

VERGLEICH VON METHODEN ZUR SOLAREN DIFFUS- UND DIREKTSTRAHLUNGSERFASSUNG

Reinhard Pertschy¹, Christina Haagen¹, Dagmar Jähnig¹, Franz Hengel¹

¹ AEE INTEC, Österreich, E-Mail: r.pertschy@aee.at

Kurzfassung

Um genaue Ergebnisse bei dynamischen Simulationen von Gebäuden und Solarkollektoren auf geneigte Flächen zu erzielen, ist die Aufteilung der Globalstrahlung in den direkten und diffusen Anteil notwendig. Dabei gibt es für die Aufteilung unterschiedliche Methoden, die neben den direkten und empirischen Messmethoden auch Daten eines Online-Wetterdienstes beinhalten können. Im Paper werden zur Bewertung unterschiedlicher Methoden die Messunsicherheit und der mittlere, quadratische Fehler für jede Methode, bei unterschiedlichen Zeitschrittweiten und Varianten zur Referenzmessung ermittelt.

Die Schattenbandmessung und die Messung mit dem SPN1-Sensor ergeben die besten Messergebnisse für die Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung. Bei den empirischen Methoden zeigt der Ansatz nach Reindl I die besten Ergebnisse. Die Online-Wetterdaten ergeben, ausgenommen der Direktstrahlung in der Tages-Auswertung, die höchste Unsicherheit.

Einleitung

Für die Auslegung von Energiesystemen z.B. durch Simulationen, welche die Sonnenenergie als Quelle nutzen, sind zumeist hochaufgelöste, stündliche oder tägliche Daten der Sonneneinstrahlung erforderlich. Die Solarstrahlung auf horizontaler Ebene stammt i.A. aus Datenbanken von Wetterstationen. Die direkten und diffusen Anteile der Solarstrahlung werden selten gemessen und müssen daher für viele Standorte empirisch bestimmt werden. Die Kenntnis der Aufteilung in den direkten und diffusen Anteil ist für verschiedene Zwecke erforderlich, z.B. ist der direkte Anteil primär für die Vorhersage der Leistung und die Planung von solarthermischen Anlagen notwendig, aber auch zur Berechnung der solaren Gewinne von Gebäuden. Bortolini et al. (2013) zeigen zahlreiche Ansätze zur Schätzung der diffusen und direkten Komponenten, die seit dem Pionierbeitrag von Liu & Jordan (1960) dokumentiert worden sind.

Zusammengefasst in Freitas et al. (2015) gibt es mehrere geometrisch basierte Formeln, die für klare oder bewölkte Himmelsbedingungen geeignet sind,

wobei ein einfaches isotropes Strahlungsmodell zur Bestimmung der Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche damals in Jordan & Liu (1963) beschrieben wurde. Die Globalstrahlung ergibt sich dabei aus den Strahlungskomponenten der Direktstrahlung, der isotrop verteilten Diffusstrahlung und der vom Boden reflektierten Strahlung ohne die Terme für die zirkumsolare Diffusstrahlung und die Diffusstrahlung durch Horizontaufhellung. Ein genaueres Modell zur Bestimmung der Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche, zeigt das Strahlungsmodell nach Perez et al. (1988), welches die anisotrope Verteilung der Diffusstrahlung beschreibt. Dabei wird die zirkumsolare Diffusstrahlung und Horizontaufhellung mit Helligkeitsfaktoren bestimmt (Duffie & Beckman, 2020).

Auf der Erde gibt es zwar zahlreiche meteorologische Messstationen. Sie sind aber ungleichmäßig verteilt. Außerdem messen viele Stationen lediglich die Globalstrahlung und deren Umrechnung auf die einzelnen Komponenten (Direkt- und Diffusstrahlung) ist eine Herausforderung. Deshalb werden weitere Messdaten, wie die Sonnenscheindauer oder die Wolkenbedeckung, zur Schätzung der Solarstrahlungskomponente nach Angelis-Dimakis (2010) benötigt. Damit kann die Diffusstrahlung anhand empirischer Modelle ermittelt werden, wobei deren Genauigkeit ein offenes Kapitel darstellt, das hier untersucht wird.

Ein weiterer empirischer Ansatz ist in Reindl et al. (1990) beschrieben. Darin folgt die Einteilung der Daten nach dem Clearness-Index k_t – nach Orgill & Hollands (1977) –, welcher das Verhältnis zwischen Globalstrahlung und extraterrestrischer Strahlung an unterschiedlichen Standorten beschreibt und ein Maß für die Bewölkung des Himmels ist. Der Ansatz wurde auf lediglich vier Variablen eingegrenzt, welche die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Sonnenhöhe und den Clearness-Index umfassen. Es gibt weitere relevante Modelle zur Schätzung der Diffusstrahlung für weitere Standorte von El-Sebbai et al. (2006) mit Daten aus Jeddah in Saudi-Arabien von 1996 – 2004 und von Li et al. (2011) mit Daten aus Guangzhou in China von 1971 – 2000. Mohammadi et al. (2016) zeigt eine Analyse mit zehn

Vorhersagevariablen zur Schätzung der Diffusstrahlung, wobei die Luftfeuchtigkeit die Diffusstrahlung am wenigsten beeinflusste (Singh, 2016).

Nach Paulescu et al. (2013) werden zur Messung breitbandiger Solarstrahlung meist Radiometer mit thermischen Sensoren eingesetzt, wobei grundlegend zwei Arten unterschieden werden, Pyrheliometer zur Messung der Direktstrahlung und Pyranometer zur Messung der Globalstrahlung. Durch Abschattung der Direktstrahlung, zum Beispiel durch einen Schattenring, kann das Pyranometer weiters zur Messung der Diffusstrahlung verwendet werden (Duffie & Beckman, 2020).

Trotz zahlreicher Untersuchungen zur Bestimmung der Strahlungsanteile wird in bisherigen Publikationen kaum auf Vergleiche hinsichtlich der Genauigkeit der unterschiedlichen Ansätze eingegangen. Dagegen wird in diesem Paper ein breites Spektrum unterschiedlicher Methoden hinsichtlich der Bestimmung der solaren Strahlungsanteile beleuchtet und explizit deren Genauigkeit analysiert. Dadurch wird eine Entscheidungsgrundlage geschaffen, ob die Anteile je nach Verwendungszweck gemessen werden sollten. Die unterschiedlichen Methoden werden anhand einer sehr genauen Referenzmessung mittels der erweiterten Messunsicherheit und mittels Root Mean Square Error (RMSE) bewertet.

Methodik und Aufbau

Für die Bewertung der Methoden wurden fünf Varianten zur Bestimmung der Strahlungseigenschaften neben der Referenzmessung definiert. Dabei wurden für die ersten zwei Varianten direkte Messungen und für zwei weitere Varianten Kombinationen aus Messungen und empirischen Methoden verwendet. Die letzte Variante befasst sich mit den Online-Wetterdaten von METEONORM / METEOTEST. Der Standort für die Experimente ist das Laborgebäude der AEE INTEC in Gleisdorf, Österreich.

Definition der unterschiedlichen Methoden

Referenzsystem

Für die Referenzmessung wird der Suntracker SOLYS2 von Kipp & Zonen (K&Z) verwendet, der mit folgendem Messequipment ausgestattet ist:

- Pyrheliometer der Type SHP1 von K&Z zur Messung der Direktstrahlung
- Pyranometer der Type SMP21 von K&Z mit Schattenball zur Messung der Diffusstrahlung

Die Ermittlung der Globalstrahlung erfolgt innerhalb der SPS aus der Summe der gemessenen Direkt- und Diffusstrahlung. Die Referenzmessung stellt die genaueste Messung der betrachteten Varianten dar.

Unsicherheiten im Datenaufzeichnungssystem

Die Messunsicherheiten der Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung wurden aus den einschlägigen Datenblättern übernommen und werden im SPS-Datenaufzeichnungssystem als erweiterte Messunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor von $k_p = 2$ und unter Annahme einer Normalverteilung bemessen und gilt für alle Messungen (vgl. Kap. Bewertungskriterium). Die erweiterte Messunsicherheit berücksichtigt dabei die kombinierte Standardunsicherheit mit folgenden Unsicherheitsquellen nach Meier (2021):

- Kalibrierung u_{calib}
- Temperaturabhängigkeit u_T
- Nicht Stabilität u_{ns}
- Auflösung u_{res} ,
- Richtung u_{dir} und Neigung u_{tilt}
- Offset A u_{oa} und Offset B u_{ob} ,
- Nichtlinearität u_{nl}

Variante 1: Schattenbandmessung

Die Schattenbandmessung stellt die erste Vergleichsvariante dar und beinhaltet folgendes Messequipment:

- Horizontales Pyranometer der Type SMP11 von K&Z zur Messung der Globalstrahlung
- Horizontales Pyranometer der Type CMP11 von K&Z mit Schattenband zur Messung der Diffusstrahlung

Die Direktstrahlung I_{bn} wird durch die allgemeine Glg. (1) innerhalb der SPS berechnet und als Minutenmittelwert abgespeichert. Das Schattenband schirmt neben der Direktstrahlung auch einen Teil der diffusen Solarstrahlung ab, was eine Korrektur der Messwerte erfordert (Paulescu et al., 2013). Die Korrektur erfolgt nach Battles et al. (1995).

$$G_h = I_{dh} + I_{bn} \cdot \cos \theta_z \quad (1)$$

G_h Globalstrahlung auf hor. Fläche in W/m^2

I_{dh} Diffusstrahlung auf hor. Fläche in W/m^2

θ_z Zenitwinkel in Grad

Variante 2: SPN1-Sensor

Der SPN1-Sensor von Delta-T Devices Ltd. misst die Diffus- und Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche ohne äußere Verschattung, z.B. ohne Ball oder Band. Die Direktstrahlung I_{bn} aus der Richtung der Sonne wird nach Glg. (1) als Minutenmittelwert berechnet.

Zur Vermeidung nicht plausibler Ergebnisse für die Direktstrahlung I_{bn} gelten folgende Einschränkungen:

- wenn Zenitwinkel $\theta_z > 90^\circ$, dann gilt $I_{bn} = 0 W/m^2$;
- wenn $I_{dh} > G_h$, dann gilt $I_{bn} = 0 W/m^2$;

- wenn $I_{bn} > 1.200 \text{ W/m}^2$ ergibt, dann gilt $I_{bn} = 0 \text{ W/m}^2$;

Variante 3: Empirische Methode (REINDL I)

Bei dieser empirischen Variante wird die Globalstrahlung mittels Pyranometer der Type SMP11 von K&Z gemessen und die Diffus- und Direktstrahlung nach Reindl et al. (1990) berechnet.

Die Auswertung erfolgt anhand der Minutenwerte sowie folgender Vorgangsweise:

- Bestimmung der extraterrestrischen Strahlung I_0 nach Spencer (1971);
- Bestimmung des Clearness-Index k_t nach Orgill & Hollands (1977);
- Bestimmung der „Diffus-fraction“ k_d nach Reindl et al. (1990), unter Berücksichtigung des Clearness-Index k_t , des Sonnenhöhenwinkels h , der Umgebungstemperatur T_a und der rel. Feuchte φ ;
- Ermittlung der Diffusstrahlung aus dem Produkt der Globalstrahlung und der Diffus-fraction;
- Ermittlung der Direktstrahlung nach Glg. (1);

Die Umgebungstemperatur T_a und die rel. Feuchte φ werden über Sensoren an der Wetterstation am Teststand erfasst und in der SPS gespeichert. Der Sonnenhöhenwinkel h wird nach Stieglitz & Heinzl (2012) separat ermittelt.

Die Einschränkungen nach Reindl et al. (1990) gelten:

- Ermittlung von k_t , wenn Zenitwinkel $\leq 90^\circ$;
- Ermittlung von k_d , wenn ein Wert in den Grenzen für k_t nach Reindl (1990) vorliegt

Das heißt, Direkt- und Diffusstrahlung werden auf 0 W/m^2 korrigiert, wenn nach Reindl et al. (1990) gilt:

- kein Wert für k_d (Zenitwinkel $> 90^\circ$);
- die Differenz zwischen der Global- und Diffusstrahlung $< 0 \text{ W/m}^2$ ergibt;
- Direkt- und Diffusstrahlung innerhalb bestimmter Intervalle für k_d und k_t liegen
- Direktstrahlung $I_{bn} > 1200 \text{ W/m}^2$
- Diffus-fraction $k_d > 1,05$

Variante 4: Empirische Methode (REINDL II)

Die Bestimmung der Direkt- und Diffusstrahlung erfolgt wie bei der Methode nach REINDL I, aber die Globalstrahlung wird mit Hilfe des horizontalen Si-Solarstrahlungssensors Si-I-420TC-T von Mencke & Tegmeyer bestimmt. Auch hier gelten wiederum die Einschränkungen nach REINDL I.

Variante 5: Online-Wetterdaten

Die Online-Wetterdaten wurden von METEONORM / METEOTEST als 15-Minuten-Mittelwerte herangezogen. Die Daten sind Messdaten von Wetterstationen, welche den Wettervorhersagemodellen GFS und IFS zu Grunde liegen – mit Gitterauflösungen von

ca. 40 km und 9 km – und für den Standort Gleisdorf optimiert wurden. Die Auswertung berücksichtigt folgende Größen im Strahlungsbereich zwischen $50 - 1200 \text{ W/m}^2$:

- Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$;
- Direktstrahlung, Sonnenrichtung in W/m^2
- Diffusstrahlung, horizontale Fläche in W/m^2
- Globalstrahlung, horizontale Fläche in W/m^2
- Globalstrahlung, geneigte Fläche in W/m^2

Bewertungskriterium

Die Bewertung der Varianten erfolgt zum einen über die erweiterte Messunsicherheit U_p für zusammengesetzte (Mess-)Größen und den RMSE.

Die Messunsicherheit wird als kombinierte Standardabweichung $u_c(y)$ einer Standardabweichung der Messgröße y von einer Messgröße x_i ausgedrückt, und als pythagoreische Summe der kombinierten Varianz $u_c^2(y)$ dargestellt. Die erweiterte Messunsicherheit U_p schließt das Vertrauensniveau, hier mit $k_p = 2$, als Ganzes mit ein. (GUM, 2008)

$$U_p = u_c(y) \cdot k_p$$

$$= \sqrt{u_{c,1}^2(x_1) + u_{c,2}^2(x_2) + \dots + u_{c,n}^2(x_n)} \cdot k_p \quad (2)$$

$$\text{mit } u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u(x_i)^2$$

Der RMSE wird in Anlehnung an die experimentelle Standardabweichung nach Gum (2008) bestimmt und dient zur Charakterisierung der Streuung der Messgröße mit n -Messungen der direkten und empirischen Messmethoden, sowie der Online-Wetterdaten. Dabei wird für eine Reihe von n -Messungen für jede Variante und jede Messgröße zunächst die Varianz und im Weiteren der RMSE nach Gleichung (3) ermittelt. Der RMSE liegt dabei als Absolutwert in W/m^2 vor.

$$u(\text{Var}) = \sqrt{\frac{\sum (MW_{Ref,n} - MW_{Var,n})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

$u(\text{Var})$ Experimentelle Standardabweichung oder RMSE in W/m^2

$MW_{Ref,n}$ n -ter Messwert der Referenzmessung in W/m^2

$MW_{Var,n}$ n -ter Messwert der Variante in W/m^2

n Anzahl an Messungen

Ergebnisse und Analyse

Datengrundlage und Ansätze

Die Auswertung der direkten und empirischen Messmethoden sowie der Online-Wetterdaten erfolgte in den Zeitschritten Minuten, 15-Minuten, Stunden

und Tage. Ausgehend von den Minutenwerten erfolgte die Mittelwertbildung der weiteren Zeitschritte. Zur Bestimmung der Messunsicherheit wurde der RMSE der Strahlungswerte in Abhängigkeit des Strahlungsbereiches und der Zeitintervalle jeder Variante gegenüber der Referenzmessung bestimmt. Die Ergebnisse (Messunsicherheiten) der einzelnen Varianten wurden einem direkten Vergleich unterzogen. Es wurden explizit Strahlungswerte im Strahlungsbereich zwischen 50-1200 W/m² und bei einem Zenitwinkel zwischen 0°-90° berücksichtigt. Neben den Strahlungswerten wurden Werte für den Zenit- und Azimutwinkel, der Umgebungstemperatur und der relativen Feuchte gemessen und aufgezeichnet um u.a. die Diffuse-fraction zu bestimmen.

Die Auswertung erfolgte im Zeitraum zwischen:

- 16.07.2021 00:00 Uhr bis 31.10.2021 23:59 Uhr für Variante 1 bis Variante 4
- 16.07.2021 00:00 Uhr bis 29.10.2021 22:00 Uhr für Variante 5

Vergleich der Methoden nach Varianten (15 min)

Die 15-Minuten-Auswertung erfolgte im o.a. Zeitraum, wobei Abbildung 1 den RMSE nach Variante und Strahlungsbereich zeigt. Für die Direktstrahlung liegen rund 3.200 Messwerte, für die Diffusstrahlung rund 4.200 Messwerte, und für die Globalstrahlung rund 4.350 Messwerte nach Bereinigung vor. Die Messunsicherheit der Referenzmessung wurde auch als erweiterte Messunsicherheit nach Glg. (2) bemessen und ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Schattenbandmessung (Variante 1) liefert, über den gesamten Strahlungsbereich betrachtet, die besten Ergebnisse hinsichtlich Diffus-, Global- und Direktstrahlung. Die Ergebnisse des SPN1-Sensors

(Variante 2) ergeben ähnliche Abweichungen für die Diffus- und Globalstrahlung, wobei die Direktstrahlung leicht darüber liegt. Der RMSE der Globalstrahlung nach Reindl I (Variante 3) liegt im Bereich des Schattenbandes und des SPN1-Sensors, aber die Direkt- und Diffusstrahlungen zeigen höhere Werte für RMSE an. Dabei sind aber alle Anteile kleiner als beim Reindl II (Variante 4). Wie bereits erwähnt unterscheiden sich die empirischen Methoden nach Reindl I und II anhand der verwendeten Sensoren zur Globalstrahlungsmessung. Bei der empirischen Methode nach Reindl I erfolgte die Erfassung der Globalstrahlung mit Hilfe des horizontalen Pyranometers der Type SMP11 und bei der empirischen Methode nach Reindl II wurde der horizontale Si-Solarstrahlungssensor herangezogen.

Der RMSE der Direkt- und Globalstrahlung liegt bei den Online-Wetterdaten (Variante 5) deutlich höher als bei allen anderen. Nur der gesamte Diffusanteil liegt im Bereich von Reindl I und II.

Vergleich der Methoden nach Zeitschritt

Die Darstellung von RMSE der einzelnen Varianten nach Zeitschritt ist in Abbildung 1 zusammengefasst. Dabei soll gezeigt werden, wie sich die Messunsicherheit bei größer werdenden Zeitschritten verändert bzw. wie sich die arithmetische Mittelwertbildung der Messdaten über größere Zeitschritte auswirkt. Die Gegenüberstellung erfolgt nach den Zeitschritten Minuten, 15-Minuten, Stunden und Tage, wobei wiederum die Messunsicherheit der Referenzmessung als erweiterte Standardabweichung bemessen und in der Abbildung den Varianten gegenübergestellt ist.

Dabei sinkt der RMSE hin zu größeren Zeitschritten und ist bei der Tagesauswertung am geringsten. Der

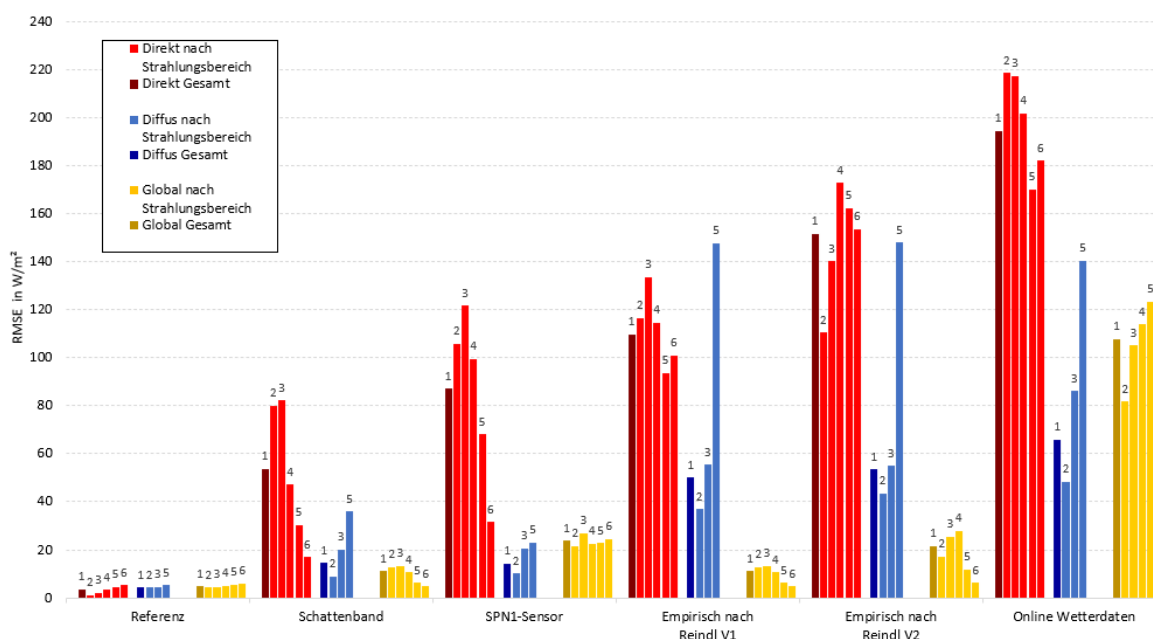


Abbildung 1: RMSE nach Variante der 15-Minuten-Auswertung. 1...50-1200 W/m², 2...50-200 W/m², 3...200-400 W/m², 4...400-600 W/m², 5...600-800 W/m², 6...800-1000 W/m²

RMSE der Direktstrahlung ist bei den Online-Wetterdaten (Variante 5), ausgenommen bei der Tages-Auswertung, am höchsten, sowie bei der Diffusstrahlung und bei der Globalstrahlung über alle Zeitschritte betrachtet. Bei Betrachtung der empirischen Methoden nach Reindl liegt die Messunsicherheit der Diffusstrahlung bei der empirischen Methode nach Reindl II nicht erheblich höher als bei der empirischen Methode nach Reindl I. Die Messunsicherheit bei der Direktstrahlung nach Reindl II ist erkennbar höher gegenüber der empirischen Methode nach Reindl I. Diese Messunsicherheit kommt durch die unterschiedliche Methode für die Bestimmung der Globalstrahlung mit unterschiedlichen Sensoren. Die Direktstrahlung wird dann aus Diffus- und Direktstrahlung berechnet, wobei eine höhere Unsicherheit vom Si-Sensor gegeben ist und ergo für die Global- und Direktstrahlung.

Die Schattenbandmessung (Variante 1) und der SPN1-Sensor (Variante 2) ergeben die geringsten Abweichungen. Dabei ergibt die Schattenbandmessung die geringsten Werte für den RMSE der Direktstrahlung und der SPN1-Sensor ähnlich geringe Werte für den RMSE der Diffusstrahlung.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Paper wurden unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der direkten, diffusen und globalen Solarstrahlung angewandt und miteinander am Standort Gleisdorf verglichen. Die Methoden umfassen direkte und empirische Messmethoden sowie Online-Wetterdaten mit insgesamt fünf Varianten und eine Referenzmessung. Bei den direkten Messmethoden wurden zwei Strahlungswerte messtechnisch erfasst. Der dritte Strahlungswert wurde anhand des allgemeinen Zusammenhangs zwischen der Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung errechnet. Im Weiteren wurde die empirische Methode

nach Reindl et al. (1990) untersucht, bei welcher anhand der gemessenen Globalstrahlung (mit einem Pyranometer bzw. mit einem Si-Solarstrahlungssensors) der diffuse Anteil errechnet wurde. Dabei wurde die Direkt- und Diffusstrahlung anhand des Clearness-Index nach Orgill & Hollands (1977) und der Diffuse-Fraction anhand der Korrelationen nach Reindl et al. (1990) ermittelt. Zuletzt wurden Online-Wetterdaten von METEONORM / METEOTEST mit 15-Minuten-Mittelwerten abgerufen und ausgewertet.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte unter Berücksichtigung der erweiterten Messunsicherheit und mittels des Root Mean Square Errors (RMSE), der die Streuung der Messgröße beschreibt. Dies diente zur Charakterisierung der Messgenauigkeit der unterschiedlichen Methoden im betrachteten Zeitraum.

Der Vergleich der Methoden erfolgte mittels RMSE für unterschiedliche Strahlungsbereiche anhand 15-Minutenwerten gegen die Referenzmessung. Dabei weist die Schattenbandmessung die geringste Messunsicherheit bei der Direkt- und Globalstrahlung und die Messung mit dem SPN1-Sensor die geringste Messunsicherheit für die Diffusstrahlung auf. Bei der empirischen Methode nach Reindl I wich die Messunsicherheit der Diffusstrahlung nicht erheblich von der Methode nach Reindl II ab. Bei der berechneten Direktstrahlung nach Reindl II hat dies sehr wohl negative Auswirkungen aufgrund des Si-Strahlungssensors mit höherer Messunsicherheit. Die Online-Wetterdaten ergaben die höchsten Messunsicherheiten für die Direkt- und Globalstrahlung.

Weiters wurde der RMSE nach Variante und Zeitschritt gegenübergestellt. Dabei ist erkennbar, dass mit größer werdendem Zeitschritt der RMSE abnimmt.

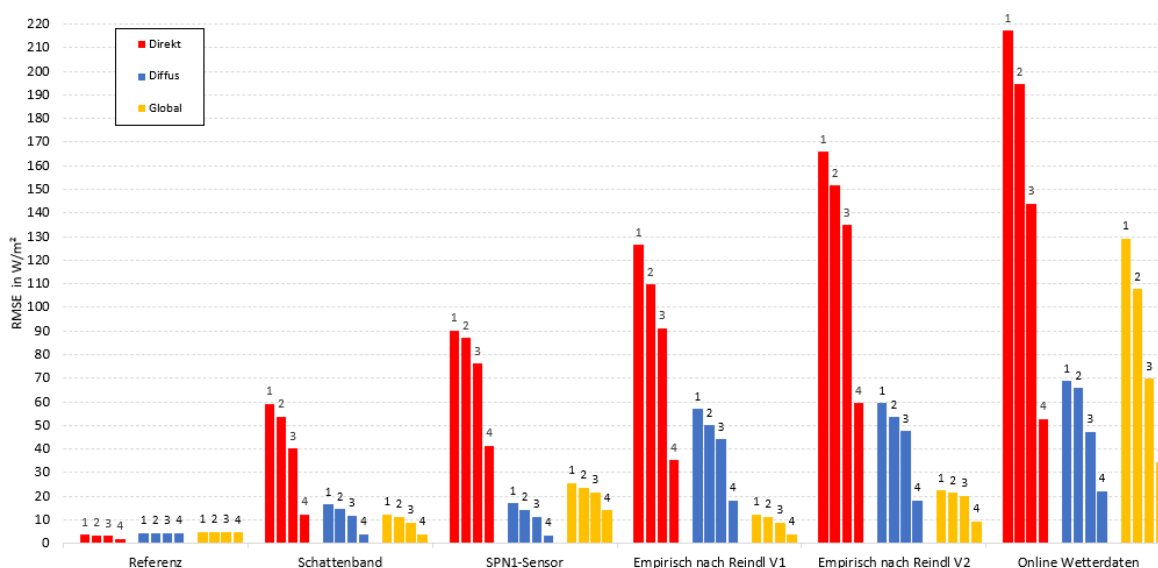


Abbildung 2: RMSE der Varianten nach Zeitschritt. 1...15-Minuten-Auswertung, 2...15-Minuten-Auswertung, 3...Stunden-Auswertung, 4...Tages-Auswertung

Dieses Paper zeigte, dass die direkten Messmethoden ähnlich gute Messergebnisse liefern. Bei den empirischen Messmethoden und bei den Online-Wetterdaten ergaben sich doch wesentliche Unterschiede bezogen auf die Messunsicherheit, letzteres aufgrund möglicher zu hoher räumlicher Auflösungen der Modelle GFS und IFS mit 40 km und 9 km.

Für zukünftige Betrachtungen wäre es interessant, die Messunsicherheiten der Varianten über ein ganzes Jahr - einschließlich der Wintermonate - zu bestimmen, da hier der diffuse Anteil einen erheblichen Anteil im Vergleich zu den Sommermonaten ausmacht. Ein weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus dem Vergleich von Online-Wetterdaten von anderen Datenbanken und für weitere Standorte bzw. mit besseren räumlichen Auflösungen.

Danksagung

Die Forschung, die zu diesen Ergebnissen geführt hat, wurde vom EU ECSEL Joint Undertaking (Grant Agreement Nr. 826452 Projekt Arrowhead Tools) und von nationalen Programmen/Förderbehörden der Partner finanziert.

Literatur

- Angelis-Dimakis, A.; Biberacher, M.; Dominguez, J.; Fiorese, G.; Gadocha, S.; Gnansounou, E.; Guariso, G.; Kartalidis, A.; Panichelli, L.; Pinedo, I.; Robba, M. (2010): Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 1182-1200
- Battles, F. J.; Olmo, F. J.; Alados-Arboledas, L. (1995): On Shadowband Correction Methods for Diffuse Irradiance Measurements, *Solar Energy*, Vol. 54, No. 2
- Bortolini, M.; Gamberi, M.; Graziani, A.; Manzini, R.; Mora, C. (2013): Multi-location model for the estimation of the horizontal daily diffuse fraction of solar radiation in Europe, *Energy Conversion and Management* 67, pp. 208-216
- Duffie, J. & Beckman, W. (2020): *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*, 5th Edition, John Wiley & Sons, New Jersey
- El-Sebaei, A. A.; Al-Hazmi, F. S.; Al-Ghamdi, A. A.; Yagmour, S. J. (2010): Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia, *Applied Energy* 87 (2010) 568-576
- Freitas, S.; Brito, M. C.; Catita, C.; Redweik, P. (2015): Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art-review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015) 915 – 931
- GUM (2008): *Uncertainty of Measurements, Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement*, ISO/IEC 2008
- Jordan, R. C. & Liu, B. Y. H. (1963): The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors, *Solar Energy*, Vol. 7, No. 2
- Li, H.; Ma, W.; Wang, X.; Lian, Y. (2011): Estimating monthly daily diffuse solar radiation with multiple predictors: A case study, *Renewable Energy* 36 (2011) 1944-1948
- Liu, Y. H. & Jordan, R. C. (1960): *The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation*, National Science Foundation, Washington D. C.
- Meier, T. (2021): *Entwicklung einer Wetterstation zur Erfassung der Umgebungsbedingungen eines Kollektors- und eines Fassadenprüfstandes*, Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science, eingereicht an der Technischen Universität Graz
- Mohammadi, K.; Shamshirband, S.; Petkovic, D.; Khorasanizadeh, H. (2016): Determining the most important variables for diffuse solar radiation prediction using adaptive neuro-fuzzy methodology; case study: City of Kerman, Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53 (2016) 1570-1579
- Orgill, J. F. & Hollands, K. G. T. (1977): Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on a Horizontal Surface, *Solar Energy*, Vol. 19
- Paulescu, M.; Paulescu, E.; Gravila, P.; Badescu, V. (2013): *Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation*, Chapter 2: Solar Radiation Measurements, Springer-Verlag London 2013
- Perez, R.; Stewart, R.; Seals, R.; Guertin, T. (1988): The development and verification of the Perez diffuse radiation model, Atmospheric Sciences Research Center, Sandia Contract 56-5434
- Reindl, D. T.; Beckman, W. A.; Duffie, J. A. (1990): Diffuse Fraction Correlations, *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-7
- Singh, U. P. (2016): *Diffuse Radiation Calculation Methods*, A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science, Arizona State University
- Spencer, J. W. (1971): Fourier Series Representation of the Position of the Sun, *Search* 2 (5), 172
- Stieglitz, R. & Heinzl, V. (2012): *Thermische Solarenergie, Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

