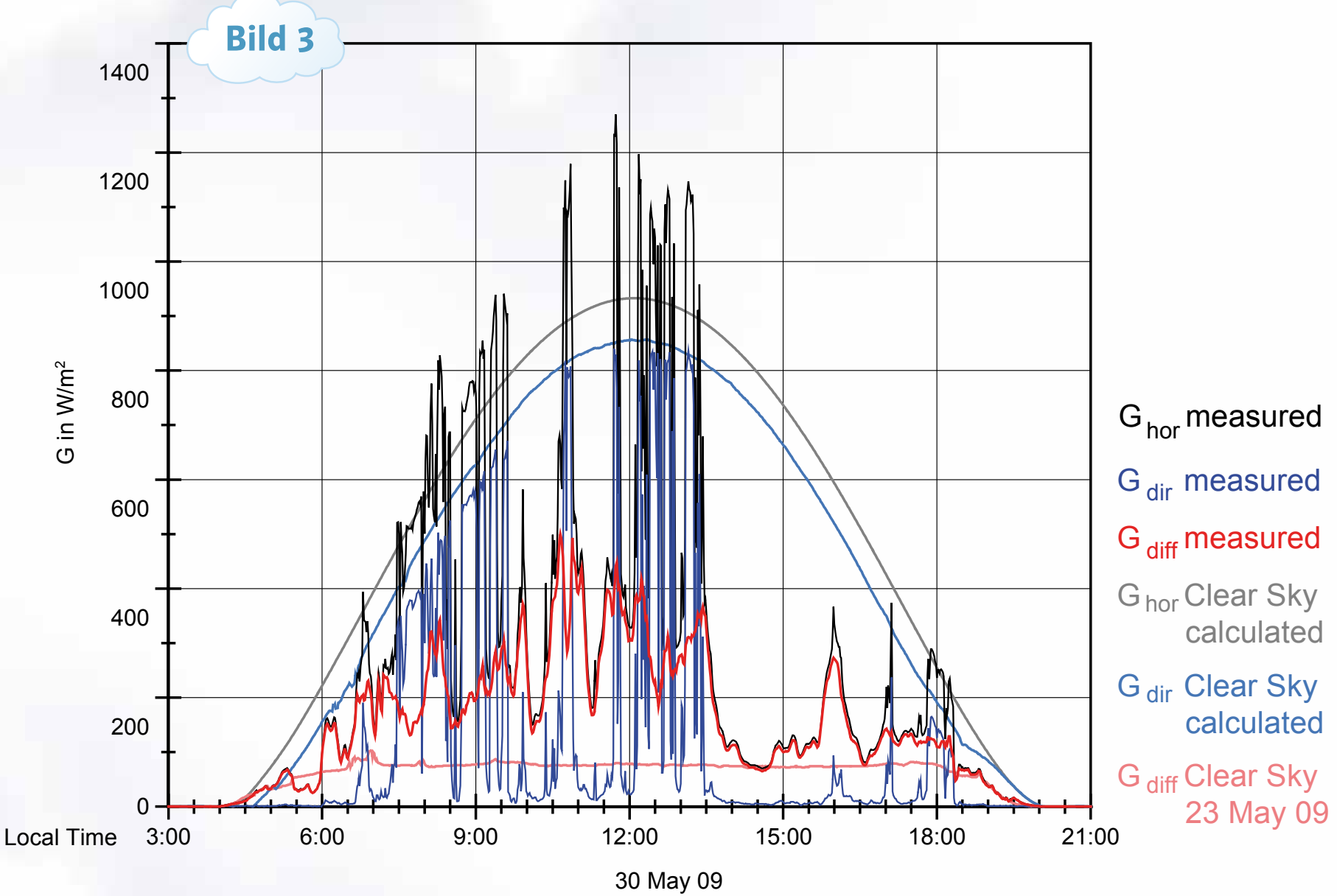
Neben vielen, vereinzelt auch längeren Einstrahlungsspitzen, wurde ein Anwachsen der Maximalwerte von 900 W/m<sup>2</sup> um 8 Uhr, bis zu einem Maximum von 1260 W/m<sup>2</sup> aufgezeichnet. Bild 2 zeigt die an den beiden Tagen aufgezeichneten Außen- und Modultemperaturen. In rot aufgetragen ist der typische Hystereseverlauf der Modultemperatur an einem Clear Sky-Tag. Blau sichtbar ist die Modultemperatur bei fluktuierender Einstrahlungsdichte. 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.

Bild 3 verdeutlicht in den Tagesgängen der Strahlungsanteile die Entstehungsursachen der Einstrahlungsüberhöhungen. In hellgrau zu sehen ist der mit libRadtran berechnete Clear Sky-Tag. Zieht man von dieser Kurve einen typischen Tagesgang der Diffusstrahlung an einem unbewölkten Tag ab (konstant etwa 80 W/m<sup>2</sup>, 23.5.09, hellrot), erhält

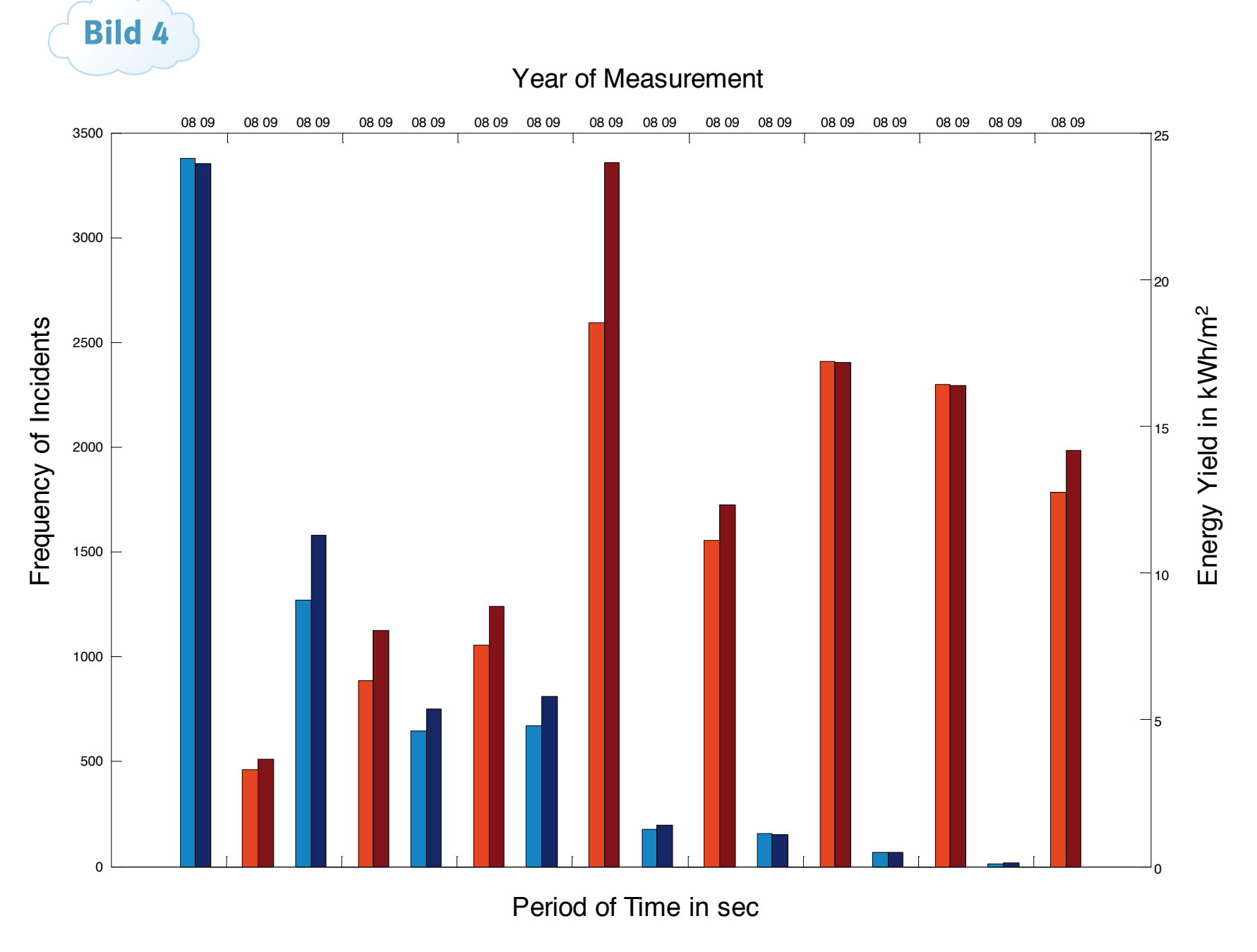
man die hellblaue Kurve als neuen Direktstrahlungsanteil des Clear Sky-Tages. Diese Kurve ist zugleich Hüllkurve für die Direktstrahlungsanteile des bewölkten Tages (dunkelblau). Die Spitzen der Einstrahlungsüberhöhungen werden nun in den Messwerten der Diffusstrahlung mit Werten bis zu über 500 W/m<sup>2</sup> (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 W/m<sup>2</sup> 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.

### 3.2 Statistische Analyse der Ereignisse im Jahresverlauf

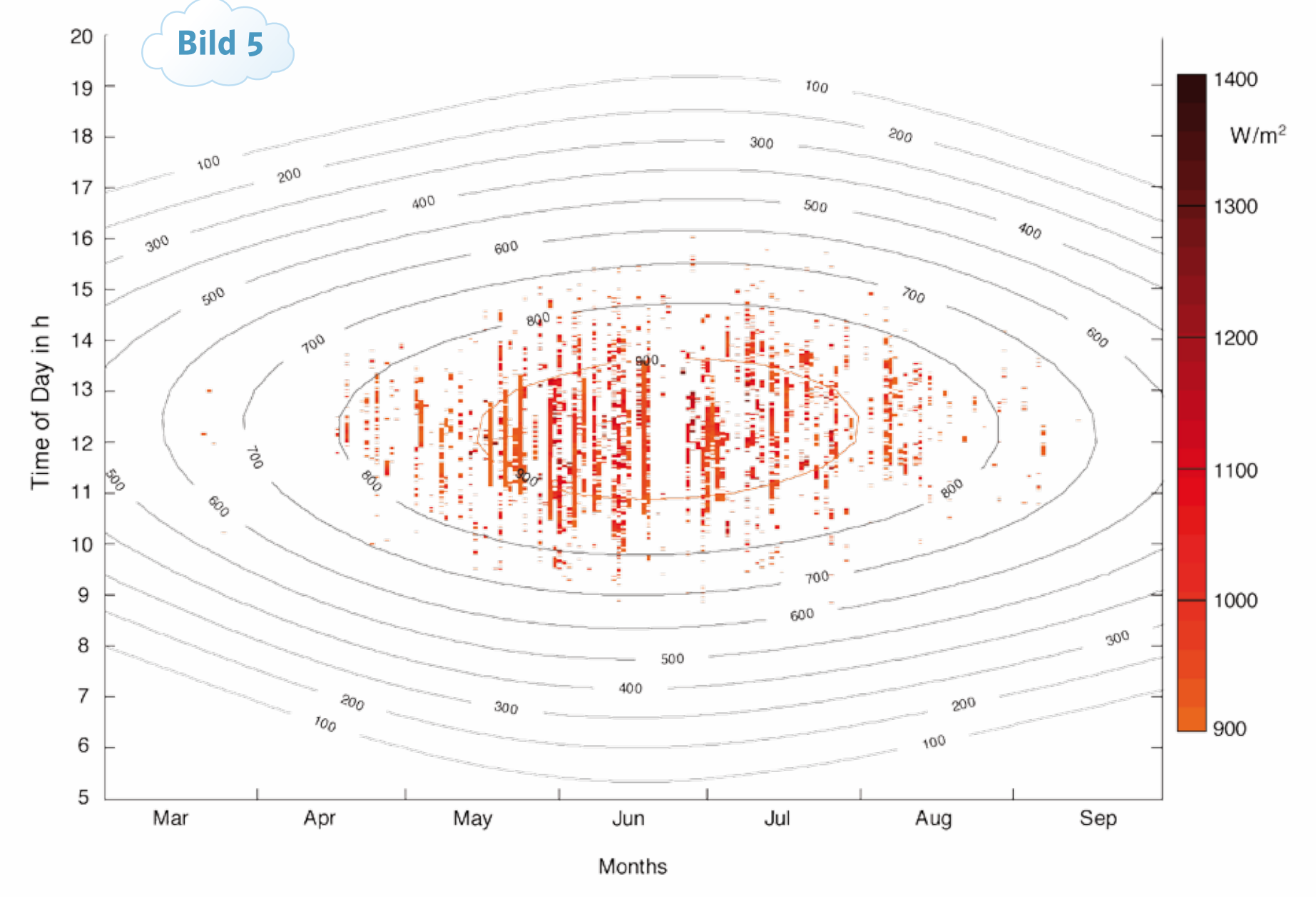
Die Bilder 4 und 5 erläutern die Ereignisse der Einstrahlungsüberhöhungen für die Jahre 2008 und 2009 für München. Bild 4 zeigt Einstrahlungsüberhöhungen über 900 W/m<sup>2</sup>, klassifiziert nach ihrer Dauer, in ihrer Häufigkeit und ihrem Energieinhalt. Bild 5 zeigt die mit libRadtran berechneten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



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.



Einstrahlungsüberhöhungen (Standort aus Bild 1) über 900 W/m<sup>2</sup>, 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).



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

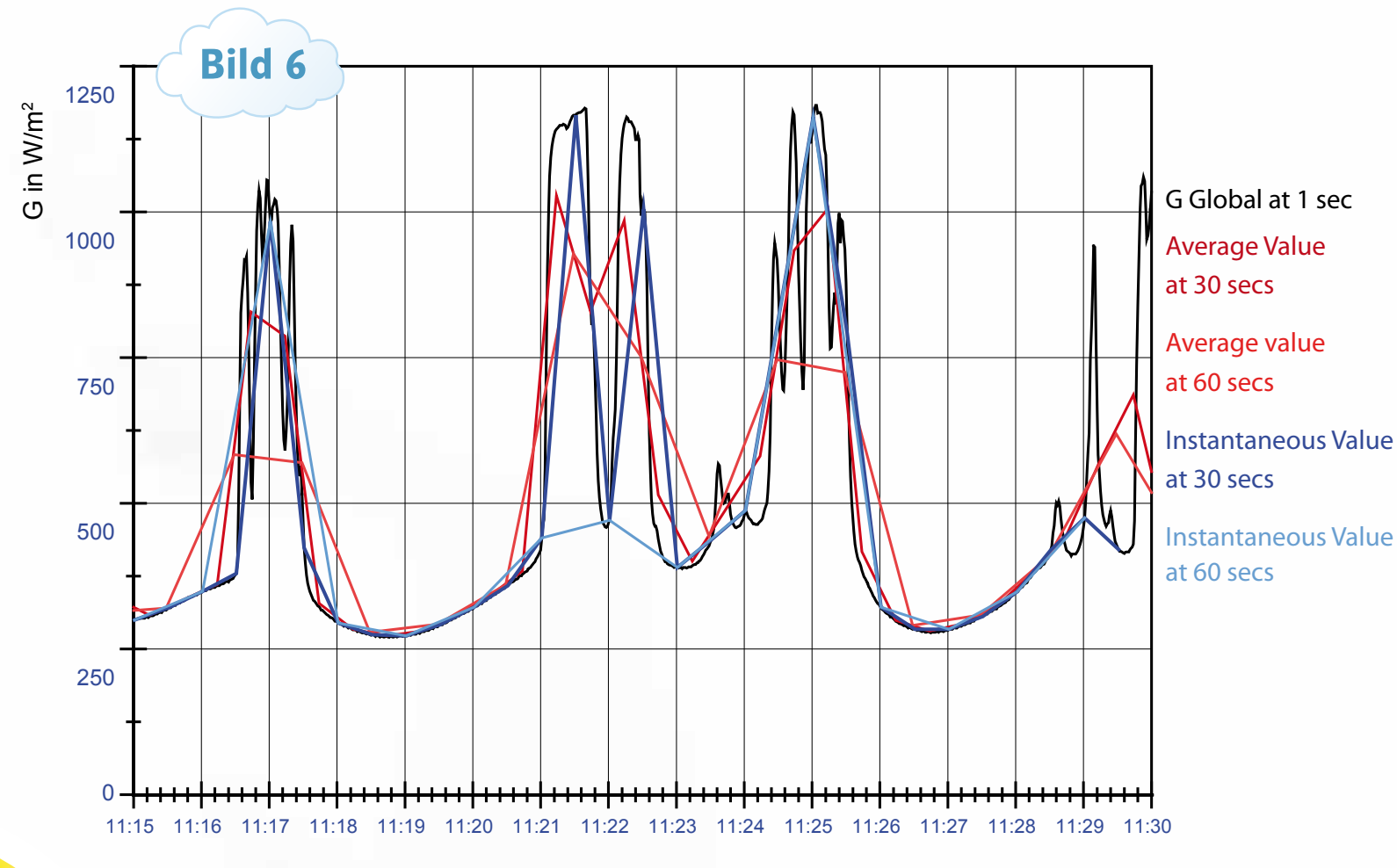
## 4 Messwertaufzeichnung und schließende Messdatenstatistik

Zusätzlich wurden bei der Messdatenanalyse Aussagen zur Wirkung der Wahl der Zeitschrittweite und des Verfahrens bei der Messwertaufnahme getroffen. Zur korrekten Wiedergabe der Spitzen wird eine hohe zeitliche Auflösung benötigt und Momentanwerte geben den Globalstrahlungsverlauf besser wieder als Mittelwerte.

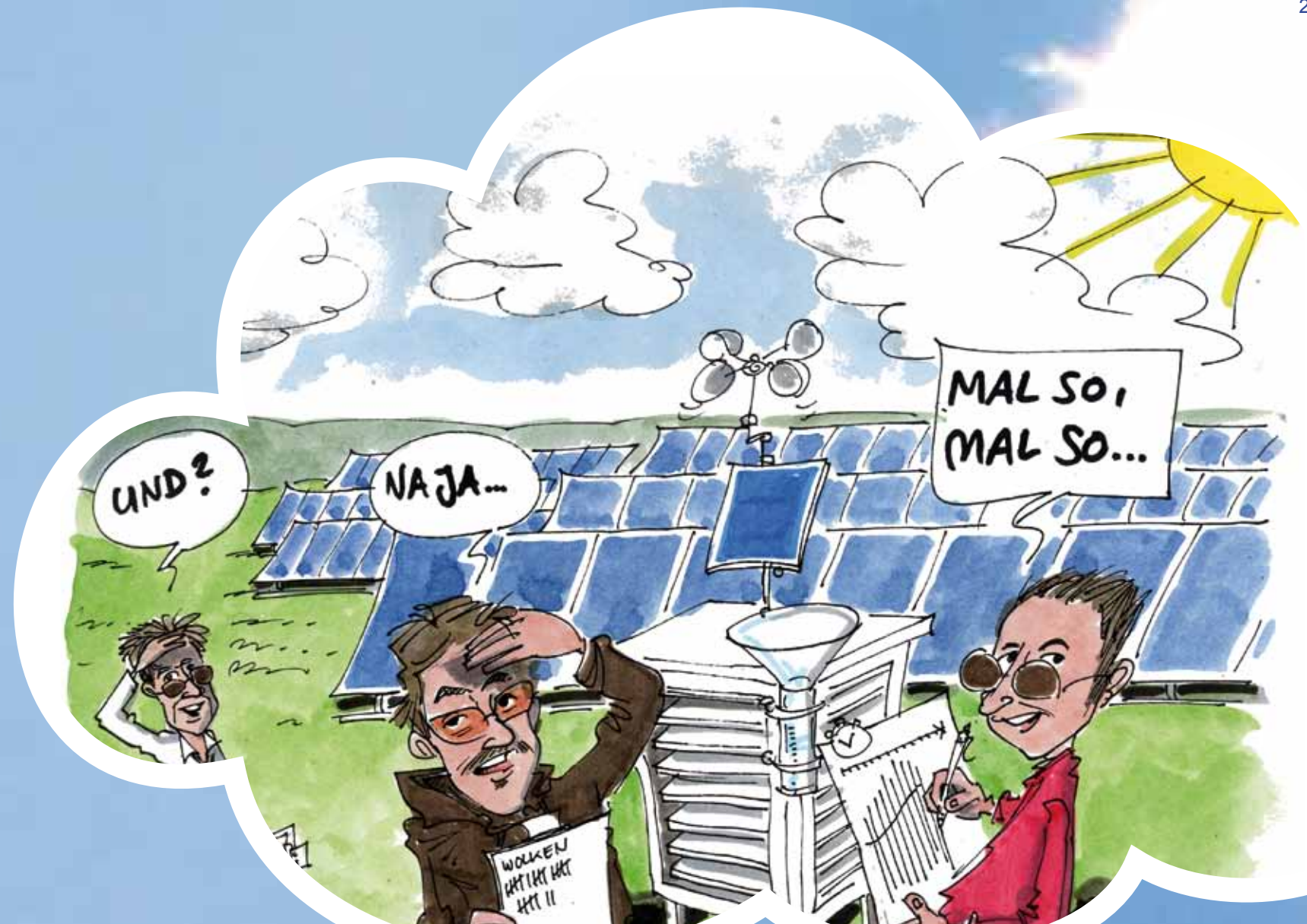
## 5 Zusammenfassung

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 Cumuluswolken (tiefe Wolken).

### Mittel- und Momentanwerte 11:15-11:30



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



<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, IIA SE S PV, Würzburger Straße 121, D-90756 Feucht  
<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