

# Ist der spektrale Einfluss in Ertragsprognosen zu berücksichtigen?

J. Wagner<sup>a</sup>, W. Laube<sup>a</sup>, M. Rennhofer<sup>b</sup>, K. A. Berger<sup>b</sup>, R. Leidl<sup>b</sup>, D. Baumgartner<sup>c</sup> and P. Weihs<sup>a</sup>

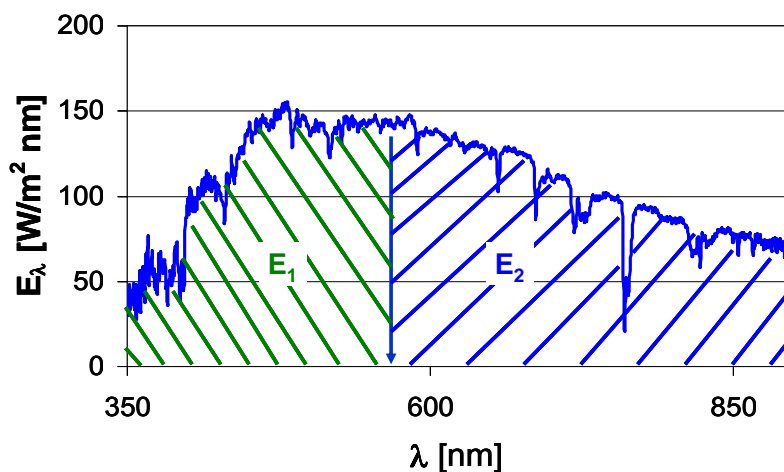
(a) Institute for Meteorology, University of Natural Resources and Life Sciences, Peter Jordan Str. 82, 1190 Vienna, Austria;

(b) AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria,

(c) Observatory Kanzelhöhe, KFU-Graz, Treffen 9521, Austria

## I. Konzept der Gleichgewichtswellenlänge

Nur das Licht mit einer Wellenlänge  $\lambda$  zwischen 300 nm und 1200 nm trägt zu einem Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  (siehe Abbildung 5 und Gleichung 1) bei den untersuchten Technologien (aSi, cSi und CdTe) bei. Aus technischen Gründen wurde in dieser Studie nur das Spektrum zwischen 351 nm und 899 nm auf der Horizontalen ( $E_{dio\_h}(\lambda)$ ) minütlich mit einer spektralen Auflösung von 1 nm erfasst. Details zu den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Messungen finden sich in Wagner [2010] und Rennhofer [2010]. Um die gemessenen Spektren sinnvoll mit einer Maßzahl zu charakterisieren wurden die Gleichgewichtswellenlänge  $\lambda_{ave}$  berechnet (siehe Abbildung 1). Eine hohe Gleichgewichtswellenlänge  $\lambda_{ave} > 597$  nm deutet somit auf eine Verschiebung des Spektrums in den roten Bereich, eine niedrige Gleichgewichtswellenlänge  $\lambda_{ave} < 597$  nm deutet dagegen auf einen zunehmenden Blauanteil hin.



$$\lambda_{ave} \iff E_1 = E_2$$

$$\lambda_{ave}(AM1.5) = 597 \text{ nm}$$

**Abbildung 1:** Berechnung der Gleichgewichtswellenlänge  $\lambda_{ave}$  nach Minemoto [2007].

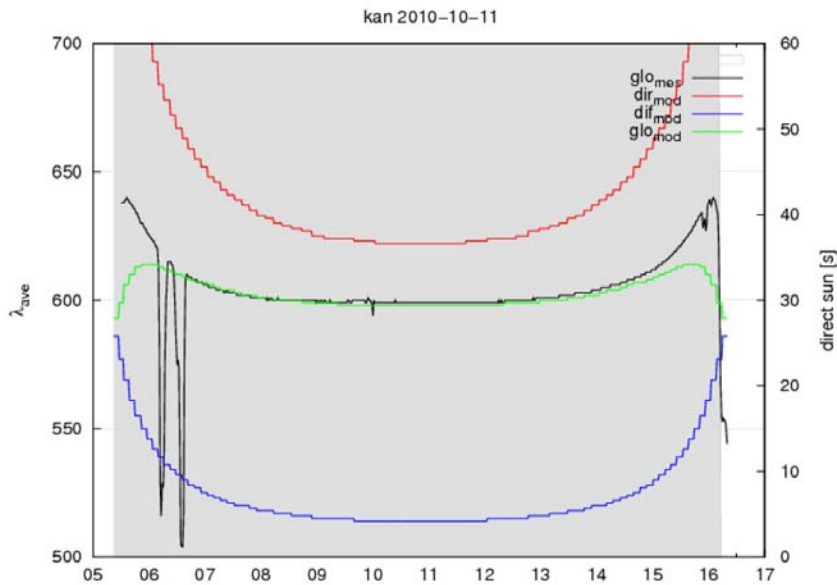
Es wurde nur die spektrale Bestrahlungsstärke auf der Horizontalen ( $E_{\text{dio}_h}(\lambda)$ ) gemessen. Die spektrale Bestrahlungsstärke in der  $35^\circ$  geneigten Modulebene ( $E_{\text{dio}_i}(\lambda)$ ) unterscheidet sich im wolkenlosen Fall signifikant davon (vergleiche Abbildung 2 und 4) –  $i$  steht hier für die Ausrichtungen Ost, Süd und West. Die Umrechnung des Spektrums von der horizontalen in die geneigte Ebene wurde gemäß Klucher [1978] durchgeführt. Für diese Umrechnung ist die Kenntnis des direkten ( $E_{\text{dio}_\text{dir}_h}(\lambda)$ ) und diffusen Anteils ( $E_{\text{dio}_\text{dif}_h}(\lambda)$ ) der spektralen Bestrahlungsstärke nötig. In erster Näherung ist der Anteil der diffusen bzw. direkten spektralen Bestrahlungsstärke an der globalen spektralen Bestrahlungsstärke von der Sonnenhöhe abhängig. Deshalb wurden mit einem 1-dimensionalen Strahlungstransfermodell (Mayer [2005]) Berechnungen mit einer typischen Atmosphäre am Messstandort Kanzelhöhe (geringe Aerosolkonzentration) durchgeführt und so ein Lookup-Tabelle der Werte  $E_{\text{dio}_\text{dir}_h} / E_{\text{dio}_\text{dif}_h}(\lambda, \gamma_s)$  mit  $\gamma_s$  – Sonnenhöhe erstellt. Somit können nicht nur die aus den gemessenen Spektren bestimmten Gleichgewichtswellenlängen in der horizontalen Ebene, sondern auch die abgeleiteten Gleichgewichtswellenlängen in den Modulebenen analysiert werden.

## **II. Spektrale Variabilität**

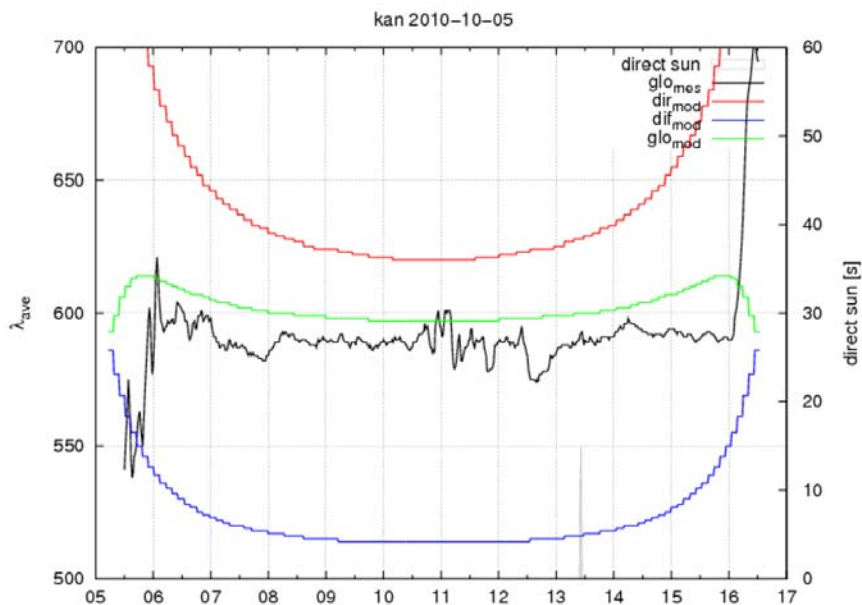
Die spektrale Variabilität wird maßgeblich durch Wolken beeinflusst. Die Ausrichtung der Module verändert das Verhältnis von direkter zu diffuser Bestrahlungsstärke und hat einen Einfluss in der gleichen Größenordnung wie Wolken. Weiters hat die Sonnenhöhe einen signifikanten Einfluss.

### **a) auf der horizontalen Ebene**

Für den Standort Kanzelhöhe und allgemein für mittlere Breitengrade ist der Einfluss der Sonnenhöhe auf die Gleichgewichtswellenlänge gering (siehe Abbildung 2) obwohl die direkte Bestrahlungsstärke sehr stark (rote Sonnenuntergänge) von der Sonnenhöhe abhängig ist. Im Zusammenspiel von direkter und diffuser Bestrahlungsstärke ändert sich die Gleichgewichtswellenlänge im Tagesgang aber kaum (nur morgens und abends). Im Mittel wurde an 27 wolkenlosen Tagen eine Gleichgewichtswellenlänge von 599.4 nm beobachtet. Damit beträgt der Unterschied zur Gleichgewichtswellenlänge des AM1.5 Spektrums nur etwas mehr als 2 nm. Im Gegensatz dazu konnte eine Verschiebung der mittleren Gleichgewichtswellenlänge an 26 bedeckten Tagen ins Blaue um ca. 11 nm beobachtet werden.



**Abbildung 2:** Tagesgang der Gleichgewichtswellenlänge an einem wolkenlosen Tag (11. Oktober 2011). Es sind Messungen (schwarze Linie) und Modellrechnungen (rot – direkte Bestrahlung, blau – diffuse Bestrahlung und grün – globale Bestrahlung) dargestellt.

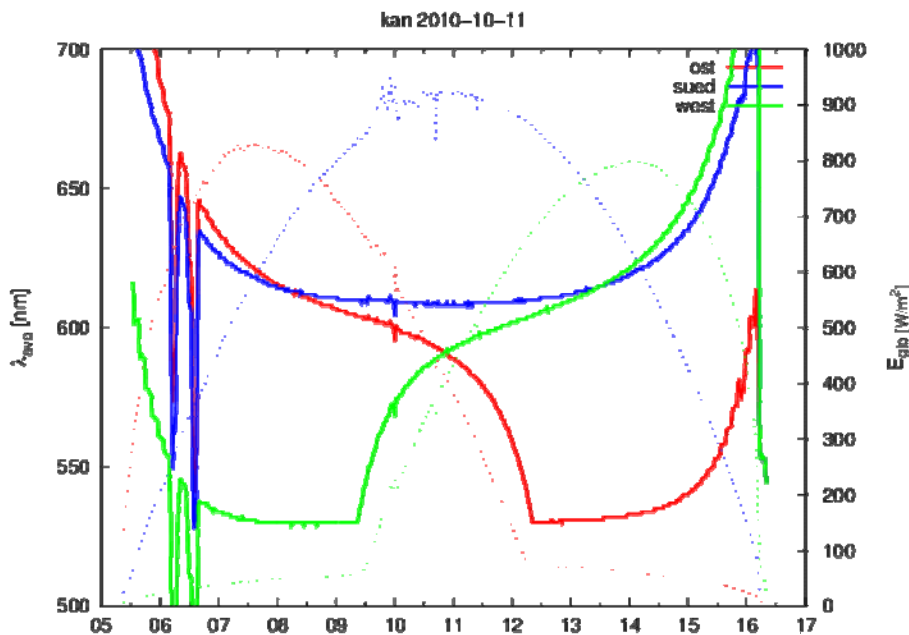


**Abbildung 3:** Wie Abbildung 2. – für einen bedeckten Tag (5. Oktober 2010)

### b) auf der geneigten Ebene

Im bewölkten Fall ist die das Spektrum in der geneigten Ebene identisch mit dem Spektrum auf der Horizontalen. Im wolkenlosen Fall ergibt sich ein heterogenes Bild. Es treten auch in Situationen mit hoher globaler Bestrahlungsstärke starke Abweichungen bis zu 30 nm der Gleichgewichtswellenlänge vom AM1.5 Spektrum auf. Besonders ausgeprägt ist die Verschiebung ins Rote bei den nach ost und west ausgerichteten Modulen. Ursache dafür ist das veränderte Zusammenspiel von direkter und diffuser Bestrahlungsstärke. Beispielsweise erhöht sich der Anteil der direkten Bestrahlungsstärke morgens auf den nach Osten ausgerichteten Modulen

und führt zu einer Rotverschiebung des Spektrums, gleichzeitig wird in dieser Zeit das Tagesmaximum der globalen Bestrahlungsstärke erreicht (siehe Abbildung 4).

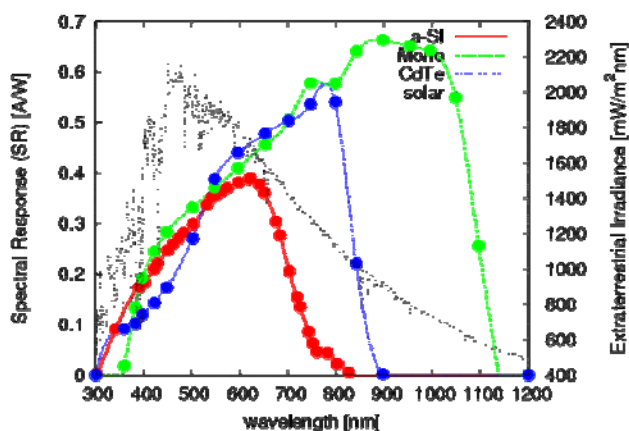


**Abbildung 4:** Der Tagesgang der Gleichgewichtswellenlänge in Modulebene an einem wolkenlosen Tag (11. Oktober 2010) ist dargestellt. Zusätzlich sind die entsprechenden Bestrahlungsstärken (rechte Ordinate) dargestellt. rot – Osten, blau – Süden, grün – Westen

### III. Einfluss auf den Kurzschlussstrom $I_{SC}$

Die spektrale Empfindlichkeit (engl. Spectral Response) beschreibt die Umwandlungseffizienz der spektralen Bestrahlungsstärke  $E(\lambda)$  in den Kurzschlussstrom  $I_{SC}$ . Es gilt:

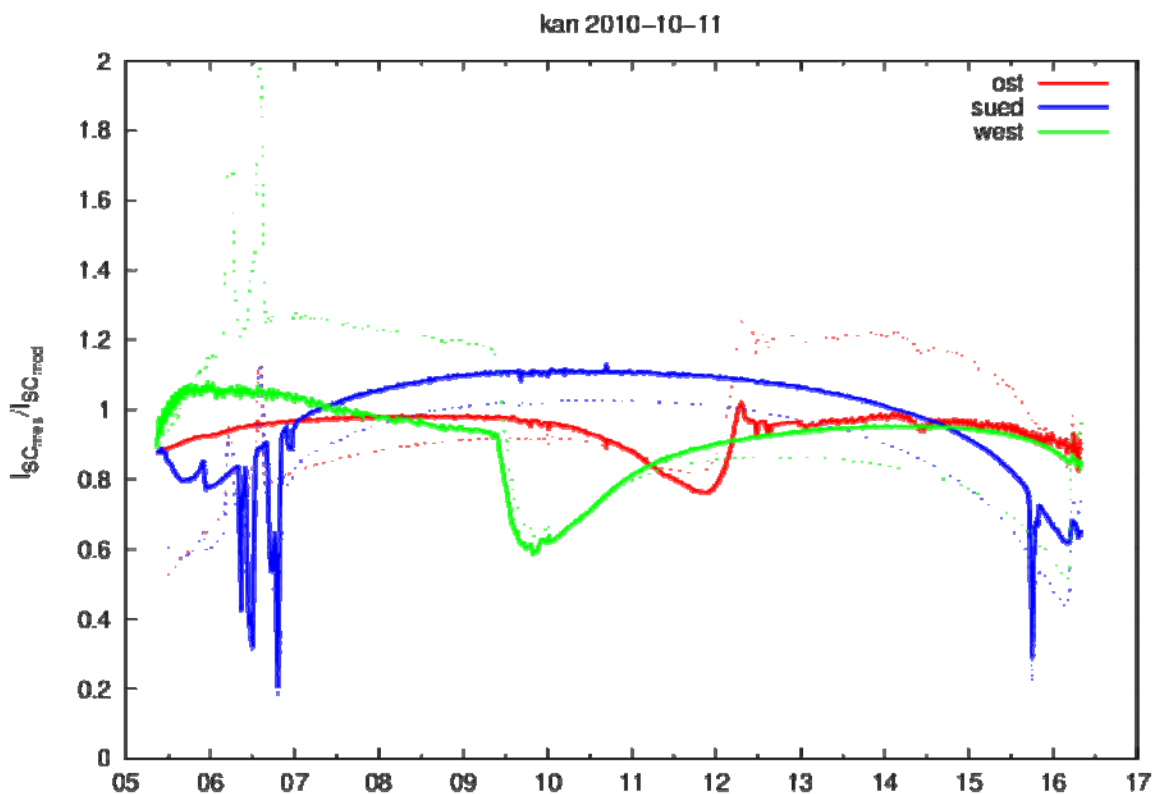
$$I_{SC} \sim I_{ph} = A \cdot \int SR(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda \quad (1)$$



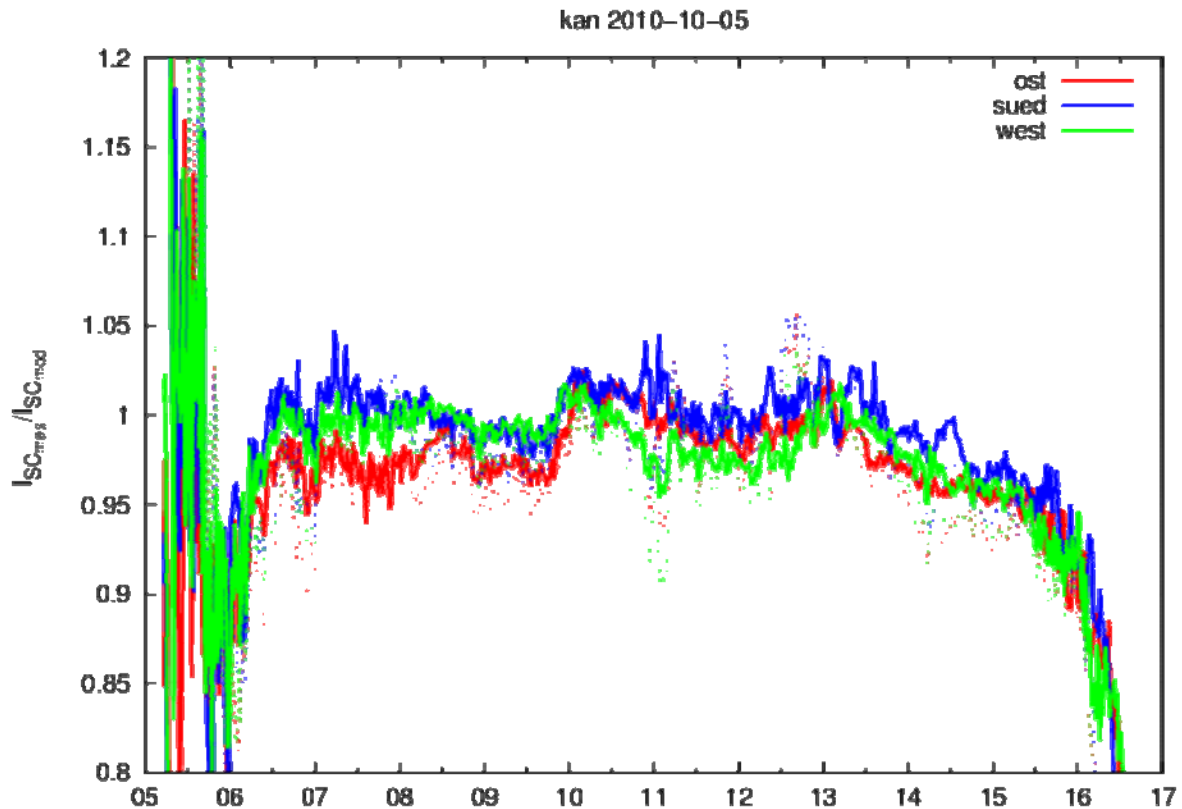
**Abbildung 5:** Spektrale Empfindlichkeit von drei Modultypen (amorphes Silizium – aSi, kristallines Silizium – cSi und Cadmium Tellurid – CdTe) – linke Ordinate. Die extraterrestrische Bestrahlungsstärke ist zusätzlich dargestellt (rechte Ordinate).

Aufgrund fehlender Daten wird der Kurzschlussstrom meist mit dem AM1.5 Spektrum berechnet. Da die beobachtete Gleichgewichtswellenlänge an bedeckten Tagen immer (siehe Abbildung 3) und an sonnigen Tagen teilweise (in Abhängigkeit von

Ausrichtung der Modulebene und Sonnenhöhe, siehe Abbildung 4) signifikant davon abweicht, ergeben sich auch signifikante Unterschiede des Kurzschlussstromes, die wiederum durch die spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Module modifiziert werden (Abbildungen 6 und 7). Der spektrale Einfluss am dargestellten wolkenlosen Tag für die cSi Module liegt im Bereich von 10 Prozent. Allerdings führt die Berücksichtigung des Spektrums nicht immer zu einer besseren Übereinstimmung mit den gemessenen Kurzschlussströmen. Wahrscheinlich ist vor allem bei tiefem Sonnenstand die Umrechnung des Spektrums von der horizontalen auf die geneigte Ebene zu ungenau. Hier wäre es wünschenswert Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke auch in der Modulebene durchzuführen.



**Abbildung 6:** Der Tagesgang des Verhältnisses von gemessenem und modelliertem Kurzschlussstrom des cSi-Moduls in den drei Ausrichtungen (ost, süd und west) ist dargestellt. Dicke Linien beziehen sich auf die klassische Berechnung mit AM1.5, dünne gestrichelte Linien auf die Berechnung mit dem gemessenen (bzw. aus dem aus der Messung in der Horizontalen für die geneigte Ebene abgeleiteten) Spektrum.



**Abbildung 7:** Wie Abbildung 6 für einen bedeckten Tag, den 5. Oktober 2010.

### **Danksagung**

Die präsentierten Ergebnisse wurden vom Klima- und Energiefonds des Bundes, 2. Ausschreibung Neue Energien 2020 gefördert. Projekt: „Einfluss von Sonnenspektrum und Klima auf die Performance von photovoltaischen Anlagen: Regionale Abschätzung des Sonnenenergiepotentials Österreichs“

### **Referenzen**

Klucher, T. M., 1979: Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23(2), 111–114.

B. Mayer and A. Kylling 2005: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1855-1877

Minemoto T., Nagee S. and Takakura H., 2007: Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous Si photovoltaic modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91 (2007) 919–923

M. Rennhofer, Sh. Zamini, K. Berger, Th. Krametz, R. Leidl, A. Bamberger, 25th Symposium Photovoltaische Solarenergie; Bad Staffelstein, Germany (2010)

J.E. Wagner, P. Weihs, M. Rennhofer, S. Zamini, F. Brence, G. Fallent, E. Feitzinger; 25th Symposium „Photovoltaische Solarenergie“, Bad Staffelstein, Germany (2010)