

Kalibrierung digitaler Strahlungssensoren - Messung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit

Karsten Bothe¹, David Hinken¹, Sebastian Denke¹, Rolf Brendel^{1,2}

¹Institut für Solarenergieforschung GmbH, Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

²Institute für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover

Tel.: +49 5151 999 425, Fax: +49 5151 999 400

E-Mail: k.bothe@isfh.de

Internet: www.isfh.de

Aktuell entfällt ca. 30% der in Deutschland installierten Photovoltaikleistung auf Freiflächenanlagen. Gerade für große PV Installationen ist ein Ertragsmonitoring wichtig, um die Wirtschaftlichkeit dieser Solarparks sicherzustellen. Damit man sich auf die Messwerte der Solarstrahlungssensoren verlassen kann, ist eine regelmäßige Kalibrierung der Sensoren wichtig. Die Monitoringnorm IEC 61724-1 [1] verlangt für Klasse A Strahlungssensoren auf Basis von Solarzellen die Einhaltung der Anforderungen für Referenzstrahlungs-sensoren gemäß IEC 60904-2 [2]. Damit wird bei deren Kalibrierung die Messung der spektralen Bestrahlungsstärke-empfindlichkeit (SR) zur Pflicht. Bisher mussten digitale Strahlungssensoren dazu geöffnet und modifiziert werden, da die typischen Messsystemen zur Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärke-empfindlichkeit auf der Messung von Strömen basieren und daher einen direkten elektrischen Kontakt zum aktiven Sensorelement erfordern

Hier stellen wir eine Methode vor, die es uns erlaubt direkt die Strahlungswerte, die digital über eine Computerschnittstelle übertragen werden, als Messgröße zu verwenden. Die Sensoren müssen nicht mehr geöffnet werden, um die Elektronik von dem Sensorelement zu trennen.

Wir verwenden einen LED-Solarsimulator (Abbildung 1) und nutzen die in [3] vorgestellte multi-SR-Methode bei der der Strahlungssensor mit einer Vielzahl von unterschiedlichen AM1.5G ähnlichen Spektren beleuchtet wird.

Für jedes Spektrum messen wir die spektrale Bestrahlungsstärke mit einem absolut kalibrierten Spektrometer und lesen den Strahlungswert des Sensors aus. Die Strahlungswert-Spektrum-Datenpaare werden dann mit dem in [3] dargestellte Verfahren mathematisch ausgewertet und die SR ermittelt.

Die multi-SR-Methode für digitale Bestrahlungsstärke-sensoren haben für Sensoren verschiedener Hersteller validiert indem wir die mit der Multi-SR-Methode bestimmten Kurven mit den Kurven desselben Sensors vergleichen, der für Messungen mit der herkömmlichen DSR/SR-Methode [4] modifiziert wurde. Für einen IMT Si-RS485TC-T-MB zeigt Abbildung 2 beispielhaft die mit der multi-SR-Methode gemessene SR (rote Kreise) im Vergleich zur DSR/SR-Methode (blaue Linie) nach Dekontaktierung der MODBUS-Elektronik.

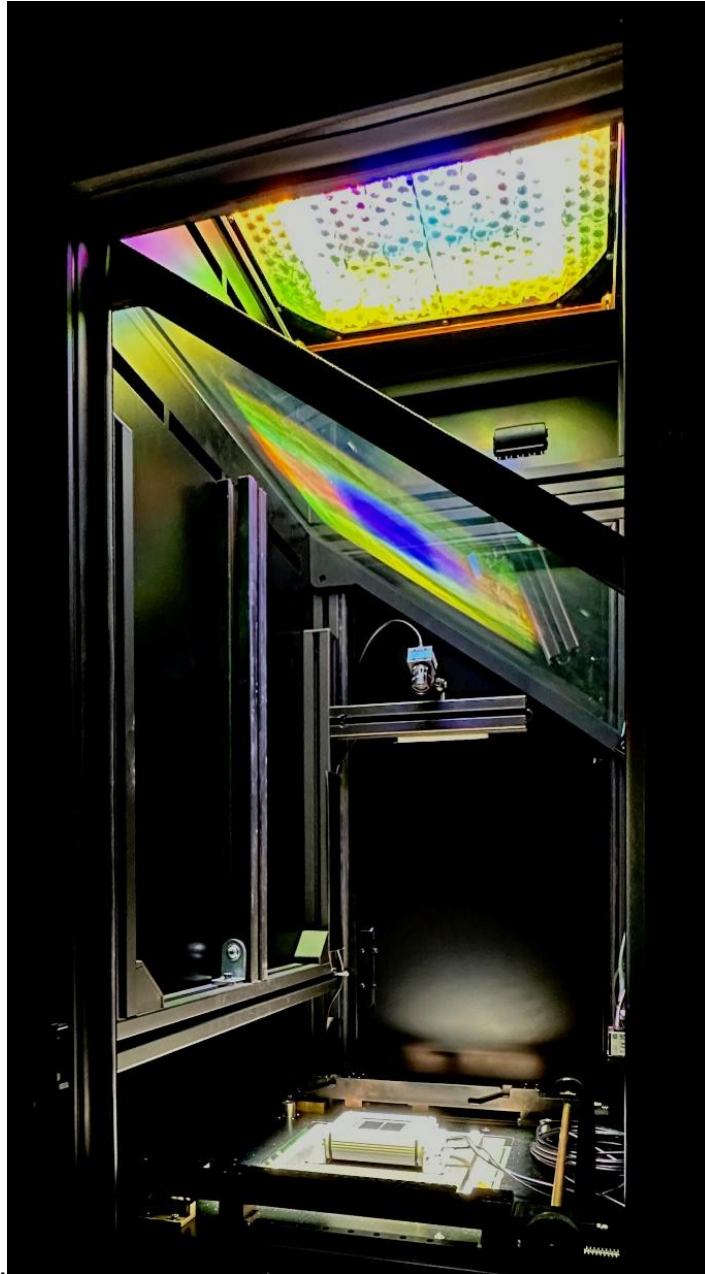


Abbildung 1: Digitaler Solarstrahlungssensor installiert zur Kalibrierung unter einem LED-Sonnensimulator im ISFH CalTeC.

Die Daten in Abbildung 2 zeigen, dass die multi-SR-Methode die Bereiche in denen sich die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit stark ändert (zwischen 300 und 400 nm sowie zwischen 1000 und 1100 nm), richtig beschreibt. Die Abweichungen zwischen den beiden Methoden beträgt weniger als $\pm 6\%$ _{rel} im Wellenlängenbereich zwischen 350 und 1150 nm. Es ist zu beachten, dass die resultierenden $SR_{\text{dig}}(\lambda)$ -Werte dimensionslos, aber absolut sind. Die Multiplikation mit einer spektralen Bestrahlungsstärke wie dem AM1.5G-Referenzspektrum [5] und die anschließende Integration des Produkts ergibt also direkt die Bestrahlungsstärke. Für die in Abbildung 2 dargestellten $SR_{\text{dig}}(\lambda)$ -Daten ergibt dies einen Wert von 996 W/m². Die Abweichung von den erwarteten 1000 W/m² beträgt also nur $-0,4\%$ _{rel}.

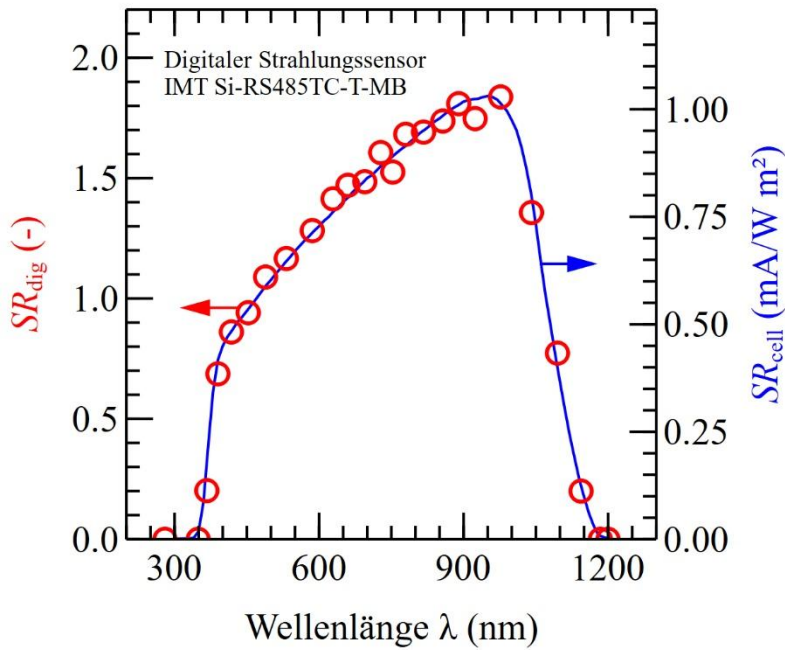


Abbildung 2: Spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit eines digitalen Bestrahlungsstärkeensors. rote Kreise: multi-SR-Methode, blaue Linie: herkömmliche DSR/SR-Methode nach Modifikation des Sensors.

Multi-SR Methodik

In der ursprünglichen Version der Multi-SR-Methode [3] wird die Solarzelle mit N verschiedenen Spektren $\phi_i(\lambda)$ ($\text{W/m}^2/\text{nm}$) bestrahlt, während für jedes einzelne Spektrum ($i=1..N$) der Kurzschlussstrom $I_{\text{sc},i}$ (mA) gemessen wird. Ein mathematischer Ansatz ermöglicht es dann, die spektrale Empfindlichkeit der Zelle, SR_{cell} (mA/W m^2), aus dem erhaltenen Datensatz durch Lösen des Gleichungssystems

$$I_{\text{sc},i} = \int d\lambda SR_{\text{cell}}(\lambda) \phi_i(\lambda). \quad (1)$$

zu bestimmen.

Für die Analyse digitaler Bestrahlungsstärke Sensoren verwenden wir den Multi-SR-Ansatz, da digitale Bestrahlungsstärke Sensoren in der Regel eine parallelgeschaltete Solarzelle mit einem Shunt-Widerstand R (Ohm) und eine Geräteelektronik enthalten, die den Spannungsabfall V_i (mV) über diesem Shunt-Widerstand misst. Die Geräte-Firmware wandelt die gemessene Spannung unter Verwendung eines Kalibrierungswerts C ($\text{W/m}^2/\text{mV}$) in eine Bestrahlungsstärke E_i (W/m^2) um

$$E_i = C \times V_i = C \times R \times I_{\text{sc},i}. \quad (2)$$

Diese Gleichung ermöglicht es, $I_{\text{sc},i}$ in Gleichung (1) zu ersetzen

$$E_i = \int d\lambda SR_{\text{dig}}(\lambda) \phi_i(\lambda). \quad (3)$$

$$SR_{\text{dig}}(\lambda) = SR_{\text{cell}}(\lambda) \times C \times R, \quad (4)$$

ist die spektrale Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit eines digitalen Bestrahlungsstärkesensors. Sie ist dimensionslos und ermöglicht durch Multiplikation mit einer spektralen Bestrahlungsstärke und Integration des resultierenden Produkts die direkte Berechnung der Bestrahlungsstärke E (W/m^2).

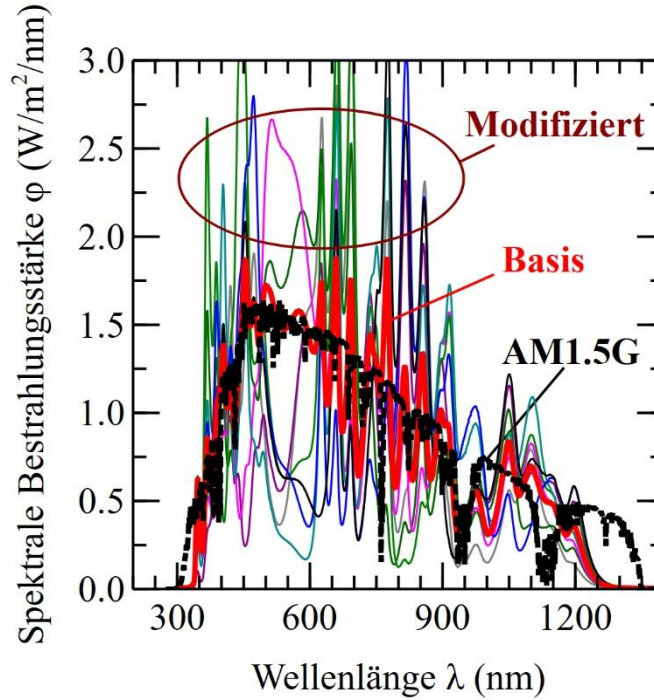


Abbildung 1: Acht verschiedene modifizierte Spektren zusammen mit dem Basisspektrum (rot) und dem AM1.5G-Spektrum (schwarz).

Unter Verwendung eines LED-basierten Sonnensimulators mit 27 verschiedenen Kanälen erzeugen wir N verschiedenen Spektren $\phi_i(\lambda)$ ($i = 1..N$), die einen Wellenlängenbereich von 346 nm bis 1195 nm abdecken. Die Intensität I jedes Kanals kann mit unserer LabVIEW-Software unabhängig eingestellt werden. Als Ausgangspunkt wird eine Basiskonfiguration $\vec{I}_{\text{base}}$ verwendet, bei der es sich um einen Vektor mit 27 Elementen handelt, die die Intensität jedes Kanals angeben. Jedes der N verschiedenen Spektren ist eine kleine Modifikation der Basiskonfiguration. Wir generieren N Vektoren $\vec{r}_i$ mit 27 Zufallswerten. Jeder Zufallswert hat eine gleichmäßige Verteilung zwischen 0,0 und 2,0. Die endgültige Kanalkonfiguration $\vec{I}_i$ für das Spektrum ϕ_i wird dann unter Verwendung eines elementweisen Produkts (Hadamard-Produkt) bestimmt.

$$\vec{I}_i = \vec{I}_{\text{base}} \odot \vec{r}_i. \quad (5)$$

Insgesamt erstellen wir $N = 50$ verschiedene Spektren. Acht dieser Spektren sind beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt. Für jedes Spektrum wird die Reaktion E_i des Bestrahlungsstärkesensors über die digitale Schnittstelle ausgelesen.

Die resultierenden Datenpaare $(\phi_i(\lambda), E_i)$ werden in Gleichung (3) eingesetzt und ergeben ein Gleichungssystem, das mathematisch gelöst wird. Wir verwenden die schrittweise Diskretisierung der Spektralempfindlichkeitsdaten und eine Regression der kleinsten Quadrate (Einzelheiten siehe Referenz [3]). Als Ergebnis erhält man die Spektralempfindlichkeit $SR_{\text{dig}}(\lambda)$ gemäß Gleichung (4) des digitalen Bestrahlungsstärkesensors.

Literatur:

- [1] IEC 61724-1:2021, Ed. 2.0, Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring, ISBN 9782832250860.
- [2] IEC 60904-2:2023, Ed. 4.0, Photovoltaic devices Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices, ISBN 9782832269480.
- [3] D. Hinken, C. Schinke, K. Bothe and R. Brendel, "Multi-Spectrum Method for the Determination of the Spectral Responsivity and the Short-Circuit Current of Photovoltaic Devices, <https://doi.org/10.1002/solr.202300240>," Solar RRL Volume 7, Issue 13, p. 2300240, 2023.
- [4] IEC 60904-8:2014, Ed. 3.0, Photovoltaic devices - Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device, ISBN 9782832215302.
- [5] IEC 60904-3:2019, Ed. 4.0, Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices, ISBN 9782832262689.