

BACHELOR THESIS
Henning Thöle

Entwicklung eines Kalibrierungsalgorithmus für Strahlungsmessstationen im Wolkenkameranetzwerk Eye2Sky

FAKULTÄT LUFTFAHRT- UND FAHRZEUGSYSTEME

Faculty of Aviation and Automotive Systems

Henning Thöle

Entwicklung eines Kalibrierungsalgorithmus für
Strahlungsmessstationen im
Wolkenkameranetzwerk Eye2Sky

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Mechatronik*
der Fakultät Luftfahrt- und Fahrzeugsysteme
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

In Zusammenarbeit mit:
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
Institut für Vernetzte Energiesysteme
Carl-von-Ossietzky-Straße 15
D-26129 Oldenburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Vera Schorbach
Zweitgutachter: M.Sc. Jonas Stührenberg

Eingereicht am: 14. April 2026

Henning Thöle

Thema der Arbeit

Entwicklung eines Kalibrierungsalgorithmus für Strahlungsmessstationen im Wolkenkameranetzwerk Eye2Sky

Stichwörter

Rotating Shadowband Irradiometer, RSI, Kalibrierung, Eye2Sky

Kurzzusammenfassung

Die präzise Messung solarer Strahlung ist zentral für die Prognose von Solarenergieerträgen. In dieser Arbeit wurde ein Kalibrierungsalgorithmus für Strahlungsmessstationen des Wolkenkameranetzwerks Eye2Sky entwickelt. Ziel ist es, die Messqualität der verteilten Stationen durch Abgleich mit der Referenzstation OLWIN zu verbessern, ohne aufwendige Vor-Ort-Kalibrierungen. Der Algorithmus nutzt u.a. wolkenfreie Zeiträume (Clear-Sky-Bedingungen), um Messwerte benachbarter Stationen mit der Referenz zu vergleichen und daraus Korrekturfaktoren abzuleiten. Die Ergebnisse zeigen, dass eine verlässliche Kalibrierung für Stationen im Oldenburger Stadtgebiet möglich ist. Allerdings sind geeignete Zeitpunkte in den betrachteten Breitengraden selten, was die Datenbasis einschränkt und hohe Anforderungen an die Wahl der Zeitfenster stellt.

Henning Thöle

Title of Thesis

Development of a calibration algorithm for radiation measurement stations in the Eye2Sky cloud camera network

Keywords

Rotating Shadowband Irradiometer, RSI, Calibration, Eye2Sky

Abstract

The precise measurement of solar radiation is central to predicting solar energy yields. In this work, a calibration algorithm was developed for radiation measurement stations in the Eye2Sky cloud camera network. The aim is to improve the measurement quality of the distributed stations by matching them with the OLWIN reference station, without requiring elaborate on-site calibrations. Among other things, the algorithm uses cloud-free periods (clear-sky conditions) to compare measurements from neighboring stations with the reference and derive correction factors from them. The results show that reliable calibration is possible for stations in the city area of Oldenburg. However, suitable time periods are rare at the latitudes considered, which limits the data basis and places high demands on the selection of time windows.

Danksagung

Zuallererst möchte ich meiner Erstbetreuerin, Prof. Dr. Vera Schorbach, für die Möglichkeit, diese Abschlussarbeit zu verfassen, danken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer und Zweitprüfer, Jonas Stührenberg, für seine wertvolle Anleitung, seine stets fachliche Kompetenz und die konstruktive Kritik, die mir bei der Weiterentwicklung dieser Arbeit sehr geholfen hat.

Bei meiner Gruppenleitung, Dr. Marion Schroedter-Homscheidt, sowie bei Dr. Thomas Vogt, dem Departmentleiter, möchte ich mich für die herzliche Aufnahme in die Forschungsgruppe und die außerordentlich gute Arbeitsatmosphäre im Departement am DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme (VE) bedanken.

Besonders hervorzuheben sind außerdem Dr. Thomas Schmidt, Arne Goerlitz sowie André Scheper und das ganze Team der [Energiemeteorologie](#) für den konstruktiv unterstützenden sowie wohlwollenden Empfang und das gute Miteinander in der Forschungsgruppe. Die Arbeit in der Gruppe war mir eine Freude.

Ein großer Dank geht darüber hinaus an meine Familie und Freunde, die mir in dieser intensiven Zeit den Rücken gestärkt und mich mit ihrer Unterstützung, Geduld und Ermutigung immer wieder motiviert haben.

Ohne euch wäre diese Abschlussarbeit nicht möglich gewesen – danke für alles!

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiv
Abkürzungen	xv
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Konzept	3
2.1 Solarstrahlung	3
2.2 Messung von Solarstrahlung	6
2.2.1 Pyranometer	6
2.2.2 Pyrheliometer	8
2.2.3 Rotating Shadowband Irradiometer	9
2.2.4 Messfehler	10
2.3 Internationale Standards zur Kalibrierung von Solarstrahlungssensoren . .	13
2.3.1 ISO 9060	13
2.3.2 ISO 9846	13
3 Versuchsaufbau	15
3.1 Eye2Sky Netzwerk	15
3.2 Referenzstation	18
3.3 Meteorologische Stationen	19
4 Methodik	21
4.1 Kalibrierung im Eye2Sky Netzwerk	21
4.2 Datenfilterung	24
4.2.1 Sonnenstand	24
4.2.2 Clear-Sky Erkennung	25
4.2.3 Linke Trübung	25

4.2.4	Windgeschwindigkeit	26
4.2.5	Eintretende Direktstrahlung	27
4.2.6	Logbuch Einträge	28
4.2.7	Eye2Sky Quality Control Flags	28
4.2.8	Datenkontinuität	28
4.2.9	Manuelle Filterung	29
4.3	Durchführung	29
4.3.1	Datenverfügbarkeit	29
4.3.2	Kalibrierung	32
5	Ergebnisse	34
5.1	Fehlermaße	34
5.2	Auswertung	36
5.3	Variabilität der Sensitivität	40
5.4	Stationsvergleich	44
5.5	Zeiträume für die Kalibrierung	47
6	Fazit und Ausblick	50
	Literaturverzeichnis	53
	Glossar	57
A	Anhang: Tabellen	58
B	Anhang: Datenfilterung	61
C	Anhang: Evaluation	65
C.1	Tagesverläufe der Stationen bei Clear-Sky	65
C.2	Tagesverläufe bei All-Sky	71
C.3	Qualitätskontrolle der Sensitivität	76
C.4	Zeiträume der Kalibrierung	81
D	Anhang: Logbuch	86
E	Anhang: Sonstiges	93
	Selbstständigkeitserklärung	99

Abbildungsverzeichnis

2.1	Einfluss von Streuung und Absorption durch Treibhausgase auf Solarstrahlung und aufsteigende thermische Strahlung; oben: Solarstrahlung (rot) und terrestrische Strahlung (magenta), die von der Atmosphäre transmittiert werden; mitte: Prozentsatz der von der Atmosphäre erfassten Strahlung; unten: Beitrag der Treibhausgase zur Absorption und Streuung der Strahlung.[21]	4
2.2	Spektrale Empfindlichkeit von Kipp&Zonen CM21 thermischen Pyranometer, CHP1 Pyrheliometer und LI-COR LI-200SA Pyranometer sowie GHI, DHI und DNI [23]	7
2.3	Instrumente zur Vermessung der Sonnenstrahlung	9
2.4	Silizium Pyranometer und Funktion des Schattenbandes eines RSI	10
3.1	<i>Nowcasting</i> mit dem Eye2Sky Netzwerk [8]	16
3.2	Eye2Sky Wolkenkameranetzwerk. Karte mit Stationsarten und -standorten; ASI: Kamera; MET: meteorologische Sensorik; CEI: Ceilometer; REF: Referenzstation [22] verändert	17
3.3	Bilder von der Referenz- und einer meteorologischen Standardstation	20
4.1	Abweichung der Clear-Sky GHI Strahlung für Standorte im Weser-Ems Gebiet im Vergleich zu der Referenzstation OLWIN (Oldenburg, Wechloy) am 12.06.2025	23
4.2	Verlauf des Sonnenstandes an der Station OLWIN im Jahr 2025, oberste Kurve am 21.06.2025, unterste Kurve am 21.12.2025, rote Kurven Sonnenstände zu Tageszeiten (UTC)	24
4.3	Beispiel "pvlib detect clearsky Algorithmus"[20] [13]; oben: Mess- und Rechenwerte für GHI; mitte: Keogramm der Station OLCLE (direkt neben OLWIN); unten: <i>boolean</i> Zeitreihe	25

4.4	Trübung der Atmosphäre mit Trübungsklassen nach Linke [15] zu einem Saharastaub-Ereignis in Oldenburg; oben: Mess- sowie Clear-Sky-Werte für GHI und DNI, grün eingefärbter Bereich ist erlaubt; unten: Verlauf der Linken Trübung, gestrichelte Linie ist der Grenzwert (Linke Trübung: 6) nach ISO 9846	26
4.5	Histogramm der Windgeschwindigkeit in Oldenburg, Station OLGBA, OLENQ und PVAMM	27
4.6	Kombinierte Datenfilter und Verlauf der Messwerte für OLGBA	29
4.7	Verfügbarkeit von Datenpunkten zur Kalibrierung in 2025	30
4.8	Anzahl und Ausschlusskriterium erlaubter OLWIN Zeitstempel, welche bei Stationen nicht zugelassen wurden. Aufschlüsselung nach vorkommen der Masken.	31
5.1	Tagesverlauf von OLCLO mit original und kalibrierten Messwerten vom 13.08.2025 sowie RMSE, rRMSE, BIAS und ein Keogram aus den ASI OLCLO Kamerabildern	37
5.2	Tagesverlauf von OLUOL mit original und kalibrierten Messwerten vom 13.08.2025 sowie Referenzstrahlung OLWIN, Clear-Sky Strahlung, RMSE, rRMSE, BIAS und einem Keogram.	38
5.3	Tagesverlauf von OLCLO zu All-Sky Wetter mit original und kalibrierten Messwerten vom 14.08.2025 sowie Referenzstrahlung OLWIN, Clear-Sky Strahlung, RMSE, rRMSE, BIAS und einem Keogram.	39
5.4	Kalibrierungsfaktor der Station OLCLO im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.	41
5.5	Kalibrierungsfaktor der Station OLDON im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.	43
5.6	Jahresverlauf 2025 der Stationen im Vergleich mit der Kalibrierung im Juli (vertikal gestrichelte Linie). Messwerte nach dem 01. Juli sind mit dem jeweiligen Kalibrierungsfaktor angepasst; oben: GHI-Messwerte sowie Clear-Sky-Strahlung bei OLWIN; unten: Fehlermetriken. Legende: Stationsname mit ermitteltem Kalibrierungsfaktor.	44
5.7	RMSE, rRMSE und BIAS für das erste und zweite Halbjahr 2025 sowie zweites Halbjahr mit kalibrierten Stationen	46

5.8 Jahresverlauf der Mess- und Fehlerwerte für die Station OLGBA im Jahr 2025. Vergleich ungefilterter (unkalibrierter) mit kalibrierten Werten unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungszeiträume. 48

Tabellenverzeichnis

3.1	Meteorologische Stationen mit RSI im Eye2Sky-Netzwerk	18
3.2	Sensorlaufzeiten der Oldenburger Stationen aus dem Eye2Sky Logbuch, siehe Anhang D	19
4.1	Berechnete Kalibrierungsfaktoren und <i>Standardabweichung</i> von Silizium Pyranometer 1 für verschiedene Zeiträume vor dem 01.07.2025 sowie für den Jahresmittelwert, jeweils unter Berücksichtigung der angewandten Da- tenfilterung. Die Werte sind auf die vierte Dezimalstelle gerundet.	32
4.2	Wie Tabelle 4.1 für Silizium-Pyranometer 2	32

Abkürzungen

α_s	Sonnenhöhenwinkel (engl. <i>solar elevation angle</i>).
γ_n	Sonnenazimut (engl. <i>solar azimuth angle</i>).
θ_z	Solarer Zenitwinkel (engl. <i>solar zenith angle</i>).
ASI	Wolkenkameras (eng. <i>All-Sky Imager</i>).
DHI	Horizontale Diffusstrahlung eng. <i>diffuse horizontal irradiance</i> .
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V..
DNI	Direktstrahlung senkrecht zur Sonne eng. <i>direct normal irradiance</i> .
GHI	Horizontale Globalstrahlung eng. <i>global horizontal irradiance</i> .
ISO	International Organization for Standardization.
RMSE	<i>root mean square error</i> .
rRMSE	<i>relative root mean square error</i> .
RSI	Rotating Shadowband Irradiometer.
SF	Institut für Solarforschung.
TOA	Extraterrestrische Sonnenstrahlung (eng. <i>top of atmosphere irradiance</i>).
VE	Institut für Vernetzte Energiesysteme.

1 Einleitung

Der menschengemachte Klimawandel infolge jahrhundertelanger Ausbeutung fossiler Rohstoffe unserer Erde stellt die Menschheit vor eine große Herausforderung. Deutschland hat sich zuletzt in der Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) zum August 2021 zu strengeren Treibhausgasreduktionen verpflichtet. Zentrale Rollen kommen dabei der Elektrifizierung der Sektoren, der Flexibilisierung des Energiemarktes und dem groß angelegten Ausbau der erneuerbaren Energien zu. [3] [1]

Ein zentraler Weg zur Minderung der Treibhausgasemissionen ist die Elektrifizierung, was die Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom anstelle fossiler Energieträger wie Öl und Gas bedeutet. [14] Im Jahr 2025 erreichte der Anteil der erneuerbaren Energien an der gesamten Nettostromerzeugung 59,0% [2]. Dabei weisen die wichtigsten erneuerbaren Quellen wie Windenergie (On- und Offshore) und Solarenergie starke tägliche sowie saisonale Schwankungen auf. Die kurzfristige Variabilität der Einspeisung von PV-Anlagen in das Stromnetz, die primär durch wechselnde Bewölkung verursacht wird, stellt eine wesentliche Herausforderung für die Netzstabilität dar. [19] Präzise kurzfristige Vorhersagen der PV-Leistung ermöglichen es, die Abweichungen im intra-day-Markt zu reduzieren und somit die Kosten zu senken [17].

Aktuelle Wettervorhersagen auf der Basis von Satellitenfernerkundung und numerischen Wettermodellen bieten keine große zeitliche sowie räumliche Auflösung, weshalb das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Vernetzte Energiesysteme (VE) die Vorhersage mit Wolkenkameras (eng. *All-Sky Imager*) (ASI) für einzelne Standorte oder in einem Messnetz aus sogenannten Wolkenkameras untersucht. Dieses Forschungsnetzwerk bietet an mehreren Standorten neben den Kameraaufnahmen meteorologische Messungen zur Validierung der entwickelten Algorithmen an.

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird eine Methode zur Kalibrierung verteilter Messinstrumente zur Bestimmung der Solarstrahlung entwickelt und evaluiert. Die bislang

eingesetzten Verfahren haben sich als arbeitsintensiv erwiesen und erfordern die Beteiligung externer Akteure. In den einleitenden Kapiteln werden zunächst die physikalischen Grundlagen der Sonnenstrahlung sowie etablierte Messverfahren systematisch dargestellt. Anschließend werden das Eye2Sky-Netzwerk und die für diese Arbeit relevanten Messstationen detailliert beschrieben und im Hinblick auf ihre Eignung für den vorgeschlagenen Kalibrierungsansatz analysiert. Im darauffolgenden Kapitel 4 wird die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Kalibrierungsmethode sowie deren Einschränkungen erläutert. Die Datenfilterverfahren und die daraus resultierenden Ergebnisse werden dargestellt. Inhaltlich schließt sich ein Kapitel zur Interpretation und Bewertung der ermittelten Kalibrierungsfaktoren an, in dem zusätzlich der Einfluss unterschiedlicher Betrachtungszeiträume analysiert und deren praktische Implementierung kritisch diskutiert wird. Darüber hinaus werden Empfehlungen für einen operationellen Einsatz im Eye2Sky-Netzwerk abgeleitet. Abschließend werden in Kapitel 6 die gewonnenen Erkenntnisse reflektiert sowie ein Ausblick auf weiterhin offene Fragestellungen und potenzielle zukünftige Untersuchungen gegeben.

2 Grundlagen und Konzept

Dieses Kapitel führt kompakt in die physikalischen und meteorologischen Grundlagen der Solarstrahlung sowie in international anerkannte Messverfahren und Normen zur Kalibrierung von Solarstrahlungssensoren ein. Es erläutert zentrale Begriffe und Einflussgrößen der Strahlung am Erdboden und deren Bezug zur Einstrahlung oberhalb der Atmosphäre. Darauf folgen praxisrelevante Messmethoden – von Pyranometern und Pyrheliometern bis zu Rotating-Shadowband-Irradiometern – sowie typische Messfehler.

2.1 Solarstrahlung

Die Intensität sowie die spektrale Zusammensetzung der am Erdboden eintreffenden Solarstrahlung werden durch eine Vielzahl atmosphärischer und standortspezifischer Einflussgrößen modifiziert. Als Extraterrestrische Sonnenstrahlung (eng. *top of atmosphere irradiance*) (TOA) wird die solare Einstrahlung auf eine horizontale Fläche unmittelbar oberhalb der Erdatmosphäre bezeichnet. Sie entspricht näherungsweise der Solarkonstante von etwa 1361 W/m^2 .

Beim Durchgang durch die Atmosphäre unterliegt die Solarstrahlung dem Strahlungstransfer (radiative transfer). Das ist ein physikalischer Prozess, der die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung in einem absorbierenden und streuenden Medium beschreibt. Die Strahlung interagiert dabei mit atmosphärischen Bestandteilen wie Aerosolen, Wasserdampf und Gasmolekülen, welche die Strahlung wellenlängenabhängig absorbieren oder über Rayleigh- bzw. Mie-Streuung in andere Raumrichtungen umlenken. Die effektive optische Weglänge durch die Atmosphäre hängt vom jeweiligen Sonnenstand ab. Sie bestimmt maßgeblich das Ausmaß der strahlungsmindernden Effekte. Abbildung 2.1 illustriert die relative Absorption unterschiedlicher atmosphärischer Komponenten der einfallenden sowie der ausgehenden Strahlung in einem Wellenlängenbereich von $0.2 \mu\text{m}$ bis $70 \mu\text{m}$. Die beschriebenen Prozesse werden zusammenfassend als atmosphärische Extinktion bezeichnet. Sie führen zu einer spektralen Umverteilung sowie zu einer Reduktion

der am Boden wirksamen Strahlungskomponenten. Abbildung E.2 im Anhang illustriert die Zusammensetzung der GHI Strahlung. Diese wird im Folgenden erläutert.

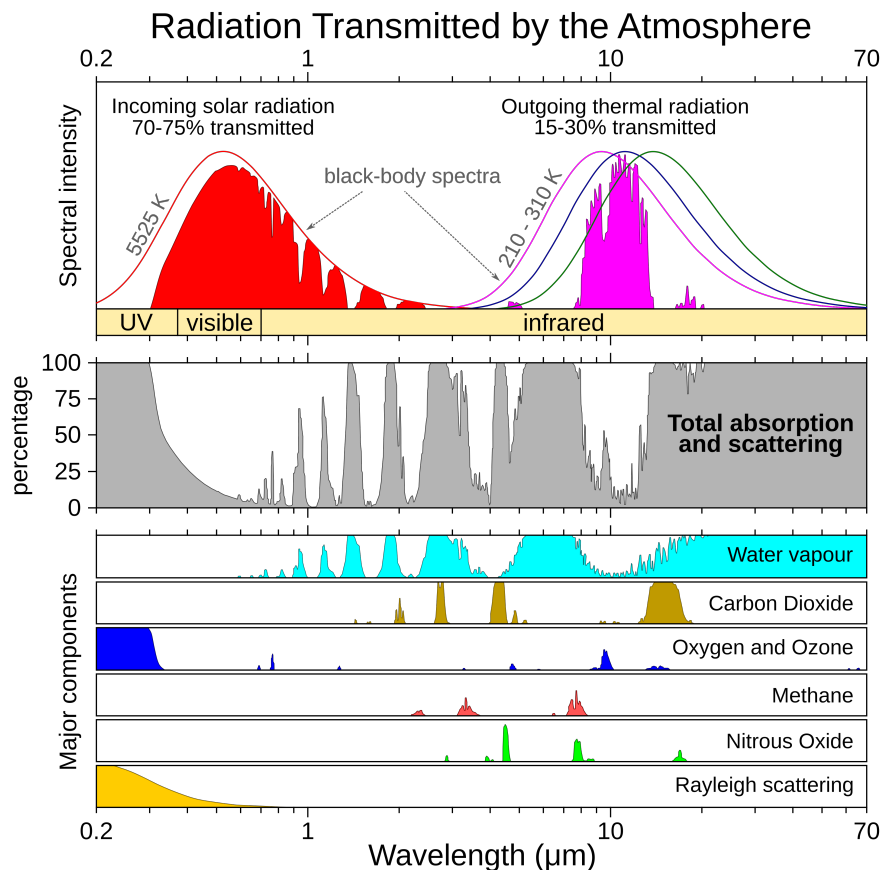


Abbildung 2.1: Einfluss von Streuung und Absorption durch Treibhausgase auf Solarstrahlung und aufsteigende thermische Strahlung; oben: Solarstrahlung (rot) und terrestrische Strahlung (magenta), die von der Atmosphäre transmittiert werden; mitte: Prozentsatz der von der Atmosphäre erfassten Strahlung; unten: Beitrag der Treibhausgase zur Absorption und Streuung der Strahlung.[21]

Horizontale Globalstrahlung

Die Globalstrahlung ist die gesamte hemisphärische Sonnenstrahlung, die auf eine horizontale Ebene einfällt und ergibt sich als Summe aus der Direkt- und Diffusstrahlung gemäß Gleichung 2.1 (vgl. E.2). Sie stellt eine zentrale Kenngröße für die Analyse und

Bewertung solarer Ressourcen dar. [23] [12]

$$GHI = DHI + DNI \times \cos(\theta_z) \quad (2.1)$$

Horizontale Diffusstrahlung

Die horizontale Diffusstrahlung repräsentiert den gesamten Anteil der Himmelsstrahlung ohne den direkten Strahlungsanteil der Sonne. Sie entsteht durch Ablenkung und Streuung der direkten Sonnenstrahlung an atmosphärischen Bestandteilen wie Molekülen, Aerosolen und Wolkentröpfchen. Unter *Overcast*-Bedingungen, d. h. bei Wetterlagen, in denen der gesamte Himmel von Wolken bedeckt ist, kann die GHI nahezu vollständig aus DHI-Strahlung bestehen [12].

Direktstrahlung

Die Direktstrahlung, auch als Normalstrahlung bezeichnet, ist jene Sonnenstrahlung, die direkt von der Sonnenscheibe ausgeht und auf einer Fläche gemessen wird, die rechtwinklig zur Einfallrichtung der Strahlen ausgerichtet ist. Dabei wird die eintreffende Sonnenstrahlung in einem Raumwinkel von 5° um die Sonnenposition erfasst. [23]

Clear-Sky

Die Clear-Sky-Strahlung bezeichnet die theoretisch am Erdboden verfügbare Solarstrahlung, welche unter wolkenfreien Bedingungen nach Berücksichtigung der atmosphärischen Extinktion auftritt. Sie stellt eine zentrale Referenzgröße zur Charakterisierung der regionalen atmosphärischen Bedingungen und des lokalen Wettergeschehens dar.

Zur Bestimmung der Clear-Sky-Strahlung werden sogenannte Clear-Sky-Modelle eingesetzt, welche die Zusammensetzung und optischen Eigenschaften der Atmosphäre unterschiedlich detailliert parametrisieren. Komplexe Modelle wie McClear nutzen satellitengestützte Messungen atmosphärischer Parameter zur Modellierung der Clear-Sky-Strahlung [18]. Demgegenüber basieren einfachere Modelle (z.B. Ineichen & Perez [15]) auf empirisch bestimmten Trübungskoeffizienten (vgl. Abschnitt 4.2.3) der Klimatologie. Das Modell nach Ineichen & Perez ist standardmäßig im *open source*-Python-Paket [pvlib](#) [13] implementiert und liefert eine weit verbreitete, standardisierte Referenz für Clear-Sky-Strahlung. Aufgrund dieser Eigenschaften kommt es auch im operationellen Betrieb des Eye2Sky-Netzwerks zum Einsatz.

2.2 Messung von Solarstrahlung

Die hochgenaue Messung der verschiedenen Komponenten der Solarstrahlung erfordert erhebliche finanzielle Aufwendungen für die Anschaffung, den Betrieb und die Wartung der Messgeräte. DNI-Messungen mit Pyrheliometern setzen eine kontinuierliche exakte Ausrichtung des Sensors auf die Sonne voraus. Hierzu dient ein Solar-Tracker, der die Sensorplattform gemäß dem aktuellen γ_n - und α_s -Winkel nachführt.

Abhängig vom Installationsort sind zusätzlich Heiz- und Ventilationssysteme für die Sensoren und Datenlogger erforderlich, um Kondensation, Vereisung oder Überhitzung zu verhindern. Diese Systeme können den Gesamtenergiebedarf der Messstation signifikant erhöhen. Darüber hinaus setzen präzise Strahlungsmessungen eine regelmäßige Reinigung der Sensorkuppeln oder -oberflächen voraus, um Verschmutzungen und die daraus resultierenden Messfehler zu minimieren. Unterschiedliche Standards für verschiedene Messinstrumente empfehlen jeweils voneinander abweichende Reinigungsintervalle. ISO TR 9901 empfiehlt eine tägliche Reinigung, wohingegen IEC 61724-1 (ausschließlich für Pyranometer) einen wöchentlichen Reinigungsrythmus vorsieht. [23]

Die Einrichtung und der Betrieb eines großflächigen Messnetzes oder von Messstationen, die an weit entfernt gelegenen Standorten sind, stellen daher eine erhebliche logistische und ökonomische Herausforderung dar. Die ISO 9060 definiert die Klassifikationskriterien und Genauigkeitsanforderungen für Messinstrumente zur Erfassung der Solarstrahlung und bestimmt damit die maßgebliche Grundlage für deren Einsatz und Bewertung.

Abbildung 2.2 zeigt die Verteilung von GHI, DHI und DNI Strahlung sowie die spektrale Empfindlichkeit von Messinstrumenten zur Strahlungsmessung. Deutlich zu erkennen ist die geringe Bandbreite des Silizium Pyranometers, wohingegen die thermischen Pyranometer und Pyrheliometer eine annähernd gleichmäßige Empfindlichkeit der auftretenden Strahlung besitzen.

2.2.1 Pyranometer

Pyranometer sind Messgeräte, welche die eintretende Sonnenstrahlung auf eine Fläche messen. Die Strahlung wird in W/m^2 angegeben. Ohne eine Abschattung des Sensors vor direkter Sonnenstrahlung misst das Pyranometer bei horizontaler Ausrichtung die GHI

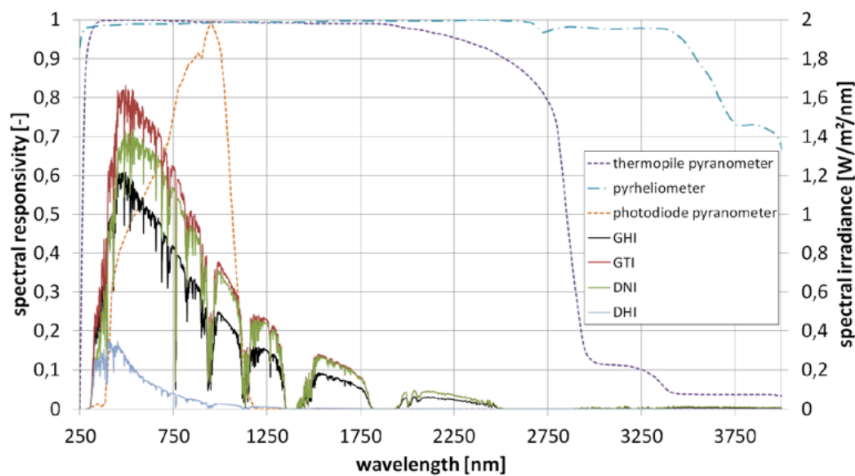


Abbildung 2.2: Spektrale Empfindlichkeit von Kipp&Zonen CM21 thermischen Pyranometer, CHP1 Pyrheliometer und LI-COR LI-200SA Pyranometer sowie GHI, DHI und DNI [23]

Strahlung. Um die DHI Strahlung messen zu können, ist eine Abschattung der Sonnenstrahlen nötig. Hierbei wird idealerweise nur der direkte Sonneneinfallswinkel abgeschattet, um diffuse Strahlung bzw. Reflexionen aus anderen Winkeln nicht zu beeinflussen.

Eine schräge Ausrichtung des Pyranometers ermöglicht es, geneigte Globalstrahlung (engl. global tilted irradiance) zu messen, die für die Evaluation möglicher PV-Parkstandorte oder zur Bewertung bestehender Anlagen von Interesse ist.

Thermische Pyranometer

Thermische Pyranometer nutzen eine schwarz eingefärbte Oberfläche zur Absorption der rundum eintretenden Strahlung, sodass sich der Absorber erwärmt. Thermosäulen wandeln den Temperaturunterschied in elektrische Spannung um, die als Strahlung interpretiert werden kann. Das Ansprechverhalten und die Genauigkeit des Pyranometers werden durch den Glasdom beeinflusst. Doppelte Glasdome, wie zum Beispiel bei dem Kipp & Zonen CMP22, bieten zusätzliche Abschirmung gegen Umwelteinflüsse wie Wind- oder Temperaturschwankungen. [9] Abbildungen 2.1 und 2.2 zeigen, dass die an der Erdoberfläche ankommende Strahlung überwiegend zwischen $0,25\mu\text{m}$ und $3\mu\text{m}$ liegt. Thermische Pyranometer zeigen eine gleichmäßige und durchgehende Reaktion über den gesamten Wellenlängenbereich.

In Abbildung 2.3a ist ein ISO 9060 *Class A* thermisches Pyranometer der Firma Kipp & Zonen zu sehen.

Silizium Pyranometer

Silizium Pyranometer messen Strahlung mit einer Photodiode, ähnlich wie eine Solarzelle oder eine LED. Abbildung 2.4a zeigt einen LI-200R-Sensor auf einer Montage- und Ausrichtungsplatte. Eintretende Strahlen werden in der Diffusorplatte am oberen Teil des Sensors gleichmäßig auf die Photodiode verteilt und anschließend in eine Spannung umgewandelt. Der gesamte Aufbau ist im Vergleich zu thermischen Sensoren deutlich kleiner und kostengünstiger. Jedoch ist die spektrale Empfindlichkeit im Vergleich zu thermischen Sensoren deutlich eingeschränkt. [23] Bei unter Clear-Sky kalibrierten Silizium-Pyranometern können in wolkenbedeckten Situationen (Overcast-Sky) Überbewertungen von bis zu 10% auftreten. [25] Während die solare Strahlung ein breites Spektrum von ca. $0,25\mu\text{m}$ bis über $2,5\mu\text{m}$ umfasst, reagiert der Silizium-Photodiodensensor ausschließlich im Bereich von $0,4\mu\text{m}$ bis $1,2\mu\text{m}$. Innerhalb dieses Bereiches ist die Empfindlichkeit zudem nicht uniform. Die spektrale Sensitivität des verwendeten LI-200R Pyranometers gegenüber der Wellenlänge zeigt Abbildung 2.2. Da die spektrale Zusammensetzung der Solarstrahlung mit dem Sonnenhöhenwinkel, der atmosphärischen Zusammensetzung und der optischen Tiefe (Maß für die Durchlässigkeit eines Mediums) variiert, entstehen systematische, zustandsabhängige Messfehler. LI-200-Pyranometer weisen bis zu einem Zenitwinkel θ_z von 75° eine uniforme Empfindlichkeit auf. Für größere Zenitwinkel sind jedoch Korrekturen erforderlich, um Messabweichungen zu kompensieren [24] [11].

2.2.2 Pyrheliometer

Das Messprinzip eines Pyrheliometers ist ähnlich dem des thermischen Pyranometers. Die eintreffende Strahlung wird ebenfalls absorbiert, in Wärme umgewandelt und über einen Temperaturunterschied ermittelt. Anders als beim Pyranometer ist die Einstrahlung durch ein strahlenbündelndes Rohr (*engl. collimation tube*) auf ein Sichtfeld von 5° limitiert, das diffuse Strahlungsanteile unterdrückt. Der Betrieb ist, wie oben beschrieben, nur mit einem Solar-Tracker durchzuführen. Die Abbildung 2.3b stellt ein Pyrheliometer der Firma EKO-Instruments dar. An dem Solar-Tracker in Abbildung 2.3c ist dies unterhalb des Abschattungsarms zu finden. Vergleichbare Systeme sind im Eye2Sky-Netzwerk an den Standorten OLWIN und ESREF installiert.

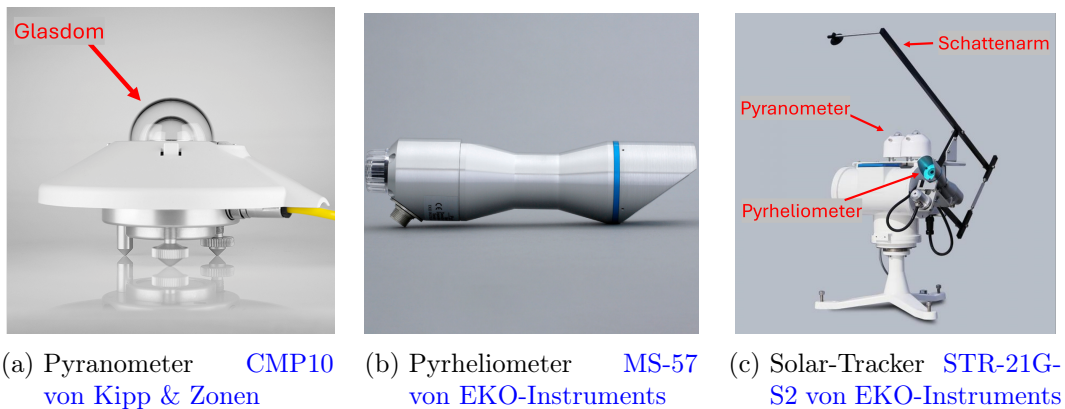


Abbildung 2.3: Instrumente zur Vermessung der Sonnenstrahlung

2.2.3 Rotating Shadowband Irradiometer

Strahlungsmessgeräte mit einem rotierenden Schattenband wurden als kostengünstige und wartungsarme Alternative zu herkömmlichen Strahlungsmessstationen mit Pyrhemliometern und Pyranometern auf einem Solar-Tracker entwickelt. Sie haben sich insbesondere für abgelegene Standorte bewährt, an denen regelmäßige Wartungsintervalle schwer einzuhalten sind [24]. Gegenüber herkömmlichen Aufbauten haben RSIs eine deutlich geringere Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzung. [7] Hinzu kommen der niedrige Stromverbrauch und die Fähigkeit zur simultanen Messung aller drei Strahlungskomponenten mit einem einzigen kompakten Gerät. Dies erlaubt den Aufbau dichter Messnetze in bislang messtechnisch kaum erschlossenen Regionen.

Ein RSI besteht aus einem horizontal montierten Silizium-Pyranometer (zum Beispiel dem LI-COR LI-200R) in Kombination mit einem rotierenden Abschattungsarm, dem Shadowband. Das Shadowband ist unterhalb des Sensors befestigt und rotiert typischerweise ein- bis zweimal pro Minute um den Sensor herum. [7] Gegenüber thermischen Pyranometern besitzen Siliziumpyranometer eine praktisch instantane Ansprechzeit von unter $10 \mu s$ beim überholten LI-200SA und unter $1 \mu s$ beim LI-200R. Dies ist für die zeitlich hochaufgelöste Abschattungs-messung zwingend erforderlich, da der Schattenübergang über den Sensor in Bruchteilen einer Sekunde erfolgt. Zu Beginn der Rotation misst das Pyranometer die ungestörte GHI Strahlung. Im Moment der maximalen Abschattung würde das Signal theoretisch DHI entsprechen. Da jedoch stets weitere Teile des Himmels vom Schattenband bedeckt werden, liegt das gemessene Minimum während der Abschattung systematisch unterhalb des wahren DHI-Wertes. Zur Korrektur dieses

Fehlers werden sogenannte Schulter-Werte aus dem Maximum der Signalfanke während der Abschattung berechnet. Abbildung 2.4b zeigt ein RSI von CSP Services während der Messungen. Der tatsächliche DHI-Wert ergibt sich dann aus der Summe des Minimums und der Differenz zwischen dem mittleren Schulterwert und der GHI. Im Anschluss kann die DNI Strahlung im Datenlogger, wie in Formel 2.1 beschrieben, berechnet werden. Außerdem werden im Datenlogger-Programm weitere Korrekturen vorgenommen, um unter anderem den Einfallswinkel, die Luftmasse oder die spektrale Empfindlichkeit eines Silizium-Pyranometers zu korrigieren.

Fabrikneue LI-200R-Sensoren werden mit einer Kalibrierkonstante (typischerweise $70 \frac{kW}{\mu Am^2}$) in einem Zertifikat, wie im Anhang E.3 abgebildet, ausgeliefert. Die Umwandlung der gemessenen Spannung in eine Bestrahlungsgröße bildet die Grundlage aller weiteren Korrekturen und Berechnungen. RSIs von CSP Services, wie auf Abbildung 2.4, verwenden zwei parallel montierte LI-200 Pyranometer zur Qualitätskontrolle.

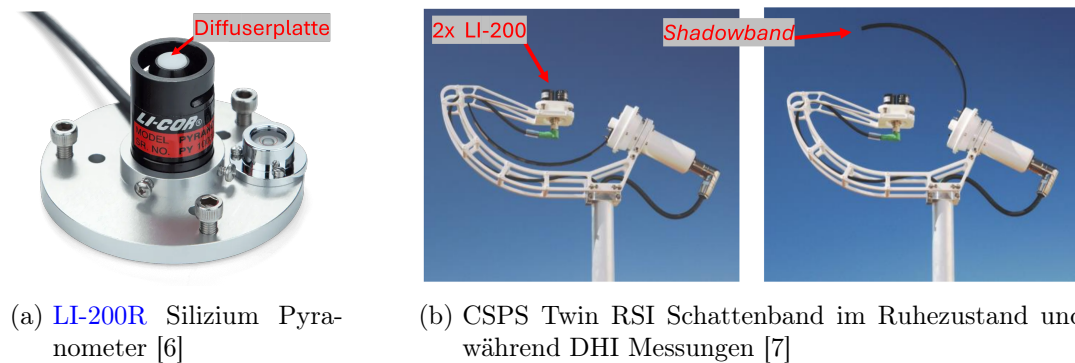


Abbildung 2.4: Silizium Pyranometer und Funktion des Schattenbandes eines RSI

2.2.4 Messfehler

Bei der Messung von Solarstrahlung können systematische und zufällige Fehler auftreten, welche die Qualität der erfassten Daten erheblich beeinflussen. Im Folgenden werden die wichtigsten Fehler genauer erläutert.

Azimut-Fehler

Der Azimutfehler tritt auf, wenn ein Sensor abhängig vom Azimutwinkel des eintreffenden Lichtes unterschiedlich reagiert. Fertigungsbedingte Asymmetrien in der Diffuserplatte

bei Silizium-Pyranometern oder im Glasdome bei thermischen Pyranometern können zu Abweichungen führen.

Zenit-/ Kosinus-Fehler

Ideale Messgeräte sollten die eintretende Strahlung, wie in Formel 4.1 beschrieben, proportional zum Einfallswinkel der Strahlung messen. Reale Pyranometer/ Pyrhelimeter, im besonderen Silizium-basierende weichen bei großen θ_z Winkeln (tief stehende Sonne) vom eigentlichen Wert ab.

Spektral-Fehler

Wie bereits in Kapitel 2.2 eingeführt, haben Pyranometer und Pyrhelimeter keine gleichmäßige spektrale Empfindlichkeit über den gesamten solaren Spektralbereich von ca. 300 nm bis 4000 nm. Nach ISO 9060 gelten Messinstrumente als *spectral flat* (wellenlängenunabhängig), wenn weniger als 3 % Abweichung bei Wellenlängen von 350 nm bis 1500 nm festzustellen sind.

Nicht-Linearität

Pyranometer zeigen über ihren Messbereich eine Abweichung vom idealen linearen Ansprechverhalten. Änderungen in der Eingangsgröße werden nicht proportional an Änderungen der Ausgangsgröße abgebildet. ISO 9060 *Class A* Pyranometer dürfen nicht mehr als $\pm 5\%$ von 100 bis 1000 W/m^2 abweichen.

Datenlogger Zeitstempel Fehler

Neben der eigentlichen Funktion des Datenloggers, die eingehenden Signale korrekt einzulesen und abzuspeichern, ist der Zeitstempel der Messung für die anschließende Verwendung der Daten essenziell. Zeitreferenzen sollten bereits im Aufbau einer Messkampagne oder im Messlabor beachtet werden.

Temperatur-Fehler

Die Empfindlichkeit von Sensoren ist temperaturabhängig. Wie in Kapitel 2.2.1 erläutert, wird die Einstrahlung bei thermischen Pyranometern durch die Messung des Temperaturunterschiedes ermittelt und ist somit auch von anderen Temperatureinflüssen abhängig. Hochwertige Geräte können diese Abhängigkeiten kompensieren. Silizium Pyranometer ermitteln die Einstrahlung durch die Beleuchtungsstärke an der Photodiode, dennoch sind auch diese Geräte temperaturempfindlich.

Verschmutzung

Verschmutzung, auch *soiling* genannt, blockiert physisch die Sonnenstrahlen und beeinträchtigt die Messungen. Für hochpräzise Datenerhebung wird eine tägliche Reinigung empfohlen. Außerdem hat die Geometrie des Sensors einen Einfluss auf die Intensität des Verschmutzungsfehlers. Thermische Pyranometer mit einem 360° Glasdom bieten deutlich mehr Oberfläche für Ablagerungen und einen Abstand zum eigentlichen Sensor, wohingegen Silizium-Pyranometer nur eine kleine Diffusorplatte als Ablagerungsfläche bieten. Besonders bei DNI Messungen zeigen RSIs eine deutlich geringere Anfälligkeit für Verschmutzungsfehler. [7] Ein zusätzlich installierter Ventilator mit Heizung kann die Anfälligkeit thermischer Pyranometer deutlich verringern. [23]

Kalibrierungsfehler

Die Kalibrierung von Strahlungsmessgeräten erfolgt üblicherweise durch den Vergleich mit einem Referenzinstrument unter definierten Wetterbedingungen. Die atmosphärische Zusammensetzung sowie andere Umweltbedingungen am Ort und Zeitpunkt der Kalibrierung können vom Aufstellungsort des Sensors abweichen und systematische Fehler einführen. Darüber hinaus verändert sich die Empfindlichkeit des Sensors über die Zeit, sodass eine Rekalibrierung der Sensoren notwendig wird. Typische Intervalle betragen 2 Jahre. [11] [9]

2.3 Internationale Standards zur Kalibrierung von Solarstrahlungssensoren

2.3.1 ISO 9060

Die Norm ISO 9060 [4] *Solar energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation* ist ein international anerkannter Standard zur Klassifikation von Pyranometern sowie Pyrheliometern. Sie wurde zuletzt im Jahr 2018 grundlegend überarbeitet und definiert die Spezifikation sowie die Klassifikation von Instrumenten zur Messung hemisphärischer und direkter Solarstrahlung.

Unterschieden werden drei Genauigkeitsklassen: Klasse A, Klasse B und Klasse C. Die Messunsicherheit verringert sich dabei von Klasse C zu Klasse B sowie von Klasse B zu Klasse A jeweils ungefähr um den Faktor 2. Die Klassen ersetzen die Terminologie der vorherigen Ausgabe. Zusätzlich sind zwei weitere optionale Eigenschaften eines Sensors definiert. Als *Spectrally Flat* können Messinstrumente klassifiziert werden, die in einem Wellenlängenbereich von $0,35\mu\text{m}$ bis $1,5\mu\text{m}$ eine spektrale Selektivität von weniger als 3% aufweisen. *Fast Response* kennzeichnet Messinstrumente mit einer besonders kurzen Ansprechzeit. Dies ist besonders für schnell wechselnde Bewölkung oder die Nutzung eines *Shadowbands* dienlich.

2.3.2 ISO 9846

Die Norm ISO 9846:2025 *Solar energy – Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer* [5] legt Anforderungen und Verfahren zur Kalibrierung von Pyranometern mittels eines Referenzpyrheliometers fest. Die ursprüngliche Fassung wurde 1993 von der International Organization for Standardization (ISO) veröffentlicht. Im Jahr 2025 erschien eine vollständig überarbeitete zweite Ausgabe, die den aktuellen Stand der Technik widerspiegelt und erweiterte Anforderungen an die Abschätzung der Messunsicherheit einbezieht. In der Norm werden Kriterien und Grenzwerte für die Datenfilterung sowie drei Kalibrierverfahren spezifiziert:

Die *Alternating sun and shade method* beruht auf alternierenden Messungen der GHI- und DHI-Strahlung durch periodische Verschattung des Pyranometers. Aus den aufgezeichneten Messwerten kann anschließend die DNI-Strahlung unter Verwendung von Gleichung 2.1 berechnet und mit den Messwerten des Referenzpyrheliometers verglichen

werden. Aufgrund der thermischen Trägheit klassischer Pyranometer kann diese Berechnung einen Nullpunkt-Offset (*Zero-Offset*) enthalten.

Die *Collimation tube method* stellt das aufwendigste, jedoch gleichzeitig präziseste Kalibrierverfahren dar. Das zu kalibrierende Pyranometer wird auf einem Solar-Tracker montiert und mit einem Kollimationsrohr ausgerüstet, wodurch das Gesichtsfeld des Pyranometers auf den Öffnungswinkel eines Pyrheliometers begrenzt wird. Auf diese Weise messen beide Sensoren unmittelbar die Direktstrahlung, sodass eine direkte Vergleichbarkeit der Messwerte gewährleistet ist.

Bei der *Continuous sun and shade method* wird der Messaufbau um ein zusätzliches, dauerhaft verschattetes Referenzpyranometer erweitert, das die DHI-Strahlung erfasst. Die Sensitivität des zu prüfenden Pyranometers wird gemäß Gleichung 2.2 unter Verwendung von Gleichung 2.1 bestimmt. Dabei wird die Nutzung aus DNI und DHI berechneter GHI-Werte einer direkten Messung mit einem unverschatteten Pyranometer vorgezogen. [5]

$$S = \frac{V_{test,unshaded}}{G_{bn,ref} \times \cos(\theta_z) + G_{d,ref,shaded}} \quad (2.2)$$

S	Sensitivität (Kalibrierfaktor)
$V_{test,unshaded}$	Ausgangssignal des zu kalibrierenden Pyranometers
$G_{bn,ref}$	DNI des Referenzpyrheliometers
θ_z	solarer Zenitwinkel
$G_{d,ref,shaded}$	DHI des verschatteten Referenzpyranometers

Unabhängig von der gewählten Methode definiert die Norm Anforderungen an die verwendete Hardware, die Datenauswahl, die Aufstellungsorte sowie an die praktische Durchführung der Kalibrierung. Nachdem die Messdaten gemäß allen zuvor genannten Kriterien erfasst und vorverarbeitet wurden, legt ISO 9846 zusätzliche Vorgaben für die Berechnung der finalen Sensitivität (Kalibrierfaktor) fest. So sind alle Datenpunkte zu verwerfen, deren berechnete Sensitivitäten mehr als 10% vom Gesamtmittelwert abweichen, da in diesen Intervallen von operationellen Fehlern oder ungeeigneten Umgebungsbedingungen auszugehen ist. Anschließend werden erneut Zeitpunkte ausgeschlossen, deren Sensitivität mehr als 1% vom gleitenden 10-Minuten-Mittelwert abweicht. Die mittlere Sensitivität wird wie folgt berechnet:

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S(i) \quad (2.3)$$

3 Versuchsaufbau

Im Folgenden wird die verwendete Infrastruktur und deren Aufbau zur Erfassung solarer Strahlungs- und meteorologischer Daten eingeführt. Zusätzlich wird ein Überblick über das Eye2Sky-Netzwerk, seine Zielsetzung und die für diese Arbeit relevanten Stationen gegeben.

3.1 Eye2Sky Netzwerk

Das **Eye2Sky**-Wolkenkamera-Netzwerk ist ein operatives Forschungsnetzwerk des DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme (VE), das sich im Nordwesten Deutschlands befindet. Im Mittelpunkt stehen dabei die Wolkenkameras (eng. *All-Sky Imager*) (ASI), bestehend aus handelsüblichen Webcams mit einem hemisphärischen Objektiv, die an allen 29 Stationen installiert sind und alle 30 Sekunden ein Bild des Himmels aufnehmen. Der vom DLR Institut für Solarforschung (SF) entwickelte WobaS Algorithmus erstellt aus den aufgenommenen Daten kurzfristige Solarstrahlungsvorhersagen mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 50 m in bis zu 30 s Intervallen. Abbildung 3.1 zeigt ein *solar irradiance Nowcasting* für Oldenburg auf Basis des Eye2Sky-Netzwerks im Vergleich zu einer Vorhersage aus Wettersatellitendaten. In den beiden oberen Darstellungen ist die räumliche Strahlungsmessung zum Zeitpunkt der Prognoseerstellung (*Lead Time: 0*) für das Eye2Sky-Netzwerk sowie für einen Wettersatelliten dargestellt. Das über Oldenburg befindliche Wolkenfeld kann mithilfe der bodengebundenen Kameras deutlich präziser detektiert und seine zeitliche sowie räumliche Dynamik realistischer modelliert werden. Dieser methodische Vorteil spiegelt sich in der Vorhersagezeitreihe des unteren Plots wider. Insbesondere starke Gradienten („Rampen“) sowie Lastspitzen der PV-Einspeiseleistung in der Region können mit dem Eye2Sky *Nowcasting* antizipiert werden, wohingegen die satellitengestützte Vorhersage (blaue Linie) im Wesentlichen geglättete Mittelwerte über größere räumliche Gebiete und längere Zeitintervalle liefert.

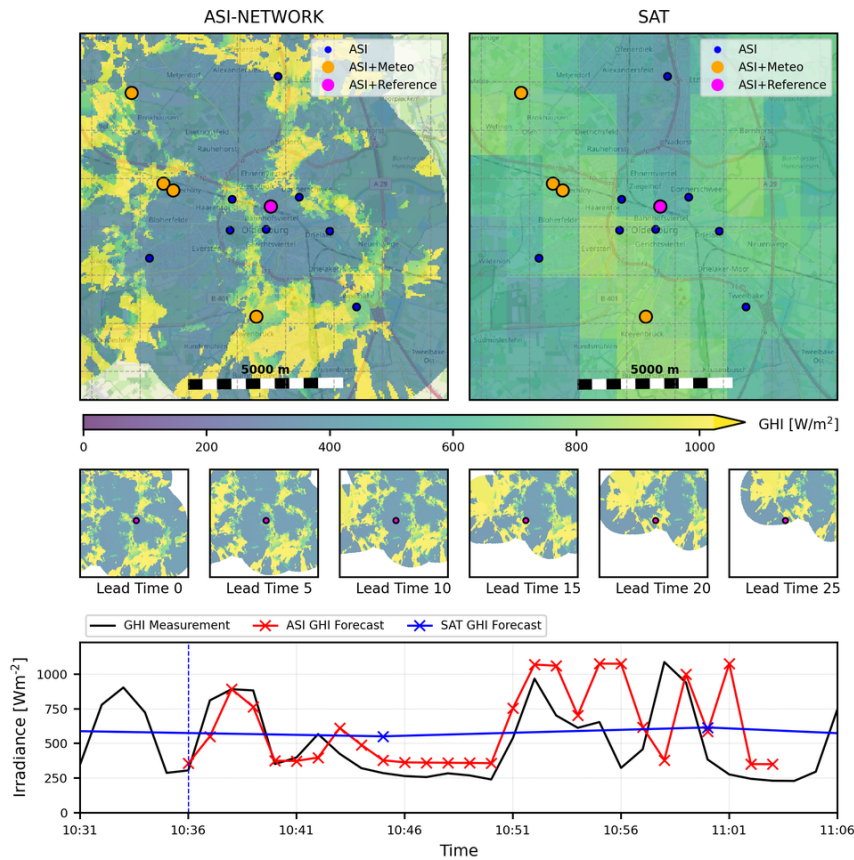
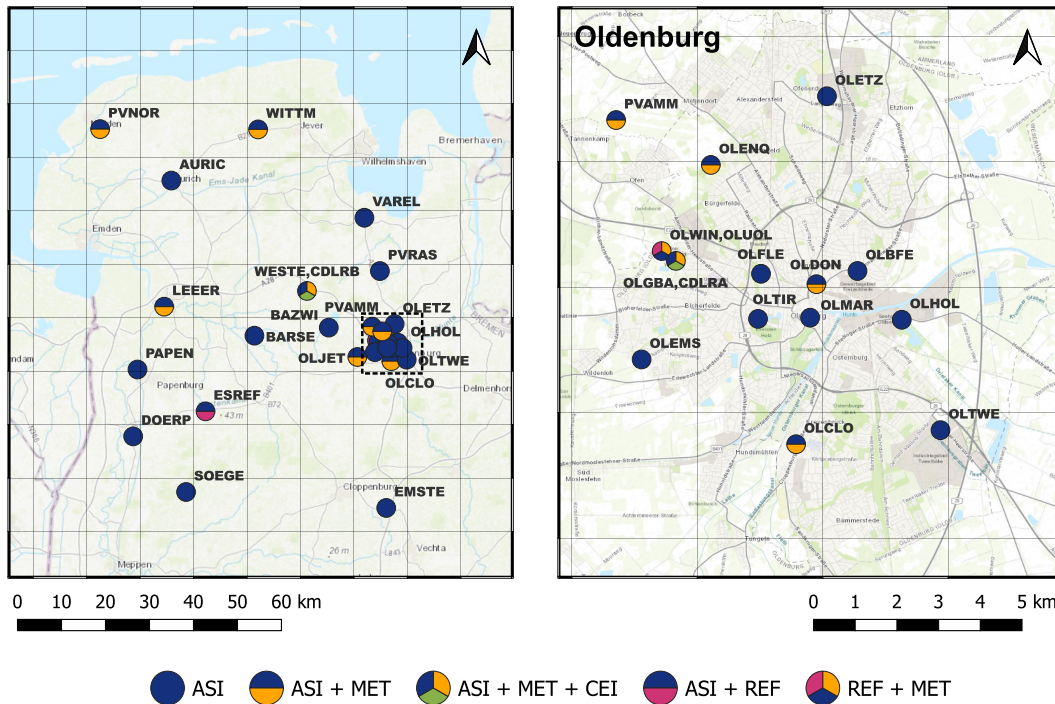


Abbildung 3.1: Nowcasting mit dem Eye2Sky Netzwerk [8]

Das Netzwerk erstreckt sich über eine Fläche von etwa $110 \text{ km} \times 100 \text{ km}$, mit einem räumlichen Schwerpunkt auf der Stadt Oldenburg (Oldb). In ländlichen Gebieten ist die Stationsdichte geringer, während im Stadtgebiet Oldenburg eine Vielzahl an Stationen vorhanden ist. Abbildung 3.2 veranschaulicht die räumliche Verteilung der Messstationen im Weser-Ems-Gebiet sowie im Stadtgebiet von Oldenburg. Die unterschiedlichen Stationstypen sind gemäß der Legende durch eine farbliche Kodierung an den jeweiligen Standorten kenntlich gemacht. [8] [22]

Zusätzlich werden an 12 dieser Standorte die Kameraaufnahmen durch Messungen der Solarstrahlung sowie meteorologischen Daten zu jeder Sekunde ergänzt, was eine besonders umfassende Erfassung der Wetterbedingungen und der Sonneneinstrahlung ermöglicht. Die erfassten Messungen dienen der Validierung und Kalibrierung der verwendeten Algo-

rhythmen zum *Nowcasting* von Sonnenstrahlung an einer einzelnen Station sowie in einem Netzwerk an Stationen.



Last update: 04/2026
Background: OpenStreetMap ESRI topographic

Abbildung 3.2: Eye2Sky Wolkenkameranetzwerk. Karte mit Stationsarten und -standorten; ASI: Kamera; MET: meteorologische Sensorik; CEI: Ceilometer; REF: Referenzstation [22] verändert

10 der 12 Stationen mit meteorologischen Messinstrumenten sind mit Rotating Shadowband Irradiometer (RSI) (CSP Twin-RSI) von der Firma CSP Services GmbH ausgestattet, welche aufgrund der geringen Größe, des geringen Stromverbrauchs und der reduzierten Anfälligkeit gegenüber *soiling* (Verschmutzung) im Netzwerk installiert wurden. Diese Geräte wurden in der Vergangenheit in regelmäßigen Abständen von 2 Jahren demontiert und durch CSP Services oder von SF kalibriert. Stationen im Nahbereich der Stadt Oldenburg werden in der strategischen Ausrichtung des Laborbetriebs ein hoher Stellenwert zugeteilt, weshalb die Stationen LEER, PVNOR und OLJET aufgrund eines defekten Motors lediglich GHI messen und nicht für eine Reparatur des Motors angefahren werden. Mit Ausnahme der Stationen in Oldenburg Wechloy (OLWIN, OLUOL, OLGBA) werden die Stationen nur während Wartungs- und Reparaturarbeiten gereinigt

Station	Entfernung zu OLWIN	Kommentar
OLUOL	0,00 km	direkt neben OLWIN
OLGBA	0,40 km	Dach vom DLR VE
OLENQ	2,37 km	neben einer PV-Anlage
OLDON	3,79 km	
OLCLO	5,63 km	
OLJET	5,75 km	ohne Motor, nur GHI
WESTE	19,26 km	
WITTM	54,11 km	
LEEER	48,41 km	ohne Motor, nur GHI
PVNOR	77,86 km	ohne Motor, nur GHI

Tabelle 3.1: Meteorologische Stationen mit RSI im Eye2Sky-Netzwerk

und besichtigt. Alle Interaktionen mit einer Station werden im Logbuch festgehalten, sodass Änderungen oder Zeiträume mit Abschattung der Sensoren durch wissenschaftliches Personal bei der Auswertung berücksichtigt werden können. Ausschnitte des Logbuches sind im Anhang D einsehbar. Tabelle 3.1 listet die für die Kalibrierung relevanten Stationen mit einem RSI und deren Entfernung zu OLWIN auf. Die Pyranometer-Einheiten der RSI-Stationen sowie die Messinstrumente der Referenzstation wurden zuletzt gemäß den in Tabelle 3.2 aufgeführten Angaben ausgetauscht.

3.2 Referenzstation

Die Referenzstation auf dem Dach des Zentrums für Windenergieforschung FORWIND der Universität Oldenburg am Campus Wechloy ist die größte Station im Netzwerk. Dort sind eine meteorologische Standardstation (OLUOL), die Referenzsensoren auf einem Solar-Tracker, ein Temperatur- und Feuchtesensor, ein Niederschlagsmessgerät, ein Sichtweitenmessgerät sowie vier weitere ASI-Kameras in unterschiedlichen Konfigurationen installiert. Aufgrund der hohen Dichte an dauerhaften und experimentellen Stationen hat OLWIN keine eigene ASI Kamera. Die Pyranometer und Pyrheliometer sind nach ISO 9060 als *Class A* klassifiziert, werden wöchentlich gereinigt und erfüllen damit die höchste Genauigkeitsklasse für Strahlungsmessgeräte. Prüfzertifikate der Referenzsensoren sind im Anhang E beigefügt. Abbildung 3.3a zeigt die wesentlichen Aufbauten. Die Referenzstation in Esterwegen (Landkreis Emsland) ESREF in einem PV-Park ist der Station OLWIN ähnlich. Es wurden lediglich Sensoren eines anderen Herstellers verbaut. Jedoch ist diese aufgrund von Umbaumaßnahmen im PV-Park seit August 2025 nicht

Station	Sensorwechsel
OLWIN	05.06.2023: 2 neue Pyranometer, neues Pyrheliometer 18.08.2025: 2 neue Pyranometer, neues Pyrheliometer 02.10.2025: neues Pyrheliometer 04.03.2026: neues Pyrheliometer
OLUOL	01.02.2023: Installation RSI
OLGBA	19.10.2022: Installation RSI
OLENQ	28.06.2024: Installation RSI 03.12.2025: Austausch der Pyranometer-Einheit
OLDON	30.10.2020: Installation RSI 09.05.2025: Austausch der Pyranometer-Einheit
OLCLO	30.10.2020: Installation RSI 01.12.2025: Austausch der Pyranometer-Einheit

Tabelle 3.2: Sensorlaufzeiten der Oldenburger Stationen aus dem Eye2Sky Logbuch, siehe Anhang D

mehr an die Stromversorgung angeschlossen. Zudem konnte bislang kein regelmäßiges Wartungs- und Reinigungsintervall für die Inspektion der Station etabliert werden. Infolge dieser Einschränkungen erfüllt ESREF derzeit nicht mehr die Anforderungen an eine funktionsfähige Referenzstation. OLWIN hat im Detail zwei ISO 9060:2018 *Class A, fast response, spectral flat* Pyranometer zur Messung von DHI und GHI sowie ein ISO 9060:1990 *First Class* Pyrheliometer zur Messung von DNI auf einem Solar-Tracker mit Abschattungsvorrichtung für eines der Pyranometer.

3.3 Meteorologische Stationen

Die meteorologischen Standardstationen des Eye2Sky-Netzwerks sind jeweils mit einer ASI-Kamera sowie einem kombinierten Sensor zur Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte ausgestattet. Zur Erfassung der Strahlungskomponenten ist ein CSPS Twin RSI bestehend aus zwei Silizium-Pyranometern sowie zwei weiteren, 30° nach Süden geneigten Siliziumsensoren installiert.

Die Datenerfassung erfolgt mittels eines zentralen Datenloggers der Firma Campbell Scientific, der das RSI-Datenloggerprogramm sowohl zur Berechnung der Strahlungskomponenten als auch zur Ansteuerung des Motors ausführt. Die doppelte Ausführung der Pyranometer innerhalb einer Pyranometer-Einheit dient primär der Qualitätssicherung der Messungen. Das Datenloggerprogramm und die Eye2Sky-Datenspeicherung stellen

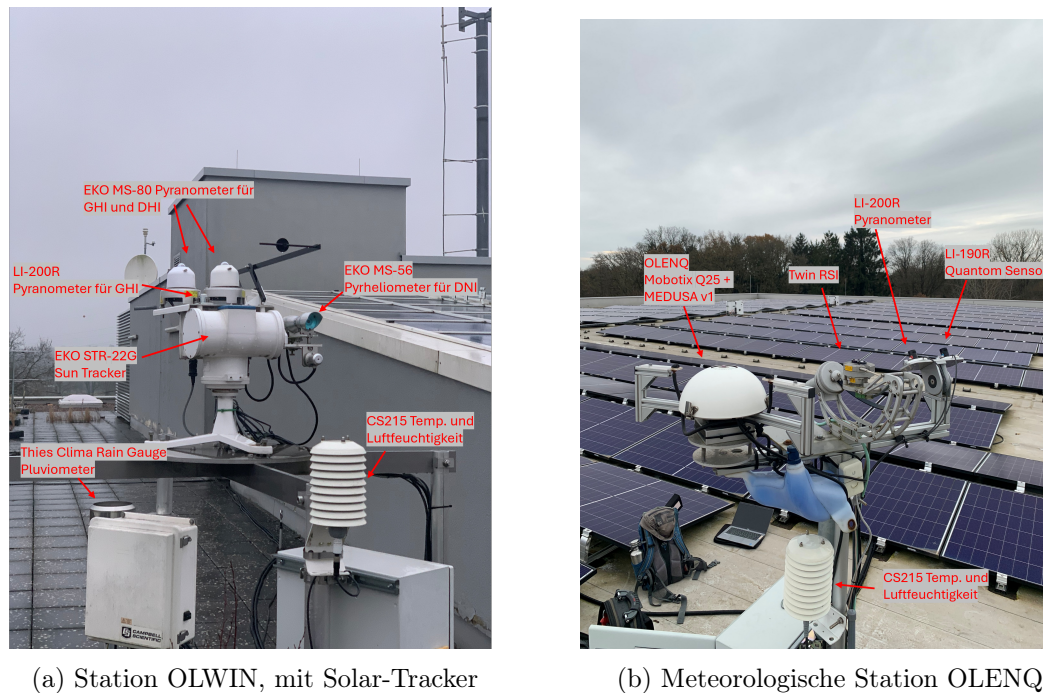


Abbildung 3.3: Bilder von der Referenz- und einer meteorologischen Standardstation

beide Messreihen unabhängig voneinander zur Verfügung und können somit getrennt als $ghi.1$ und $ghi.2$ genutzt werden. Sofern nicht anders angegeben, wird im Eye2Sky-Netzwerk sowie in der vorliegenden Arbeit der Messwert des ersten Sensors verwendet.

Der Motor für das Shadowband an den Stationen PVNOR und LEEER scheint einen Defekt zu haben. Wie in Kapitel 3.1 erwähnt, gilt für diese Stationen kein strategischer Fokus, weshalb die Fehlermeldung nicht bearbeitet wurde und die Messungen ohne Motor weiterhin stattfinden. Messwerte für DHI und DNI können somit nicht ermittelt werden. Folglich ist ausschließlich ein Messwert für GHI Strahlung vorhanden.

Abbildung 3.3b ist während Wartungsarbeiten bei der Station OLENQ entstanden und mit der Beschriftung der Messinstrumente einer meteorologischen Station annotiert. In unmittelbarer Nähe befindet sich eine PV-Anlage der Oldenburger Energiegenossenschaft (Olegeno), die ebenfalls wertvolle Daten für die Forschung liefert. Nicht Bestandteil einer meteorologischen Standardstation ist die automatische Kamerareinigung (MEDUSA). Diese besteht aus Bauteilen der Automobilbranche zur Reinigung von Scheiben und Scheinwerfern. Installiert ist ein experimenteller früher Prototyp an OLENQ.

4 Methodik

Im folgenden Kapitel wird die angewandte Methode zur Kalibrierung dargestellt und anhand von grafischen Darstellungen veranschaulicht. Die darauf aufbauenden Datenfilterverfahren zur Identifikation des Kalibrierungsdatensatzes werden erläutert. Abschließend wird die Methode auf die relevanten Messstationen im Oldenburger Raum angewendet und die entsprechenden Ergebnisse präsentiert. Die Bewertung und Interpretation dieser Ergebnisse erfolgen im anschließenden Kapitel.

4.1 Kalibrierung im Eye2Sky Netzwerk

Bei der Kalibrierung der RSI-Stationen im Eye2Sky-Netzwerk wird eine Methode zur Fernkalibrierung angestrebt, bei der die RSI Pyranometer weder demontiert noch zur Kalibrierung versendet werden müssen. Dies reduziert den Betriebsaufwand des Netzwerks erheblich. Wechselnde Bewölkung, die Distanz zur Referenzstation und weitere atmosphärische Einflüsse stellen eine Herausforderung für die Kalibrierung dar.

Die gängigen Normen für die Kalibrierung von Solarsensoren setzen eine geringe räumliche Trennung zwischen Referenz- und Prüfsensor voraus (< 30 m gemäß ISO 9846 bzw. < 100 m gemäß ISO 9059). Diese Maximalabstände können bei der Fernkalibrierung im Eye2Sky Netzwerk nicht eingehalten werden. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über die Entfernungen der Stationen zu OLWIN. Weitere Anforderungen und Rechenvorschriften aus ISO 9846 dienen als Leitfaden.

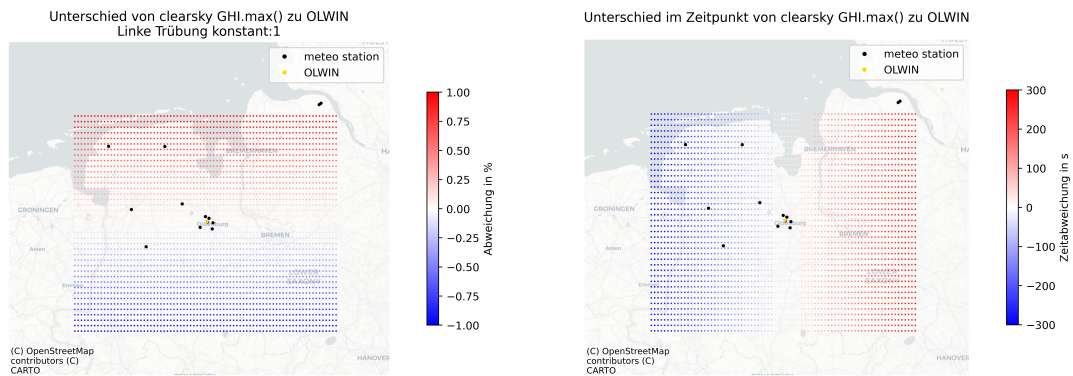
Darüber hinaus werden wolkenfreie Bedingungen oder Perioden mit geringer Bewölkung benötigt. Sollten leichte Wolken in Sonnennähe die Messungen beeinträchtigen, empfiehlt ISO 9847 die Verwendung von Integrationszeiträumen von einer bis fünf Minuten, um kurzzeitige Strahlungsschwankungen zu mitteln. Bei starker Bewölkung wird eine Mittelung von bis zu einer Stunde empfohlen.

Die Fernkalibrierung soll darüber hinaus weitgehend automatisiert und standardisiert erfolgen. Angestrebt wird eine jährliche Kalibrierung im Sommer für alle RSI-Stationen im Oldenburger Stadtgebiet. Die Referenzstation OLWIN stellt auf einem Solar-Tracker wöchentlich gereinigte und hochpräzise Messinstrumente zur Erfassung von DNI und DHI bereit. Die *Continuous Sun and Shade Method* gemäß ISO 9846 dient als konzeptionelle Grundlage für die Adaption eines geeigneten Kalibrierverfahrens für das Eye2Sky-Netzwerk, wenngleich die dort formulierten Randbedingungen und Anforderungen nicht vollständig erfüllt werden können. Im Rahmen der Methodik ist zu untersuchen, welche Zeitintervalle sich am besten für eine verlässliche Kalibrierung eignen. Für den operationellen Betrieb stellt eine einmalige Kalibrierung zu einem definierten Stichtag (z. B. 01.07.) mit anschließender Implementierung des ermittelten Kalibrierfaktors in das RSI-Datenloggerprogramm die praktikabelste Umsetzungsvariante dar.

Um den Einfluss der Entfernung unter isolierten Bedingungen zu untersuchen, können die Stationsparameter aus Tabelle A.1 [22] verwendet werden. Damit können Clear-Sky-Einstrahlungen, wie beschrieben, für einen gegebenen Zeitraum berechnet werden. Sowohl die Amplitude als auch der Zeitpunkt der maximalen Globalstrahlung GHI sind unter Idealbedingungen (gleiche Atmosphäre, gleiches Wetter) stark vom Standort der Station abhängig. Ein direkter Vergleich der Messwerte mit der Referenzstation in Oldenburg-Wechloy (OLWIN) ist daher nur bei vernachlässigbaren Abweichungen in Amplitude und Einstrahlungsmaximum zulässig. Bei Stationen mit mittleren bis großen Abweichungen müssen die Messwerte vor dem Vergleich entsprechend korrigiert werden.

Abbildung 4.1a zeigt die Abweichung der maximalen Clear-Sky-Strahlung, während Abbildung 4.1b den zeitlichen Versatz im Einstrahlungsmaximum gegenüber der Referenzstation am 12.06.2025 darstellt. Die schwarzen Punkte auf den Abbildungen zeigen die Position der Eye2Sky-Standorte mit meteorologischen Messeinrichtungen. Für die Stationen innerhalb des Stadtgebiets Oldenburg sind nur geringfügige, standortbezogene Abweichungen festzustellen, die in den nachfolgenden Berechnungen als vernachlässigbar eingestuft werden. Die Anwendung der Kalibrierungsmethode auf Basis der Referenzstation OLWIN wird daher auf Standorte mit einem Abstand von weniger als 10 km beschränkt.

Die atmosphärische Trübung stellt einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Abschwächung der Solarstrahlung dar. Für Stationen innerhalb der 10 km-Grenze wird die Trübung aufgrund der geringen räumlichen Trennung und ähnlichen geographischen Beschaffenheit als näherungsweise konstant angenommen. Die Küstenstationen PVNOR und



(a) Unterschied von Clear-Sky GHI Maximalwert

(b) Unterschied vom Zeitpunkt zum Clear-Sky GHI Maximalwert

Abbildung 4.1: Abweichung der Clear-Sky GHI Strahlung für Standorte im Weser-Ems Gebiet im Vergleich zu der Referenzstation OLWIN (Oldenburg, Wechloy) am 12.06.2025

WITTM unterliegen hingegen einer abweichenden atmosphärischen Zusammensetzung, insbesondere hinsichtlich des erhöhten Salzaerosol- und Feuchtegehalts der Meeresluft, was zu einer systematisch veränderten Strahlungsabschwächung führen kann. Für die Kalibrierung sind zudem Zeitintervalle zu definieren, in denen an beiden Messstandorten (Referenz- und Testpyranometer) simultan ideale Messbedingungen herrschen. Mit zunehmender Distanz zwischen den Standorten nimmt jedoch die räumliche Variabilität der Wolkenfelder zu, wodurch die Identifikation solcher Zeiträume beeinträchtigt werden kann. Ein großer Vorteil gegenüber der Kalibrierung durch externe Dienstleister an einem anderen Ort ist, neben dem deutlich reduzierten Arbeitsaufwand, die Kalibrierung im Einsatzgebiet des Sensors. SF kalibriert Sensoren bei *Plataforma Solar de Almería* (PSA) in Südspanien, dessen Atmosphäre sowie lokale Wetterbedingungen deutlich von den Standortbedingungen im Raum Weser-Ems abweichen. Wie in Kapitel 2.2.3 eingeführt, verwenden RSIs zwei Silizium-Pyranometer und einen Schattenarm zur Messung und Berechnung der Sonnenstrahlungskomponenten. Die Kalibrierung erfolgt jedoch lediglich auf den Messwerten der GHI Strahlung, da die Ermittlung der Komponenten in allen Fällen denselben Sensor verwendet. Das zweite Silizium-Pyranometer dient der Qualitätskontrolle und Überwachung von *Sensordrift* und *soiling*.

4.2 Datenfilterung

Im Folgenden werden die entwickelten Filter präsentiert, mit denen sich die entscheidenden Zeitstempel für die Kalibrierung gezielt und zuverlässig identifizieren lassen.

4.2.1 Sonnenstand

Die Norm ISO 9846 schreibt für die Kalibrierung Datenpunkte mit einem Winkel $\theta_z > 70^\circ$ vor. Abbildung 4.2 stellt den jährlichen Verlauf der Sonnenbahn in Bezug auf den Azimut γ_n sowie den Höhenwinkel α_s am Standort OLWIN dar. Grau markierte Sonnenpositionen werden von der Auswertung ausgeschlossen, was eine präzise Kalibrierung in den Wintermonaten unterbindet. Die Farbskala der Linien kodiert den Zeitpunkt im Jahresverlauf. In den Wintermonaten treten geringe Werte des Höhenwinkels α_s auf, während die Sonne in den Sommermonaten Höhenwinkel von bis zu 60° erreicht. Die roten Linien zeigen den Sonnenstand zu einer Tageszeit der UTC-Zeit.

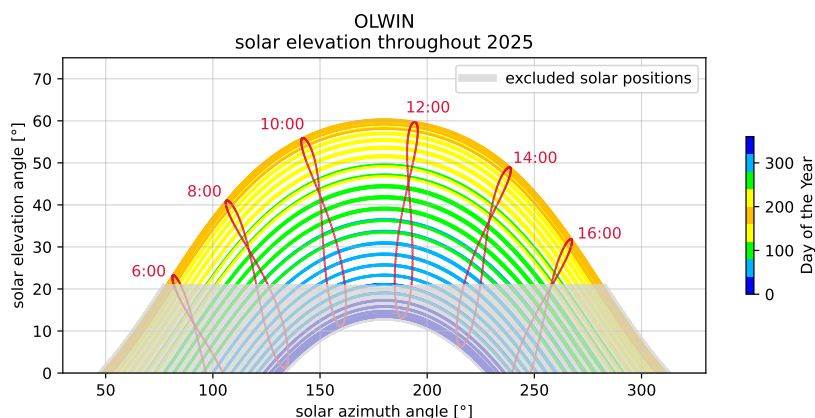


Abbildung 4.2: Verlauf des Sonnenstandes an der Station OLWIN im Jahr 2025, oberste Kurve am 21.06.2025, unterste Kurve am 21.12.2025, rote Kurven Sonnenstände zu Tageszeiten (UTC)

Dabei bezeichnet α_s den Winkel zwischen der Horizontalen und den einfallenden Sonnenstrahlen. Der Zenitwinkel θ_z beschreibt hingegen den Winkel zwischen den Sonnenstrahlen und der Normalen auf die horizontale Fläche. Der Winkel zwischen Norden und dem aktuellen Sonnenstand wird als Azimutwinkel γ_n bezeichnet. Abbildung E.1 veranschaulicht die genannten Winkel exemplarisch anhand eines Solarmoduls.

4.2.2 Clear-Sky Erkennung

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, kann die Clear-Sky-Strahlung für beliebige Standorte und Zeiträume berechnet werden. Das Python-Paket `pvlib` bietet neben den Funktionen zur Berechnung der solaren Position und der Clear-Sky-Strahlung auch eine Implementierung eines Algorithmus [20] zur Erkennung von Clear-Sky-Zeiträumen in gemessenen Zeitreihen der GHI Strahlung. Dieser Algorithmus vergleicht die simulierten mit den gemessenen Daten in einer Standardzeitauflösung von 60 s und generiert daraus eine *boolean* Zeitreihe. Der Wert dieser Zeitreihe ist genau dann *true*, wenn auf Basis der Messdaten ein wolkenfreier Himmel detektiert beziehungsweise klassifiziert wurde. In Abbildung 4.3 ist der Algorithmus exemplarisch für die Station OLWIN am 01.04.2025 berechnet. Zusätzlich ist in der Darstellung ein Keogramm der ASI-Kamerabilder enthalten. Diese Darstellungsform wurde ursprünglich zur Visualisierung von Polarlichtern eingeführt und dient der Darstellung zeitlicher Veränderungen am Himmel. Hierbei wird ein schmaler, zumeist vertikaler Streifen eines kreisförmigen ASI-Bildes extrahiert und zu einem großformatigen Bild einer Zeitreihe zusammengesetzt.

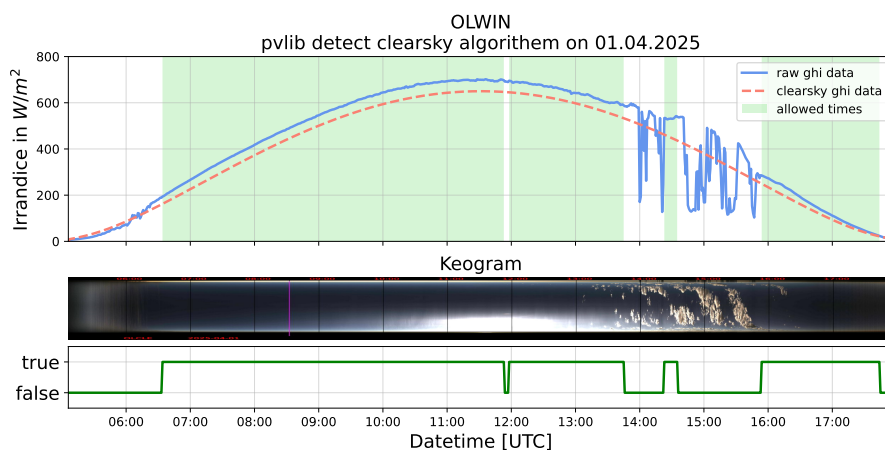


Abbildung 4.3: Beispiel "pvlib detect clearsky Algorithmus"[20] [13]; oben: Mess- und Rechenwerte für GHI; mitte: Keogramm der Station OLCLE (direkt neben OLWIN); unten: *boolean* Zeitreihe

4.2.3 Linke Trübung

Die Sonnenstrahlung unterliegt, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, auf ihrem Weg durch die Atmosphäre Abschwächungen. Der Trübungsfaktor nach Linke ist ein Maß für die

Intensität dieser Abschwächung und gibt an, wie viele ideale Atmosphären für eine gleichwertige Abschwächung der realen Atmosphäre benötigt werden. ISO 9846 legt einen Maximalwert der Klasse 6 für Kalibrierzeitpunkte fest.

Anfang März 2026 kam es in Oldenburg zu Saharastaub. Dadurch war die Atmosphäre stark getrübt. Abbildung 4.4 zeigt den Verlauf der Trübung um dieses Ereignis herum. Für die überwiegenden Zeiträume sind in Oldenburg Trübungen weit unter dem Grenzwert festzustellen.

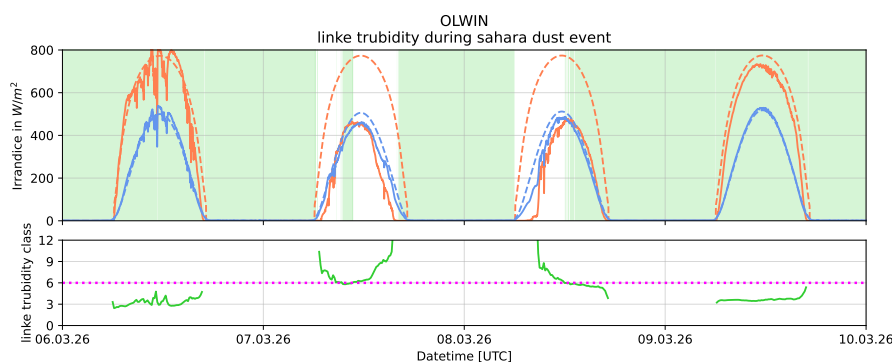


Abbildung 4.4: Trübung der Atmosphäre mit Trübungsklassen nach Linke [15] zu einem Saharastaub-Ereignis in Oldenburg; oben: Mess- sowie Clear-Sky-Werte für GHI und DNI, grün eingefärbter Bereich ist erlaubt; unten: Verlauf der Linken Trübung, gestrichelte Linie ist der Grenzwert (Linke Trübung: 6) nach ISO 9846

4.2.4 Windgeschwindigkeit

Bei hohen Windgeschwindigkeiten geht die Norm ISO 9846 von einer signifikanten Beeinflussung der Messung der Direktstrahlung aus. Für ein windgeschütztes Pyrheliometer sind daher alle Zeitintervalle mit einer Windgeschwindigkeit größer als $10 \frac{m}{s}$ von der Auswertung auszuschließen.

Das Eye2Sky-Netzwerk, dessen Schwerpunkt auf der Erfassung der Solarstrahlung liegt, ermöglicht lediglich eingeschränkte Messungen der Windgeschwindigkeit. In Oldenburg werden entsprechende Messwerte ausschließlich an den Stationen OLGBA, OLENQ und PVAMM erfasst. Abbildung 4.5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten in Oldenburg. Als Näherung wird angenommen, dass die Windgeschwindigkeiten innerhalb des Stadtgebietes als räumlich homogen betrachtet werden können. Fehlende

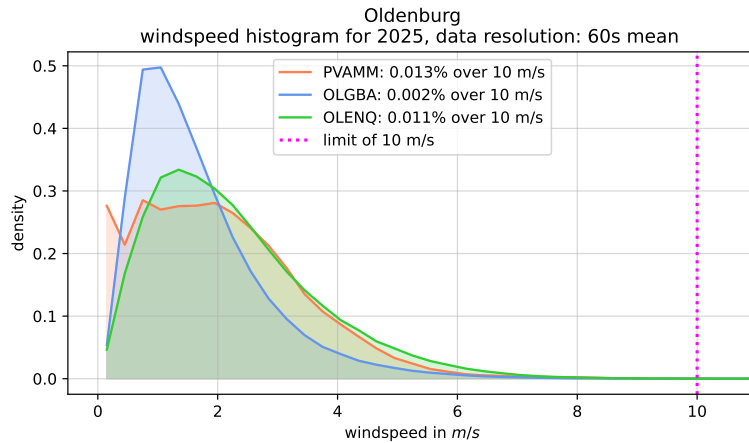


Abbildung 4.5: Histogramm der Windgeschwindigkeit in Oldenburg, Station OLGBA, OLENQ und PVAMM

Messungen in den Daten von OLGBA werden mit Messwerten von PVAMM aufgefüllt. Der Legende in Darstellung 4.5 ist zusätzlich der Anteil der Zeitpunkte mit einer Windgeschwindigkeit oberhalb des Grenzwertes von 10 m/s zu entnehmen. Deutlich erkennbar sind darüber hinaus die unterschiedlichen Windgeschwindigkeitsverteilungen der beiden Messstandorte. Der Standort PVAMM befindet sich am Stadtrand auf einer Freiflächen-Photovoltaikanlage, während OLENQ auf einem Parkhausdach am Stadtrand installiert ist. Der Grenzwert wird in weniger als 0,02% der Zeitpunkte überschritten.

4.2.5 Eintretende Direktstrahlung

Das Lambertsche Kosinusetz beschreibt die winkelabhängige Abschwächung der Strahlungsintensität auf einer gegebenen Fläche in Abhängigkeit vom Einfallswinkel und ist wie folgt definiert:

$$I_{\theta} = I \times \cos(\theta_z) \quad (4.1)$$

Gemäß ISO 9846 sind Messdaten auszuschließen, bei denen die auf die Ebene des Pyranometers projizierte Direktstrahlung (engl. *beam horizontal irradiance*) kleiner als $500 \frac{W}{m^2}$ ist. Diese Größe kann aus der DNI unter Verwendung der Gleichung 4.1 berechnet werden.

4.2.6 Logbuch Einträge

Im operationellen Betrieb des Eye2Sky-Netzwerks wird ein Logbuch zur systematischen Erfassung von Änderungen und Hinweisen zu den Stationen geführt. Im Rahmen von Wartungsarbeiten werden jeweils die Art der Tätigkeit, die durchgeführten Modifikationen sowie der entsprechende Zeitraum detailliert dokumentiert. Auf diese Weise können Zeitintervalle identifiziert und ausgeschlossen werden, in denen sich Personen im Sichtfeld der Kameras und Sensoren aufhalten oder diese potenziell verdecken.

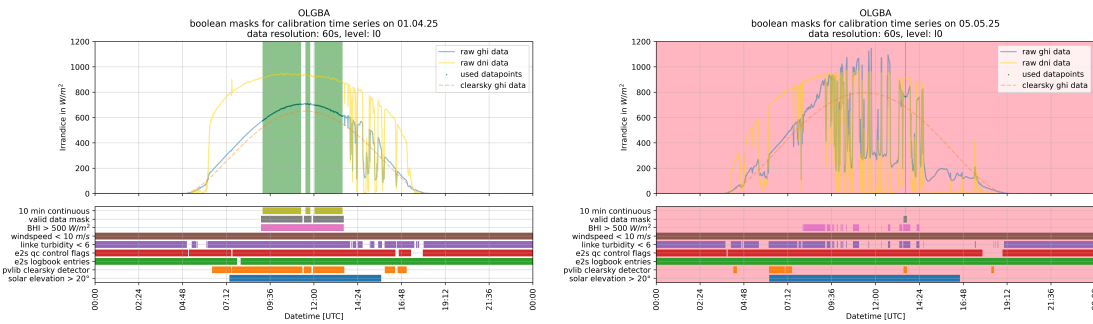
Bei Konfigurationsänderungen, beispielsweise an den Routereinstellungen oder den Belichtungszeiten der Kamera, ist gewährleistet, dass sich keine Person im Nahbereich der Sensorik befindet, da diese Anpassungen in der Regel per Fernzugriff durchgeführt werden. Relevante Logbucheinträge für den Ausschluss von Daten sind typischerweise mit folgenden Tags versehen: `SensorUpdate`, `calibration`, `maintenance`, `repair`, `cleaning`, `CamAlignment`. Die Logbucheinträge der Oldenburger Stationen sind im Anhang D aufgeführt.

4.2.7 Eye2Sky Quality Control Flags

Tabelle 4 in [22] gibt einen Überblick über die im Eye2Sky-Netzwerk implementierten operationellen Qualitätskontrollen für meteorologische Datensätze. Die Tests *maximum* und *minimum gradient limit* werden dabei nicht auf Strahlungsdaten angewendet. Die übrigen Prüfverfahren führen im Fall eines negativen Testergebnisses zum Ausschluss der betreffenden Daten aus dem Kalibrierungsdatensatz. Eine detaillierte Darstellung der zugrunde liegenden Testmethodik findet sich in Kapitel 5 *Quality Control* aus [22].

4.2.8 Datenkontinuität

Unter bewölkten Wetterbedingungen oder während des Übergangs zu Clear-Sky-Verhältnissen identifiziert der Algorithmus `pvlb.clearsky.detect_clearsky` Zeitintervalle, die nicht den Anforderungen für eine zuverlässige Kalibrierung genügen. Um diese Intervalle systematisch auszuschließen, wird ein rollendes Zeitfenster angewendet, das auf der logischen Verknüpfung aller zuvor durchgeführten Datenfilter basiert. Innerhalb dieses Verfahrens werden ausschließlich Zeitpunkte berücksichtigt, für die über einen zusammenhängenden Zeitraum von mindestens 10 Minuten durchgängig als gültig eingestufte Daten vorliegen.



(a) Korrekte Klassifizierung am 01.04.2025 (b) *false positive* Klassifizierung am 05.05.2025

Abbildung 4.6: Kombinierte Datenfilter und Verlauf der Messwerte für OLGBA

4.2.9 Manuelle Filterung

Nachdem alle zuvor beschriebenen Filter angewendet wurden, sind in den Daten weiterhin *false positive* identifizierte Zeitintervalle vorhanden. Für jeden erkannten Tag wird ein Diagramm erzeugt, wie in Abbildung 4.6a dargestellt. Dieses visualisiert die einzelnen Masken, den zeitlichen Verlauf der Messwerte, ein Keogramme sowie die letztlich zugelassenen Zeiträume. Abbildung 4.6b zeigt exemplarisch einen Tagesverlauf mit einem *false positive*, weshalb der Hintergrund der Darstellung rot eingefärbt ist. Die betreffenden Tage werden anschließend manuell aus dem Kalibrierungsdatensatz ausgeschlossen. Die Abbildung und dessen Keogramme sind zur besseren Einsicht in vergrößertem Format nochmals im Anhang B abgebildet.

4.3 Durchführung

Im Folgenden wird die beschriebene Methodik einschließlich der angewandten Datenfilterung auf die Messdaten der Messstation Oldenburg übertragen. Eine detaillierte Auswertung der Kalibrierung erfolgt im anschließenden Kapitel.

4.3.1 Datenverfügbarkeit

Nach Anwendung sämtlicher zuvor beschriebener Datenfilterungsmethoden verbleibt lediglich eine geringe Anzahl von Zeitpunkten, die für eine Kalibrierung herangezogen

werden können. In Abbildung 4.7 ist die Anzahl der für das Jahr 2025 verfügbaren Kalibrierungszeitpunkte für jede Station dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Datenfilterungsmethoden an beiden Standorten simultan ideale Bedingungen identifizieren müssen, um eine Kalibrierung zu ermöglichen. Die in Abbildung 4.7 dargestellten gestrichelten Kurven repräsentieren die Verfügbarkeit der Stationspaare unter Einbeziehung von OLWIN, während die durchgezogenen Linien die Verfügbarkeit der jeweiligen Einzelstationen abbilden. Aus der Abbildung lässt sich unmittelbar ableiten, dass der Sommer 2025 überwiegend durch vermehrte Bewölkung charakterisiert war, da der Großteil der zulässigen Kalibrierungszeitpunkte im Frühjahr auftritt. Eine Kalibrierung während der Wintermonate ist aufgrund der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Einschränkung des Sonnenstandes prinzipiell ausgeschlossen.

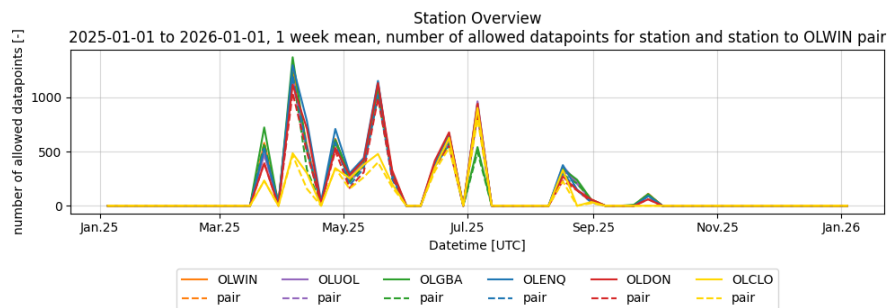


Abbildung 4.7: Verfügbarkeit von Datenpunkten zur Kalibrierung in 2025

Die in Darstellung 4.8 gezeigten Kreisdiagramme liefern Informationen sowohl über die Differenzen in der Anzahl der gleichzeitig zugelassenen Zeitstempel der Stationspaare als auch über die Verteilung der jeweils wirksamen Ausschlusskriterien. Dem Stationsnamen ist die Anzahl der Zeitstempel zugeordnet, die von der betreffenden Station im Vergleich zu OLWIN zusätzlich verworfen werden. Dies spiegelt sich zugleich in der Kreisgröße wider. Ein größerer Kreis weist dabei auf eine erhöhte Anzahl problematischer Zeitpunkte und damit auf potenzielle Qualitätsprobleme der jeweiligen Station hin.

Besonders hervorzuheben ist der deutlich erhöhte Anteil verworfener Zeitstempel der Station OLCLO im Vergleich zu den übrigen Stationen. Für diese Station wurden 3621 Zeitpunkte aus dem Kalibrationsdatensatz von OLWIN als nicht den Anforderungen entsprechend klassifiziert, was bei einer zeitlichen Auflösung von 60 s Mittelwerten einem Zeitraum von etwa 60 Stunden entspricht. Aus der in Abbildung 3.2 dargestellten

Standortkarte geht hervor, dass diese Station am gegenüberliegenden Stadtrand von Oldenburg positioniert ist. Dies allein liefert jedoch keine hinreichende Erklärung für die stark abweichende Anzahl zeitgleicher Kalibrierungszeitpunkte.

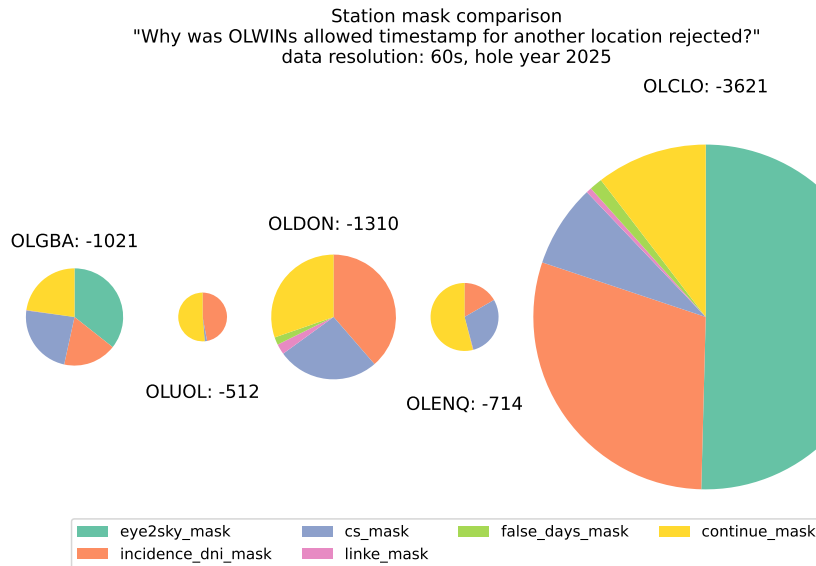


Abbildung 4.8: Anzahl und Ausschlusskriterium erlaubter OLWIN Zeitstempel, welche bei Stationen nicht zugelassen wurden. Aufschlüsselung nach vorkommen der Masken.

Vielmehr zeigt Abbildung 4.8, dass in etwa der Hälfte der Fälle die Qualitätskontrolle des Eye2Sky Netzwerkes `eye2sky_mask` zum Ausschluss geführt hat. Diese Maske wird überwiegend aufgrund fehlender Messwerte durch Verbindungs- bzw. Datenübertragungsprobleme zum Netzwerk aktiviert. Ein weiterer wesentlicher Anteil der ausgeschlossenen Zeitpunkte ist auf die Masken `incidence_dni_mask`, `cs_mask` und `continue_mask` zurückzuführen. Diese Masken deuten auf variierende atmosphärische Bedingungen, insbesondere auf durchziehende Wolkenfelder, hin.

Die Maske für ausreichend eintreffende DNI-Strahlung `incidence_dni_mask` (siehe Kapitel 4.2.5) kann zusätzlich durch starke Abweichungen der Sensorempfindlichkeit verschärft werden. Für die Bewertung der Kalibrierungszeiträume werden exakt jene Sensoren herangezogen, die auch kalibriert werden sollen. Bei extremen Abweichungen kann die Bestimmung geeigneter Zeitpunkte für eine Station jedoch massiv beeinträchtigt und im schlechtesten Fall nahezu unmöglich werden.

Station	30 Tage	60 Tage	90 Tage	1. Halbjahr	Alle Werte
OLUOL	1.0145 0.0126	1.0348 0.0195	1.0384 0.0159	1.0376 0.0150	1.0350 0.0151
OLGBA	0.9779 0.0127	0.9853 0.0105	0.9813 0.0126	0.9800 0.0122	0.9831 0.0134
OLENQ	1.0304 0.0122	1.0329 0.0094	1.0244 0.0128	1.0231 0.0125	1.0267 0.0146
OLDON	0.9996 0.0189	0.9876 0.0293	1.0140 0.0390	1.0182 0.0387	1.0217 0.0370
OLCLO	1.0962 0.0128	1.1023 0.0123	1.1009 0.0113	1.1004 0.0108	1.1022 0.0110

Tabelle 4.1: Berechnete Kalibrierungsfaktoren und *Standardabweichung* von Silizium Pyranometer 1 für verschiedene Zeiträume vor dem 01.07.2025 sowie für den Jahresmittelwert, jeweils unter Berücksichtigung der angewandten Datenfilterung. Die Werte sind auf die vierte Dezimalstelle gerundet.

Station	30 Tage	60 Tage	90 Tage	1. Halbjahr	Alle Werte
OLUOL	1.0044 0.0112	1.0079 0.0084	1.0023 0.0101	1.0012 0.0100	1.0040 0.0112
OLGBA	0.9798 0.0118	0.9877 0.0100	0.9849 0.0117	0.9841 0.0112	0.9868 0.0121
OLENQ	1.0269 0.0123	1.0284 0.0093	1.0209 0.0120	1.0201 0.0116	1.0237 0.0139
OLDON	0.9847 0.0148	0.9743 0.0157	1.0301 0.0621	1.0378 0.0624	1.0337 0.0585
OLCLO	1.0920 0.0126	1.1004 0.0135	1.0983 0.0124	1.0973 0.0120	1.0989 0.0118

Tabelle 4.2: Wie Tabelle 4.1 für Silizium-Pyranometer 2

4.3.2 Kalibrierung

Zur Bestimmung der Sensitivität, also dem Quotienten aus Stations- zu Referenzstrahlung, einer Messstation für unterschiedliche Auswertungszeiträume werden Gleichung 2.2 sowie Gleichung 2.3 auf den Kalibrierungsdatensatz angewandt, wobei Datenpunkte entsprechend den in Kapitel 2.3.2 definierten Qualitätskriterien ausgeschlossen werden. Als Referenzdatum für die Kalibrierung wird der 01.07. festgelegt. Hiervon ausgehend werden die resultierenden Sensitivitäten für Zeiträume von 30, 60 und 90 Tagen vor diesem Stichtag für das erste Halbjahr sowie für das gesamte Jahr für jedes Silizium Pyranometer bestimmt. Die entsprechenden Kalibrierungsfaktoren für jede Station sind in Tabelle 4.1 und 4.2 zusammengefasst. Zur erleichterten Interpretation wird die Sensitivität in invertierter Form dargestellt. Ein Faktor > 1 weist darauf hin, dass eine Station im Vergleich zur Referenz zu geringe Strahlungswerte registriert. Bei Faktoren < 1 misst das Pyranometer im Verhältnis zu OLWIN eine zu hohe Strahlung. Die invertierte Sensitivität wird zur Korrektur der ursprünglichen Strahlungswerte als Faktor verwendet.

Begonnen bei ghi.1 aus Tabelle 4.1 der Station OLUOL ergibt sich ein breites Spektrum berechneter Faktoren. Die Werte der einzelnen Auswertungszeiträume vor Juli 2025 sowie der jeweilige Jahresmittelwert differieren im Maximum um mehr als 0,02 bzw. um mehr als 2%. Dies wird lediglich von den Faktoren der Station OLDON übertroffen, de-

ren Werte im Maximum um mehr als 3% abweichen. Diese Abweichungen sind bereits als erheblich einzustufen und werfen die Fragen auf, inwieweit die Wahl des Auswertungszeitraums den berechneten Faktor beeinflusst oder ob sich das beobachtete Verhalten durch andere Einflussgrößen oder Ereignisse erklären lässt. Die anderen Stationen zeigen über die unterschiedlichen Zeiträume ein stabiles Verhalten mit einer geringeren Variabilität der Standardabweichung.

Analog zu den für den ersten Sensor bestimmten Faktoren des zweiten Pyranometers zeigen die in Tabelle 4.2 aufgeführten Kalibrierungsfaktoren ein vergleichbares Verhalten, auch wenn die einzelnen Werte deutlich voneinander abweichen können. Die Abweichungen bei OLUOL sind jedoch bei Weitem nicht so ausgeprägt wie beim ersten Pyranometer. Das zweite Pyranometer weist einen Kalibrierungsfaktor von ungefähr 1 auf, was einer bereits nahezu idealen Kalibrierung entspricht.

Hervorzuheben ist zudem, dass alle Faktoren über beide Pyranometer hinweg eine konsistente Abweichungsrichtung aufweisen. Die Sensoren messen jeweils entweder durchgängig zu hohe oder zu niedrige Einstrahlungswerte und zeigen dieses Verhalten darüber hinaus unabhängig von den gewählten Kalibrierzeiträumen. Eine Ausnahme bildet ausschließlich OLDON, das abhängig vom Kalibrierzeitraum unterschiedliche, jedoch über beide Pyranometer hinweg konsistente Faktoren aufweist.

5 Ergebnisse

Dieses Kapitel analysiert die berechneten Kalibrierungsfaktoren anhand verschiedener graphischer Auswertungen und gibt Erklärungen sowie Einordnungen der wichtigsten Erkenntnisse.

Da aus den in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 dargestellten Unterschieden der Kalibrierfaktoren von $ghi.1$ zu $ghi.2$ keine eindeutige oder konsistente Systematik abgeleitet werden kann, wird die Bewertung der Kalibrierung im Folgenden auf die Werte des ersten Sensors beschränkt. Die ermittelten Kalibrierfaktoren werden jedoch in der Anwendung auf beide Sensoren übertragen. Außerdem wird im ersten Teil mit einer Kalibrierung zum 01.07. mit einem Zeitraum von 30 Tagen gerechnet. In Kapitel 5.5 werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Kalibrierungen näher erläutert.

Die Entwicklung eines geeigneten Qualitätsmaßes für die Beurteilung der Kalibrierung stellt eine zentrale Aufgabe dieser Arbeit dar. Darüber hinaus ist die Güte der bestimmten Kalibrierfaktoren zu verifizieren, um eine verlässliche und reproduzierbare Anpassung der Messwerte sicherzustellen.

5.1 Fehlermaße

RMSE

Der *root mean square error* (RMSE), auch als *root mean square deviation* (RMSD) bezeichnet, ist ein weit verbreitetes Gütemaß zur Quantifizierung der mittleren Abweichung zwischen Mess- und Referenzwerten. Da die Fehlerterme vor der Mittelwertbildung quadriert werden, führt der RMSE zu einer stärkeren Gewichtung großer Abweichungen sowie ein Ausblenden des Vorzeichens.

$$\delta_i = X_i - X_i^{ref} \quad (5.1)$$

δ_i Messfehler
 X_i gemessene Werte
 X_i^{ref} Referenz- bzw. tatsächliche Werte

$$\text{RMSE} = \text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (5.2)$$

Der RMSE repräsentiert damit den mittleren quadratischen Fehler und besitzt dieselbe physikalische Einheit wie die betrachteten Eingangsgrößen. Ein RMSE von null indiziert eine vollständige Übereinstimmung zwischen Messdaten und Referenzwerten.

rRMSE

Die im Sommer zu erwartende solare Einstrahlung ist signifikant höher als im Winter. Ebenso übersteigt die Einstrahlung zur Mittagszeit jene in den Abendstunden. Um die Modellfehler über den Jahresverlauf hinweg vergleichbar zu machen, wird der *relative root mean square error* (rRMSE) herangezogen. Hierzu wird der RMSE auf den Mittelwert der jeweiligen Referenzwerte normiert und anschließend als prozentuale Kennzahl angegeben.

$$\text{rRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^{ref}} \times 100 \quad (5.3)$$

Mit Hilfe des rRMSE können hohe absolute Abweichungen in den Sommermonaten systematisch den geringeren absoluten Fehlern in den Wintermonaten gegenübergestellt und quantitativ verglichen werden.

BIAS

Der BIAS quantifiziert die systematische Abweichung der Messwerte der meteorologischen Stationen von denen der Referenzstation und entspricht dem arithmetischen Mittel der Einzelfehler δ_i :

$$\text{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (5.4)$$

Ein positiver BIAS weist auf eine systematische Überschätzung der Einstrahlung hin, während ein negativer BIAS auf eine systematische Unterschätzung der Einstrahlung schließen lässt.

5.2 Auswertung

Der unmittelbare Effekt der Kalibrierung ist in Abbildung 5.1 ersichtlich. Am 13.08.2025 herrschen nahezu wolkenfreie Bedingungen, d.h. alle Messstationen im Stadtgebiet Oldenburg sollten annähernd identische Einstrahlungswerte erfassen. Im zeitlichen Verlauf der GHI-Messungen der Stationen OLCLO und OLWIN im obersten Diagramm zeigt sich jedoch eine deutlich sichtbare Diskrepanz. Für diesen Tag ergibt sich für die betreffende Station eine mittlere Abweichung von über 50 W/m^2 . Eine derartige Differenz ist für die Bewertung solarer Ressourcen sowie für die Evaluierung von Algorithmen im Eye2Sky-Kontext bereits von erheblicher Relevanz.

Die durchgezogenen Kurven in der Darstellung 5.1 repräsentieren die Stationsmesswerte nach einer Kalibrierung auf Basis von Datenpunkten aus einem 30-Tage-Zeitraum bis zum 01.07.2025, während die gepunkteten Kurven die unkorrigierten Messwerte und deren Fehlerverlauf abbilden. Unter wolkenfreien (Clear-Sky-)Bedingungen erweist sich die Kalibrierung der Station als besonders wirksam. Die zuvor eingeführten Fehlermetriken RMSE, rRMSE und BIAS können zu nahezu jedem Zeitpunkt des 13.08.2025 signifikant reduziert werden. Die systematischen Abweichungen haben in diesem Zeitraum ein hohes Niveau erreicht, was sich insbesondere in einem ausgeprägten BIAS und einem erhöhten RMSE widerspiegelt.

Der überwiegende Anteil der Fehlerreduktion ist dabei auf die Verringerung des BIAS zurückzuführen.

Auffällig ist beim BIAS der Wechsel des Vorzeichens um die Mittagszeit, was auf eine fehlerhafte horizontale Ausrichtung des Sensors an der Station OLCLO hindeuten könnte. Die ausgeprägte Abweichung zum Zeitpunkt des Sonnenuntergangs lässt darüber hinaus vermuten, dass an einem der Standorte (OLWIN oder OLCLO) die Einstrahlung durch umliegende Objekte partiell abgeschattet wird.

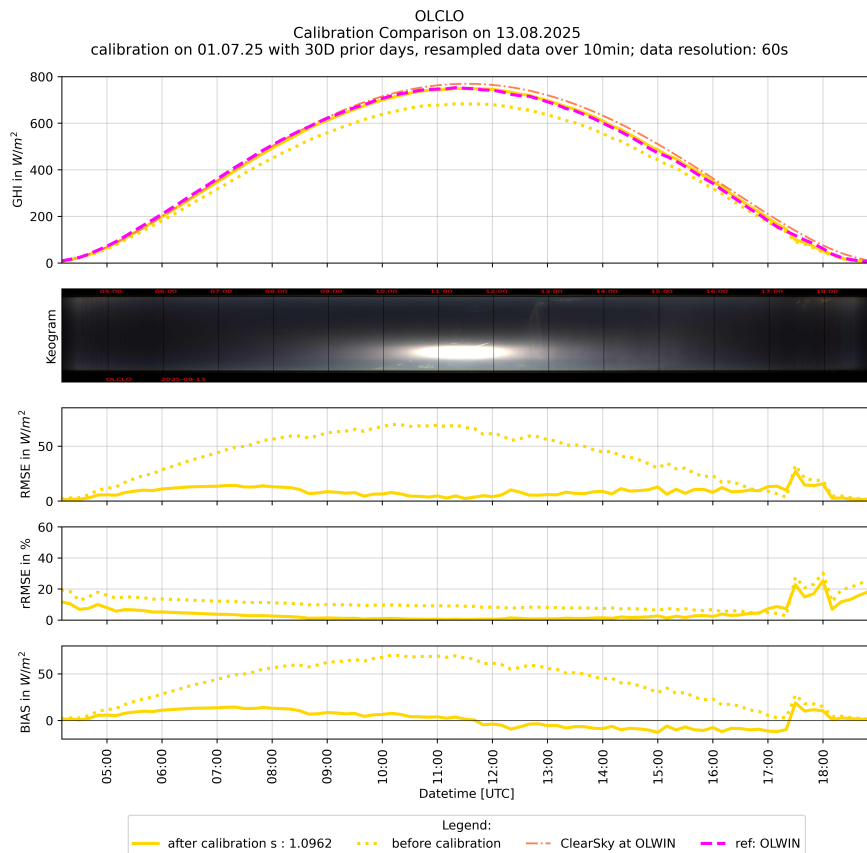


Abbildung 5.1: Tagesverlauf von OLCLO mit original und kalibrierten Messwerten vom 13.08.2025 sowie RMSE, rRMSE, BIAS und ein Keogram aus den ASI OLCLO Kamerabildern

Für eine Messstation mit geringerer Entfernung zu OLWIN lässt sich aus demselben Diagramm zum selben Tag – in Abbildung 5.2 exemplarisch für OLUOL dargestellt – bereits vor der Kalibrierung ein deutlich niedrigeres Niveau der Fehlermaße erkennen. Dennoch können auch diese Abweichungen durch eine Kalibrierung nach demselben Verfahren wie für die Station OLCLO weiter reduziert werden. Der RMSE der Station OLUOL kann auf diese Weise nahezu vollständig auf Null verringert werden.

Obwohl OLWIN und OLUOL räumlich direkt benachbart sind, zeigt sich beim rRMSE zu den Zeiten des Sonnenauf- und Sonnenuntergangs eine Abweichung. Im Vergleich zum "Rauschen" der Messsignale lässt sich dies einerseits auf die sehr geringe absolute Einstrahlung in diesen Zeitfenstern zurückführen. Andererseits kann dies auf die erhöhte

Fehleranfälligkeit von RSI Silizium Pyranometern bei flachen Einfallswinkeln (Kosinusfehler) zurückgeführt werden.

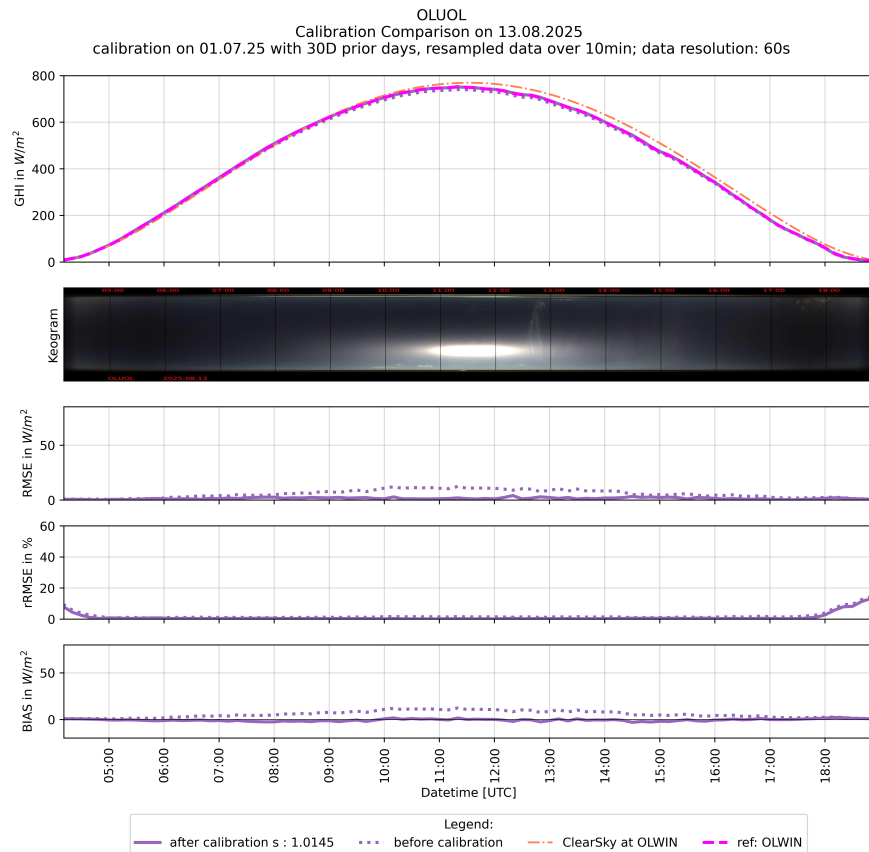


Abbildung 5.2: Tagesverlauf von OLUOL mit original und kalibrierten Messwerten vom 13.08.2025 sowie Referenzstrahlung OLWIN, Clear-Sky Strahlung, RMSE, rRMSE, BIAS und einem Keogram.

double penalty effect

Der *double penalty effect* bezeichnet ein systematisches Problem bei der Verifikation von Vorhersagemodellen. Dieses Phänomen tritt auf, wenn räumlich hochaufgelöste, explizite Vorhersagen mit Beobachtungsdaten verglichen werden und das Modell ein Wetterereignis – beispielsweise ein Gewitter, eine Regenfront oder ein Sturmtief – physikalisch korrekt simuliert, jedoch an einer räumlich leicht versetzten Position vorhersagt. In einem solchen Fall wird das Modell in der klassischen Ereignisstatistik doppelt benachteiligt. Zum einen an dem Ort, an dem das Ereignis in der Realität auftritt, von der Vorhersage jedoch als

Nicht-Ereignis klassifiziert wird (*false negative*), und zum anderen an dem Ort, an dem das Modell ein Ereignis vorhersagt, an dem in den Beobachtungen tatsächlich kein Ereignis auftritt (*false positive*). Beide Fehler gehen in herkömmliche Bewertungsmetriken wie den RMSE getrennt ein, sodass dasselbe meteorologische Ereignis faktisch zweimal negativ gewichtet wird. Modelle mit größerer räumlicher Auflösung oder ohne explizite Darstellung des betreffenden Features können unter Verwendung des RMSE daher scheinbar eine bessere Modellgüte aufweisen.[16]

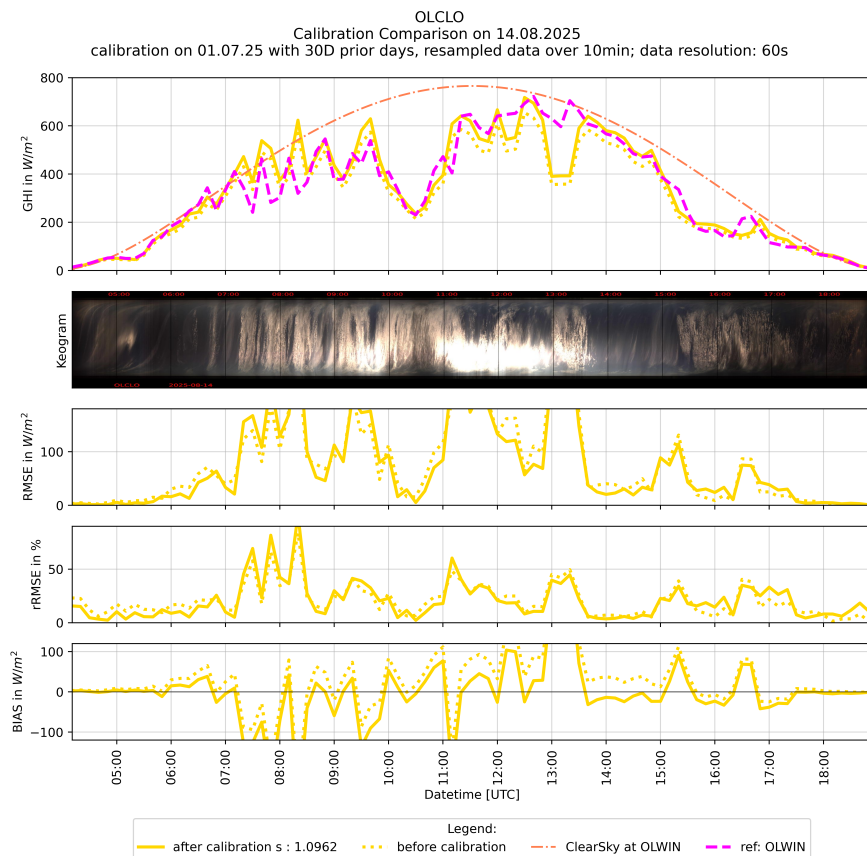


Abbildung 5.3: Tagesverlauf von OLCLO zu All-Sky Wetter mit original und kalibrierten Messwerten vom 14.08.2025 sowie Referenzstrahlung OLWIN, Clear-Sky Strahlung, RMSE, rRMSE, BIAS und einem Keogram.

Ein analoger Effekt zeigt sich beim Vergleich zeitlich hochaufgelöster Stationszeitreihen. Unter All-Sky-Wetterbedingungen führen sich verlagernde Wolkenfelder zu teils erheblichen instantanen Differenzen zwischen Vorhersage und Messung. Diese kurzzeitigen Abweichungen können sich jedoch in zeitlichen Mittelwerten – beispielsweise über einen Tag

oder längere Intervalle – teilweise kompensieren, da sich Phasen mit Abschattung und Phasen mit freier Einstrahlung mitteln. In Abbildung 5.3 sind der zeitliche Verlauf der Messgrößen sowie die zugehörigen Fehlermaße für einen typischen All-Sky-Tag detailliert mit 10 Minuten Mittelwerten dargestellt. Im Keogramm treten die diskontinuierlichen, über Oldenburg hinwegziehenden Wolkenstrukturen unmittelbar und deutlich hervor. In der oberen Darstellung sind die durch Bewölkung verursachten Einbrüche der Globalstrahlung klar und scharf erkennbar. Insbesondere an der wechselhaften Bewölkung am Vormittag verdeutlicht sich ein zeitlicher Versatz der Wolkenfelder von wenigen Minuten. Der RMSE erreicht in diesen Phasen Werte deutlich oberhalb von 100 W/m^2 . Am frühen Nachmittag zeigt sich zudem ein ausgeprägter Einbruch der Solarstrahlung in OLCLO, während zeitgleich an OLWIN weitgehend ungetrübte Strahlungsbedingungen vorliegen. An diesen Zeitpunkten wirkt sich der *double penalty effect* besonders stark aus. In Zeiträumen, in denen die Bewölkung an den beiden Standorten einander ähnelt, verringern sich die Fehlermetriken erwartungsgemäß. Zwischen 10:00 und 11:00 Uhr (UTC) tritt ein Zeitraum mit ausgeprägter Abschattung an beiden Messorten auf. Der RMSE, rRMSE sowie das BIAS sinken in dieser Phase deutlich auf ein niedrigeres Niveau. Im Gegensatz zu den übrigen Fehlermetriken kann das BIAS sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Situationen, in denen am Standort OLCLO eine höhere Einstrahlung gemessen wird, führen zu einem negativen BIAS, wohingegen Phasen mit höherer Einstrahlung am Standort OLWIN einen positiven BIAS verursachen.

Am Nachmittag, zwischen 13:30 und 15 Uhr (UTC), zeigt sich sowohl im Keogramm als auch in den Messdaten eine Auflockerung der Bewölkung, die sich in reduzierter Abschattung und entsprechend angepassten Fehlermaßen widerspiegelt. In diesem Zeitraum zeigt die Anpassung der Werte mit der Kalibrierung wieder eine Wirkung – der BIAS wird zu nahe Null reduziert. (Hinweis: Die Skalen der Fehler sind in Abbildung 5.1 und 5.3 unterschiedlich)

5.3 Variabilität der Sensitivität

Zur Qualitätskontrolle der berechneten Sensitivität (oder Kalibrierfaktor) sind in Abbildung 5.4 die einzelnen Sensitivitäten in Abhängigkeit von verschiedenen Größen exemplarisch für die Station OLCLO aufgetragen. Die farblichen Markierungen der Einträge richten sich dabei nach dem Zeitraum und sind in jedem Plot der Abbildung 5.6 identisch. Der obere linke Plot zeigt die instantanen Kalibrierfaktoren zwischen der Station

und OLWIN im zeitlichen Verlauf zu jedem Zeitstempel innerhalb der Datenfilterung, weshalb diese nur lückenhaft und in warmen Jahreszeiten berechnet wurden. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt die mittlere Sensitivität als Mittelwert aller Werte. Der obere rechte Plot zeigt die Einstrahlung in OLCLO zu der Referenzstrahlung OLWIN, dessen Verlauf unterhalb der Idealkurve liegt. Die Station misst eine zu geringe Strahlung und zeigt eine Abweichung von $\sim 10\%$ in allen Zeitpunkten des Kalibrierungsdatensatzes.

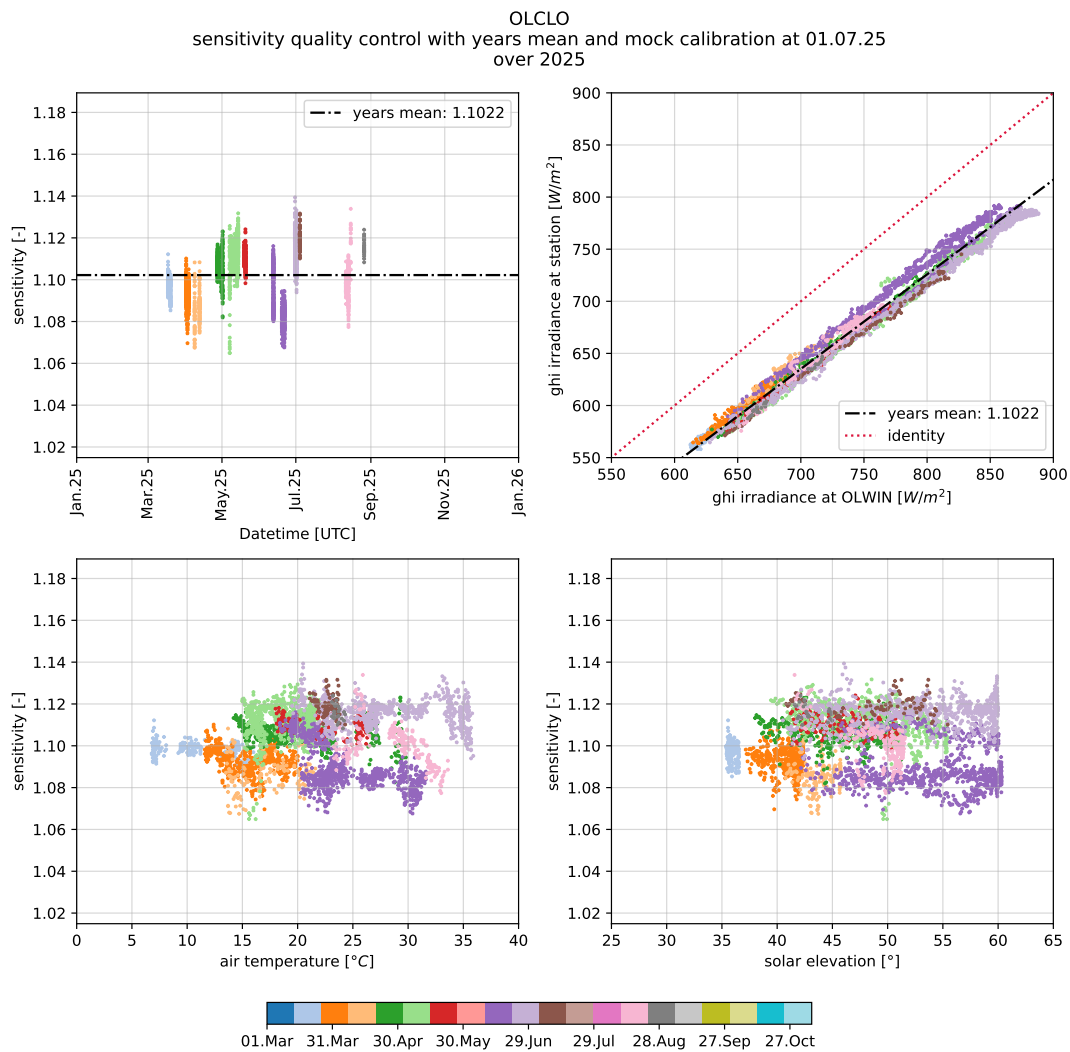


Abbildung 5.4: Kalibrierungsfaktor der Station OLCLO im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.

Die beiden unteren Plots stellen die berechnete Sensitivität in Abhängigkeit von der gemessenen Lufttemperatur sowie dem berechneten Sonnenstandswinkel α_s dar. Es ist deutlich erkennbar, dass eine Gruppierung der Messwerte innerhalb bestimmter Intervalle der Farbskala auftritt. Eine systematische Abhängigkeit der Sensitivität von der Lufttemperatur oder vom Sonnenstandswinkel lässt sich daraus jedoch nicht ableiten. Messfehler, die durch diese Umwelteinflüsse induziert sind, können somit weitgehend ausgeschlossen werden. Die beobachteten Gruppen sind vielmehr auf unterschiedliche Grade der Verschmutzung, *Sensordrift* oder auf variierende atmosphärische Zusammensetzungen an den jeweiligen Messtagen im Jahresverlauf zurückzuführen. Die Abhängigkeit der Silizium-Pyranometer vom Sonnenstandswinkel (Kosinusfehler, vgl. Kapitel 2.2.4; Silizium-Pyranometer, vgl. Kapitel 2.2.1) ist bekannt und wird bereits im Programm des Datenloggers berücksichtigt. Allerdings sind die Messwerte des Kalibrierungsdatensatzes ausschließlich von Zeitpunkten mit hohen Sonnenständen (vgl. Kapitel 4.2.1).

Bei der Station OLDON wurde im Mai 2025 die Pyranometereinheit des RSI ausgetauscht. Dieser Austausch manifestiert sich deutlich in einem sprunghaften Wechsel der ermittelten Sensitivitäten. Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse der Qualitätskontrolle für OLDON. Im oberen rechten Plot ist zunächst ein deutlicher Rückgang der Sensitivität zu erkennen, gefolgt von einem ausgeprägten erneuten Anstieg. Bereits nach wenigen Monaten erreicht die Abweichung wieder das Niveau des zuvor verwendeten Sensors. Dieses Verhalten lässt sich vermutlich auf *soiling*-Effekte oder auf eine ausgeprägte Veränderung der Sensorempfindlichkeit während der frühen Phase des Feldeinsatzes zurückführen. Infolgedessen ist die Streuung der Einstrahlungswerte, die in dem oberen rechten Plot dargestellt sind, in Bezug auf die Änderungen der Sensitivität deutlich erhöht. Eine Kalibrierung des Sensors unter Verwendung von Datensätzen unterschiedlicher Pyranometereinheiten ist daher nicht zielführend. Zudem lässt sich daraus ableiten, dass der Sensor bereits über einen Zeitraum von mehreren Monaten im Feld betrieben worden sein sollte, bevor eine belastbare Bestimmung des Kalibrierfaktors durchgeführt werden kann.

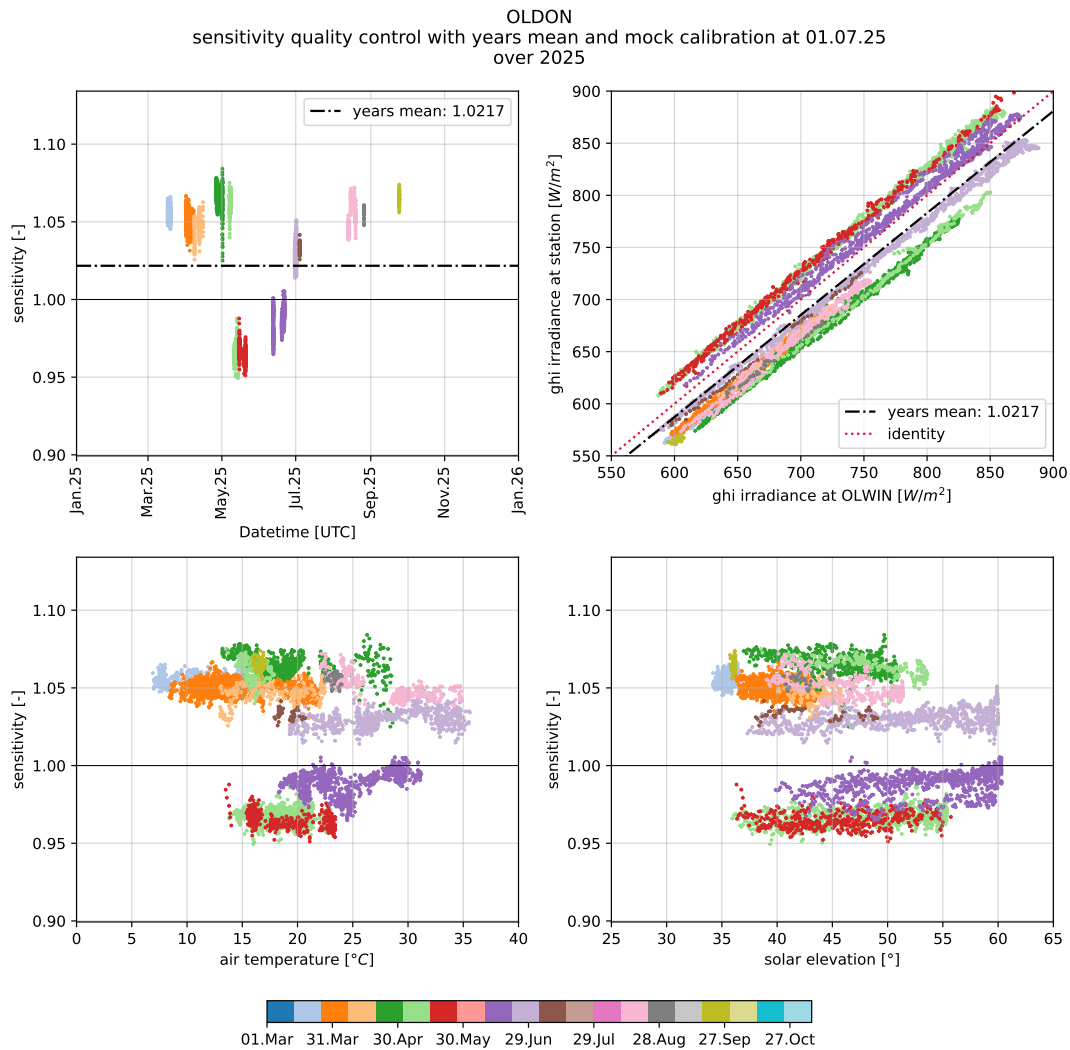


Abbildung 5.5: Kalibrierungsfaktor der Station OLDON im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.

Die unteren beiden Darstellungen in Abbildung 5.5 erlauben erneut keine belastbaren Rückschlüsse auf eine Abhängigkeit der Sensitivität von der Lufttemperatur oder vom Sonnenstandswinkel. Stattdessen ist eine Gruppierung der Daten nach Tagen deutlich ausgeprägter als in Abbildung 5.4 zu erkennen.

5.4 Stationsvergleich

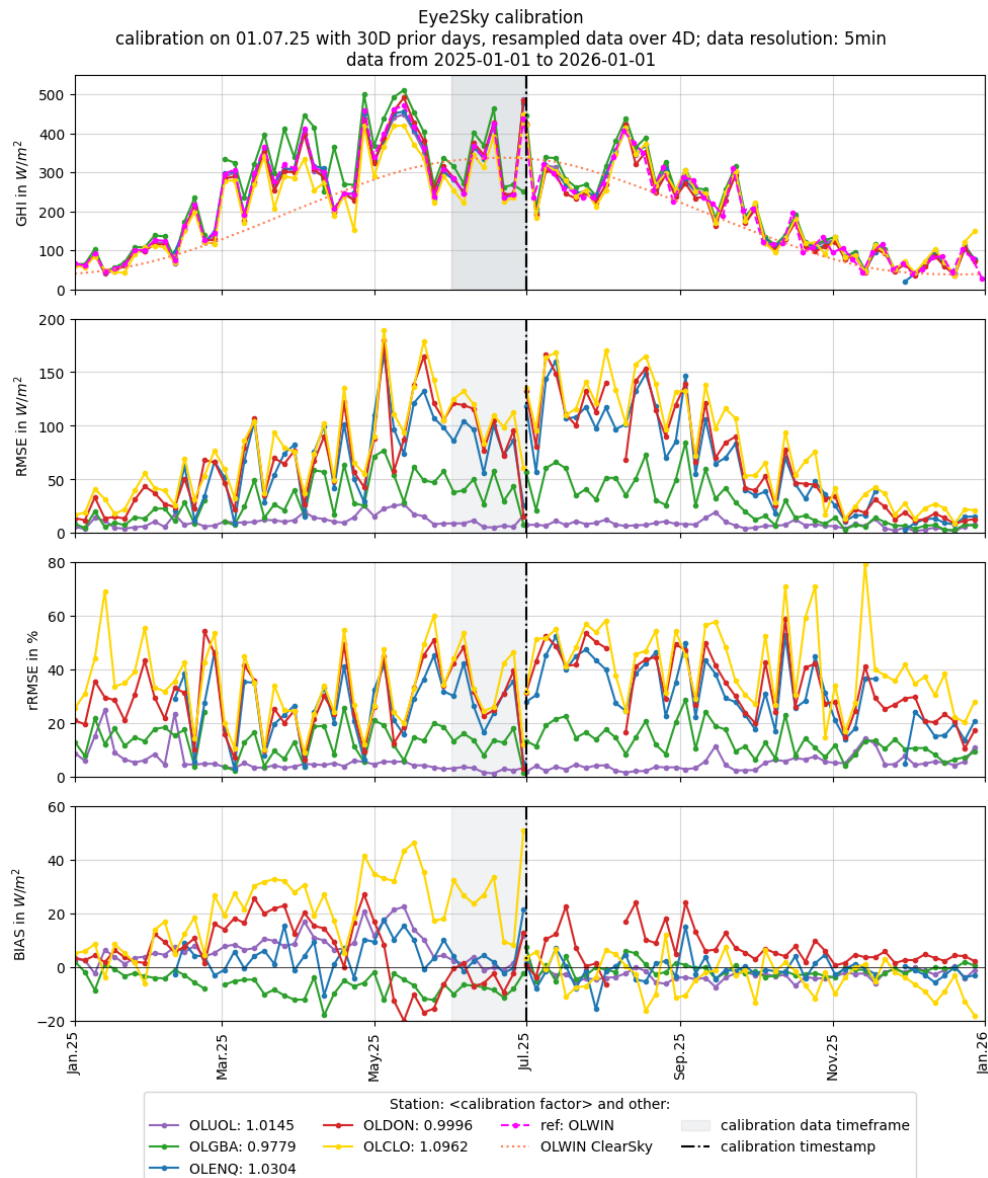


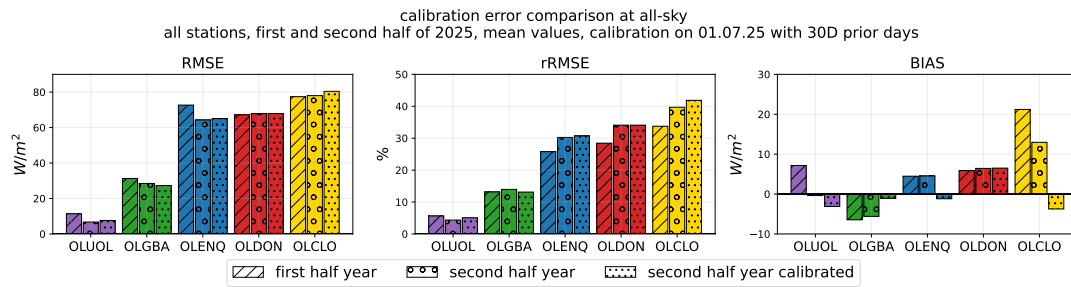
Abbildung 5.6: Jahresverlauf 2025 der Stationen im Vergleich mit der Kalibrierung im Juli (vertikal gestrichelte Linie). Messwerte nach dem 01. Juli sind mit dem jeweiligen Kalibrierungsfaktor angepasst; oben: GHI-Messwerte sowie Clear-Sky-Strahlung bei OLWIN; unten: Fehlermetriken. Legende: Stationsname mit ermitteltem Kalibrierungsfaktor.

Abbildung 5.6 zeigt den Jahresverlauf der GHI-Messwerte für die Oldenburger meteorologischen Stationen sowie die daraus abgeleiteten Fehlerkennwerte auf Basis der 4-Tages-Mittelwerte. Im oberen Diagramm sind zusätzlich die gemessene Globalstrahlung und die errechnete Clear-Sky-Globalstrahlung am Standort OLWIN dargestellt. Wie in Kapitel 4.3 erläutert, ist in den Sommermonaten eine im Vergleich zum Clear-Sky-Potenzial reduzierte Einstrahlung zu erkennen. Die darunterliegenden Diagramme zeigen bis zur schwarzen vertikalen Linie die Verläufe von RMSE, rRMSE und BIAS für die unkalibrierten Messwerte. Die darauf folgenden Zeitreihenabschnitte repräsentieren die durch eine Kalibrierung korrigierten Messungen. Die Kalibrierung wurde am 01.07.2025 durchgeführt. Hierzu wurden Messdaten, die innerhalb der in Kapitel 4.2 definierten Masken liegen, über einen Zeitraum von 30 Tagen vor dem Kalibrierzeitpunkt herangezogen. Die jeweiligen daraus bestimmten Kalibrierfaktoren sind dem Stationsnamen in der Legende zugeordnet. Vor der Berechnung der 4-Tages-Mittelwerte wurde die zeitliche Auflösung der ursprünglich 60s Mittelwerte auf 5-minütige Mittelwerte aggregiert, um Effekte des *double penalty effect* zu verringern.

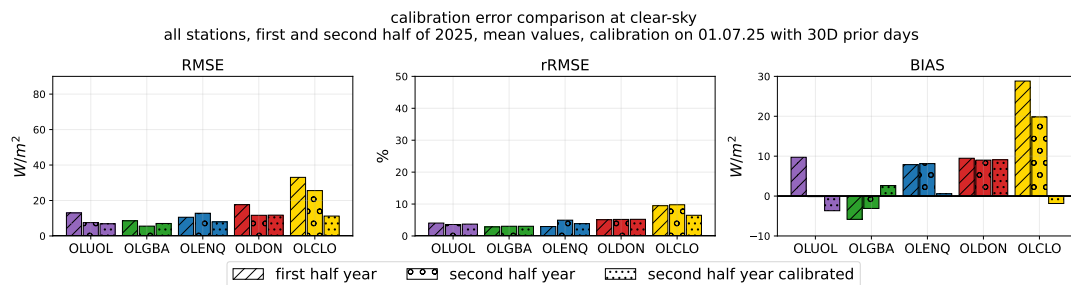
Die Verläufe von RMSE und rRMSE zeigen für alle Stationen im Vergleich zu den unkalibrierten Zeitreihen nur geringfügige Änderungen, wohingegen für den BIAS eine deutliche Reduktion festzustellen ist. Besonders für die Station OLCLO (gelbe Linie) ist eine ausgeprägte Verringerung des BIAS erkennbar. Im Dezember 2025 wurde an OLCLO die seit Oktober 2020 betriebene Pyranometer-Einheit des RSI ausgetauscht, was zu einer erneuten negativen Vergrößerung des BIAS nach dem Austausch führt.

Hervorzuheben sind zudem die Stationen OLUOL in unmittelbarer Entfernung sowie OLGBA und OLENQ in mittlerer Entfernung zur Referenz OLWIN. Aufgrund ihrer geringen Distanz zur Referenzstation weisen diese Stationen im RMSE und rRMSE niedrigere Fehlerwerte auf als die übrigen Stationen. Dieser Trend setzt sich auch nach der Kalibrierung fort.

Die Pyranometer-Einheit der Station OLDON (rote Kurve) wurde im Mai 2025 gewechselt (siehe Tabelle 3.2), was sich in einem markanten Einbruch des BIAS im entsprechenden Zeitraum widerspiegelt. Anschließend steigt der BIAS jedoch innerhalb kurzer Zeit wieder an. Der Zeitraum der Kalibrierung (grau hinterlegter Bereich) fällt somit in die frühe Betriebsphase des neu installierten Sensors. Bereits nach wenigen Monaten weist diese Station erneut einen erhöhten BIAS gegenüber der Referenz auf, ähnlich den Abweichungen vor dem Sensorwechsel.



(a) unter All-Sky Wetter (alle verfügbaren Datenpunkte)



(b) unter Clear-Sky Wetter (ausschließlich zu Datenpunkten innerhalb vom Filter vgl. 4.2.2)

Abbildung 5.7: RMSE, rRMSE und BIAS für das erste und zweite Halbjahr 2025 sowie zweites Halbjahr mit kalibrierten Stationen

Darstellungen a und b aus 5.7 zeigen die eingeführten Fehlermetriken als Mittelwert über das erste bzw. zweite Halbjahr 2025. Wie zuvor wurde zum Stichtag 01.07.2025 eine Kalibrierung der Stationen durchgeführt, wobei Datenpunkte der vorangegangenen 30 Tage verwendet und die resultierenden Kalibrierparameter anschließend auf die Messwerte des zweiten Halbjahres angewandt wurden. Diese kalibrierten Werte sind in den Abbildungen als dritter Balken je Station dargestellt. In Abbildung 5.7a werden erneut die Auswirkungen des *double penalty effects* sichtbar. Die Entfernung der Stationen zu OLWIN sowie RMSE und rRMSE nimmt dabei von links nach rechts zu. Die hier ablesbaren Veränderungen der Fehlermetriken stützen die in Abbildung 5.6 gewonnenen Erkenntnisse, dass RMSE und rRMSE vor und nach der Kalibrierung auf einem vergleichbar hohen Niveau verbleiben, wohingegen sich beim BIAS eine Verbesserung feststellen lässt.

Vergleicht man den Balken des zweiten Halbjahres (jeweils mittlerer Balken) mit dem Balken der kalibrierten Werte desselben Halbjahres (jeweils rechter Balken), so ist beim BIAS ausschließlich für OLUOL eine Verschlechterung und für OLDON keine Veränderung zu beobachten. Für die übrigen Stationen kann der BIAS hingegen mehr als halbiert

werden. Zu den möglichen Ursachen für ein anderes Verhalten der Stationen OLUOL und OLDON wird im darauffolgenden Kapitel Bezug genommen.

In der unteren Abbildung wird der Einfluss überziehender Wolken durch eine Filterung auf Clear-Sky-Situationen mithilfe des in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Verfahrens ausgeschlossen. Unter dieser Randbedingung zeigen sich nun auch für RMSE und rRMSE merkliche Reduktionen. Die Balken des BIAS weisen hingegen größere Beträge auf, da sich negative und positive Abweichungen nicht mehr in vergleichbarem Maße gegenseitig kompensieren.

5.5 Zeiträume für die Kalibrierung

Für den operationellen Betrieb stellt sich die Frage, welche Zeiträume für eine Kalibrierung erforderlich sind und inwieweit die Wahl des Kalibrierungszeitraumes die Qualität der Kalibrierung beeinflusst. Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 zeigen die unterschiedlichen Kalibrierungsfaktoren der Stationen für verschiedene Kalibrierungszeiträume.

In Abbildung 5.8 sind mit der schwarzen Linie die ungefilterten Messwerte der Station OLGBA sowie die zugehörigen Fehlermaße im Jahresverlauf dargestellt. Zum Zeitpunkt der vertikal gestrichelten Linie, dem 01.07.2025, wird erneut eine Kalibrierung unter Verwendung verschiedener Zeitfenster vorgenommen. Die farbigen Linien nach dem 01.07. repräsentieren die entsprechend angepassten Stationsmesswerte sowie die daraus resultierenden modifizierten Fehlermaße. Für RMSE und rRMSE ergeben sich nahezu identische Kurvenverläufe, die weitgehend unabhängig vom jeweils gewählten Kalibrierungszeitraum sind. Die meisten Kurven liegen nahezu vollständig übereinander. Beim BIAS ist jedoch eine deutliche Reduktion zu beobachten. Obwohl die jeweiligen BIAS-Kurven nicht exakt deckungsgleich sind, sind die Abweichungen als vernachlässigbar einzustufen. Für die Station OLGBA ist die Wahl des verwendeten Kalibrierungszeitraumes folglich von untergeordneter Bedeutung. Der Sensor zeigt über alle im Kalibrierdatensatz enthaltenen Zeitabschnitte hinweg ein weitgehend stabiles Abweichungsverhalten.

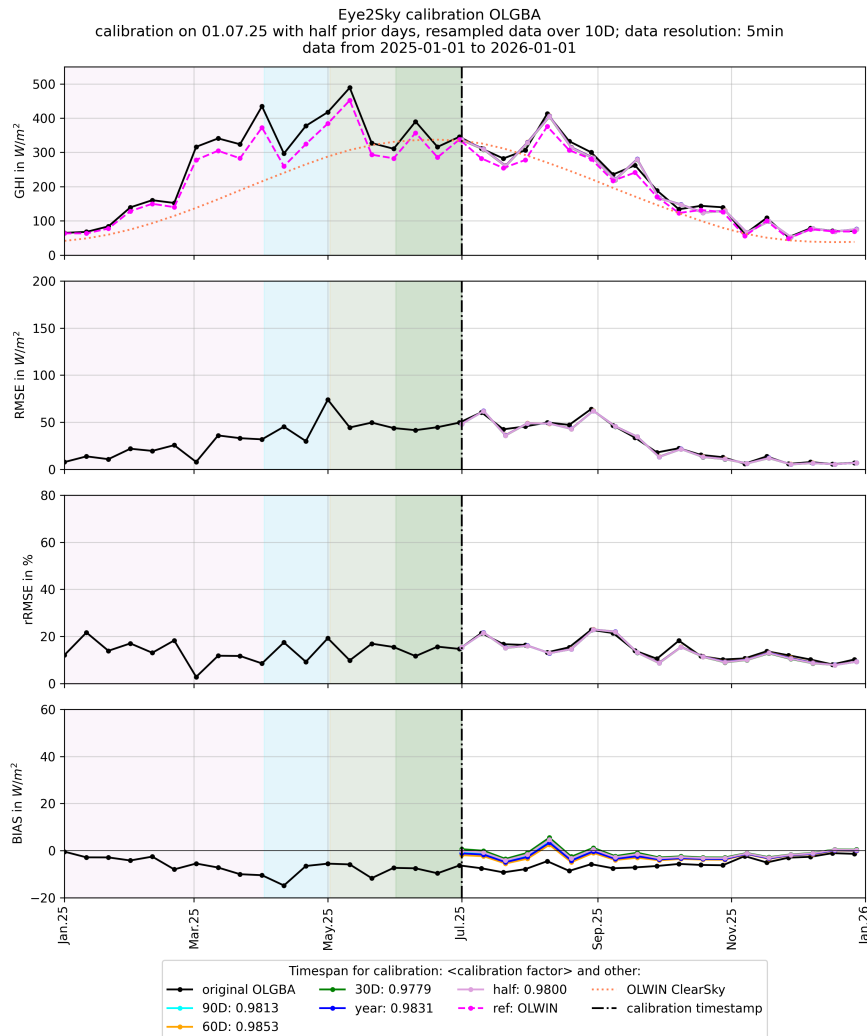


Abbildung 5.8: Jahresverlauf der Mess- und Fehlerwerte für die Station OLGBA im Jahr 2025. Vergleich ungefilterter (unkalibrierter) mit kalibrierten Werten unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungszeiträume.

Dieses Verhalten lässt sich auf die übrigen Oldenburger Stationen mit Ausnahme von OLUOL und OLDON übertragen. Für OLDON ergeben sich in den BIAS-Kurven unterschiedliche Grade der Reduktion, die auf die bereits beschriebenen Wechsel der Pyranometer -Einheit zurückzuführen sind. Die Verläufe von RMSE und rRMSE sind für die unterschiedlichen Zeiträume hingegen nahezu identisch und stimmen weitgehend mit den Zeiträumen der unkalibrierten Werte überein. Abbildung C.19 im Anhang C.4 illustriert die beschriebenen Verläufe. Im selbigen Anhang sind zudem die entsprechenden Darstel-

lungen für alle kalibrierten Oldenburger Stationen enthalten. Die Messstation OLUOL weist in der ersten Jahreshälfte in den ursprünglichen Datensätzen einen erhöhten BIAS im Vergleich zur zweiten Jahreshälfte auf. Dies ist insbesondere in den Darstellungen C.16 und 5.7 am Verlauf des BIAS und dem jeweils linken Balken ersichtlich. Unter All-Sky-Bedingungen berechnete BIAS-Werte liegen im ersten Halbjahr im Mittel bei über 5 W/m^2 , wohingegen das zweite Halbjahr einen, in der Darstellung kaum erkennbaren, sehr geringen BIAS aufweist. Nach Anwendung des Korrekturfaktors vergrößert sich dieser BIAS zusätzlich. Folglich sind alle Korrekturfaktoren, die aus Zeiträumen vor dem 01.07. abgeleitet wurden, nur eingeschränkt auf das zweite Halbjahr übertragbar. Unter den untersuchten Kalibrierungszeiträumen liefert die Korrektur mit einem Fenster von 30 Tagen die zuverlässigsten Ergebnisse, da der im Juni beobachtete BIAS dem im zweiten Halbjahr beobachteten BIAS am ähnlichsten ist. Aus dem Logbuch sowie einer Auswertung, die den Zeitraum der letzten Reinigung als Faktor berücksichtigt, lassen sich keine direkten Schlüsse auf den Grund dieses unterschiedlichen Verhaltens von OLUOL im ersten zum zweiten Halbjahr ziehen. D

6 Fazit und Ausblick

Das im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelte Verfahren zur Kalibrierung von Sonnenstrahlungs Messinstrumenten in einem verteilten Messnetz ohne physische Eingriffe an den Sensoren erweist sich als geeignete Methode zur Reduktion von Messabweichungen infolge von *Sensordrift*, *textitsoiling* oder anderen Einflüssen. Die Auswahl geeigneter Zeitstempel für die Kalibrierung sowie die detaillierte Analyse der an einer Messstation auftretenden Ereignisse sind dabei von zentraler Bedeutung.

Die Methode weist insbesondere für die Messstation OLCLO eine ausgeprägte Wirksamkeit auf. Diese Station ist seit 2020 in Betrieb und wurde vor der am 01. Juli 2025 durchgeführten virtuellen Kalibrierung über mehrere Jahre hinweg nur unzureichend gereinigt. Der erhöhte BIAS, welcher wahrscheinlich durch eine veränderte Sensorempfindlichkeit bzw. durch Verschmutzung bedingt ist, konnte durch die Anwendung der Fernkalibrierung effektiv minimiert werden. Dabei erweist sich die konkrete Wahl des Kalibrierungszeitraums als von untergeordneter Bedeutung. Für die betrachteten Stationen lässt sich folgern, dass sowohl die Dauer des kontinuierlichen Betriebs als auch die Konsistenz der Installationsbedingungen (keine Änderungen in Ausrichtung, Sensorbestückung, etc.) von zentraler Relevanz für eine erfolgreiche Kalibrierung sind.

Die Beurteilung der ermittelten Abweichungen ist nicht abschließend möglich. Sie können sowohl auf Veränderungen der Sensorempfindlichkeit, auf *soiling* oder auf noch andere Effekte zurückzuführen sein. Trotz sorgfältiger Auswahl des Kalibrierungsdatensatzes können entfernungsbedingte Messfehler auftreten. Die Ergebnisse in Abbildung 5.7b zeigen, dass die Fehler mit der Entfernung zunehmen. Dennoch sind bei OLUOL trotz geringerer Entfernung RMSE und BIAS höher als bei dem weiter entfernten OLGBA. Dies ist für den praktischen Betrieb des Messnetzes jedoch von geringer Relevanz, da bereits die Angleichung der Messwerte unter Clear-Sky-Bedingungen im Oldenburger Stadtgebiet auf ein einheitlicheres Niveau zu einer erheblichen Verbesserung der Datenqualität des Messnetzes führt. Weder die Festlegung kürzerer Wartungs- und Reinigungsintervalle noch

die Demontage der Sensoren zu Kalibrierzwecken stellen zum aktuellen Zeitpunkt eine praktikable Maßnahme zur Kompensation der beobachteten Messabweichungen dar.

Die Abweichungen von OLDON sind gut mit dem Wechsel der Sensoren zu begründen, wohingegen die Station OLUOL keine klaren Schlüsse zu den unterschiedlichen Sensorverhalten im ersten und zweiten Halbjahr zulässt. Dies gilt es in weiteren Arbeiten zu untersuchen. Mögliche Erklärungen für abweichende Messungen trotz wöchentlicher Reinigung und geringster Entfernung könnte die Ausrichtung des Sensors (nicht ideal horizontal) sein.

Die im Rahmen des vorliegenden Verfahrens gewonnenen Erkenntnisse über die Sensitivität der Pyranometer werden bislang ausschließlich zur Korrektur der Messwerte der globalen Einstrahlung herangezogen. Im Datenlogger-Programm der RSI werden darüber hinaus komplexe Korrekturen und Berechnungen zur Umwandlung der Messgrößen in DNI und DHI durchgeführt. Die Auswirkungen der beschriebenen Kalibrierung auf Fehler und Abweichungen der Messungen von Direkt- und Diffusstrahlung konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

Die internen Berechnungen der RSIs basieren für alle Komponenten der Sonnenstrahlung auf den Messwerten desselben physikalischen Sensors. Unter der Annahme, dass der ermittelte Korrekturfaktor in gleichem Maße auf die Abweichung während der Rotation des *Schattenbands* anwendbar ist, könnte somit auch die DHI und DNI Messung verbessert werden. Dies sollte in weiterführenden Analysen detailliert untersucht werden und ist insbesondere für den operationellen Betrieb des verteilten Messnetzes zur Evaluation solarer Ressourcen von großem Interesse. Die Amplitude der DNI wird in besonderem Maße durch Verschattungseffekte beeinflusst, was in zukünftigen Untersuchungen zusätzlich berücksichtigt werden muss. Die Auswahl des Kalibrierungsdatensatzes muss noch restriktiver erfolgen. Bereits hochliegende Cirruswolken oder geringe Verschmutzung des Referenz- und Testsensors können starken Einfluss auf die Ergebnisse nehmen.

Eine Möglichkeit zur Minimierung von *soiling* auf den Sensoren stellt das von VE entwickelte MEDUSA-System dar. Dieses wurde als früher Prototyp an den ASI-Kameras der Standorte OLMED und OLENQ installiert (siehe Abbildung 3.3b). Im Rahmen des Hauptpraktikums bei VE konnte ich eine weiterentwickelte Version dieses Systems konzipieren und anschaffen, die jedoch bis zum Abschluss dieser Bachelorarbeit noch nicht unter Feldbedingungen erprobt werden konnte.

Die Auswertung der ersten Prototypenversuche auf ASIs weist jedoch darauf hin, dass sich gegenüber ASIs ohne Reinigung ein nennenswerter Nutzen erzielen lässt.

Literaturverzeichnis

- [1] : *Analyse: Die Schlüsselrolle von Flexibilität im Stromsystem 2030 - Nutzenanalyse und kritische Flex-Technologien* | Ariadne. – URL <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-die-schlüsselrolle-von-flexibilitat-im-stromsystem-2030/>. – Zugriffsdatum: 2026-04-13
- [2] : *Anteil erneuerbarer Energien* | Energy-Charts. – URL https://www.energy-charts.info/charts/renewable_share/chart.html?l=de&c=DE&interval=year&share=ren_share_total. – Zugriffsdatum: 2026-03-21
- [3] : *Ariadne kompakt: Transformation der Industrie als Schlüssel für die Klimaneutralität* | Ariadne. – URL <https://ariadneprojekt.de/publikation/ariadne-kompakt-transformation-der-industrie/>. – Zugriffsdatum: 2026-04-13
- [4] : *ISO 9060: Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation.* – URL <https://www.iso.org/standard/67464.html>. – Zugriffsdatum: 2026-04-02
- [5] *ISO 9846: Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrliometer.* – URL <https://www.iso.org/standard/84176.html>. – Zugriffsdatum: 2026-03-16. – ISO Norm
- [6] : *LI-COR Environmental.* – URL <https://www.licor.com/products/light/pyranometer?category=Meteorology>. – Zugriffsdatum: 2026-04-02
- [7] *Rotating Shadowband Irradiometer CSPS Twin-RSI.* . – URL <https://www.cspservices.de/wp-content/uploads/CSPS-RSI.pdf>. – Zugriffsdatum: 2026-03-23
- [8] : *Wolkenkamera-Netzwerk Eye2Sky.* – URL https://www.dlr.de/de/ve/forschung-und-transfer/infrastruktur/labore_infrastrukturen/eye2sky. – Zugriffsdatum: 2026-03-21

-
- [9] : *The Working Principle of a Thermopile Pyranometer - Kipp & Zonen*. – URL <https://www.kippzonen.com/News/572/The-Working-Principle-of-a-Thermopile-Pyranometer>. – Zugriffsdatum: 2026-04-01
- [10] AL-MESSABI, Najj ; GOH, Cindy ; LI, Yun: Heuristic grey-box modelling for photovoltaic power systems. 4, Nr. 1, S. 235–246. – URL <https://doi.org/10.1080/21642583.2016.1228485>. – Zugriffsdatum: 2026-04-13. – Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/21642583.2016.1228485>. – ISSN null
- [11] BIGGS, William W.: *Principles of Radiation Measurement*. – URL https://www.licor.cn/uploads/20251128/Sensors_Principles_of_Radiation_Measurement.pdf.pdf. – Zugriffsdatum: 2026-03-23
- [12] DWD: *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar*. – URL https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html. – Zugriffsdatum: 2026-04-10
- [13] F. HOLMGREN, William ; W. HANSEN, Clifford ; A. MIKOFSKI, Mark: pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. 3, Nr. 29, S. 884. – URL <http://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00884>. – Zugriffsdatum: 2026-03-22. – ISSN 2475-9066
- [14] FABIAN HUNEKE ; MIRA WENZEL ; PHILIPP GODRON ; ANNA KRAUS ; KATHARINA HARTZ: *Effiziente Energiewende. Vier Hebel für Resilienz und Klimaschutz*. – URL https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2025/2025-15_DE_Monitoring_Energiewende/A-EW_Effiziente_Energiewende_WEB.pdf. – Zugriffsdatum: 2026-03-25
- [15] INEICHEN, Pierre ; PEREZ, Richard: A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. 73, Nr. 3, S. 151–157. – URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X02000452>. – Zugriffsdatum: 2026-03-22. – ISSN 0038-092X
- [16] JEPPESEN, Joanne: *Verifying high-resolution forecasts*. – URL <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/science-blog/2023/verifying-high-resolution-forecasts>. – Zugriffsdatum: 2026-04-10
- [17] KAUR, Amanpreet ; NONNENMACHER, Lukas ; PEDRO, Hugo T. ; COIMBRA, Carlos F.: Benefits of solar forecasting for energy imbalance markets. 86, S. 819–830. –

- URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115302901>. – Zugriffsdatum: 2026-03-03. – ISSN 09601481
- [18] LEFÈVRE, M. ; OUMBE, A. ; BLANC, P. ; ESPINAR, B. ; GSCHWIND, B. ; QU, Z. ; WALD, L. ; SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, M. ; HOYER-KLICK, C. ; AROLA, A. ; BENEDETTI, A. ; KAISER, J. W. ; MORCLETTE, J.-J.: McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. 6, Nr. 9, S. 2403–2418. – URL <https://amt.copernicus.org/articles/6/2403/2013/>
- [19] NOTTON, Gilles ; NIVET, Marie-Laure ; VOYANT, Cyril ; PAOLI, Christophe ; DARRAS, Christophe ; MOTTE, Fabrice ; FOUILLOY, Alexis: Intermittent and stochastic character of renewable energy sources: Consequences, cost of intermittence and benefit of forecasting. 87, S. 96–105. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118300327>. – Zugriffsdatum: 2026-03-02. – ISSN 13640321
- [20] RENO, Matthew J. ; HANSEN, Clifford W.: Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements. 90, S. 520–531. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115305358>. – Zugriffsdatum: 2026-03-27. – ISSN 09601481
- [21] ROHDE, Robert: *Atmospheric Transmission*. – URL https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission-en.svg. – Zugriffsdatum: 2026-03-26
- [22] SCHMIDT, Thomas ; STÜHRENBERG, Jonas ; BLUM, Niklas ; LEZACA, Jorge ; HAMMER, Annette ; WILBERT, Stefan ; NOURI, Bijan ; SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, Marion ; HEINEMANN, Detlev ; VOGT, Thomas: Eye2Sky – a network of all-sky imager and meteorological measurement stations for high resolution nowcasting of solar irradiance. 34, Nr. 1, S. 35–55. – URL https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/34/106743/Eye2Sky__a_network_of_all_sky_imager_and_meteorolo?af=crossref. – Zugriffsdatum: 2026-02-03. – ISSN 0941-2948
- [23] SENGUPTA, Manajit ; HABTE, Aron ; WILBERT, Stefan ; GUEYMARD, Christian ; REMUND, Jan ; LORENZ, Elke ; VAN SARK, Wilfried ; JENSEN, Adam: *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy*

- Applications: Fourth Edition.* – URL <https://www.osti.gov/servlets/purl/2448063/>. – Zugriffsdatum: 2026-04-01
- [24] STEFAN WILBERT ; GEUDER, Norbert ; KRAAS, B.: *Best Practices for Solar Irradiance Measurements with Rotating Shadowband Irradiometers.* – URL https://elib.dlr.de/198919/1/RSI_BestPractices_v2.pdf. – Zugriffsdatum: 2026-03-21
- [25] STEPHENS, Chod: *Measuring the Sun More Accurately and Simply.* – URL <https://www.campbellsci.com.au/blog/measuring-sun-accurately-simply>. – Zugriffsdatum: 2026-03-16. – Silicon Pyranometer Problems, Spectral Response LI-200
- [26] TOLUN, Gülizar-Gizem ; KAPLAN, Yusuf-Alper: DEVELOPMENT OF BACKPROPAGATION ALGORITHM FOR ESTIMATING SOLAR RADIATION: A CASE STUDY IN TURKEY. 68, Nr. 3, S. 313–316. – URL <https://journal.iem.pub.ro/rrst-ee/article/view/193>. – Zugriffsdatum: 2026-04-13. – ISSN 0035-4066

Glossar

<i>Nowcasting</i>	Kurzfristige Wettervorhersage mit einem zeitlichen Horizont von wenigen Minuten bis Stunden. .
Keogramm	Ein Keogramm ist ein zusammengesetztes Bild, das aus den mittleren Bildstreifen einer Reihe von ASI-Aufnahmen über die Zeit entsteht und so die zeitliche Entwicklung von Himmels- oder Atmosphärenscheinungen anschaulich darstellt..
Solar-Tracker	Gerät um Sensoren der Sonne nachzuführen. Die Position der Sonne wird durch γ_n und α_s beschrieben.
WobaS	Vom DLR SF entwickelter Algorithmus für <i>Nowcasting</i> von Solarstrahlung unter Verwendung von ASI Kameras..

A Anhang: Tabellen

#	Station ID	Place	Domain	Type	Latitude [°N]	Longitude [°E]	Altitude (MASL)	Height above ground [m]	Installation date
1	OLWIN, OLUOL	Oldenburg	Suburban	REF, MET	53.15348	8.16192	21	15	25 June 2019
2	OLDLR, CDLRA	Oldenburg	Urban	MET, CEI	53.15137	8.16701	21	9	3 April 2018
3	OLCLO	Oldenburg	Urban	MET	53.11200	8.21004	22	14	9 Nov. 2018
4	OLDON	Oldenburg	Urban	MET	53.14637	8.21733	28	20	26 Sept. 2018
5	PVAMM	Metjendorf	Urban	MET	53.18160	8.14560	11	2	15 Okt. 2019
6	OLTWE	Oldenburg	Urban	ASI	53.11502	8.26172	16	7	14 Sept. 2021
7	OLEMS	Oldenburg	Urban	ASI	53.13021	8.15472	20	12	10 Dez. 2019
8	OLBFE	Oldenburg	Urban	ASI	53.14921	8.23201	22	14	3 Febr. 2020
9	OLETZ	Oldenburg	Urban	ASI	53.18670	8.22108	25	4	16 Sept. 2020
10	OLMAR	Oldenburg	Urban	ASI	53.13918	8.21504	30	16	9 Nov. 2018
11	OLHOL	Oldenburg	Suburban	ASI	53.13873	8.24786	16	10	17 Dez. 2018
12	OLFLE	Oldenburg	Urban	ASI	53.14861	8.19747	23	15	26 Nov. 2018
13	OLTIR	Oldenburg	Urban	ASI	53.13892	8.19640	39	30	26 Okt. 2018
14	ESREF	Esterwegen	Rural	REF, ASI	53.01063	7.58575	8	2	3 April 2019
15	WITTM	Wittmund	Suburban	MET	53.57694	7.76241	8	5	10 Feb. 2022
16	WESTE, CDLRB	Westerstede	Suburban	MET, CEI	53.25335	7.92658	19	10	2 Dez. 2020
17	LEEER	Leer	Rural	MET	53.22173	7.44668	17	12	21 Aug. 2019
18	PVNOR	Norden	Rural	MET	53.57749	7.23156	2	2	11 July 2019
19	OLJET	Friedrichsfehn	Suburban	MET	53.12040	8.09583	17	4	10 July 2019
20	BAZWI	Bad Zwischenahn	Rural	ASI	53.17959	7.99990	20	10	11 Sept. 2020
21	PAPEN	Papenburg	Rural	ASI	53.09513	7.35701	87	77	16 Nov. 2021
22	EMSTE	Emstek	Rural	ASI	52.81489	8.19291	74	20	16 Jan. 2020
23	PVRAS	Rastede	Rural	ASI	53.29334	8.17172	19	3	12 Mar. 2021
24	BARSE	BarSSEL	Rural	ASI	53.16337	7.75002	10	6	25 Okt. 2019
25	ESENS	Esens	Rural	ASI	53.64210	7.60411	12	5	2 Aug. 2019
26	SOEGE	Soegel	Suburban	ASI	52.84727	7.52025	55	10	4 Nov. 2019
27	DOERP	Doerpen	Rural	ASI	52.96002	7.34255	15	6	10 Dez. 2019
28	VAREL	Varel	Suburban	ASI	53.40032	8.11957	10	5	2 Aug. 2019
29	AURIC	Aurich	Rural	ASI	53.47473	7.47082	11	5	9 Dez. 2019

Tabelle A.1: Tabelle 1 aus [22] mit allen aktiven Stationen im Eye2Sky Netzwerk, Stationen im Forschungswindpark WiValDi sind nicht aufgelistet, Stand Mai 2025

	Type	ASI	GHI	DHI	DNI	GTI	Temp	rel Humidity	Pressure	Rain	Wind speed	Wind direction
OLWIN	Tracker station		EKO MS-80	EKO MS-80	EKO MS-56		CS215	CS215		Thies Clima Rain Gauge		
ESREF	Tracker Station	Mobotix Q25	K&Z CMP-21	K&Z CMP-21	K&Z CMP-21	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215	Vaisala PTB110		Th. Friedr. 4310 Ultrasonic 10m	Th. Friedr. 4310 Ultrasonic 10m
PVAMM	PV plant monitoring	Mobotix Q25	EKO MS-80			EKO-MS80 30°/187° *	Lufft WS600	Lufft WS600	Lufft WS600	Lufft WS600	Lufft WS600 ***	Lufft WS600 ***
OLUOL	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				
OLDLR	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				
OLCLO	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				
OLDON	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				
WESTE	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				
WITTM	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				
LEEER	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				
PVNOR	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	CSPS Twin-RSI	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				
OLJET	RSI Station	Mobotix Q25	CSPS Twin-RSI	**	**	Li-Cor 200 30°/180°	CS215	CS215				

Tabelle A.2: Tabelle 2 aus [22] mit allen meteorologischen Stationen, Stand Mai 2025

	Unit	Missing data	Maximum gradient limit	Minimum gradient limit	Tracker-Off Test	Sensor Redundancy	BSRN Closure's / GTI model comparison	Coherence test 2	Ex-tremely rare limit	Physical limit	PU check	Cleaning	Manual flag	Shading
Bits position		0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13
Decimal value		1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096
Revised data		remove	keep	keep	keep	keep	keep	keep	keep	keep	remove	keep	remove	keep
Cleaned data		remove	remove	keep	keep	keep	keep	keep	keep	remove	remove	interpolate	remove	remove
GHI	W m ⁻²	x				x	x	x	x	x	x	x	x	x
DHI	W m ⁻²	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	
DNI	W m ⁻²	x			x	x	x		x	x	x	x	x	x
GTI	W m ⁻²	x					x			x		x	x	x
Wind speed	m s ⁻²	x	x	x						x			x	
Wind direction	°	x								x			x	
Air temperature	°C	x	x	x						x			x	
relative Humidity	%	x	x	x						x			x	
Precipitation	mm		x											
Barometric pressure	hPa		x											

Tabelle A.3: Tabelle 4 aus [22], Zusammenfassung der Qualitätskontrollen der meteorologischen Sensordaten, Stand Mai 2025

B Anhang: Datenfilterung

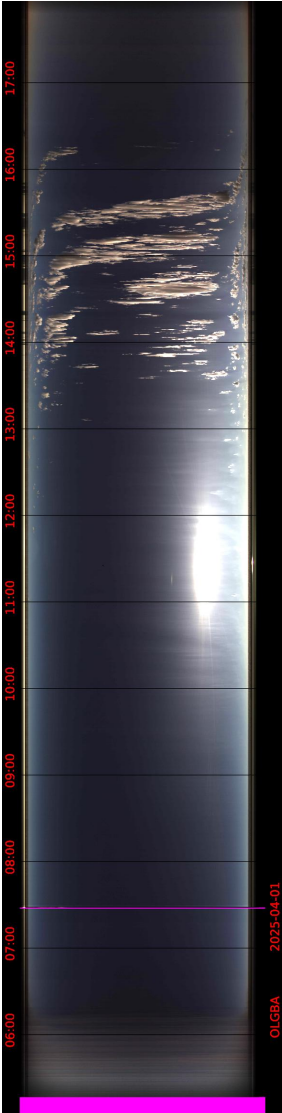


Abbildung B.1: Keogramm bei Clear-Sky an OLGBA am 01.04.2025

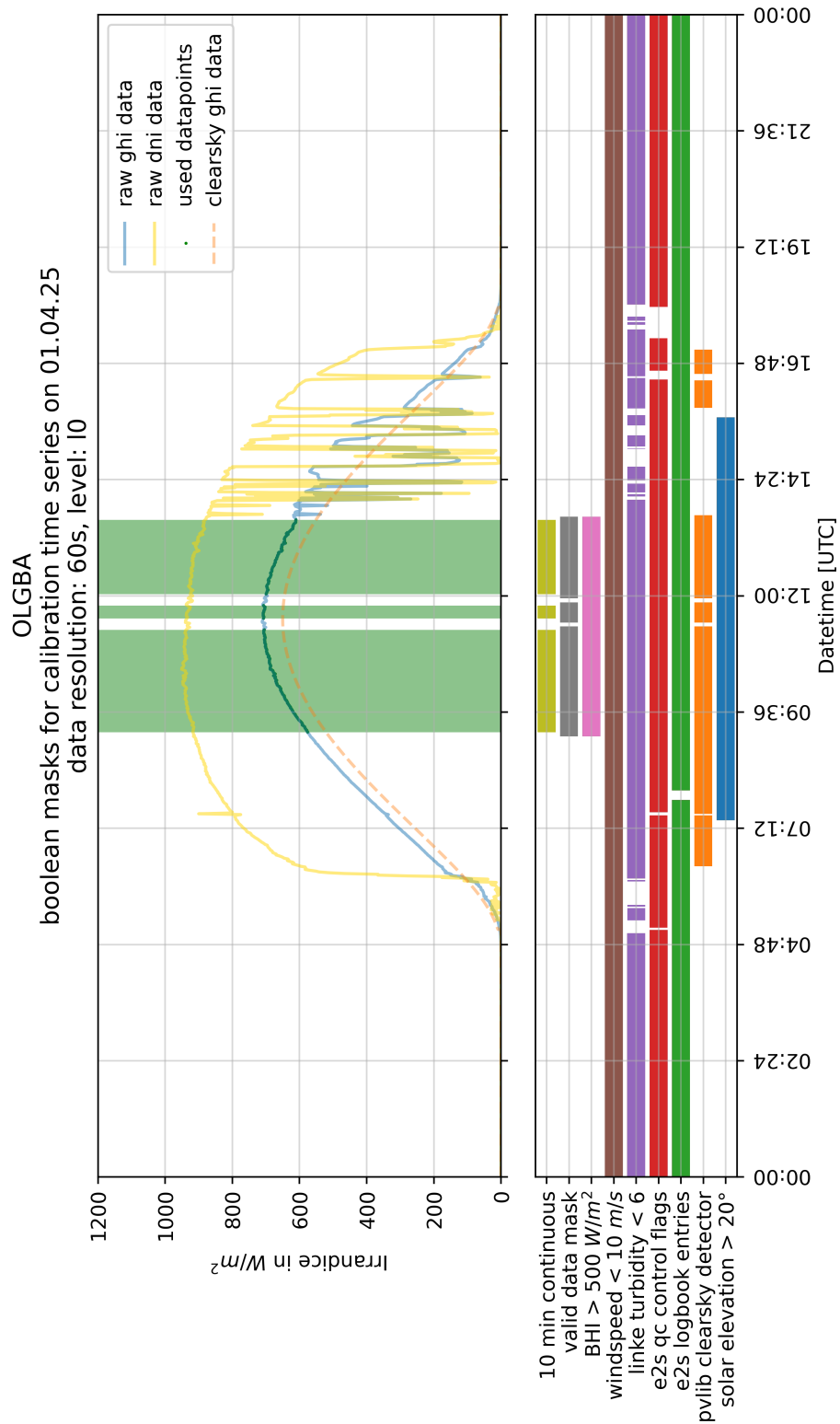


Abbildung B.2: Kombinierte Datenfilterung bei Clear-Sky für OLGBA am 01.04.2025.

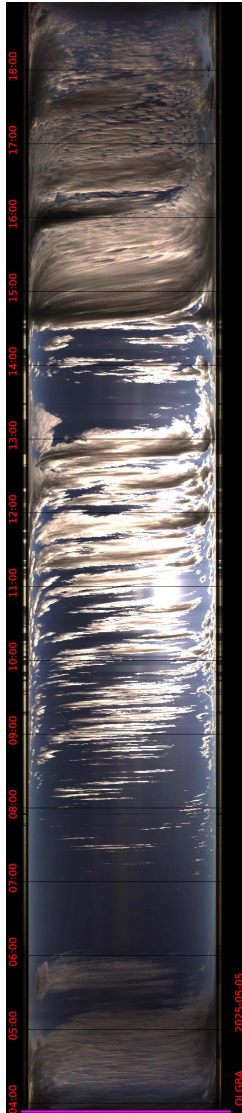


Abbildung B.3: Keogramm bei bewöltem Himmel an OLGBA am 05.05.2025

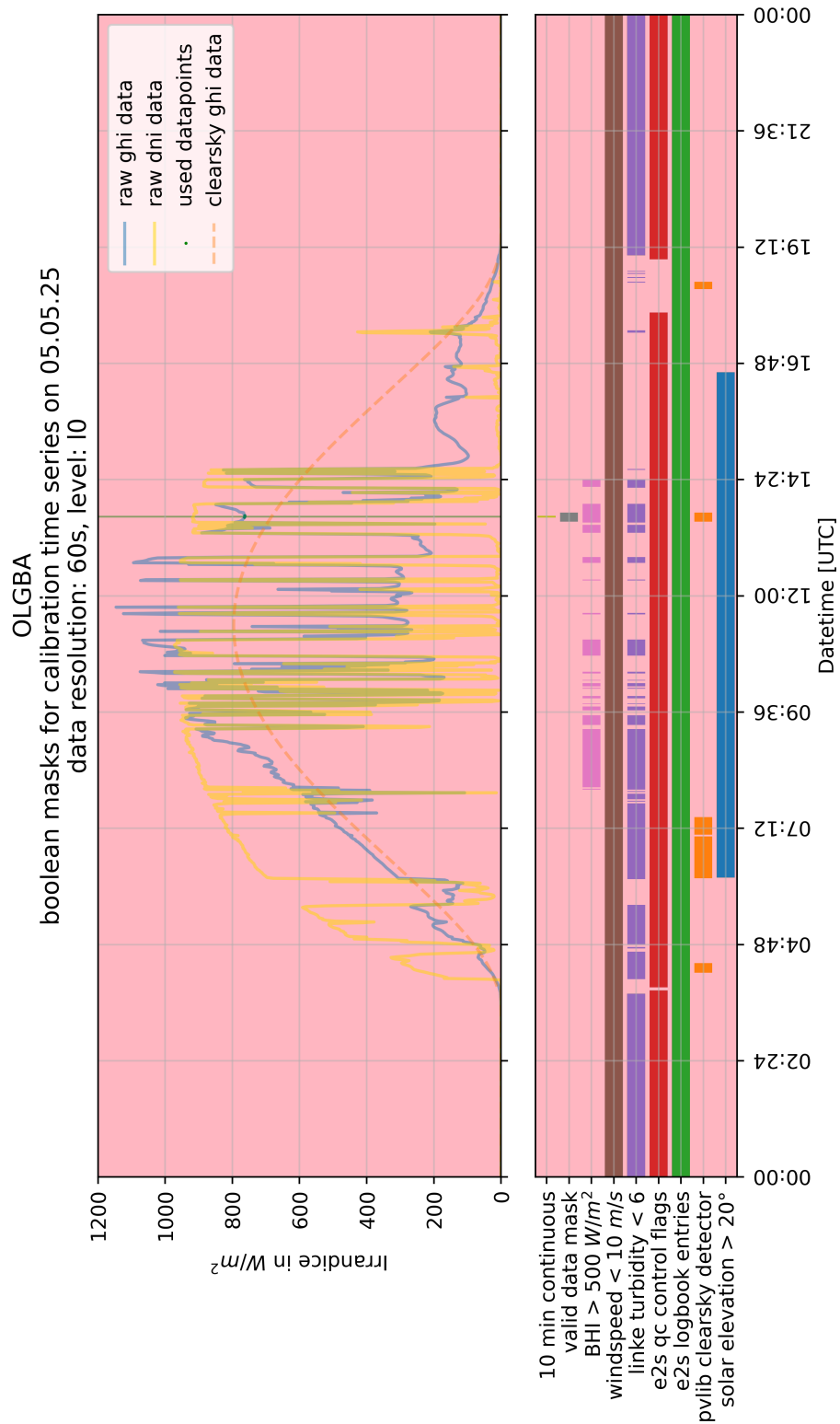


Abbildung B.4: Kombinierte Datenfilterung bei *false positive* für OLGBA am 05.05.2025

C Anhang: Evaluation

C.1 Tagesverläufe der Stationen bei Clear-Sky

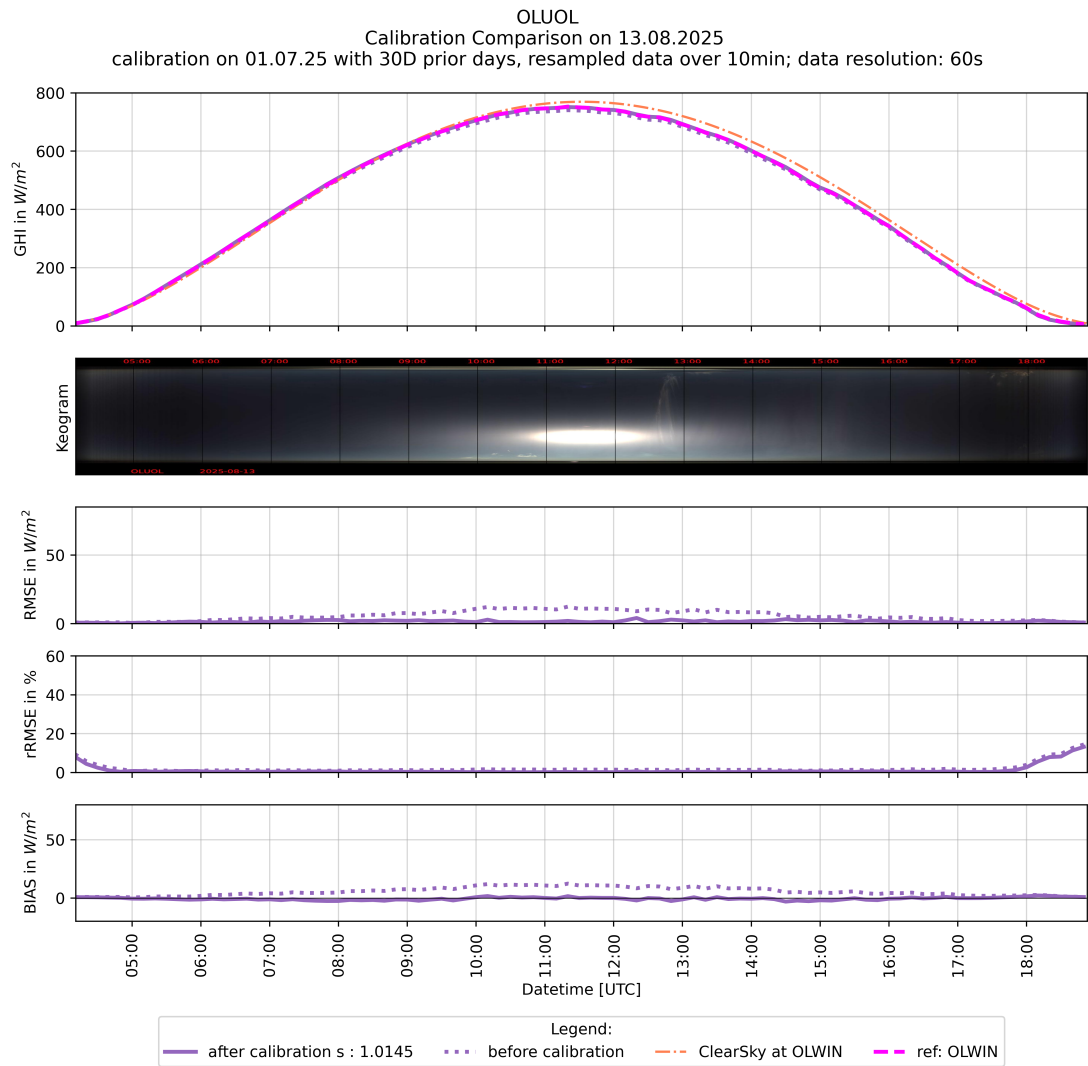


Abbildung C.1: Tagesverlauf bei Clear-Sky bei OLUOL am 13.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

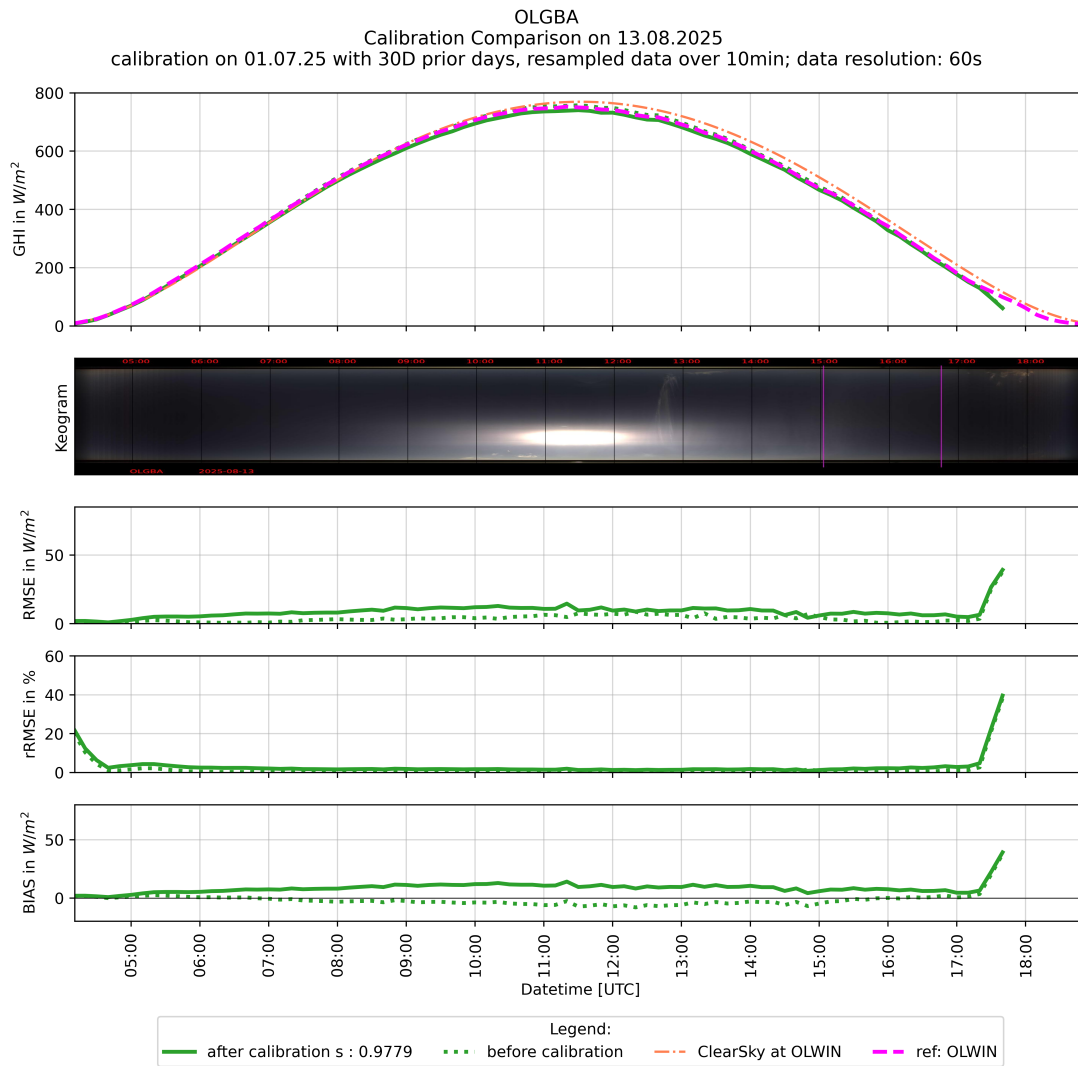


Abbildung C.2: Tagesverlauf bei Clear-Sky bei OLGBA am 13.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

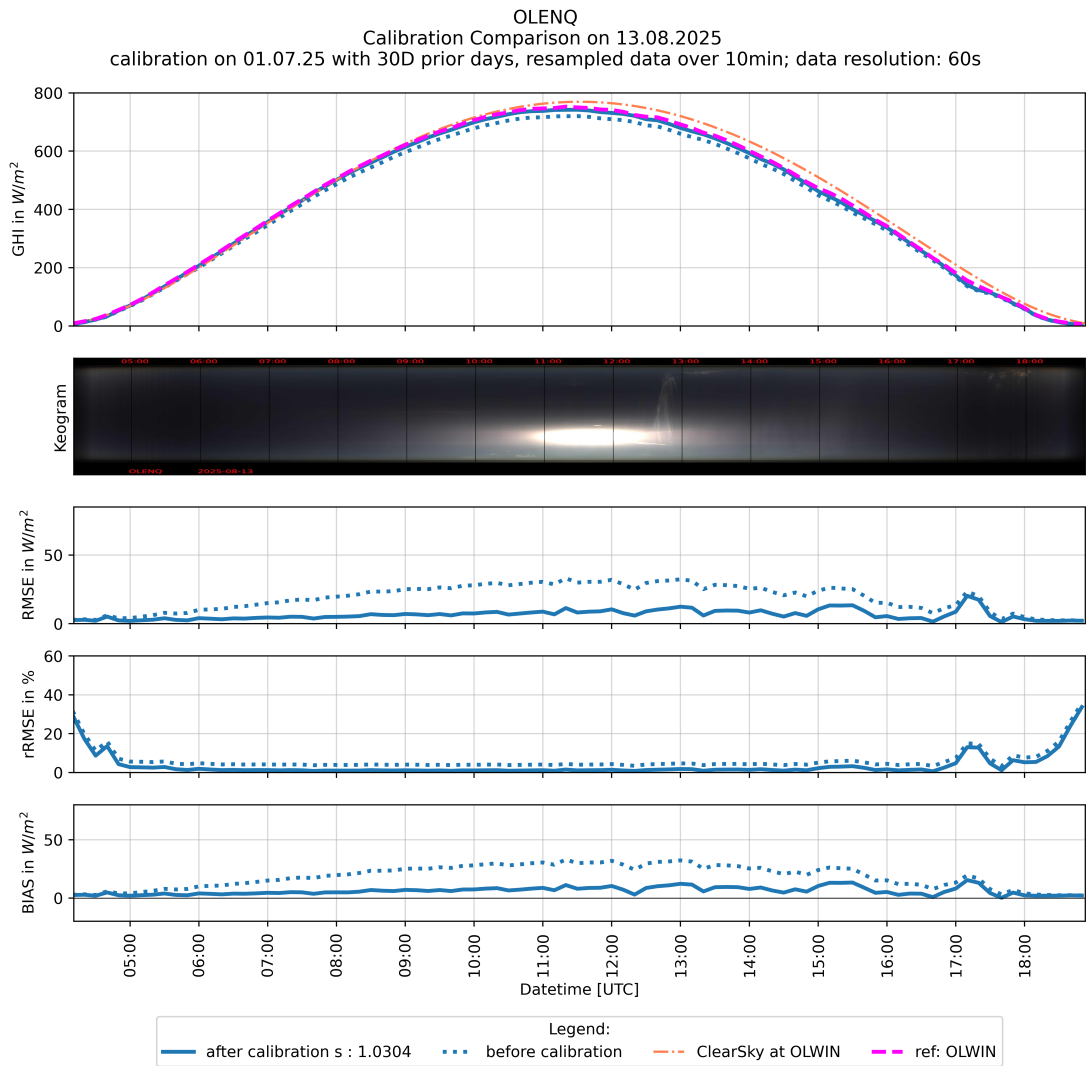


Abbildung C.3: Tagesverlauf bei Clear-Sky bei OLENQ am 13.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

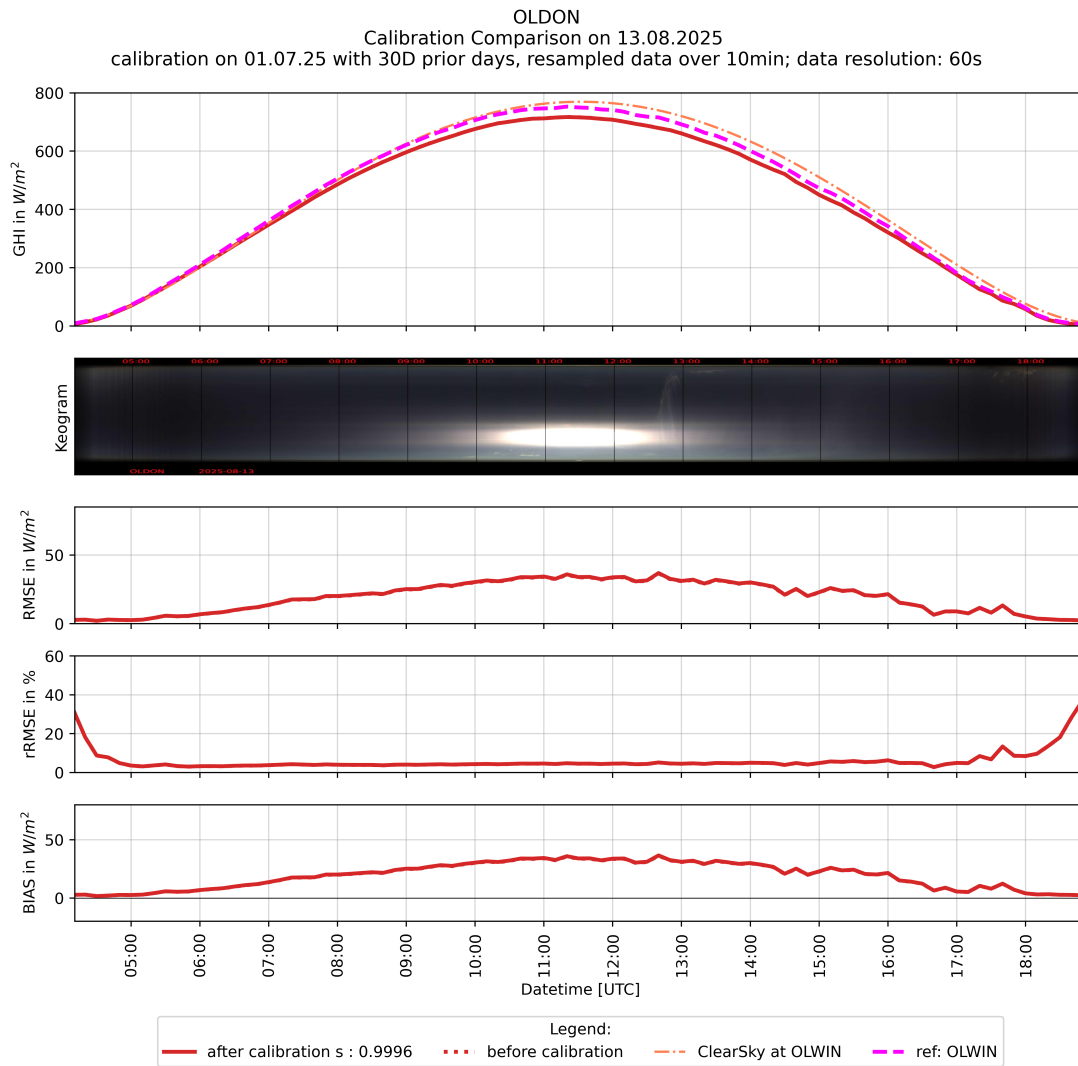


Abbildung C.4: Tagesverlauf bei Clear-Sky bei OLDON am 13.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

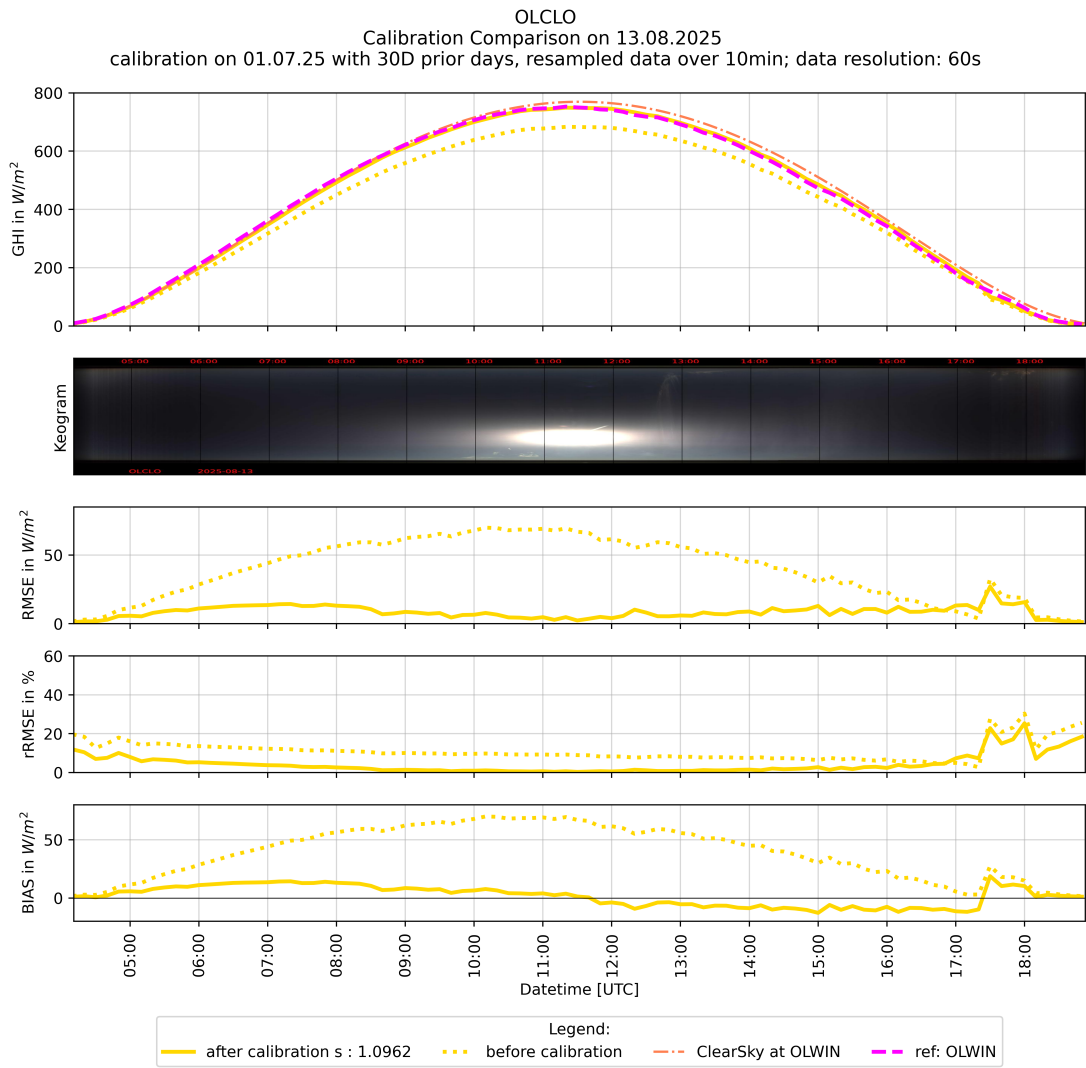


Abbildung C.5: Tagesverlauf bei Clear-Sky bei OLCLO am 13.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

C.2 Tagesverläufe bei All-Sky

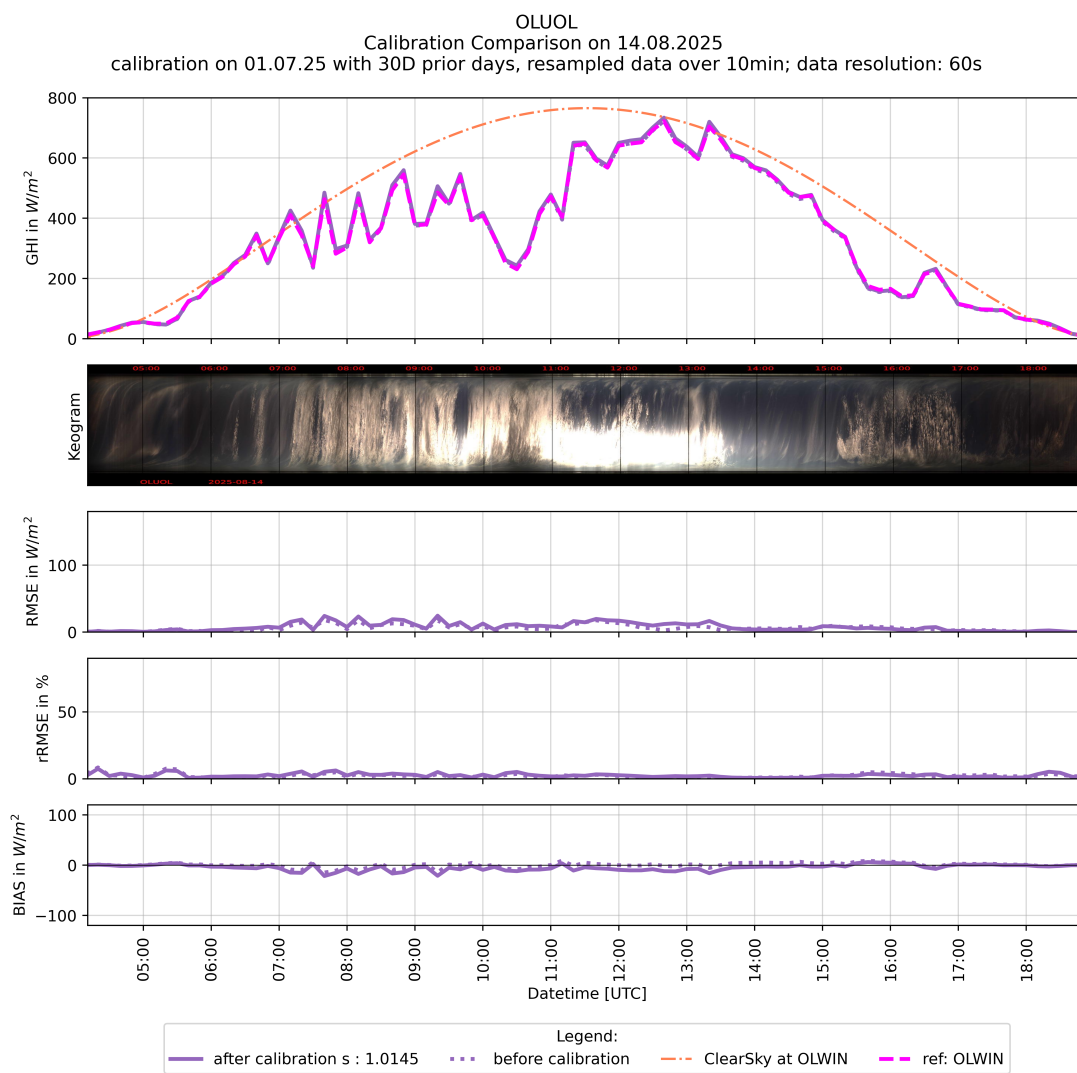


Abbildung C.6: Tagesverlauf bei All-Sky bei OLUOL am 14.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

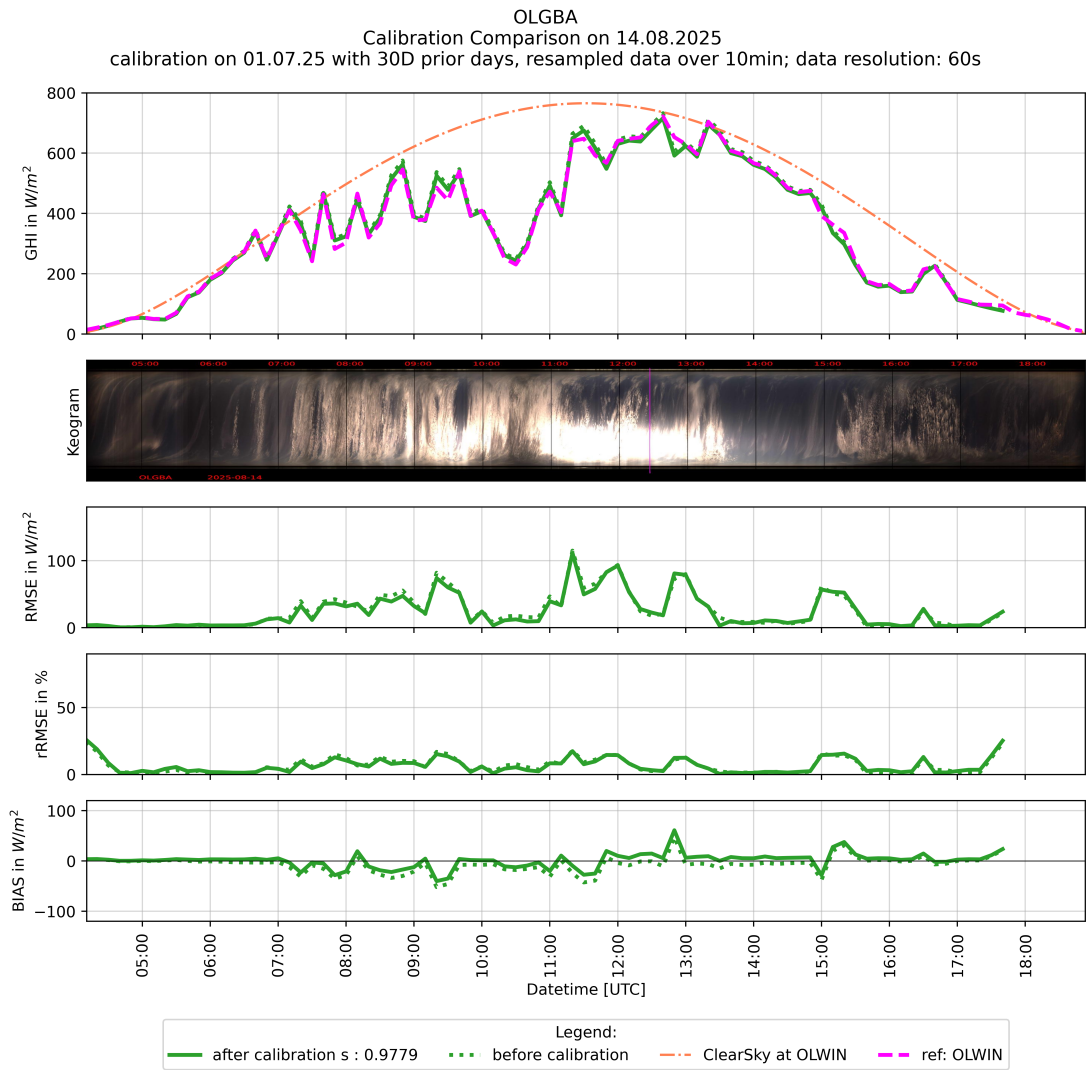


Abbildung C.7: Tagesverlauf bei All-Sky bei OLGBA am 14.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

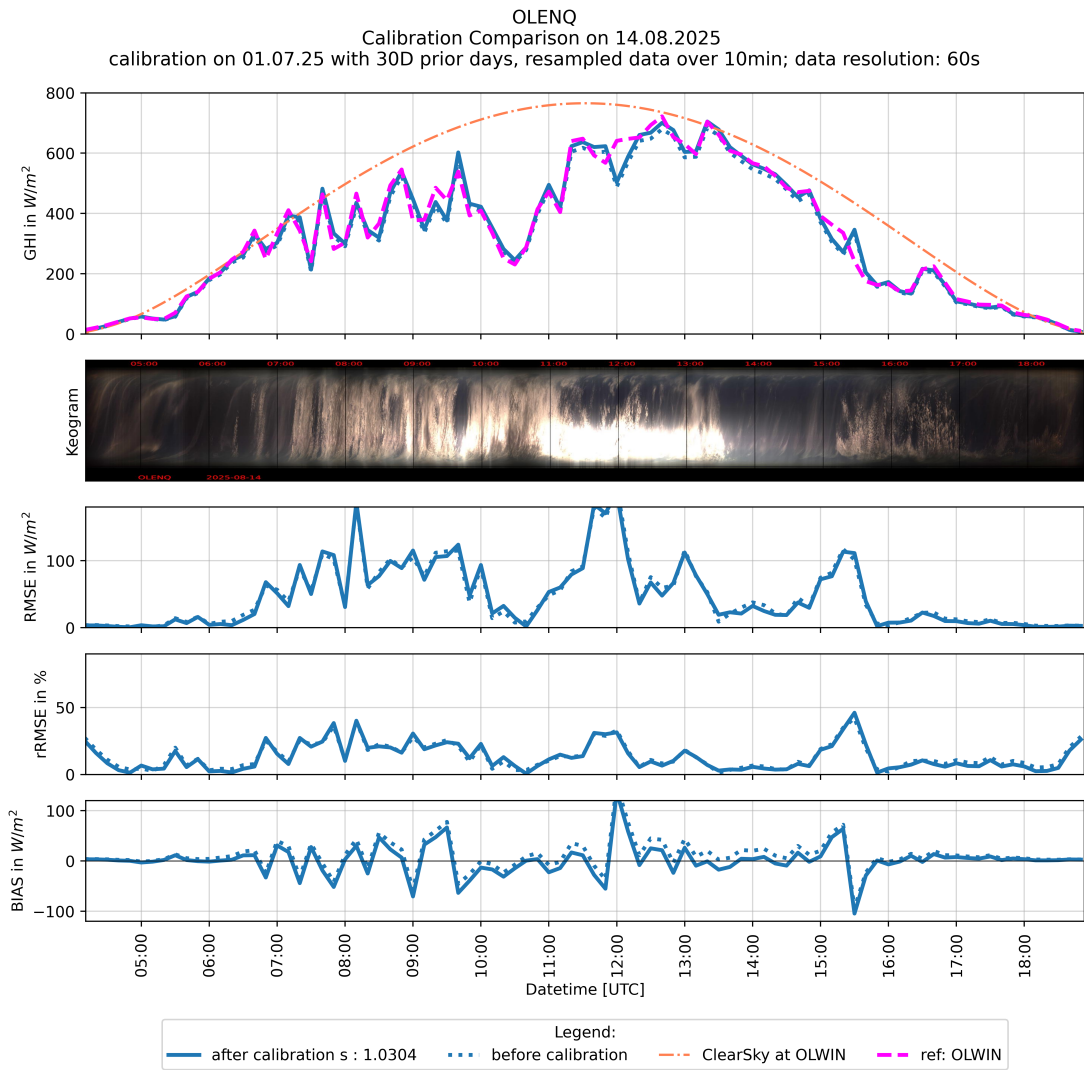


Abbildung C.8: Tagesverlauf bei All-Sky bei OLENQ am 14.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

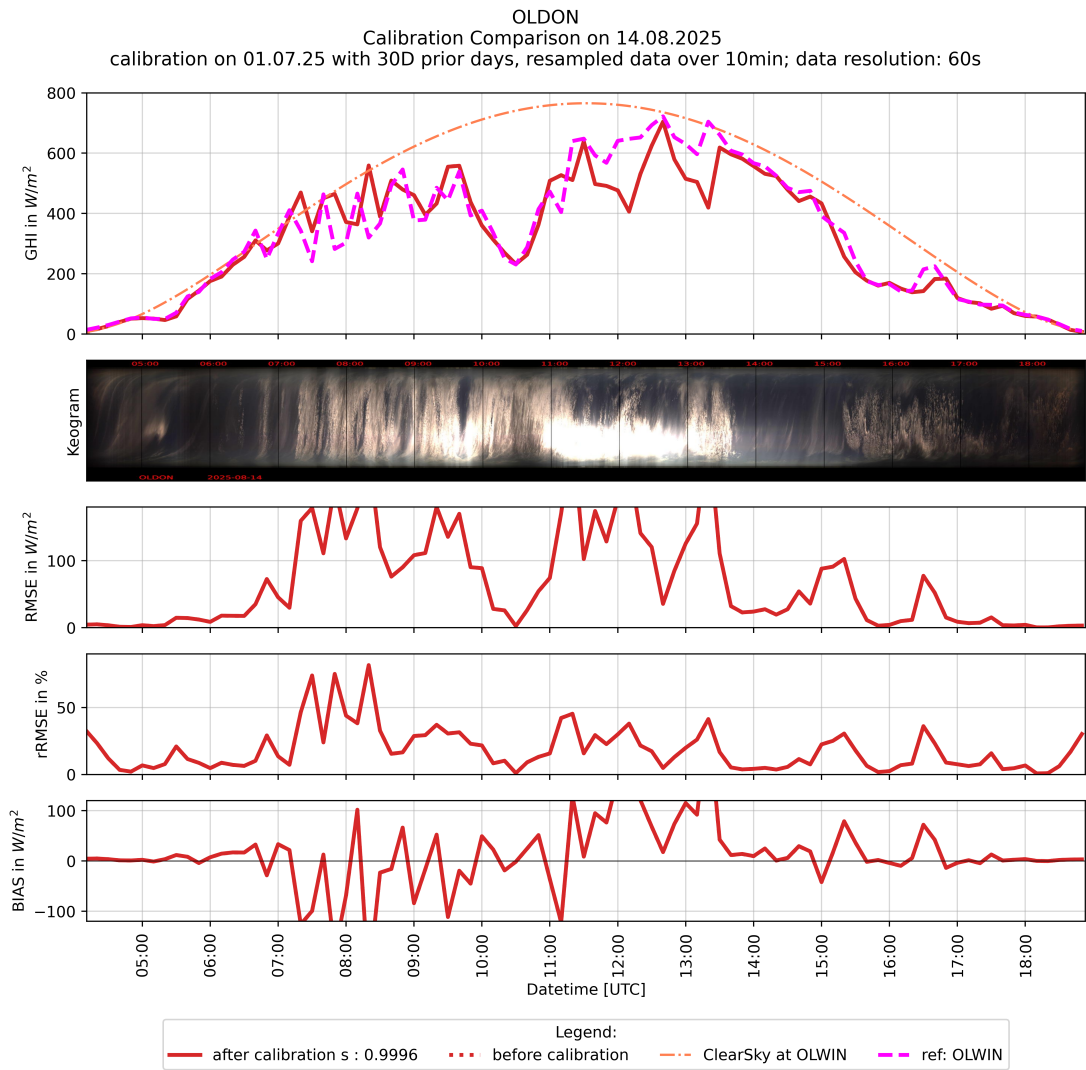


Abbildung C.9: Tagesverlauf bei All-Sky bei OLDON am 14.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

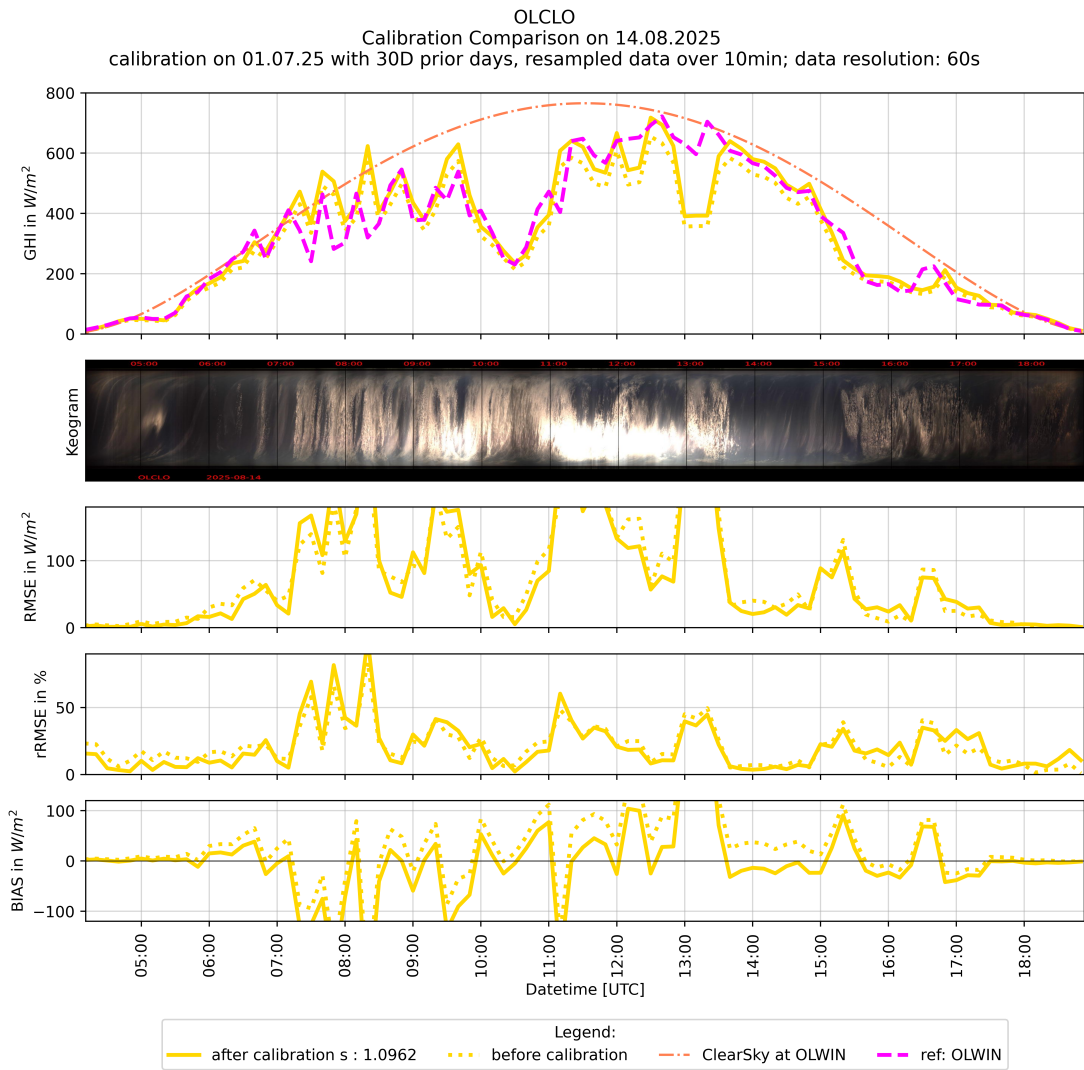


Abbildung C.10: Tagesverlauf bei All-Sky bei OLCLO am 14.08.2025, Auswirkung der Kalibrierung

C.3 Qualitätskontrolle der Sensitivität

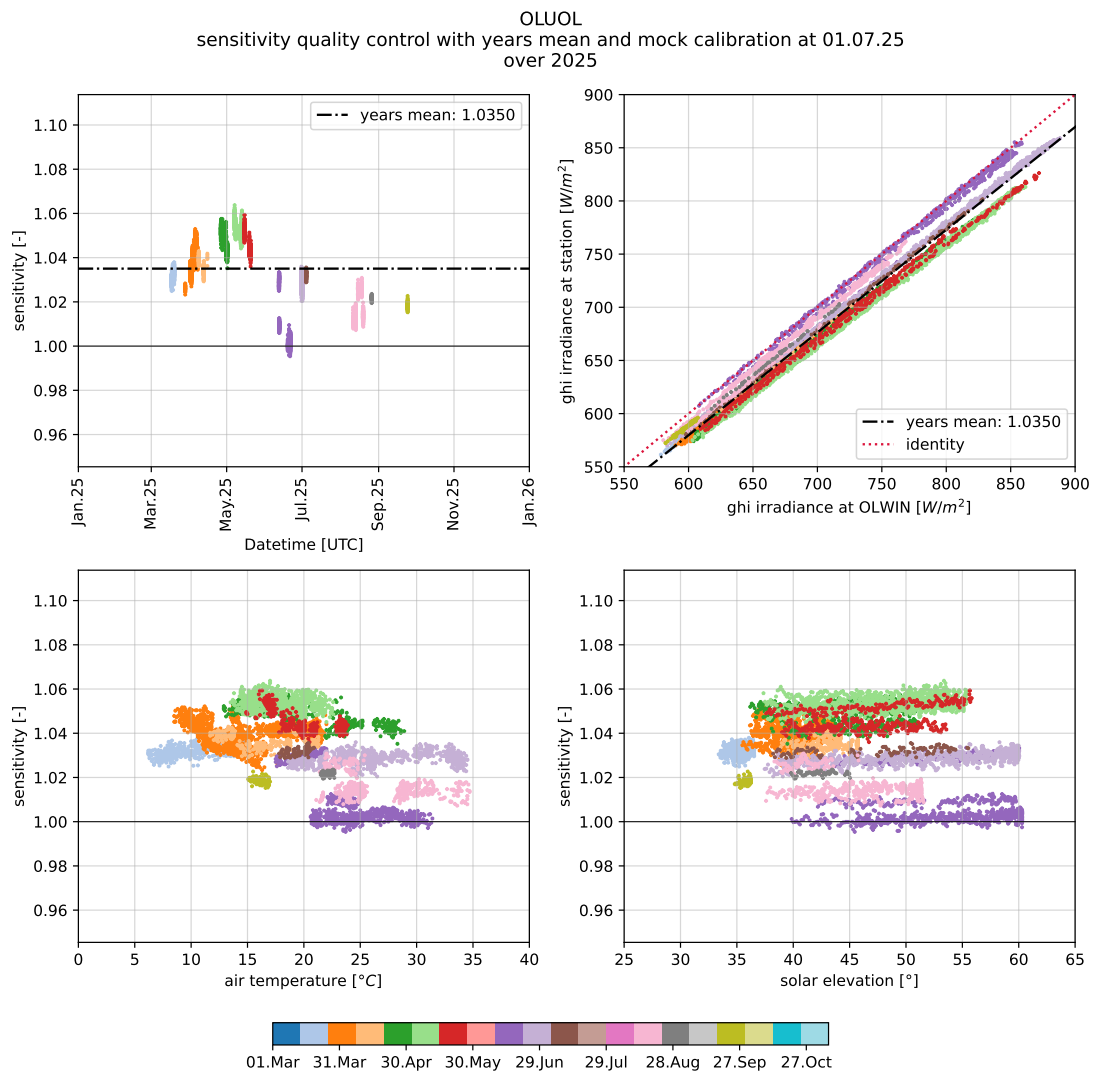


Abbildung C.11: Kalibrierfaktor der Station OLUOL im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.

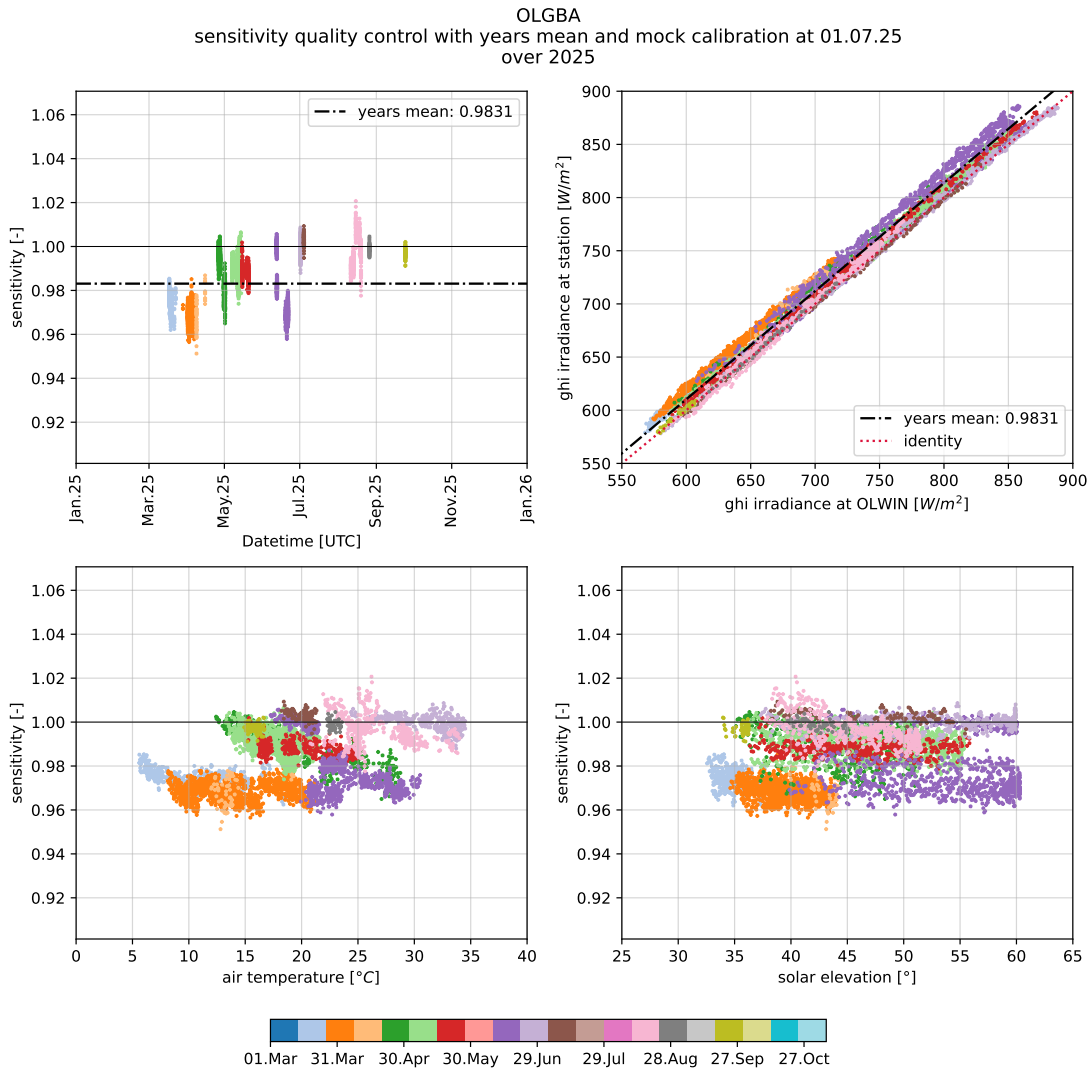


Abbildung C.12: Kalibrierfaktor der Station OLGBA im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.

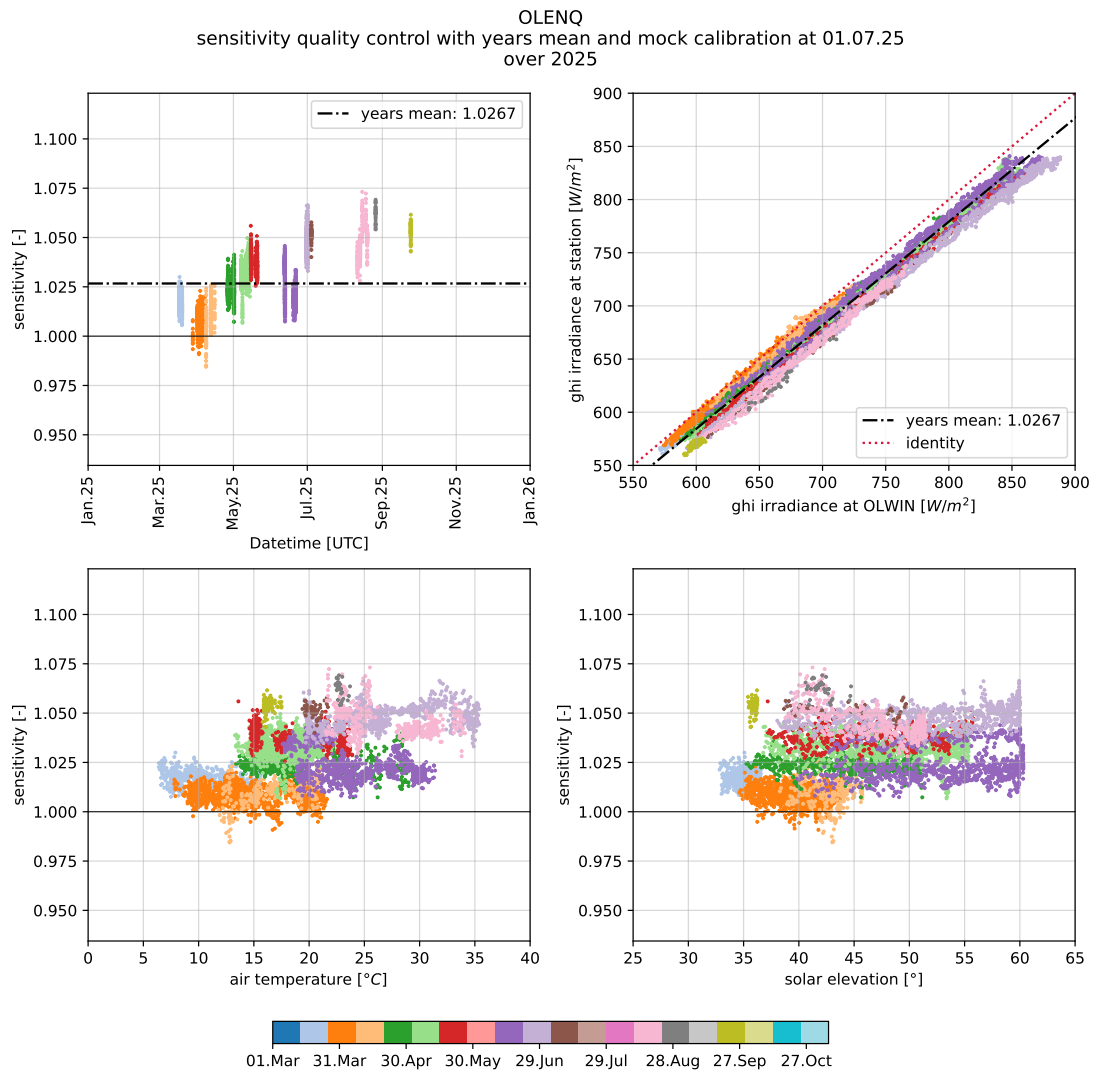


Abbildung C.13: Kalibrierfaktor der Station OLENQ im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.

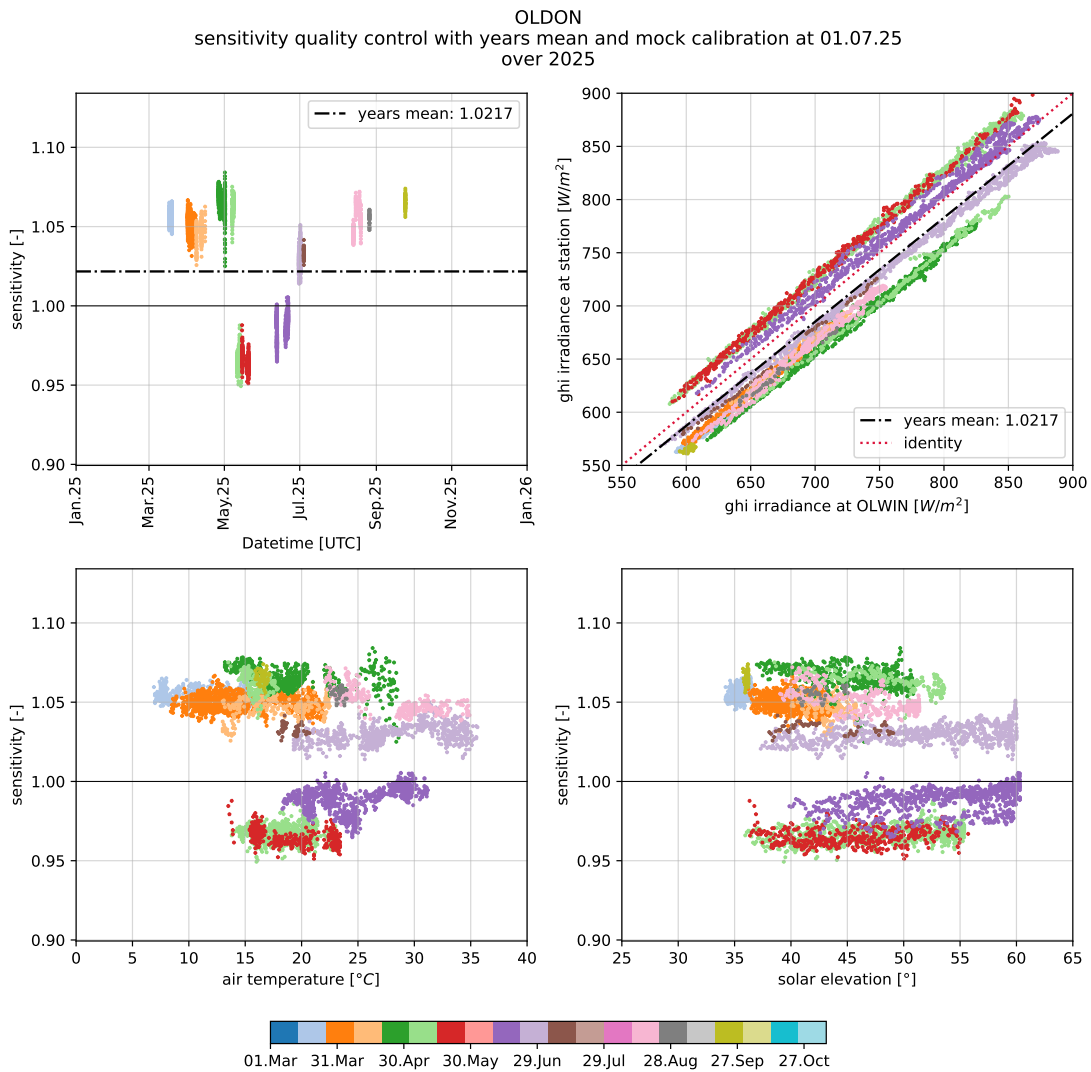


Abbildung C.14: Kalibrierfaktor der Station OLDON im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.

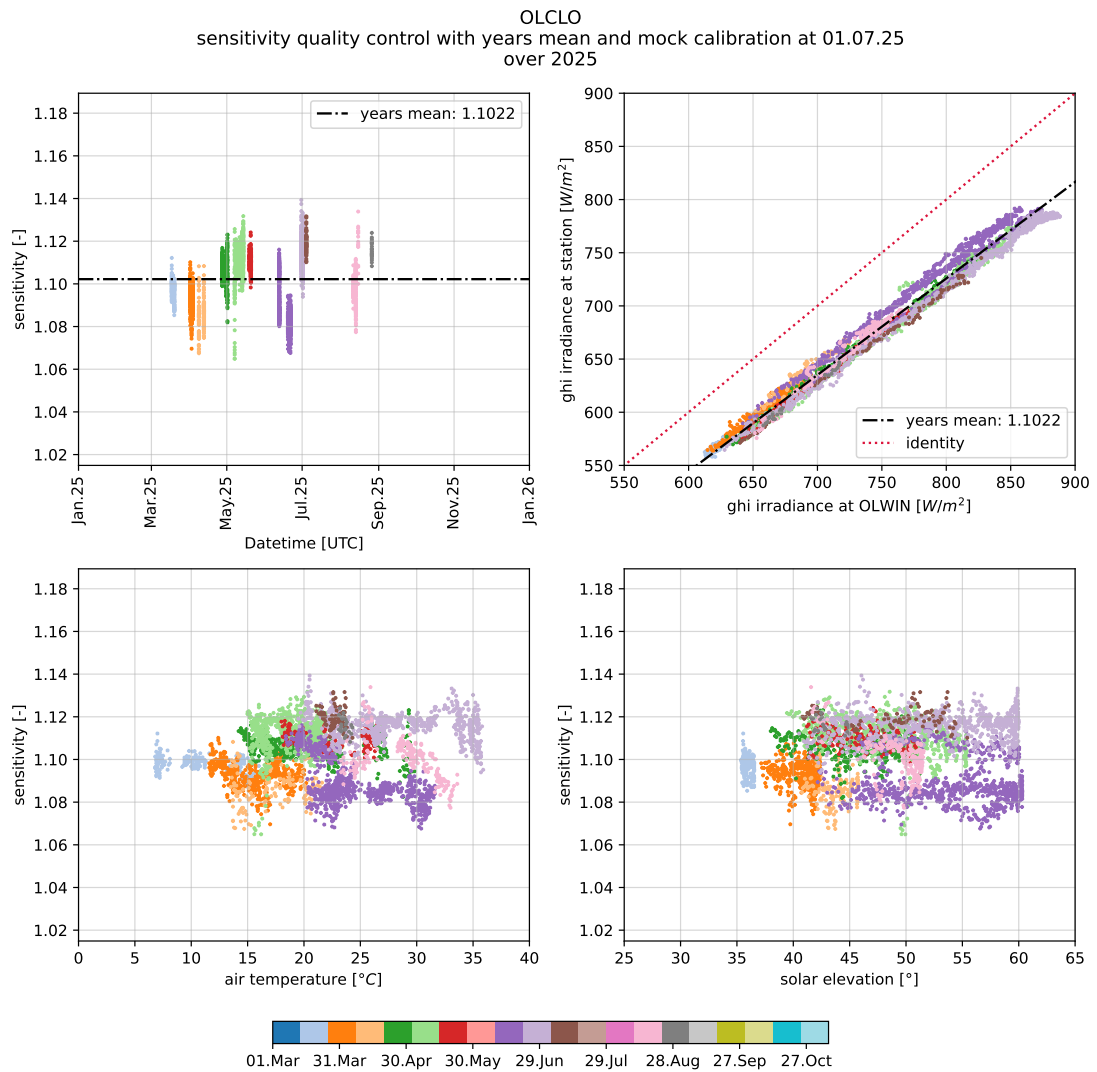


Abbildung C.15: Kalibrierfaktor der Station OLCLO im Verlauf von 2025 sowie in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Sonnenstand. Ausschließlich Daten innerhalb der Datenfilterung wurden verwendet.

C.4 Zeiträume der Kalibrierung

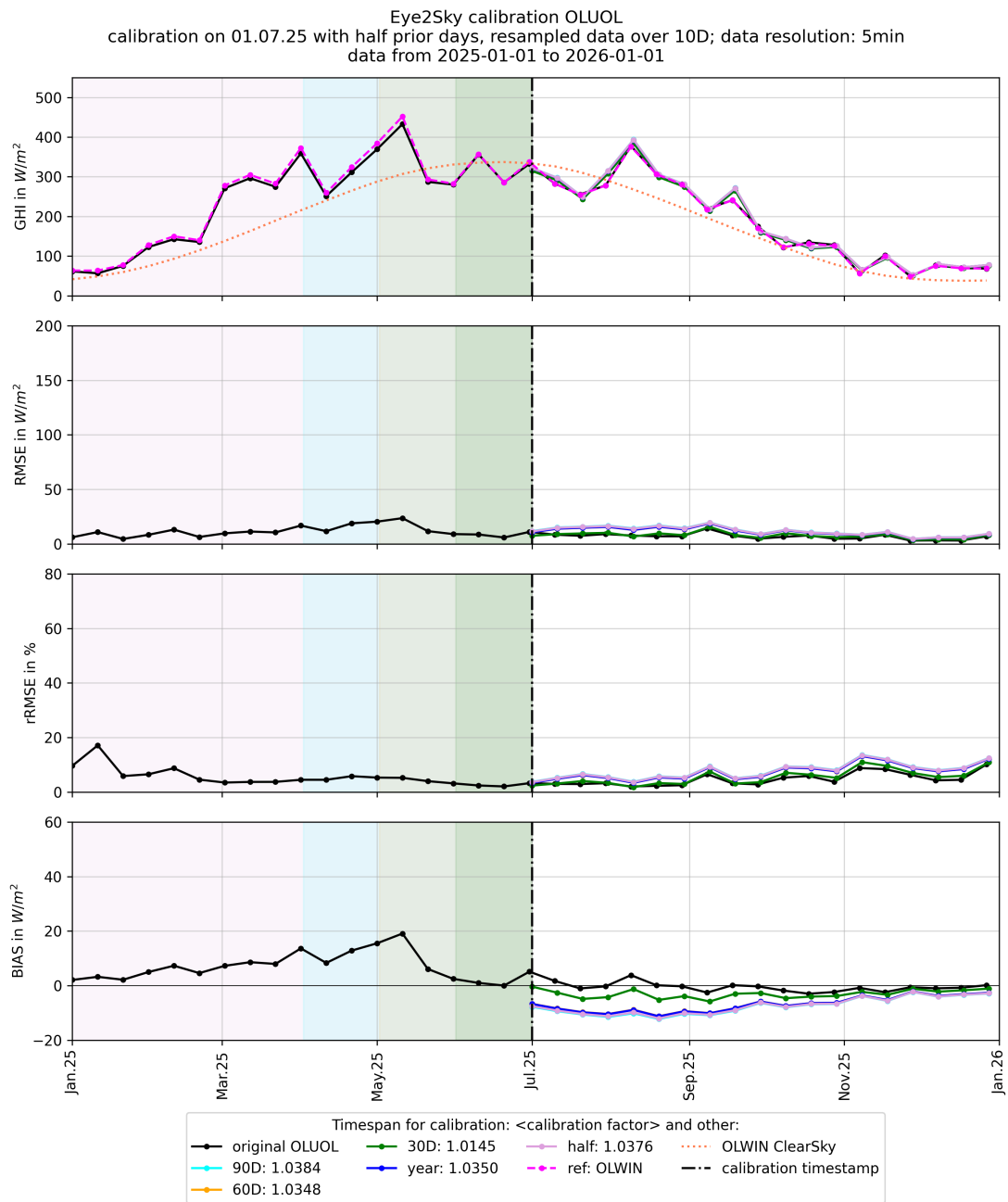


Abbildung C.16: Jahresverlauf der Mess- und Fehlerwerte für die Station OLUOL im Jahr 2025. Vergleich von unkalibrierten mit kalibrierten Werten unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungszeiträume

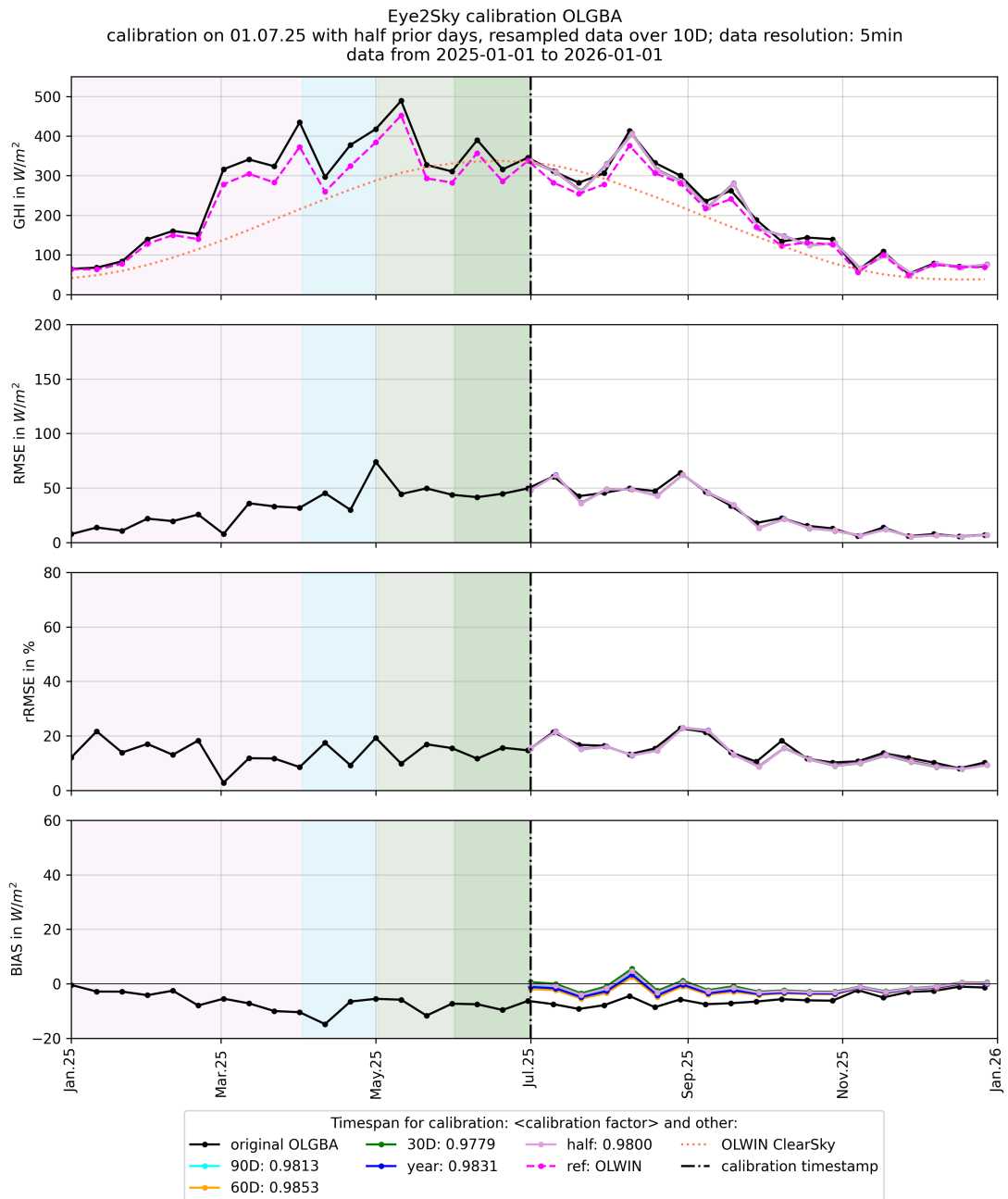


Abbildung C.17: Jahresverlauf der Mess- und Fehlerwerte für die Station OLGBA im Jahr 2025. Vergleich von unkalibrierten mit kalibrierten Werten unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungszeiträume

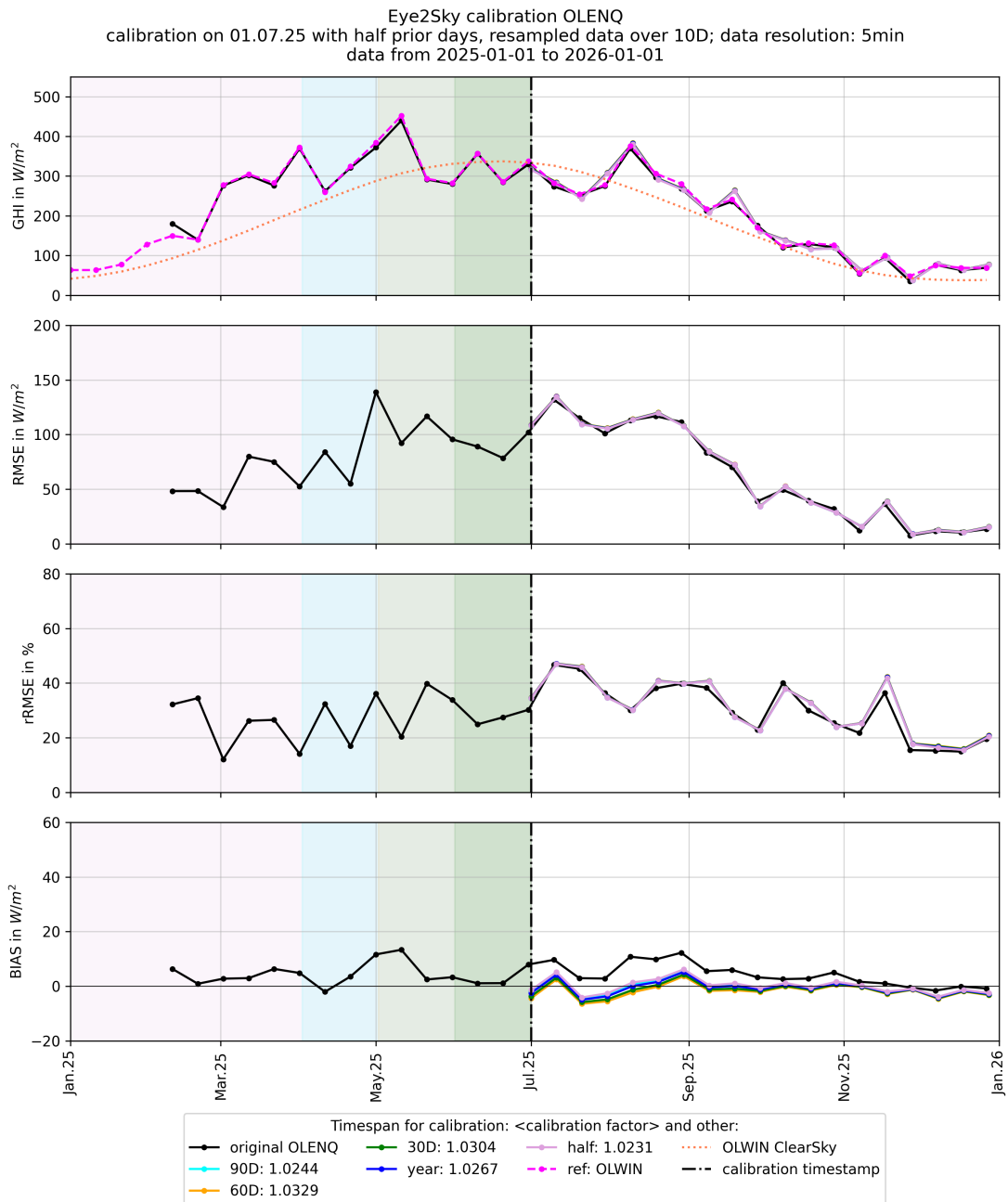


Abbildung C.18: Jahresverlauf der Mess- und Fehlerwerte für die Station OLENQ im Jahr 2025. Vergleich von unkalibrierten mit kalibrierten Werten unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungszeiträume

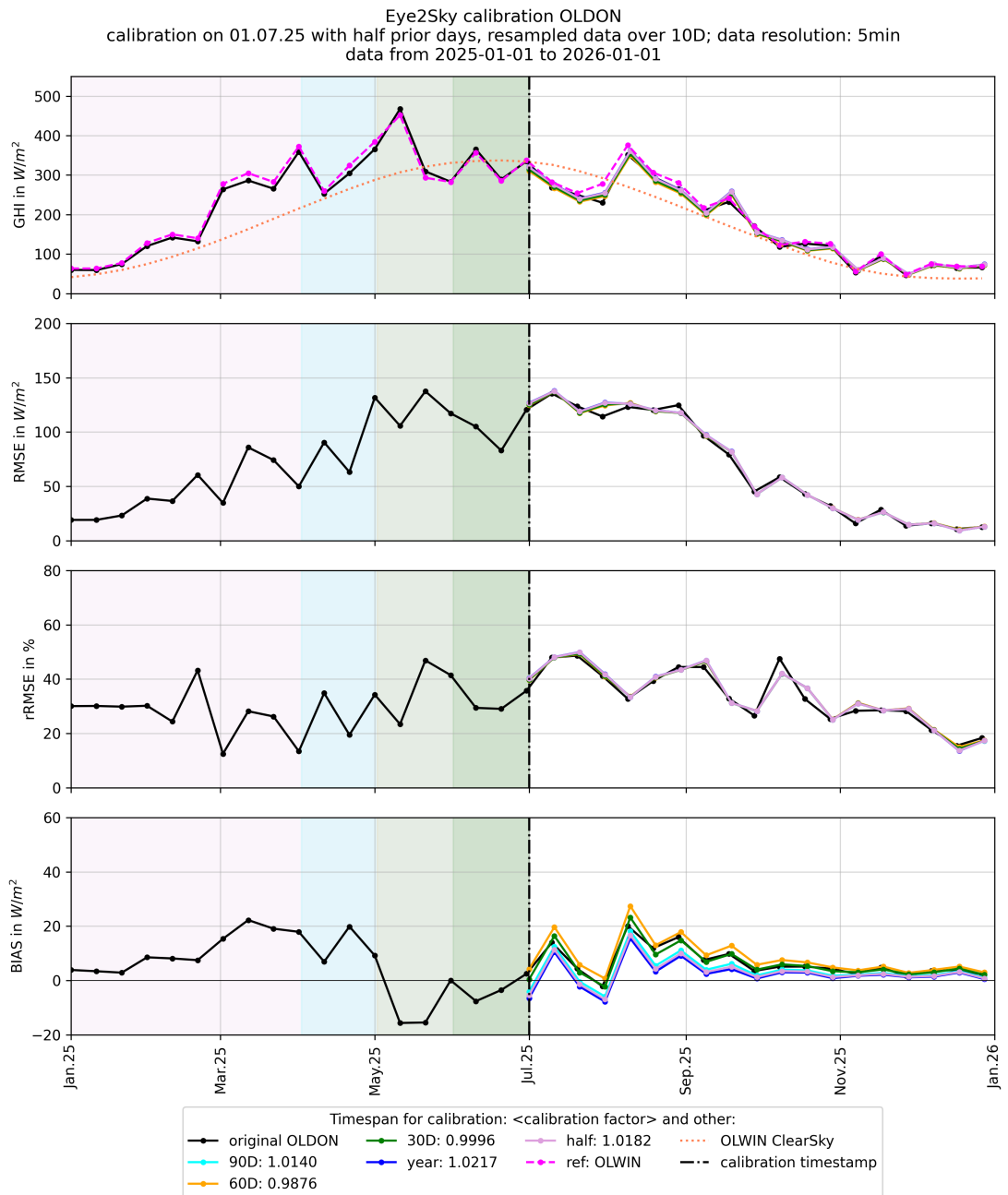


Abbildung C.19: Jahresverlauf der Mess- und Fehlerwerte für die Station OLDON im Jahr 2025. Vergleich von unkalibrierten mit kalibrierten Werten unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungszeiträume

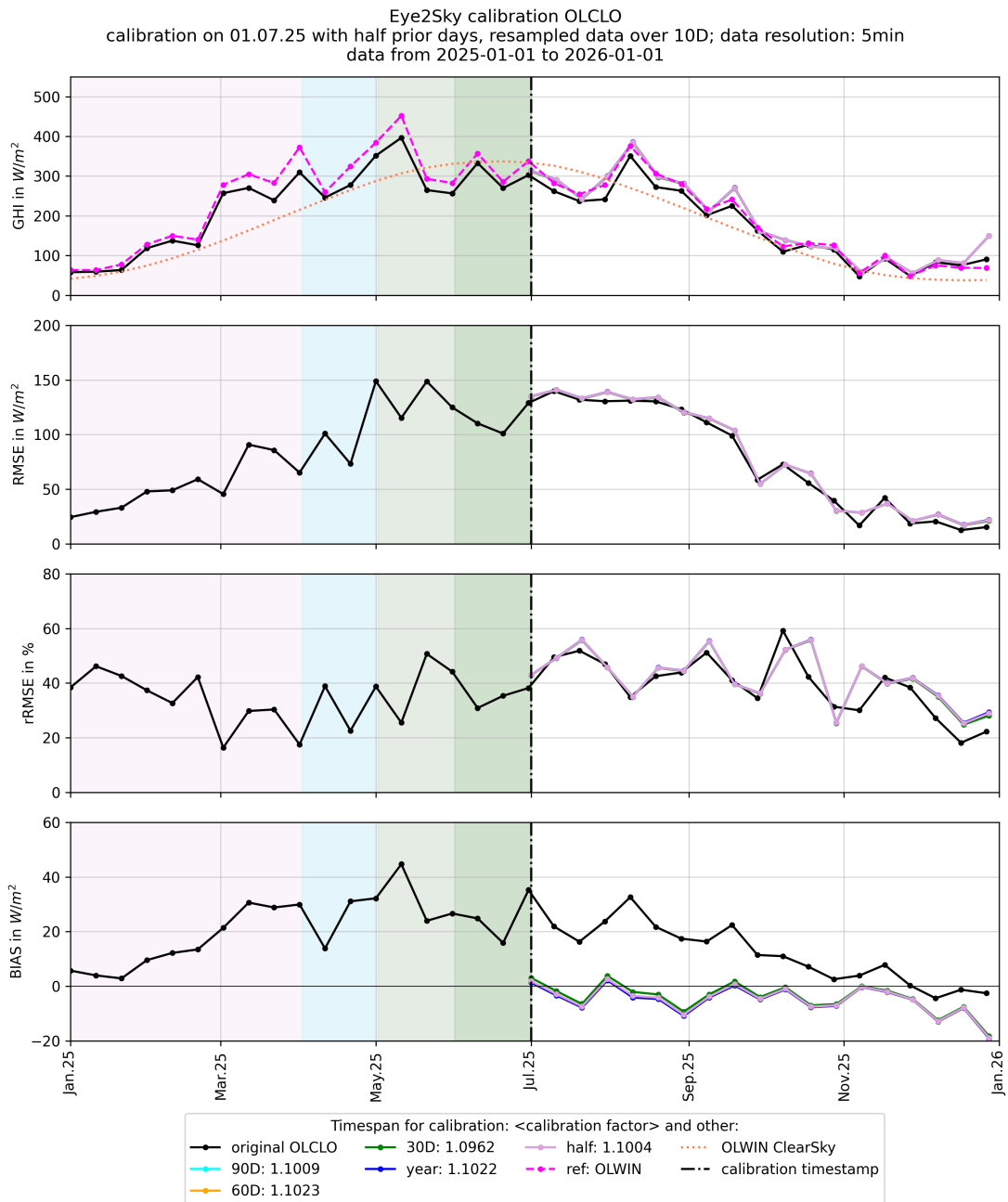


Abbildung C.20: Jahresverlauf der Mess- und Fehlerwerte für die Station OLCL0 im Jahr 2025. Vergleich von unkalibrierten mit kalibrierten Werten unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungszeiträume

D Anhang: Logbuch

Index	Station	Tag	Report	Who	TODD	Datetime	Datetime_end
357	OLGBA	Camera, Station	Installed longer screws so that the camera protection is not in the picture.	redacted		2022-10-19 11:00:00	2022-10-19 14:00:00
360	OLGBA	Commissioning	Adding OLGBA station to Loggernet, start download and start h5 conversion, created hjson for conversion of files	redacted		2022-11-04 16:00:00	2022-11-04 18:00:00
362	OLGBA	Datalogger	Changed Calibration constants in datalogger! Rotation was not working!	redacted		2022-11-08 16:00:00	2022-11-08 22:59:00
364	OLGBA	Datalogger, RSI, Cleaning	Changed Logger program, now RSI works, Cleaning all sensors	redacted		2022-11-10 12:00:00	2022-11-10 14:00:00
367	OLGBA	Datalogger	new program 20221207_OLGBA.CR1X on datalogger, bug in datalogger program led to wrong calculation of DHI.1 and DHI.2, subsequently DNI values were also incorrect.	redacted		2022-12-07 10:00:00	2022-12-07 10:30:00
371	OLGBA	Cleaning	Cleaning of camera and sensors	redacted		2023-01-04 14:15:00	2023-01-04 14:30:00
388	OLGBA	Datalogger	sent new datalogger program 20230309_OLGBA.CR1X due to DNI problem	redacted		2023-03-09 18:01:00	2023-03-09 18:03:00
391	OLGBA,	OLDIR	Cleaning	redacted		2023-03-17 08:00:00	2023-03-17 08:30:00
407	OLGBA	Cleaning	Cleaning	redacted		2023-04-17 09:03:00	2023-04-17 21:59:00
411	OLGBA	Cleaning	Cleaning	redacted		2023-04-24 08:50:00	2023-04-24 21:59:00
449	OLGBA	cleaning		redacted		2023-06-12 06:51:00	2023-06-12 07:06:00
493	OLGBA	horizon	mast position changed	redacted		2023-09-12 08:15:00	2023-09-12 08:30:00
498	OLGBA	safety,cleaning,ventilation	safety inspection new podest, cleaning, check VHS, ventilation Not working properly,too tight opening	redacted		2023-09-14 12:29:00	2023-09-14 12:44:00
511	OLGBA	cleaning		redacted		2023-11-07 15:48:00	2023-11-07 16:03:00
512	OLGBA	cleaning	safety tour with scientist that helps cleaning	redacted		2023-11-07 15:54:00	2023-11-07 16:09:00
514	OLGBA	cleaning		redacted		2023-11-14 12:02:00	2023-11-14 12:17:00
518	OLGBA	cleaning		redacted		2023-11-22 12:01:00	2023-11-22 12:16:00
532	OLGBA	cleaning		redacted		2023-12-18 11:29:00	2023-12-18 11:44:00
541	OLGBA	cleaning		redacted		2024-01-23 13:05:00	2024-01-23 13:15:00
547	OLGBA	cleaning		redacted		2024-02-19 11:31:00	2024-02-19 11:41:00
550	OLGBA	cleaning		redacted		2024-03-12 11:44:00	2024-03-12 11:54:00
552	OLGBA	cleaning		redacted		2024-03-19 14:26:00	2024-03-19 14:36:00
560	OLGBA	cleaning		redacted		2024-04-02 11:25:00	2024-04-02 11:35:00
567	OLGBA	cleaning		redacted		2024-04-16 11:08:00	2024-04-16 11:18:00
570	OLGBA	cleaning, squeaking sound heard from the RSI (as in video)		redacted		2024-04-29 10:54:00	2024-04-29 11:04:00
574	OLGBA	cleaning		redacted		2024-05-13 12:24:00	2024-05-13 12:34:00
578	OLGBA	cleaning,alignment	cleaning sensor, align pyrometer, align thermal pyranometer, exchange	redacted		2024-05-15 12:06:00	2024-05-15 12:16:00
584	OLGBA	cleaning		redacted		2024-05-28 13:10:00	2024-05-28 13:20:00
607	OLGBA	cleaning		redacted		2024-07-15 10:10:00	2024-07-15 10:20:00
613	OLGBA	cleaning		redacted		2024-07-30 06:45:00	2024-07-30 07:00:00
616	OLGBA	cleaning		redacted		2024-08-13 06:50:00	2024-08-13 07:00:00
618	OLGBA	cleaning		redacted		2024-08-20 10:28:00	2024-08-20 10:38:00
623	OLGBA	cleaning		redacted		2024-09-03 10:45:00	2024-09-03 11:00:00
624	OLGBA	cleaning		redacted		2024-09-03 11:00:00	2024-09-03 11:10:00
652	OLGBA	cleaning		redacted		2024-11-12 12:13:00	2024-11-12 12:23:00
659	OLGBA	cleaning		redacted		2024-12-04 12:34:00	2024-12-04 12:44:00
662	OLGBA	cleaning		redacted		2025-01-07 08:50:00	2025-01-07 09:00:00
668	OLGBA	cleaning		redacted		2025-01-31 11:15:00	2025-01-31 11:30:00
678	OLGBA	cleaning		redacted		2025-02-17 13:25:00	2025-02-17 13:35:00
683	OLGBA	mask	lightning rod installation at OLGBA in the morning	redacted		2025-03-04 06:30:00	2025-03-04 07:00:00
684	OLGBA	horizon	installation of new lightning rod by technicians	redacted	new mask	2025-03-04 06:30:00	2025-03-04 07:00:00
685	OLGBA	cleaning		redacted		2025-03-04 12:14:00	2025-03-04 12:24:00
687	OLGBA	router,construction	new router with new firmware after failure, new construction on rooftop blocking anemometer, new lightning rod in view of olgba camera	redacted		2025-03-05 08:17:00	2025-03-05 08:27:00
692	OLGBA	cleaning		redacted		2025-03-18 08:45:00	2025-03-18 08:55:00
701	OLTES,OLG	BA	research	redacted		2025-03-26 10:30:00	2025-03-26 11:50:00
702	OLGBA	router	test of asi motion detection for recognising drones (quadcopter) test connection and works again	redacted		2025-03-27 14:00:00	2025-03-27 14:30:00
707	OLGBA	cleaning		redacted		2025-04-01 07:48:00	2025-04-01 07:58:00
719	OLGBA	cleaning		redacted		2025-04-28 08:37:00	2025-04-28 08:47:00
723	OLGBA	datalogger	SD card inserted	redacted		2025-04-30 11:37:00	2025-04-30 11:47:00
729	OLGBA	cleaning		redacted		2025-05-12 10:30:00	2025-05-12 11:00:00
735	OLGBA	router	upgrade firmware to 7.6.18	redacted		2025-06-06 09:33:00	2025-06-06 09:43:00
741	OLGBA	cleaning		redacted		2025-06-18 12:15:00	2025-06-18 12:25:00
743	CDLRA,OL	GBA	router	redacted		2025-06-26 09:15:00	2025-06-26 09:30:00
749	OLGBA	cleaning, was restarted as per Jonas	changed dir switch setting to fix 100Mbit speed	redacted		2025-07-01 07:51:00	2025-07-01 08:01:00
751	OLGBA	router	downgrade Firmware to 7.4.1	redacted		2025-07-02 07:06:00	2025-07-02 07:16:00
752	OLGBA	router	downgrade firmware to 7.4.1 again, playing around with settings, you have to delete all configs on firmware downgrade. otherwise it doesnt work	redacted		2025-07-03 07:00:00	2025-07-03 11:00:00
760	OLGBA	cleaning		redacted		2025-08-05 10:07:00	2025-08-05 10:17:00
776	OLGBA	cleaning		redacted		2025-08-25 09:01:00	2025-08-25 09:11:00
780	OLGBA	cleaning		redacted		2025-08-28 13:15:00	2025-08-28 13:20:00
785	OLGBA	cleaning		redacted		2025-09-19 06:30:00	2025-09-19 07:10:00
791	OLGBA	cleaning		redacted		2025-09-30 11:07:00	2025-09-30 11:17:00
797	OLGBA	cleaning		redacted		2025-10-14 10:47:00	2025-10-14 10:57:00
812	OLGBA	cleaning		redacted		2025-11-18 12:15:00	2025-11-18 12:30:00
831	OLGBA	cleaning		redacted		2025-12-09 13:31:00	2025-12-09 13:41:00
851	OLGBA	cleaning		redacted		2026-02-24 12:00:00	2026-02-24 12:20:00

Abbildung D.1: Logbucheinträge von OLGBA aus 2020 bis 2025

Index	Station	Tag	Report	Who	TODD	Datetime	Datetime_end
663	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-01-08 12:05:00	2025-01-08 12:20:00
664	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-01-14 13:29:00	2025-01-14 13:39:00
666	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-01-24 12:45:00	2025-01-24 12:55:00
670	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-01-31 13:00:00	2025-01-31 13:10:00
674	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-02-07 12:28:00	2025-02-07 12:38:00
676	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-02-14 08:44:00	2025-02-14 08:54:00
679	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-02-21 08:28:00	2025-02-21 08:38:00
681	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-02-27 13:05:00	2025-02-27 13:15:00
688	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-03-07 10:43:00	2025-03-07 10:53:00
690	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-03-14 12:54:00	2025-03-14 13:04:00
691	OLWIN	maintenance	add calibration tags Stamblatt 8-11	redacted		2025-03-14 12:55:00	2025-03-14 13:05:00
696	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-03-21 12:54:00	2025-03-21 13:04:00
703	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-03-27 14:55:00	2025-03-27 15:05:00
704	OLWIN	maintenance	orienting dhi and dni sensor, exchange drying agent, Check if pyrheliometer is well aligned=yes, cleaning	redacted	buy new housing ms80	2025-03-27 15:00:00	2025-03-27 15:20:00
708	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-04-03 09:31:00	2025-04-03 09:41:00
710	OLWIN,OLUOL,OLEXP,OLCAL	router	changed wireguard setting, might have bricked the router.	redacted	check locally	2025-04-08 11:27:00	2025-04-08 11:37:00
711	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning	does not come back online after reboot	redacted		2025-04-09 06:50:00	2025-04-09 07:10:00
712	OLWIN	router	setup wireguard to Servers	redacted		2025-04-09 09:30:00	2025-04-09 09:40:00
713	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-04-16 10:38:00	2025-04-16 10:48:00
718	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-04-25 11:44:00	2025-04-25 11:54:00
724	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-04-30 14:05:00	2025-04-30 14:15:00
725	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning	visit with students lasting 1 hour, disturbances possible	redacted		2025-05-05 14:15:00	2025-05-05 15:15:00
730	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-05-12 15:55:00	2025-05-12 16:10:00
731	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-05-22 10:45:00	2025-05-22 10:55:00
733	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-05-28 12:00:00	2025-05-28 12:10:00
734	OLWIN	router	upgrade firmware to 7.6.18	redacted		2025-06-06 09:33:00	2025-06-06 09:43:00
737	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-06-06 11:20:00	2025-06-06 11:30:00
739	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-06-12 11:30:00	2025-06-12 11:40:00
742	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-06-22 16:52:00	2025-06-22 17:02:00
744	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-06-26 11:26:00	2025-06-26 11:36:00
747	OLWIN	pyranometer,repair	exchange DHI pyranometer housing	redacted		2025-06-26 11:29:00	2025-06-26 11:39:00
750	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-07-01 08:06:00	2025-07-01 08:16:00
755	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-07-08 14:38:00	2025-07-08 14:48:00
756	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-07-16 07:52:00	2025-07-16 08:02:00
759	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-07-29 10:05:00	2025-07-29 10:15:00
761	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-08-05 12:13:00	2025-08-05 12:23:00
762	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-08-11 11:42:00	2025-08-11 11:52:00
767	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-08-15 07:36:00	2025-08-15 07:46:00
768	OLWIN	pyranometer,recalibration	problem with the calibration constants for the silicon pyranometer pyr_sl, the datalogger program was changed on the 18.8.2025 with a calibration constant of 51.8, however, the sensor was not changed, so the calibration factor of 48.2 would have been correct in this case. fixed on the 2025-03-05	redacted		2025-08-17 22:00:00	2026-03-05 22:59:00
770	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	recalibration	photos of recalibration	redacted		2025-08-18 12:20:00	2025-08-18 12:30:00
772	OLWIN	recalibration	exchanged with new pyrheliometer P15055: pyrheliometer contains dirt inside the device in front of the lense, pyranometer S18108021 GHI pyra.1, pyranometer S17096023 DHI,pyra.2, water level deteriorated, pyranometer Si S18034502 pyra_sl1	redacted		2025-08-18 13:46:00	2025-08-18 13:56:00
777	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-08-18 13:52:00	2025-08-18 14:02:00
784	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-08-25 11:55:00	2025-08-25 12:10:00
786	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-09-04 14:44:00	2025-09-04 14:54:00
789	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-09-10 10:36:00	2025-09-10 10:46:00
790	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-09-19 10:45:00	2025-09-19 11:00:00
792	OLWIN	sensorupdate	exchanged pyrheliometer for the last one to send in to the supplier, the new one is: S20060.12, new calibration constant set into the datalogger, exchanged water levels for both Eko MS80 pyranometers as old water levels were broken. releveled the pyranometers	redacted		2025-09-24 09:49:00	2025-09-24 09:59:00
793	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-10-02 11:00:00	2025-10-02 12:30:00
795	OLWIN	pictures	exchanged pyrheliometer and replaced Walter levels for both pyranometers	redacted		2025-10-02 11:46:00	2025-10-02 11:56:00
796	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-10-02 12:23:00	2025-10-02 12:33:00
798	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-10-10 10:54:00	2025-10-10 11:04:00
804	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-10-14 10:52:00	2025-10-14 11:02:00
806	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-10-29 13:33:00	2025-10-29 13:43:00
809	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-11-05 12:09:00	2025-11-05 12:19:00
813	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-11-12 11:35:00	2025-11-12 11:45:00
815	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-11-21 12:38:00	2025-11-21 12:48:00
821	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-12-01 11:04:00	2025-12-01 11:14:00
832	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-12-01 11:04:00	2025-12-01 11:14:00
834	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning, sign	attached signs for OLDIR and OLMD2 to ensure these will not be cleaned. However signs do not stick sufficiently due to size; thermophile pyranometer SPN1-A2174 wobbles; crosschecked installed silicon pyranometer serial number on OLWIN: S10948469	redacted	use proper cut out warning stickers deposit in forward roof cottage instead; solidify and level th. pyranometer	2025-12-19 12:25:00	2025-12-19 12:40:00
835	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-12-22 08:06:00	2025-12-22 08:16:00
836	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2025-12-30 07:55:00	2025-12-30 08:05:00
837	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2026-01-07 08:12:00	2026-01-07 08:22:00
838	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2026-01-16 12:36:00	2026-01-16 12:46:00
840	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2026-01-19 11:51:00	2026-01-19 12:01:00
841	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2026-01-30 07:16:00	2026-01-30 07:26:00
842	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning	serious icing of some sensors, medusa iced	redacted		2026-02-05 08:28:00	2026-02-05 08:38:00
843	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	photos		redacted		2026-02-05 08:29:00	2026-02-05 08:39:00
845	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning	serious icing of some sensors	redacted		2026-02-13 08:21:00	2026-02-13 08:31:00
848	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2026-02-20 10:41:00	2026-02-20 10:51:00
856	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning	medusa does not spray	redacted		2026-02-27 12:44:00	2026-02-27 12:54:00
857	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning		redacted		2026-03-04 12:09:00	2026-03-04 12:25:00
858	OLWIN	repair	newly calibrated pyrheliometer installed	redacted		2026-03-04 12:09:00	2026-03-04 12:25:00
859	OLWIN	repair	ref H and T Sensor changed	redacted		2026-03-04 12:09:00	2026-03-04 12:25:00
860	OLWIN	Update	Serialnumber pyrheliometer P15055, new calibration constant, redirected	redacted		2026-03-04 13:08:00	2026-03-04 13:18:00
863	OLWIN	note		redacted	change silicon pyranometer, fix temp-humidity sensor	2026-03-05 14:26:00	2026-03-05 14:36:00

Abbildung D.2: Logbucheinträge von OLWIN aus 2025

index	Station	Tag	Report	Who	TODO	Datetime	Datetime_end
382	OLUOL	Datalogger	sent new program with new calibration values from calibration of 2021: PU:	reduced		2023-02-01 11:00:00	2023-02-01 11:00:00
386	OLWN,OLCAL,OLUOL,OLM59,OLEXP	Cleaning, Datalogger, PU	Cleaning of camera and sensors, new driving agent for all sensors, filter mat for camera, OLCAL, new pyranometer unit: 17.001.0009, PV1: P90722, PV2: P90723, new program. Checked installation Hamover camera, grounding all stations, Connection other cameras, vhs, prope cable alignment, cleaning.	reduced		2023-02-27 09:00:00	2023-02-27 11:00:00
505	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	Installation, cleaning	Installation, cleaning	reduced		2023-10-16 07:15:00	2023-10-16 14:30:00
510	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	cleaning, cam alignment	cleaning, cam alignment	reduced		2023-11-09 09:17:00	2023-11-09 09:32:00
516	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	cleaning	all sensors and the new camera setup condensation water in hamover camera detected	reduced		2023-11-15 11:07:00	2023-11-15 11:11:00
517	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	cleaning, installation, Ca	cleaning, installation of medusa system, fortification of mounting, orientation, exchange of	reduced			
528	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	cleaning	Camera OLRD for new camera Q25 SN:10.21.30.185	reduced		2023-11-22 09:00:00	2023-11-22 16:00:00
538	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	cleaning	cleaning after heavy snow fall	reduced		2023-12-06 08:29:00	2023-12-06 08:32:00
561	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	cleaning	hint sticker on Q71A fallen off	reduced		2023-12-29 10:42:00	2023-12-29 10:47:00
561	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	maintenance, cleaning, media	cleaned TH sensors, cleaned Rain sensor, pyrheliometer checked alignment, well aligned, all pyranometers well aligned and realigned, silicon pyranometer not aligned and realigned; base plate started to crack, drying agent exchanged in all Kipp and conen pyranometers and eko dirt on lens from sahara dust, event	reduced	broke screw of eko m80 dhi sensor, pyranometer 180/60 loose, rebuy eko mb3 silicon	2024-04-10 07:15:00	2024-04-10 10:00:00
562	OLUOL	photo	photo	reduced		2024-04-10 07:38:00	2024-04-10 07:48:00
573	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	cleaning, dust on heliometer MS57	cleaning, dust on heliometer MS57	reduced		2024-05-08 09:22:00	2024-05-08 09:32:00
582	OLWN,OLUOL,OLCAL,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLHANO	cleaning	disturbances due to student group excursion	reduced		2024-05-30 11:28:00	2024-05-30 11:32:00
583	OLUOL	photo	photo of station due to invalid data points	reduced		2024-06-03 11:51:00	2024-06-03 11:55:00
620	OLUOL	maintenance	pin value fixed by replacing temperature sensor, Tado: replacing cable ties	reduced		2024-06-30 12:00:00	2024-06-30 12:15:00
626	OLUOL	maintenance	photos of new temperature sensor	reduced		2024-06-09 12:58:00	2024-06-09 13:08:00
630	OLUOL	note	photos of new temperature sensor	reduced		2024-09-13 15:29:00	2024-09-13 15:39:00
637	OLUOL,OLMED,OLQ71	soiling	soiling	reduced		2024-09-27 09:44:00	2024-09-27 09:54:00
639	OLUOL,OLQ71	soiling	soiling	reduced		2024-09-27 09:44:00	2024-09-27 09:54:00
675	OLUOL	CamAlignment	CamAlignment	reduced		2024-09-30 12:36:00	2024-09-30 12:46:00
705	OLUOL	Camera	Camera	reduced		2025-02-07 12:35:00	2025-02-07 12:40:00
710	OLWN,OLUOL,OLEXP,OLCAL	router	router	reduced	new config files	2025-03-27 16:08:00	2025-03-27 16:18:00
725	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning	outlet tried to exchange lens, probably destroyed the optics like that. Check picture after that changed wireguard setting, might have bricked the router, does not come back online after	reduced	check locally	2025-05-05 14:15:00	2025-05-05 14:15:00
745	OLUOL	Camera, installation	Camera Exchange as old camera had lens issues. New camera SN: 10.21.45.382 type Q25-6WP	reduced		2025-06-26 11:27:00	2025-06-26 11:37:00
746	OLUOL	camera	camera exchange	reduced		2025-06-26 11:29:00	2025-06-26 11:39:00
824	OLUOL	photo	dry lens	reduced		2025-11-21 12:58:00	2025-11-21 12:58:00
834	OLUOL	photo	attached signs for OLRD and OLMED to ensure these will not be cleaned. However signs do not stick sufficiently due to size. Reamorphic pyranometer SPN1-621.74 wobbles, crosschecked	reduced	use proper cut out warning stickers, deposit in forward not contact instead, solidify and level th. pyranometer	2025-12-19 12:25:00	2025-12-19 12:40:00
842	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning, sign	installed silicon pyranometer serial number on OLWIN S1094869	reduced		2026-02-09 08:28:00	2026-02-09 08:38:00
845	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning	serious idling of some sensors, medusa led	reduced		2026-02-13 08:21:00	2026-02-13 08:31:00
845	OLCAL,OLCLE,OLEXP,OLM59,OLQ71,OLUOL,OLWIN	cleaning	serious idling of some sensors	reduced		2026-02-13 08:21:00	2026-02-13 08:31:00

Abbildung D.3: Logbucheinträge von OLUOL aus 2023 bis 2025

Index	Station	Tag	Report	Who	TODO	Datetime	Datetime_end
176			Cleaned camera and all sensors; exchanged pyranometer unit and both Licor pyranometer measuring PDA/GTI; new sensors: Pyranometer unit: Licor Li190R, before: 90694 Py2: before: 80741, after: 9095 Py3: U-200R; before: 106493; after: 110737 Py4: U-150R Quantum; before: 108071; after: 111813	redacted		2020-10-30 09:30:00	2020-10-30 10:15:00
224	OLCLO	Recalibration, Pyranometers, Cleaning,	Cleaning of camera and all sensors; exchanged router, wrote down Serial numbers of all sensors; New alignment of camera and GTI sensors 30.3° PVR Nord 90694 PVR South 90695 Licor Li190R; before: 111813 GTI Pvr; 110737 P1: Tisch CSP4 MS 16.001.0014 New datalogger program with new calibration constants	redacted redacted		2021-04-16 07:18:00 2021-05-17 13:44:00	2021-04-16 21:59:00 2021-05-17 21:59:00
236	OLCLO	Cleaning, Router, CamAlignment, Station	Installation of new router. Cleaning of camera. Sensors misaligned but no new leveling performed. Everything worked fine. Router SN: 1115624318 Batch No.: 107	redacted		2022-01-19 12:10:00	2022-01-19 12:40:00
270	OLCLO	Router, Cleaning, Maintenance	Thermostat temperature was set to 5°C	redacted		2022-01-26 23:00:00	2022-01-27 22:59:00
271	OLCLO/EEER	Router	Connection problems, router restarted automatically due to ping restart	redacted		2022-02-03 07:45:00	2022-02-03 08:40:00
273	OLCLO	Router, Cleaning, Datalogger	Connection of second antenna, restart of router, cleaning of all devices, download and format from SD CARD	redacted		2022-05-16 08:00:00	2022-05-17 13:20:00
311	OLCLO	Datalogger	Weird problem: no datalogger download occurred, the program did not recognize new data on the logger somehow, tried stopping and restarting program, since stop, Datalogger seems to be dead, somehow recovered and works again!	redacted		2022-08-05 08:35:00	2022-08-05 08:42:00
330	OLCLO	Cleaning, CamAlignment, Pyranometer	Cleaning of camera, TH sensor was quite dirty, Cam alignment, Alignment of Pyranometer unit was perfect	redacted		2023-01-19 13:00:00	2023-01-19 13:30:00
376	OLCLO	Cleaning, CamAlignment	Cleaning of camera and sensors, restart router electrically, cam alignment	redacted		2025-06-06 10:00:00	2025-06-06 10:10:00
736	OLCLO	router	upgrade firmware to 7.6.18	redacted		2025-07-23 08:25:00	2025-07-23 10:00:00
757	OLCLO	camalignment/change	Station has been moved by EWE technicians	redacted		2025-07-23 08:25:00	2025-07-23 10:00:00
758	OLCLO	CamAlignment, Change	Station has been moved by EWE technicians	redacted		2025-12-01 12:50:00	2025-12-01 13:30:00
823	OLCLO	alignment, cleaning	alignment of RS1 and AS1	redacted		2025-12-01 13:16:00	2025-12-01 13:26:00
824	OLCLO	sensorupdate, CamAlignment	new pyranometer unit, CSP4 MS 17.001.0014, new sensor calibration in the logger program, new Pressure but in program corrected, recalculation of station, new station coordinate S3.1195557828034, E2.100930746808377, as station was moved due to works on rooftop, new antenna router	redacted		2025-12-01 13:17:00	2025-12-01 13:27:00
825	OLCLO	cleaning	new antenna	redacted		2025-12-01 13:17:00	2025-12-01 13:27:00
826	OLCLO	router	change time to now(), change NTP server to router	redacted		2026-02-24 13:37:00	2026-02-24 13:47:00
827	OLCLO	camera		redacted			

Abbildung D.4: Logbucheinträge von OLCLO aus 2020 bis 2025

Index	Station	Tag	Report	Who	TODO	Datetime	Datetime_end
175	OLDON	Recalibration, Pyranometers, Cleaning,	Cleaned camera and all sensors; exchanged pyranometer unit and the Li-150R. In the Li-200R, one screw could not be undone, which is why sensor could not be exchanged. Dismantled since then.	redacted		2020-10-30 08:00:00	2020-10-30 09:30:00
179			Cleaned all sensors and camera; Installed new sensor Li200 (missing before) SN: 109613 Li90 SN 112229; installed on 30.10.2020 Py1 (north); SN 76625 (installed on 30.10.2020) Py2 (south); SN 87334 (installed on 30.10.2020) PU table; SN: CSPA MS.1.4002.0011				
223	OLDON	Cleaning, Recalibration	Cleaning of camera and all sensors; put in BA; exchanged router; cam alignment still perfect Serial Numbers: PY1 Nord 76625 PY2 Süd 87334 GTI Quantum 112229 GTI Pyr-109613 PU: CSPA MS.1.4002.0011	redacted		2020-12-02 07:00:00	2020-12-02 07:30:00
235	OLDON	Cleaning, Router	New datalogger program with new calibration constants	redacted		2021-04-16 06:10:00	2021-04-16 21:59:00
237	OLDON	Datalogger	Probably RSI (Arm not rotating any more as DH and GH are equal at a high value of >800W/m ² ; exchanged RSI; exchanged cable to RSI, NEW RSI Unit Drive; CSPA DR.17.001.0010; new orientation of Pyranometer unit; +-2° South; read out datalogger card.	redacted		2021-05-17 12:54:00	2021-05-17 21:59:00
245	OLDON	RSI, Repair	cleaning of all sensors	redacted		2021-06-18 10:00:00	2021-08-03 10:30:00
264	OLDON	Cleaning	Installation of new router; Cleaning of camera. Everything worked fine. Router SN: 1112903706 Batch No.: 103	redacted		2021-08-03 09:00:00	2021-08-03 10:30:00
335	OLDON	Router, Cleaning		redacted		2021-12-07 07:50:00	2021-12-07 08:03:00
599	OLDON	Cleaning, CamAlignment, Pyranometers	Cleaning of camera, Cam alignment, relieving of pyranometer unit; GTI sensors still on good angle (30°)	redacted		2022-08-08 06:30:00	2022-08-08 06:45:00
726	OLDON	cleaning		redacted		2024-06-20 07:38:00	2024-06-20 07:48:00
727	OLDON	recalibration, cleaning	exchanged with new PU MS.17.001.0013; py1 90730, py2 90731, py3 PY106498 pyrak: Q108073; wrote new datalogger program; took out normpressure bag; cleaning, cleaned tin sensor, new fence around rooftop	redacted		2025-05-09 09:54:00	2025-05-09 10:04:00
728	OLDON	recalibration, photos		redacted		2025-05-09 10:08:00	2025-05-09 10:10:00

Abbildung D.5: Logbucheinträge von OLDON aus 2020 bis 2025

Index	Station	Tag	Report	Who	TODO	Datetime	Datetime_end
601	OLENQ	Installation	Installation of hardware for energy station, wind net Mast missing	redacted	fuse from perik etc, orientation, 50mm ² per cable, install wind sensor, install router, switch on medusa	2024-06-28 14:10:00	2024-06-28 14:20:00
602	OLENQ	note		redacted		2024-06-28 14:12:00	2024-06-28 14:22:00
609	OLENQ	commissioning	Activation of ASI after bad ethernet cable connection	redacted	ketterschuss, schein, kabelbinder	2024-07-16 07:15:00	2024-07-16 08:00:00
611	OLENQ	installation	mounting of new pole for anemometer	redacted		2024-07-23 08:00:00	2024-07-23 08:45:00
627	OLENQ	installation	installation of lightning rods next to the meteor station components	redacted		2024-09-06 09:45:00	2024-09-06 10:00:00
631	OLENQ	worksafety	vertical distance for ladder 4,60m	redacted		2024-09-16 12:44:00	2024-09-16 12:54:00
632	OLENQ	4,1050m	vertical distance for ladder 4,60m	redacted		2024-09-16 12:44:00	2024-09-16 12:54:00
645	OLENQ	installation,photos		redacted		2024-11-04 22:45:00	2024-11-04 22:59:00
647	OLENQ	Installation	Wind Sensor this compact 2d, orientated north and tried to program data logger with the correct program.	redacted		2024-11-05 11:00:00	2024-11-05 15:00:00
648	OLENQ	Installation	Wind sensor mounted and orientated north	redacted		2024-11-05 13:41:00	2024-11-05 13:51:00
649	OLENQ	troubleshooting,windensor	troubleshooting communication to anemometer	redacted		2024-11-06 08:00:00	2024-11-06 09:45:00
651	OLENQ	Installation	installation wind sensor, reorientation, programming data logger and wind sensor to modbus configuration sensor lost its config after restart, now it is saved, heating switched off	redacted		2024-11-11 11:00:00	2024-11-11 15:40:00
669	OLENQ	logger restart, logger sd card formatted, logger ping activated, cleaning sensors, refill medusa		redacted		2025-01-31 11:19:00	2025-01-31 11:29:00
697	OLENQ	tank with anti-freezing liquid		redacted		2025-03-24 09:55:00	2025-03-24 10:05:00
716	OLENQ	cleaning, safety	cleaning, installation and test of ladder	redacted		2025-04-17 16:12:00	2025-04-17 16:22:00
801	OLENQ	cleaning	visit with mats and other est colleague	redacted	refill antilite	2025-10-23 07:16:00	2025-10-23 07:26:00
826	OLENQ	Sensors photos, cleaning, fuse		redacted		2025-12-03 11:45:00	2025-12-03 13:00:00
827	OLENQ	sensor updates	new pu serial number ms.17.001.0011, new datalogger program, refill medusa, reorient PU, cleaning, replaced 4A fuse	redacted		2025-12-03 12:25:00	2025-12-03 12:35:00
833	OLENQ	windspeed,datalogger	change datalogger program as between 30.9.2025 and 12.12.2025 windspeed data was not recorded on OLENG due to programming error	redacted		2025-12-12 14:20:00	2025-12-12 14:30:00
847	OLENQ	cleaning, router	cleaning, medusa water tank full, exchange simcard to Vodafone, did not work, sim card issue? take home router.	redacted		2026-02-19 12:30:00	2026-02-19 14:00:00
850	OLENQ	router	Vodafone simcard successfully installed	redacted		2026-02-20 11:09:00	2026-02-20 11:19:00

Abbildung D.6: Logbucheinträge von OLENG aus 2020 bis 2025

E Anhang: Sonstiges

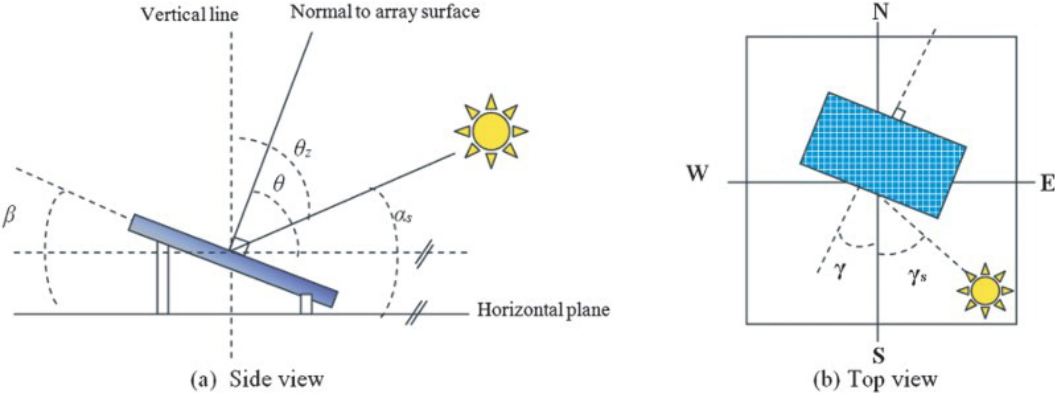


Abbildung E.1: Solare Einstrahlungswinkel auf ein PV-Modul; $\gamma_n = \gamma_s + 180^\circ$; [10]

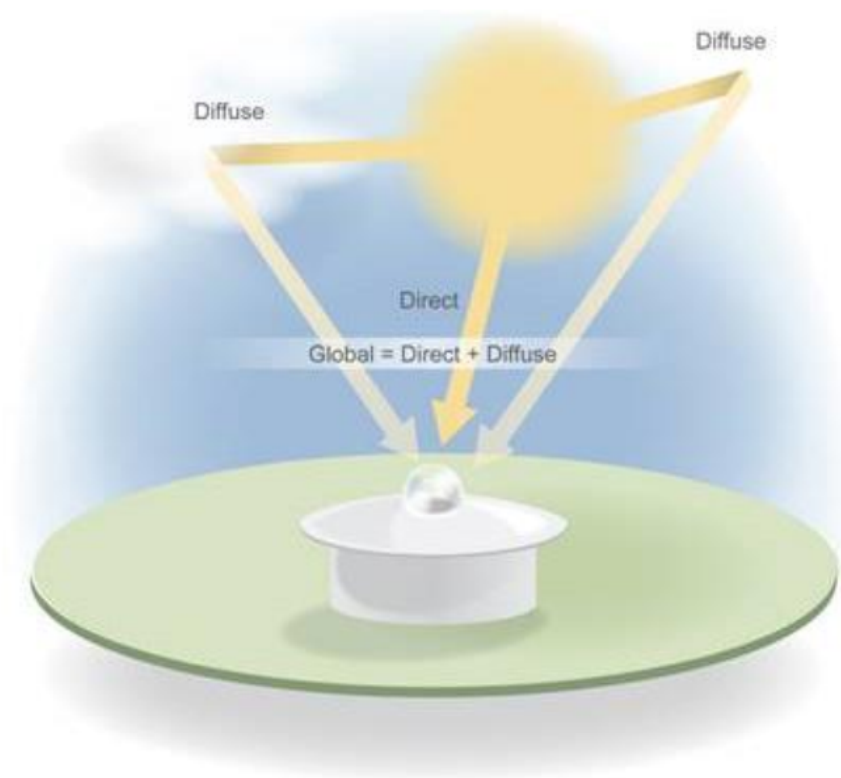


Abbildung E.2: Komponenten der globalen Sonneneinstrahlung [26]

CERTIFICATE of CALIBRATION for LI-COR SENSOR

Pyranometer
Model Number: LI-200/R

Serial Number: **PY109613**

Calibration Date: **June 27, 2019**
Manufacture Date: **June 27, 2019**

Calibration Constant:

Output: 71.71 microamps per 1000 watts m⁻²

For use with LI-COR handheld meters and loggers:

Multiplier: -13.95 watts m⁻² per microamp

If this is an LI-200R-BL (3-wire bare leads):

Multiplier: 13.95 watts m⁻² per microamp

For use with LI-COR 2220 (147 ohm) Millivolt Adapter:

Multiplier: -94.87 watts m⁻² per millivolt

If this is an SL or SMV sensor:

Multiplier: -100.0 watts m⁻² per millivolt

IMPORTANT: Read the appropriate instruction manual (www.licor.com/200-manual) before using this sensor.
IMPORTANT: It is recommended that sensors be recalibrated every two years after field deployment.

Calibration Technician: Aaron Deschane

Calibrations are traceable to the World Radiometric Reference through Secondary Standard Thermopile radiometers, which are calibrated annually by the National Renewable Energy Laboratory.

LI-COR Biosciences, Global Headquarters • 4647 Superior Street • Lincoln, NE 68504 USA
Phone: +1-402-467-3576 • Fax: +1-402-467-2819 • Toll-free: 800-447-3576 (USA & Canada)
envsales@licor.com • envsupport@licor.com • www.licor.com
Manual: www.licor.com/200-manual

Abbildung E.3: Beispiel Kalibrierzertifikat eines LI-200R

Deutscher Wetterdienst
 GB Forschung und Entwicklung
 Meteorologisches Observatorium
 Lindenberg
 Richard-Aßmann-Observatorium



PRÜFSCHEIN

Gegenstand <i>Object</i>	Bestimmung der Empfindlichkeit eines Pyranometers
Hersteller <i>Manufacturer</i>	EKO Instruments
Typ <i>Type</i>	MS80
Fabrikat/Serien-Nr <i>Serial number</i>	S18108021
Auftraggeber <i>Customer</i>	DLR Institut für vernetzte Energiesysteme / Energiesystemanalyse z.Hd. Jonas Stührenberg Carl von-Ossietzky-Straße 15 26129 Oldenburg
Auftragsnummer: <i>Order no.</i>	2025/20/03
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	20.05.2025; 30.05.2025; 01.07.2025; 02.07.2025
Kalibrierverfahren <i>Procedures/Conditions</i>	Kalibrierverfahren: Vergleich des belüfteten Pyranometers nach ISO 9846 ("Continuous sun-and-shade" Methode) bei wolkenlosen Bedingungen mit der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung als Quelle. Die direkte Sonnenstrahlung wurde mit den Absolut-Pyrheliometern PMO6-5 und PMO6-0405 gemessen (WRR-Faktor PMO6-5: 0.999562, IPC-XIII, 2021; WRR-Faktor PMO6-0405: 0.999130, IPC-XIII, 2021). Die diffuse Himmelsstrahlung wurde als Mittelwert der zwei abgeschatteten und mit leicht erwärmter Luft belüfteten Standard-Pyranometer CMP22 130495 (Kalibrierfaktor: 8.73 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^2)$, DWD, 30.9.2022) und CMP22 140105 (Kalibrierfaktor: 8.71 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^2)$, DWD, 20.7.2022) des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg ermittelt. Die Sensoroberflächen der Pyranometer wurden horizontal ausgerichtet.

- Fortsetzung Seite 2 -



www.dwd.de
 Dienstgebäude: Am Observatorium 12 - 15848 Tausche OT Lindenberg - Tel. 069 / 8062-5800
 Konto: Bundeskasse Trier – Deutsche Bundesbank Saarbrücken – IBAN: DE81 5900 0000 0059 0010 20, BIC: MARKDEF1590
 Der Deutsche Wetterdienst ist eine rechtsfähige Anstalt des öffentlichen Rechts im Geschäftsbereich
 des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)
Das Qualitätsmanagement des DWD ist zertifiziert nach DIN ISO 9001:2015 (Reg.-Nr. 10700719 QM)



Abbildung E.4: Prüfschein des Referenzpyranometer MS80: GHI Messungen

Deutscher Wetterdienst
GB Forschung und Entwicklung
Meteorologisches Observatorium
Lindenberg
Richard-Aßmann-Observatorium

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



PRÜFSCHHEIN

Gegenstand <i>Object</i>	Bestimmung der Empfindlichkeit eines Pyranometers
Hersteller <i>Manufacturer</i>	EKO Instruments
Typ <i>Type</i>	MS80
Fabrikat/Serien-Nr <i>Serial number</i>	S17096023
Auftraggeber <i>Customer</i>	DLR Institut für vernetzte Energiesysteme / Energiesystemanalyse z.Hd. Jonas Stührenberg Carl von-Ossietzky-Straße 15 26129 Oldenburg
Auftragsnummer: <i>Order no.</i>	2025/20/02
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	20.05.2025; 30.05.2025; 01.07.2025; 02.07.2025
Kalibrierverfahren <i>Procedures/Conditions</i>	Kalibrierverfahren: Vergleich des belüfteten Pyranometers nach ISO 9846 ("Continuous sun-and-shade" Methode) bei wolkenlosen Bedingungen mit der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung als Quelle. Die direkte Sonnenstrahlung wurde mit den Absolut-Pyrheliometern PMO6-5 und PMO6-0405 gemessen (WRR-Faktor PMO6-5: 0.999562, IPC-XIII, 2021; WRR-Faktor PMO6-0405: 0.999130, IPC-XIII, 2021). Die diffuse Himmelsstrahlung wurde als Mittelwert der zwei abgeschatteten und mit leicht erwärmter Luft belüfteten Standard-Pyranometer CMP22 130495 (Kalibrierfaktor: 8.73 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^2)$, DWD, 30.9.2022) und CMP22 140105 (Kalibrierfaktor: 8.71 $\mu\text{V}/(\text{Wm}^2)$, DWD, 20.7.2022) des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg ermittelt. Die Sensoroberflächen der Pyranometer wurden horizontal ausgerichtet.

- Fortsetzung Seite 2 -



www.dwd.de
Dienstgebäude: Am Observatorium 12 - 15848 Tausche OT Lindenberg - Tel. 069 / 8062-5800
Konto: Bundeskasse Trier - Deutsche Bundesbank Saarbrücken - IBAN: DE81 5900 0000 0059 0010 20, BIC: MARKDEF1590
Der Deutsche Wetterdienst ist eine teilrechtsfähige Anstalt des öffentlichen Rechts im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)
Das Qualitätsmanagement des DWD ist zertifiziert nach DIN ISO 9001:2015 (Reg.-Nr. 10700719 QM)



Abbildung E.5: Prüfschein des Referenzpyranometers MS80: DHI Messugen



EKO INSTRUMENTS CO.,LTD.
 1-21-8 Hatagaya, Shibuya-ku,
 Tokyo 151-0072 Japan
 P. +81.3.3469.6713
 F. +81.3.3469.6719
 www.eko.co.jp

Calibration Certificate

Requester: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
 Cari-von-Ossietzky-Str. 15, 26129 Oldenburg, Germany

ISO/IEC 17025:2017



Manufacturer : EKO Instruments Co., Ltd.
 Description : Pyrheliometer
 Model : MS-56
 ISO Classification: Class B
 Serial Number : P15055
 Accessories:
 Product Conditions : Adjustment
 Calibration Conditions

Certificate Number : P15055-EX25-495
 Issue date: November 27, 2025
 Calibration Date : November 22, 2025
 Calibration Procedure: LM-10

Ambient Temperature	17	[°C]	(Average)
Direct Normal Irradiance	920.06	[W·m ⁻²]	(Average)

Calibration Results

Sensitivity	8.368	[μV/W·m ⁻²]	
Uncertainty	0.61	[%]	(Coverage factor $k = 1.96$)
Sensitivity deviation	0.63	[%]	(Based on the shipment time)

The product is calibrated by side-by-side comparison with the reference pyrheliometer in compliance with ISO/IEC9059. The uncertainty of calibration is calibrated according to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).

Reference Instruments	Model	S/N	Calibration due
Pyrheliometer	MS-57	S20060.01	2025/12/18
Data Acquisition System	CR1000X	19119	2026/2/26

EKO Instruments Co., Ltd.
 1-21-8, Hatagaya, Shibuya-ku, Tokyo, 151-0072, Japan
 Director / Quality Assurance

Abbildung E.6: Prüfschein des Referenzpyrheliometers MS56: DNI Messungen

