

Referenzzellen vs. Pyranometer – Abweichungen und Umrechnung von Messwerten

Mariella Rivera, Christian Reise
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Germany
Tel.: +49 1520 4030386
mariella.josefina.rivera.aguilar@ise.fraunhofer.de
www.ise.fraunhofer.de

ABSTRACT:

Viele Schritte in einem Solarenergieprojekt - Ressourcenbewertung, Planung, Ertragsvorhersage, Betrieb und Wartung - hängen von genauen und zuverlässigen Messungen der Sonneneinstrahlung ab. Es werden jedoch verschiedene Arten von Sensoren verwendet, die je nach Messung unterschiedliche Anwendungen haben. Wir haben die beiden wichtigsten Sensortypen betrachtet: thermische Bestrahlungsstärkesensoren (Pyranometer) und Silizium-Referenzzellen. In dieser Studie stellen wir zunächst die Unterschiede in den Messergebnissen der beiden Sensoren dar. Dies geschieht durch die Auswertung der globalen Bestrahlungsstärke in der Ebene des Arrays (POA), die von beiden Sensoren gemessen wurde, die in verschiedenen Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) in Deutschland installiert sind. Aus dieser Bewertung werden die Hauptfaktoren aufgezählt, die zu den Unterschieden beitragen: Temperaturabhängigkeit, Winkelabhängigkeit, Spektralabhängigkeit und Kalibrierungsabweichung. Außerdem wird ein Satz von Korrekturgleichungen auf die Daten der Silizium-Referenzzelle angewendet. Diese Gleichungen korrelieren die beiden Sensoren und die Faktoren, die zu ihrer Abweichung beitragen (erhalten aus der Datenanalyse, früheren Studien und den technischen Spezifikationen des Sensors). Schließlich bewerten wir das Korrekturmodell mit einem neuen Datensatz und erreichen eine Verringerung der Unterschiede zwischen den Sensoren (Root Mean Square Deviation RMSD) von etwa 38 %.

1 EINLEITUNG

Die Messung der solaren Bestrahlungsstärke ist der Schlüssel zu einer präzisen Bewertung eines Solarenergieprojekts; daher besteht die Notwendigkeit für einen hochpräzisen Sensor, der solche Messungen liefert.

Es gibt zwei Kategorien von Geräten, die für die Messung der Bestrahlungsstärke verwendet werden: Die erste sind Wärmestrahlungssensoren, auch bekannt als Thermopile-Pyranometer. Sie sind hochpräzise Instrumente, die aufgrund ihrer nahezu konstanten spektralen Empfindlichkeit über das gesamte Sonnenspektrum meist in meteorologischen Stationen eingesetzt werden. Sie

verfügen über eine Temperaturkompensationsschaltung, um den durch die Änderungen der Umgebungstemperatur verursachten Fehler zu reduzieren. Ihre Ansprechzeit ist jedoch relativ langsam (bis zu 15 Sekunden). Dadurch haben sie einen Nachteil bei Tagesübergängen zwischen klar und bewölkt, was zu erheblichen Fehlern bei Momentanmessungen führen kann [1]. Messungen, die mit einem Pyranometer durchgeführt werden, werden in dieser Arbeit als G_{pyr} bezeichnet.

Die zweite Kategorie sind photovoltaische Strahlungssensoren, bei denen Photodioden-Pyranometer und Silizium-Solarzellen (Referenzzellen) eingesetzt werden. Letztere sind eine wirtschaftliche Alternative für die Überwachung der Bestrahlungsstärke. Sie zeigen ein schnelles Zeitverhalten, was sie bei schnellen Änderungen der Sonneneinstrahlung zuverlässiger macht. Darüber hinaus haben sie nahezu die gleiche spektrale Empfindlichkeit wie die im System vorhandenen PV-Module. Einige Probleme, die auftreten können, sind die ungleichmäßige spektrale Empfindlichkeit und ihre thermische Abhängigkeit [1, 2]. Messungen, die mit einer Referenzzelle durchgeführt wurden, werden in diesem Beitrag mit G_{si} bezeichnet.

Wie in Abbildung 1 gezeigt, weisen die Bestrahlungsstärkemessungen dieser beiden Sensoren deutliche Unterschiede auf. Im Allgemeinen sind die Unterschiede am frühen Morgen und am späten Nachmittag aufgrund des flachen Deckglases der Referenzzellen größer; hohe Einfallswinkel (AOI) des Sonnenlichts haben einen größeren Einfluss auf die Messungen der Referenzzellen im Vergleich zu den Messungen des Pyranometers. Ein hoher AOI erhöht die Lichtreflexion an der Sensorabdeckung (Reflexionsverluste), was das gemessene Signal senkt [3].

Um einen Einblick in die Faktoren zu bekommen, die zu ihren Unterschieden beitragen, wurden Daten aus dem Jahr 2017 von sechs Überwachungssystemen in ganz Deutschland gesammelt. Die Studie arbeitet mit der solaren Bestrahlungsstärke, die in der Ebene des Arrays (POA) in Fünf-Minuten-Intervallen von einem Thermopile-Pyranometer CMP11 von Kipp & Zonen und einem monokristallinen Siliziumsensor von Mencke & Tegtmeyer mit einem eingebetteten Pt100-Temperatursensor auf der Rückseite der Zelle gemessen wird. Aus der Datenanalyse und früheren Studien geht hervor, dass die Hauptursachen für die Abweichung die Temperaturabhängigkeit, der Winkelgang, der Spektralgang und die Kalibrierungsabweichung sind.

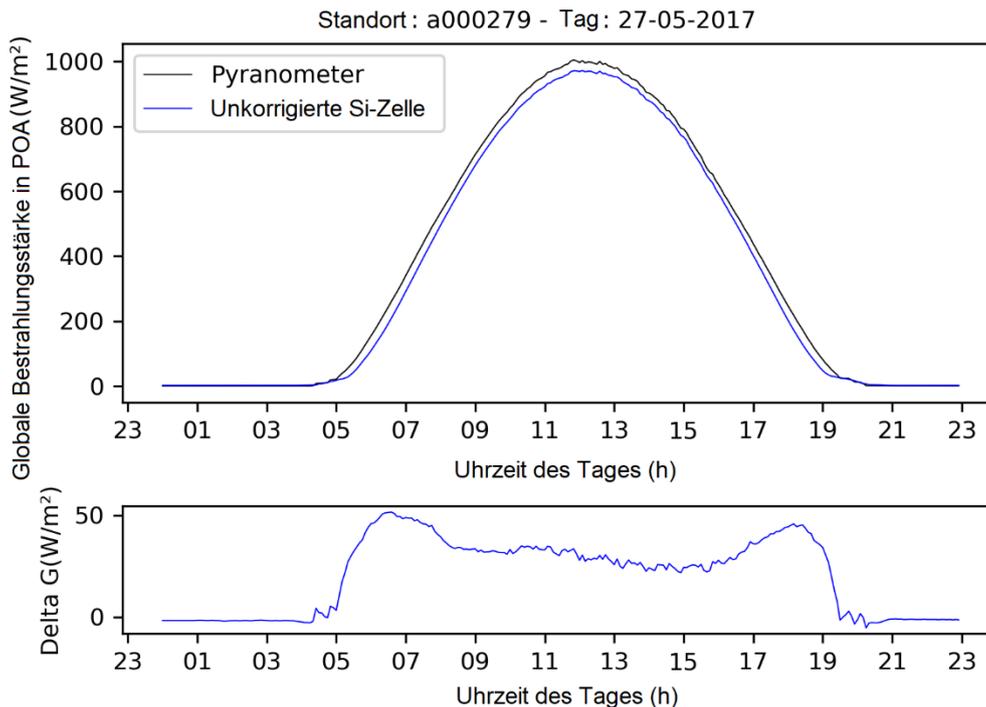


Abbildung 1: Beispiel für Abweichungen zwischen Bestrahlungsstärkemessungen. Oberes Diagramm: Messungen der globalen Bestrahlungsstärke in POA, wie sie vom Pyranometer und der Referenzzelle aufgezeichnet wurden. Unteres Diagramm: die Differenz zwischen den Messwerten des Sensors.

Diese Studie zielt darauf ab, die physikalischen Eigenschaften und Designunterschiede zwischen Referenzzellen und Thermopile-Pyranometern zu analysieren, die die Fehlmessungen zwischen ihnen verursachen. Auf dieser Grundlage erstellen wir eine Reihe von Korrelationen und Gleichungen als ein Modell, das die Messungen der Referenzzelle korrigieren kann, um die Messwerte eines hochpräzisen Thermopile-Pyranometers nachzuahmen. Mit diesem Modell könnten die Daten der Referenzzelle in den verschiedenen Prozessen eines Solarenergieprojekts nützlicher sein und die Unsicherheiten beim Vergleich der beiden Sensorkategorien könnten reduziert werden [4, 5].

2 METHODIK

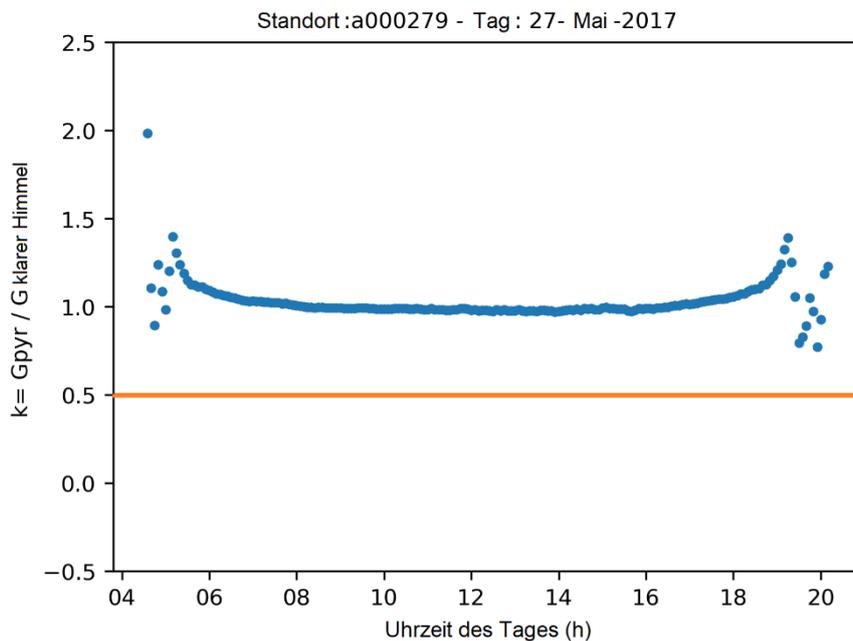
2.1 Variablen und Datenfilterung

Neben der gemessenen Sonneneinstrahlung in POA und der Zelltemperatur werden neue Variablen berechnet. Damit wird der Einfluss des Sonnenstandes auf die Messdifferenz zwischen den Einstrahlungssensoren ermittelt. Die Sonnenstandswinkel und die zugehörigen Variablen werden mit Hilfe von pvlib-python berechnet, das eine Reihe von dokumentierten Funktionen und Klassen für die Simulation der Leistung von Photovoltaikanlagen enthält. Es berücksichtigt

grundlegende Informationen wie den Standort, die Uhrzeit und den atmosphärischen Druck am Standort [6]. Die neuen Variablen umfassen Zenit-, Elevations- und Azimutwinkel, Einfallswinkel (AOI), Luftmasse (AM) und Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel.

Zur Erstellung der Korrelationsgleichungen zwischen den beiden Sensoren und den neu berechneten Variablen, die als Korrekturen verwendet werden, wird ein Trainingssatz von Messdaten aller Überwachungssysteme über ein Jahr hinweg verwendet. Die Daten werden für AOI kleiner als 90° gefiltert, um Messfehler aufgrund von Verzerrungen und Reflexionsverlusten zu vermeiden. Diese Fehler treten vor allem bei Messungen mit Referenzzellen auf, da diese aus einem flachen Deckglas bestehen [7]. Anschließend wird die Korrektursequenz bei der abschließenden Modellauswertung auf Bestrahlungsstärkemessungen angewendet, die den gesamten Bereich des solaren Einfallswinkels umfassen. Zusätzlich tragen hohe Luftmassenwerte (AM) zur Verzerrung der abgeleiteten Korrekturen bei [8]; daher werden die Daten für Bestrahlungsdichtemessungen mit einer Luftmasse kleiner als AM10 gefiltert.

$$k = \frac{G_{mess,pyr}}{G_{klarer\ Himmel}} \quad (1)$$



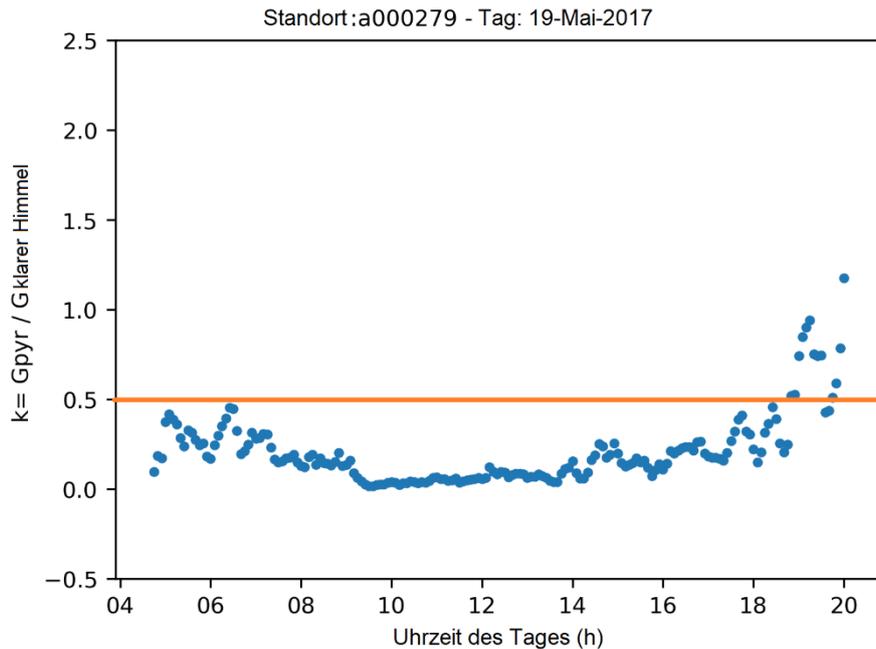


Abbildung 2: Beispiel für den Clear-Sky-Index k für einen Tag mit klarem Himmel (obere Grafik) und einen Tag mit bewölktem Himmel (untere Grafik).

Ein weiterer Faktor für die Filterung der Daten ist die Unterscheidung zwischen Tagen mit klarem und bewölktem Himmel, was bei der Analyse des unterschiedlichen Messverhaltens zwischen diesen Tagen nützlich ist. Wir definieren den Parameter k in Gleichung (1), bekannt als Klarhimmel-Index, als das Verhältnis der mit dem Pyranometer gemessenen Bestrahlungsstärke ($G_{mess,pyr}$) und der simulierten Klarhimmel-Bestrahlungsstärke im POA ($G_{klarer\ Himmel}$), wie mit der `pvlb-python`-Bibliothek berechnet.

Der Klarhimmel-Index wurde für den gesamten Datensatz berechnet und gezeichnet. Ein Schwellenwert von 0,5 wurde verwendet, um Tage mit klarem und bewölktem Himmel zu unterscheiden. Das bedeutet, dass Bestrahlungsstärkemessungen mit k -Werten größer als 0,5 als Tage mit klarem Himmel klassifiziert werden, während diejenigen mit k -Werten unter 0,5 zu Tagen mit bewölktem Himmel gehören. Abbildung 2 zeigt Daten für zwei Beispieltage.

2.2 Korrekturreihenfolge

Zur Übersicht: Das erstellte allgemeine Korrekturverfahren beginnt mit einer Temperaturkorrektur der unkorrigierten Bestrahlungsstärke-Messungen der Referenzzelle. Danach differenziert und trennt das Modell die Daten zwischen Tagen mit klarem und bewölktem Himmel. Außerdem werden eine Korrektur der Winkelantwort und eine Korrektur der spektralen Antwort auf die Daten angewendet. Für Tage mit klarem Himmel werden Korrekturgleichungen für die spezifische Referenzzelle angewendet, die aus früheren Studien und technischen Spezifikationen

stammen. Für Tage mit bewölktem Himmel werden Korrelationsgleichungen verwendet, die durch Datenanalyse gefunden und an die Tendenz der Daten unter bewölkten Bedingungen angepasst wurden. Zum Schluss wendet das Modell eine Kalibrierungskorrektur an. Diese Schritte werden in den folgenden Abschnitten im Detail erläutert.

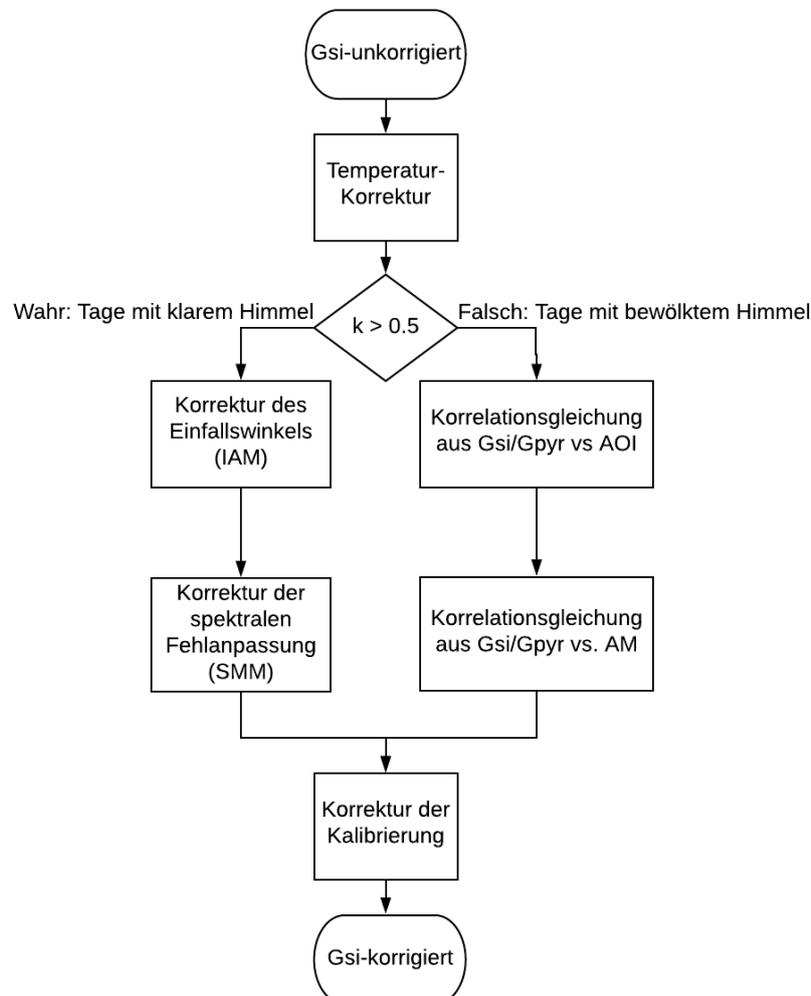


Abbildung 3: Korrektursequenz, die auf die Bestrahlungsstärkemessungen der Referenzzelle G_{si} angewendet wurde.

2.3 Temperaturkorrektur

Photovoltaische Sensoren wie Referenzzellen zeigen eine lineare Temperaturabhängigkeit, die mit dem Temperaturkoeffizienten des Kurzschlussstroms zusammenhängt [9]. Dies wird vom Hersteller berücksichtigt, und typischerweise wird eine Korrekturgleichung (2) zur externen Temperaturkompensation angegeben [10].

$$G_{temp.korr} = G_{unkorr} \cdot (1 - \alpha(T_{sensor} - 25^{\circ}\text{C})) \quad (2)$$

Dabei ist α der Temperaturkoeffizient in $1/^\circ\text{C}$, der von den Kalibrierlaboratorien am Fraunhofer ISE für dieses spezifische Sensormodell mit $0,00034/^\circ\text{C}$ angegeben wird, G_{unkorr} sind die Bestrahlungsstärkemessungen der Referenzzelle ohne Temperaturkorrektur und T_{sensor} ist die Oberflächentemperatur der Sensorrückseite.

2.4 Korrektur der Winkelantwort

Die Abhängigkeit von der AOI ist eine der Hauptdiskrepanzen zwischen den beiden Sensorkategorien, da ihre optischen Mechanismen deutlich unterschiedlich sind. Das Thermopile-Pyranometer mit seiner Glaskuppel erlaubt eine breitere Reaktion auf den relativen Sonnenstand, während die Referenzzelle mit der flachen Glasabdeckung bei hohem AOI aufgrund von Reflexionsverlusten Fehler aufweist [9]. Um die Abweichung der Messungen der Referenzzelle aufgrund des Winkelverhaltens zu korrigieren, unterteilt das Modell die Daten in Tage mit klarem und bewölktem Himmel, da die Daten ein unterschiedliches Verhalten bei den Messungen in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen zeigen.

Für Tage mit klarem Himmel wendet das Modell die Werte der Incident Angle Modifier (IAM)-Kurve in Abhängigkeit vom AOI an, die vom Hersteller bereitgestellt wird [11]. Die Werte in der Kurve berücksichtigen die Abnahme der Bestrahlungsstärke aufgrund der Reflexion an der Glasabdeckung des Sensors durch die Erhöhung des AOI [12]. Sie wird mit Gleichung (3) angewendet.

$$G_{AOIkorr} = \frac{G_{temp.korr}}{IAM} \quad (3)$$

Für Tage mit bewölktem Himmel haben wir uns die Korrelation zwischen den beiden Sensoren und dem AOI angesehen, indem wir das Verhältnis Referenzzelle über Pyranometer gemessene Bestrahlungsstärke (G_{si}/G_{pyr}) gegen AOI von allen Messstellen im Jahr 2017 aufgetragen haben (Abbildung 4). Durch die Suche nach einer Gleichung, die der Tendenz der Daten von einem bewölkten Tag entspricht, wird die Gleichung (4) erhalten und im Modell als Korrektur der Winkelantwort für bewölkte Tage angewendet.

$$G_{AOIkorr} = \frac{G_{temp.korr}}{0.6510 + 0.3092 \ln(AOI) - 0.0820 \ln(AOI)^2 + 0.0066 \ln(AOI)^3} \quad (4)$$

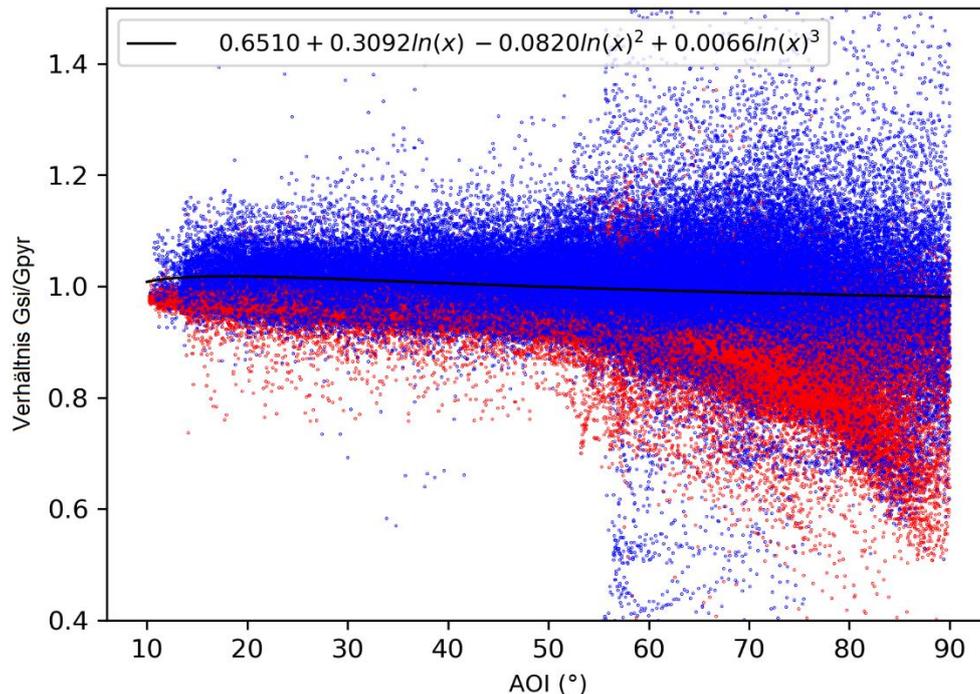


Abbildung 4: Verhältnis G_{si} / G_{pyr} gegen AOI, für Tage mit klarem Himmel (rote Punkte) und Tage mit bewölktem Himmel (blaue Punkte). Die schwarze Linie zeigt die Polynom-Fit-Gleichung für die Daten bei bewölktem Himmel.

2.5 Korrektur der Spektralantwort

Die spektrale Empfindlichkeit bezieht sich darauf, wie effizient der Sensor die Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge erfasst. Thermopile-Pyranometer haben ein flaches, gleichmäßiges Ansprechverhalten über den gesamten Wellenlängenbereich, während das Ansprechverhalten von Referenzzellen begrenzt und nicht gleichmäßig ist [9]. Um diese Abweichung zwischen den Sensoren zu korrigieren, unterteilt das Modell die Daten erneut in Tage mit klarem und bewölktem Himmel.

Für Tage mit klarem Himmel werden die Werte des spektralen Fehlanpassungsfaktors (SMM) für diesen Typ von Referenzzellen von [13] angegeben, bis zu AM10 extrapoliert und als Korrektur in diesem Modell angewendet. Der SMM quantifiziert die Leistung des Sensors, wenn er bei Standardtestbedingungen (STC), wie sie bei der Kalibrierung der Sensoren verwendet werden, einer anderen spektralen Bestrahlungsstärke als dem Referenzspektrum ausgesetzt wurde. Die Korrektur mit diesen Werten wird mit Gleichung (5) angewendet.

$$G_{AMkorr} = \frac{G_{AOIkorr}}{SMM} \quad (5)$$

Für Tage mit bewölktem Himmel wird eine Korrelationsgleichung als Korrektur angewendet. Durch Auftragen des Verhältnisses Referenzzelle über Pyranometer gemessene Bestrahlungsstärke (G_{si}/G_{pyr}) gegen AM von allen Überwachungsstandorten im Jahr 2017 (Abbildung 5) erhält man eine Polynom-Anpassung an die Tendenz der Daten für bewölkten Himmel, die dann in eine Gleichung zur Korrektur der spektralen Reaktion für bewölkte Tage transformiert wird (6).

$$G_{AMkorr} = \frac{G_{AOIkorr}}{1.0198 - 0.0266 \ln(AM) + 0.0023 \ln(AM)^2} \quad (6)$$

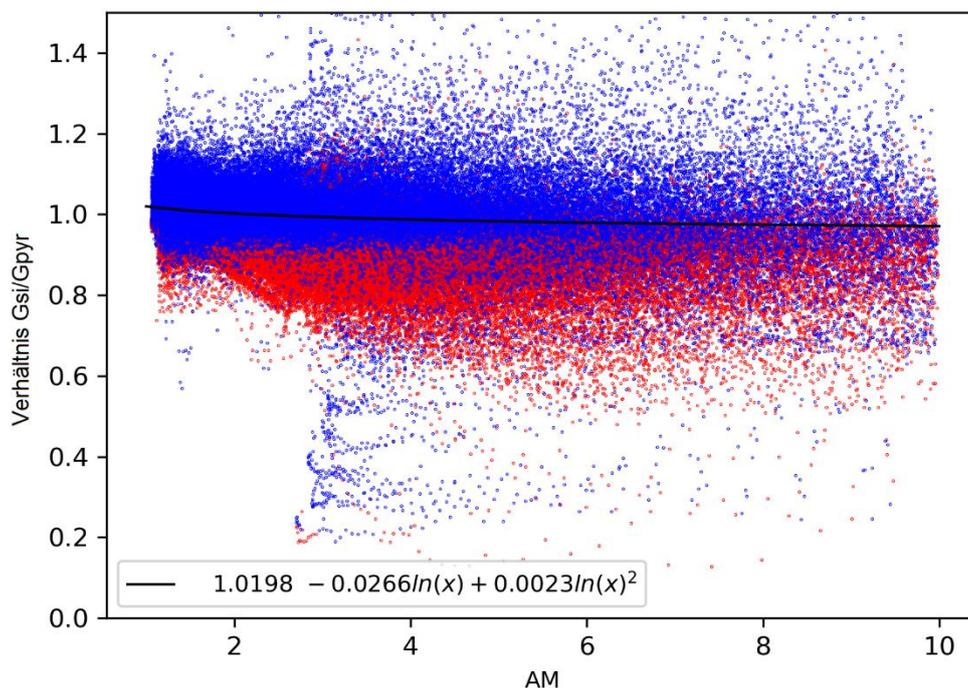


Abbildung 5: Verhältnis G_{si} / G_{pyr} gegen AM, für Tage mit klarem Himmel (rote Punkte) und Tage mit bewölktem Himmel (blaue Punkte). Die schwarze Linie zeigt die Polynom-Fit-Gleichung für Daten mit bewölktem Himmel.

2.6 Korrektur der Kalibrierungsabweichung

Die Kalibrierung sowohl der Pyranometer als auch der Referenzzellen erfolgt unter Standard-Testbedingungen bei einer Temperatur von 25°C, einer senkrechten Bestrahlungsstärke von 1000 W/m² und unter einem Spektrum, das AM1,5 entspricht [14]. Eine Möglichkeit zu erkennen, wann ein Sensor eine Abweichung bezüglich der Kalibrierungsfaktoren aufweist, ist daher die Analyse der Differenzen um die Mittagszeit, wenn ähnliche Bedingungen wie bei der Kalibrierung von STC herrschen. Das Modell filtert die Daten, um die Differenz zwischen dem Pyranometer und der Referenzzelle für Tage mit klarem Himmel ($k > 0,8$), um die Mittagszeit (11:30-13:30)

und Bestrahlungsstärkewerte größer als 900 W/m² zu erhalten. Die durchschnittliche Differenz aus dem gefilterten Datensatz kann als Prozentsatz (%kalib) in Gleichung 7 berechnet und dann als Korrekturfaktor (Gleichung 8) verwendet werden.

$$\%kalib = \frac{\text{Mittlere Einstrahlungsdifferenz zur Mittagszeit}}{\text{Mittlere Bestrahlungsstärke zur Mittagszeit}} \quad (7)$$

$$G_{Kalib.korr} = G_{AMkorr}(1 + \%kalib) \quad (8)$$

Wenn jedoch keine Daten von einem Pyranometer als Referenz vorliegen, wurde aus früheren Studien [8, 15] eine durchschnittliche prozentuale Kalibrierungsabweichung von 2 % berücksichtigt, die vom Modell in Gleichung 8 angewendet wird.

3 AUSWERTUNG

Mit diesem Satz von Korrekturgleichungen und der Abfolge der Schritte wurde das Modell (unter anderem) für die gleichen Überwachungssysteme in dieser Studie getestet, jedoch mit Daten aus dem folgenden Jahr (2018). Die Ergebnisse wurden durch den Vergleich der korrigierten Messungen der Referenzzelle mit den Messungen des Pyranometers als Referenz für eine bestimmte Überwachungsstelle ermittelt. Tabelle I zeigt die durchschnittliche Abweichung (RMSD) zwischen unkorrigierten Sensormessungen aus dem kompletten Satz von Überwachungssystemen für das Jahr 2018 als 18,83 W/m² (11,82 %). Nach Anwendung des Korrekturmodells auf die Daten der Referenzzelle wurde die Abweichung auf 11,90 W/m² (7,46 %) reduziert, was einer durchschnittlichen Verringerung der Abweichungen von 37,8 % für alle Überwachungssysteme entspricht. Die Tabelle zeigt auch, wie der RMSD zwischen den Sensorpaaren nach jedem Korrekturschritt reduziert wurde.

Die Ergebnisse zeigen auch, wie die Einstrahlungsmessungen des Siliziumsensors im Vergleich zu den Pyranometermessungen unterschätzt wurden (Tabelle II), erkennbar an den negativen Werten für die mittlere Abweichung (MBD) vor der Korrektur. Nach der Korrektur waren die Werte der MBD näher bei Null, was darauf hindeutet, dass das Modell eine präzise Schätzung im Vergleich zu den Referenzmessungen liefert.

Tabelle I: Mittlere quadratische Abweichung (Root Mean Square Deviation, RMSD) in W/m² nach jedem Korrekturschritt und prozentuale Reduzierung der RMSD.

Standort	Unkorr.	AOI korr.	AM korr.	Kalib. korr.	%Red.
A000257	19.67	15.17	15.23	12.87	34.6%
A000270	17.12	12.89	12.88	10.84	36.7%
A000272	13.37	9.45	9.25	8.32	37.7%
A000279	16.02	10.73	10.70	7.79	51.4%

A000281	18.60	14.24	14.36	11.70	37.1%
A000302	28.19	23.51	23.54	19.89	29.4%
Durchschnitt	18.83	14.33	14.32	11.90	37.8%

Tabelle II: Mittlere Bias-Abweichung (MBD) in W/m² vor und nach dem Korrekturverfahren.

Standort	Unkorrigiert	Korrigiert
A000257	-9.48	-2.30
A000270	-6.67	+0.83
A000272	-6.08	+1.16
A000279	-7.53	+0.13
A000281	-9.33	-2.11
A000302	-12.25	-4.42
Durchschnitt	-8.56	-1.12

Für einen einzelnen Tag mit klarem Himmel von einem der Teststandorte sind die Auswirkungen der Korrekturschritte in Abbildung 6 dargestellt. Die obere Grafik zeigt das Ergebnis der Korrekturschritte in gestrichelten Linien, die sich nun den Messungen aus dem Pyranometer (schwarze Linie) annähern. Die untere Grafik zeigt die Differenz zwischen den Sensormessungen (Pyranometer - Siliziumsensor), beginnend mit der Differenz zu den Bestrahlungsstärkemessungen der unkorrigierten Referenzzelle (blaue Linie) um 50 W/m². Als nächstes werden die Korrekturschritte angewendet (gestrichelte Linien), die sich einer Differenz von 0 W/m² annähern (rote gestrichelte Linie).

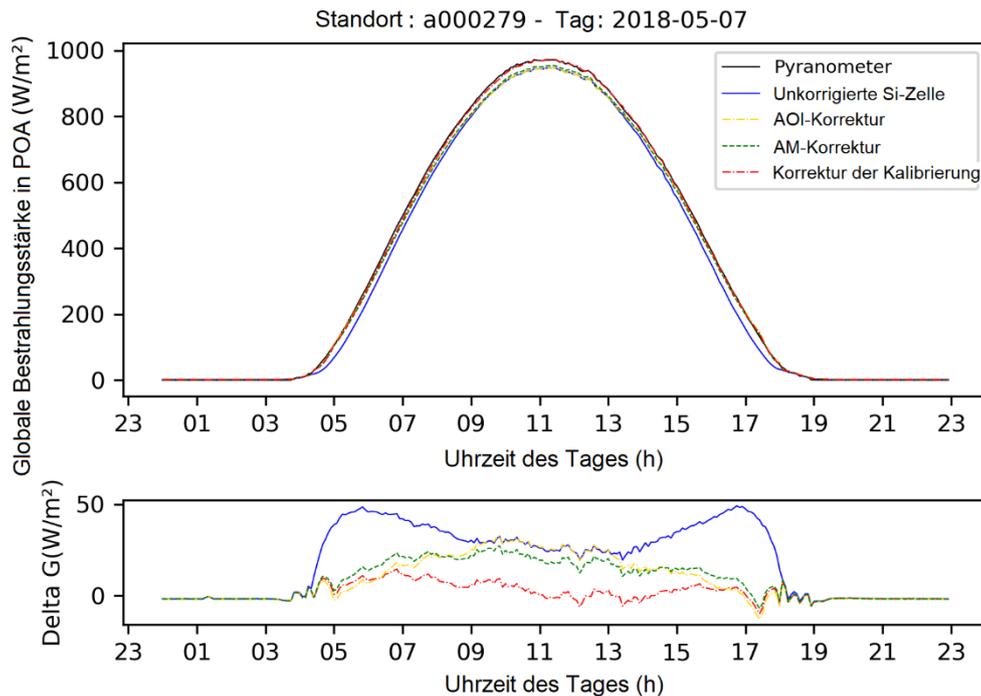


Abbildung 6: Obere Grafik: Messungen der globalen Bestrahlungsstärke in POA durch beide Sensoren. Unteres Diagramm: die Differenz zwischen den Sensoren, vor (blaue Linie) und nach jedem Korrekturschritt (gestrichelte Linien).

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Ziel dieser Studie war es, ein Korrekturmodell zu erstellen, das in der Lage sein könnte, die Unterschiede zwischen den Bestrahlungsstärkemessungen der Referenzzelle und des Thermopile-Pyranometers zu reduzieren. Es wurde eine Verbesserung der Daten des Silizium-Bestrahlungsstärkesensors erreicht, der nun das Verhalten der Pyranometer Messungen nachahmt (Abbildung 7). Basierend auf diesen Ergebnissen könnte der Silizium-Bestrahlungssensor als wirtschaftliche und hochpräzise Alternative in Solarenergieprojekten und zur Überwachung der Bestrahlungsstärke eingesetzt werden.

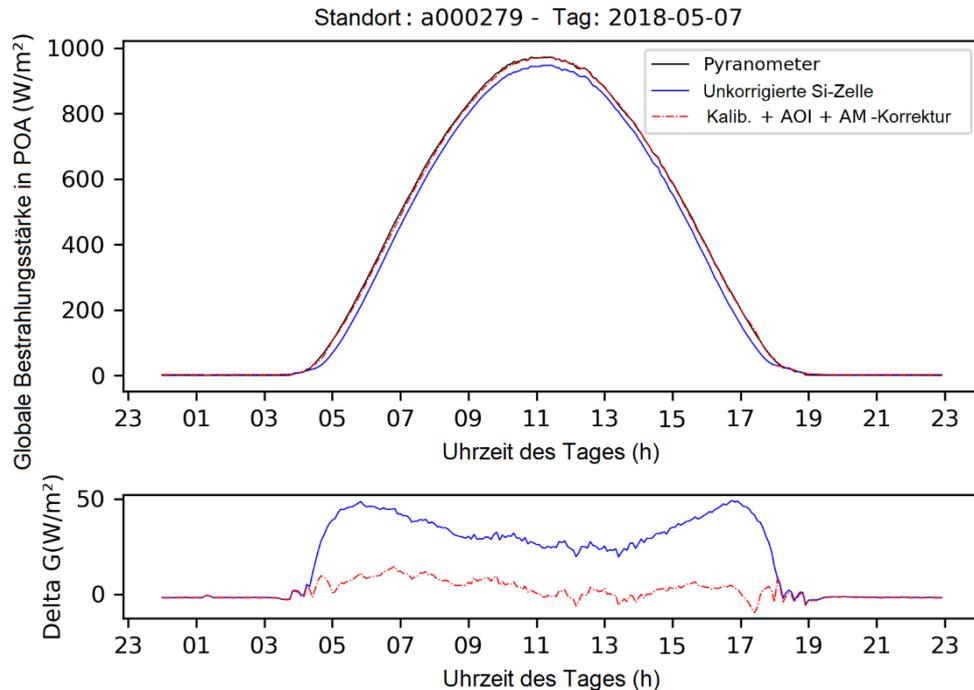


Abbildung 7: Obere Grafik mit den Globalstrahlungsmessungen im POA durch beide Sensoren und die untere Grafik zeigt die Differenz zwischen den Sensoren, vor (blaue Linie) und nach dem Korrekturverfahren (rote Linie).

Das endgültige Modell, das in Python implementiert ist, benötigt die Standortinformationen (Breitengrad, Längengrad, Höhe, Neigungswinkel, Azimutwinkel), die Bestrahlungsstärkemessungen der Referenzzelle und die Gerätetemperatur als Eingabe, um den Korrekturprozess durchzuführen. Sie beseitigt teilweise die Unterschätzung der Messungen der Referenzzelle, die nun den Messwerten des Pyranometers bei klarem und bewölktem Himmelsbedingungen ähnlich sind.

5 WEITERE ARBEITEN

Um das Modell zu verbessern und eine bessere Beschreibung des Verhaltens und der Abweichungen von beiden Sensoren zu erhalten, sollte ein größerer Satz von Trainingsdaten für die Berechnung der Korrekturgleichungen berücksichtigt werden.

Für die Korrektur der Winkelverluste sollte anstelle einer sehr allgemeinen getrennten Behandlung von klaren und bewölkten Tagen der diffuse Anteil oder das Verhältnis von direkter zu diffuser Bestrahlungsstärke verwendet werden, um eine Korrektur für jeden einzelnen Zeitschritt zu berechnen. Da separate Messungen der diffusen Bestrahlungsstärke im POA oder der direkten Normalbestrahlungsstärke in der Regel nicht verfügbar sind, sollte ein Modell wie in [16] beschrieben verwendet werden.

Eine Verbesserung der Kalibrierungskorrektur sollte in Betracht gezogen werden. Derzeit verwendet das Modell einen geschätzten Kalibrierungskorrekturfaktor von 2 %, der auf den Ergebnissen früherer Studien basiert. Hier sollte ein genauere Wert verwendet werden, der die Korrelation zwischen der Kalibrierungsabweichung und der Zeit, die seit dem Kalibrierungsvorgang vergangen ist, berücksichtigen könnte.

Für die Korrektur der spektralen Reaktion wurden die Werte des SMM aus einer früheren Studie übernommen. Tests haben jedoch gezeigt, dass orts- und zeitspezifische Daten zur spektralen Bestrahlungsstärke es ermöglichen würden, ein SMM zu berechnen, das zu der jeweiligen Messung passt und somit die Korrektur verbessern und Probleme wie Überkorrekturen reduzieren kann.

Schließlich konnten Verschmutzungseffekte in dieser Studie nicht analysiert werden. Eine weitere Bewertung der Bestrahlungsstärkemessungen im Laufe der Zeit und der Reinigungsprozesse an einem Überwachungssystem könnte helfen, die Verschmutzungsabweichung zwischen den Sensoren in Abhängigkeit von der Zeit, die nach der Reinigung vergangen ist, zu korrigieren.

5 DANKSAGUNG

Die in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten wurden teilweise durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Forschungsauftrags MetPVNet (0350009D) gefördert.

Literatur

- [1] N. Erraissi, N. Aarich, M. Akhsassi, M. Raoufi und A. Bennouna, „An Inexpensive and Accurate Solar Irradiance Sensor Based in a Small Calibrated PV Module“ (eng), *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 1588–1592, 2017, doi: 10.4229/EUPVSEC20172017-5BV.4.17.
- [2] L. Alados-Arboledas, F. J. Batlles und F. J. Olmo, „Solar radiation resource assessment by means of silicon cells“, *Solar Energy*, Jg. 54, Nr. 3, S. 183–191, 1995, doi: 10.1016/0038-092X(94)00116-U.
- [3] Sustainable Technologies Evaluation Program, „Field Comparison of a Photovoltaic Reference Sensor and a Pyranometer“, *Renewable Energy: Photovoltaics*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://sustainabletechnologies.ca/home/renewable-energy/solar/photovoltaics/field-comparison-photovoltaic-reference-sensor-pyranometer/pvsensor-and-pyranometer-comparison-techbrief/>.
- [4] B. Müller, L. Hardt, A. Armbruster, K. Kiefer und C. Reise, „Yield Predictions for Photovoltaic Power Plants: Empirical Validation, Recent Advances and Remaining Uncertainties“ (eng), S. 2591–2599, 2014, doi: 10.4229/EUPVSEC20142014-5BV.1.7.
- [5] N. H. Reich, B. Mueller, A. Armbruster, W. G. J. H. M. van Sark, K. Kiefer und C. Reise, „Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?“, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, Jg. 20, Nr. 6, S. 717–726, 2012, doi: 10.1002/pip.1219.
- [6] W. F. Holmgren, C. W. Hansen und M. A. Mikofski, „pvlib python: a python package for modeling solar energy systems“, *JOSS*, Jg. 3, Nr. 29, S. 884, 2018, doi: 10.21105/joss.00884.
- [7] J. J. Michalsky, R. Perez, L. Harrison und B. A. LeBaron, „Spectral and temperature correction of silicon photovoltaic solar radiation detectors“, *Solar Energy*, Jg. 47, Nr. 4, S. 299–305, 1991, doi: 10.1016/0038-092X(91)90121-C.
- [8] J. J. Michalsky, L. Harrison und B. A. LeBaron, „Empirical radiometric correction of a silicon photodiode rotating shadowband pyranometer“, *Solar Energy*, Jg. 39, Nr. 2, S. 87–96, 1987, doi: 10.1016/S0038-092X(87)80036-1.
- [9] A. Driesse, W. Zaaiman, D. Riley, N. Taylor, and Stein J.S., „Indoor and outdoor evaluation of global irradiance sensors“, *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2015.
- [10] Mencke & Tegtmeyer GmbH, *Quick Reference Guide for Analog Silicon Irradiance Sensors*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.imt-solar.com/fileadmin/docs/en/products/Si_Instruction_analog_E.pdf.
- [11] Mencke & Tegtmeyer GmbH, *Silicon Irradiance Sensor Technical Data*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.imt-solar.com/fileadmin/docs/en/products/Si-Sensor_2017_E.pdf.
- [12] PVSyst SA., „Project design- PVSyst: Array incidence loss (IAM)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.pvsyst.com/help/index.html?iam_loss.htm.
- [13] S. Grünsteidl, P. Borowski, and T. Dalibor, „Evaluation of irradiance sensor technologies for plant monitoring of PV systems with CIGS thin film modules“, *35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 2021–2027, 2018.
- [14] K. Bothe and D. Hinken, „Calibration of Solar Irradiance Sensors“. [Online]. Verfügbar unter: <https://isfh.de/en/dienstleistungen/isfh-caltex/strahlungssensoren/>.

- [15] A. Habte, M. Sengupta, A. Andreas, S. Wilcox und T. Stoffel, „Evaluating Solar Resource Data Obtained from Multiple Radiometers Deployed at the National Renewable Energy Laboratory“ (eng), *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, S. 2892–2899, 2014, doi: 10.4229/EUPVSEC20142014-5BV.2.28.
- [16] D. E. Guzman Razo, S. Killinger, B. Müller und C. Wittwer, „A Comparison of Two Models for the Separation of Direct and Diffuse Irradiance in Plane of Array“ (en), 2019, doi: 10.4229/EUPVSEC20192019-5CV.3.1.