



Repräsentativität von Einstrahlungsinformationen in nextGEMS und Wolkenkammerbeobachtungen

Maximilian Schellhorn

24.05.2024

Erstprüfer: **Prof. Dr. Gunther Seckmeyer**
Institut : Institut für Meteorologie und Klimatologie
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Zweitprüfer: **Dr. Thomas Schmidt**
Institut : Institut für Vernetzte Energiesysteme
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Zusammenfassung

Durch die geplante Umstellung von fossilen zu erneuerbaren Energien steigt die Anzahl der installierten Photovoltaik Anlagen in vielen Ländern deutlich an. Dieser anhaltende weltweite Anstieg der installierten Photovoltaik Anlagen lenkt die Aufmerksamkeit auf die wetterbedingte Variabilität ihrer Produktion. Das Verständnis der zugrunde liegenden raum-zeitlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung ist entscheidend für die erfolgreiche Planung und den stabilen Betrieb zukünftiger Stromnetze [Lohmann, 2018].

Dabei liefern Strahlungsvorhersagen auf der Basis von Wolkenkamerabildern, durch eine feine Auflösung, detaillierte Wolken- und Strahlungsinformationen. Diese Auflösung kann in bisherigen Klimamodellen nicht erreicht werden. Die neuen sturmauflösenden-Erdsystemmodelle von nextGEMS, welche ein feineres Gitter verwenden, ermöglichen es nun wesentliche Klimaprozesse, wie z.B. Stürme, die von bestehenden Klimamodellen entweder nicht erfasst oder nur empirisch repräsentiert werden, explizit darzustellen [nextGEMS].

In dieser Arbeit wurde überprüft, wie repräsentativ die Einstrahlungsinformationen eines ICON Laufs von nextGEMS, mit einer Gitterweite von 5000 Metern, im Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen basierend auf den Daten des Kameranetzwerks „Eye2Sky“ des DLR in Oldenburg, sind. Mit Eye2Sky sind kurzfristige Strahlungsvorhersagen für ein Untersuchungsgebiet der Größe 40 x 40 km in Oldenburg, mit einer räumlichen Auflösung von ungefähr 50 m möglich. Ebenso wurden im späteren Verlauf das hemispherical Sky imager System des Instituts für Meteorologie und Klimatologie in Hannover mit integrierter Canon EOS 750D Kamera, mit einer einzelnen Kamera des Eye2Sky Netzwerks (Mobotix Q25 6MP) hinsichtlich der unterschiedlichen Auflösungen verglichen. Es wurde überprüft, ob der am IMuK entwickelte Algorithmus zur Wolkenklassifizierung von hochaufgelösten Kamerabildern profitiert.

Die Analyse der Variabilität in Eye2Sky zeigt deutlich den Einfluss der räumlichen Mittelung, mit einer Reduktion des Variabilitätsindex, von maximal 300 bei Originalauflösung von 50 Metern, auf maximal 50 bei 5000 Metern.

Für den ICON Lauf aus nextGEMS, mit einer nativen Auflösung von 5000 m, liegt die Spanne der Variabilitätsindizes zwischen 1 und 27. Die Tagesmittelwerte der Variabilitätsindizes im Jahr 2022 für nextGEMS liegen zwischen 1 und 12 in einer ähnlichen Größenordnung wie die Variabilitätsindizes von Eye2Sky zwischen 1 und 14, bei gleicher räumlicher Auflösung von 5000 Metern. Homogene Strahlungsverhältnisse in Eye2Sky werden häufig mit einem Variabilitätsindex von 1 beschrieben. Die Differenzierung unter variablen Bedingungen ist in Eye2Sky ausgeprägter, was sich durch die breitere Verteilung der Indizes bei gleicher räumlicher Auflösung zeigt. Die berechnete mittlere Bestrahlungsstärke in den Produkten der beiden Vorhersagemethoden, ist von der räumlichen Mittelung nahezu unabhängig.

Die projizierte GHI von Eye2Sky weicht im Mittel um 3.7% und maximal 10.7% im Dezember von der mittleren, der zu Eye2Sky zugehörigen Messstationen, gemessenen Bestrahlungsstärke ab und zeigt damit eine gute Korrelation für das Jahr 2022. Die durch den ICON Lauf projizierte GHI überschätzt die tatsächlich gemessene Bestrahlungsstärke größtenteils und weicht im Mittel um 12.3% und maximal mit 31.5% im März davon ab. Der Vergleich von Eye2Sky und dem ICON Lauf von nextGEMS zeigt, dass bei vergleichbarer Auflösung von 5000 m, durch die ursprünglich feinere Auflösung des Kameranetzwerks, mehr Variabilität in den Produkten von Eye2Sky steckt.

Der Vergleich der Mobotix Q25 6MP und der Canon EOS 750D zeigte bei der Klassifizierung der Wolken mithilfe eines Algorithmus vom Institut für Meteorologie und Klimatologie in Hannover detaillierte Wolkenstrukturen für die Aufnahmen beider Kamerateypen. Die Auswertung anhand

eines Fallbeispiels vom 17.11.2023 um 13:27 UTC deutet darauf hin, dass für eine detaillierte Erfassung der Wolken nicht nur die Auflösung, sondern auch der verwendete Algorithmus von Bedeutung ist. An diesem Fallbeispiel konnte gezeigt werden, dass auch mit einer geringeren Auflösung und einem angepassten Algorithmus, sowie angepasster Helligkeit, feine Wolkenstrukturen erkannt werden konnten. Um detaillierte Aussagen hierüber treffen zu können, sind weiterführende statistische Untersuchungen notwendig.

Die Variabilitätsanalyse unterstreicht die Bedeutung einer feinen Auflösung zur Erkennung von durch Wolken induzierten kleinskaligen Strahlungsgradienten und zeigt die Vorteile einer kamerabasierten Strahlungsvorhersage.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1 Einführung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Variabilität	4
Variabilitätsindex	5
2.2 Eye2sky	8
Kameranetzwerk	8
Wolkenbasiertes Kamerasystem	10
2.3 nextGEMS	12
Aufbau	14
ICON	14
2.4 Hemispherical Sky imager	15
2.5 Algorithmus	16
3 Methodik	18
3.1 Datengrundlage	18
3.2 Datenaufbereitung	18
4 Analyse	22
4.1 Variabilität in Eye2Sky	22
4.2 Variabilität in nextGEMS	29
4.3 Vergleich Eye2Sky mit nextGEMS	34
4.4 Vergleich der absoluten GHI mit Bodenmessungen	39
4.5 Vergleich der Kamertypen	41
5 Fazit	45
6 Ausblick	47

Abkürzung	Bedeutung
ASI	Allsky image
CS	Clear Sky
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
GHI	Globale horizontale Bestrahlungsstärke
HSI	Hemispherical Sky imager
ICON	Icosahedral Nonhydrostatic model
IFS	Integrated Forecasting System
IMuK	Institut für Meteorologie und Klimatologie
nextGEMS	next Generation Earth-system Models
OC	Overcast
VI	Variabilitätsindex

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispiele für VI Stein	6
2.2	Scatterplot VI Clear-Sky Index und Messdaten	7
2.3	Eye2Sky Messnetzwerk	9
2.4	Überblick der Kamerabilder und Messinstrumente	10
2.5	GHI bei klarem Himmel	11
2.6	GHI bei bedecktem Himmel	11
2.7	GHI bei durchbrochener Bewölkung	11
2.8	nextGEMS Entwicklung & Anwendung	13
2.9	Healpix Struktur und Beispiel eines nextGEMS Lauf	15
2.10	Hemispherical Sky imager System	16
3.1	Zeitliche Mittelung GHI	19
3.2	GHI von Eye2Sky und nextGEMS bei unterschiedlicher Auflösung	20
4.1	ASI 02.07.2022	23
4.2	VI 07.02.022 Eye2Sky	24
4.3	VI 07.2022 Eye2Sky	26
4.4	kumulative Häufigkeit des VI Eye2Sky	28
4.5	VI 02.07.2022 nextGEMS	30
4.6	VI 07.2022 nextGEMS	32
4.7	Kumulative Häufigkeit VI nextGEMS	33
4.8	VI 2022 monatlich gemittelt	35
4.9	Scatterplot VI 5000 m	36
4.10	Kumulative Häufigkeit VI 2022	37
4.11	Häufigkeit VI 2022	38
4.12	GHI 2022 monatliches Mittel	40
4.13	HSI CC ASI 17.11.23 13:27 UTC	42
4.14	CC ASI 17.11.23 13:27 UTC	43
4.15	CC ASI 17.11.23 13:27 UTC nach Tonwertkorrektur	44

Tabellenverzeichnis

4.1	Mittel- und Maximalwerte des VI und GHI vom 02.07.2022	25
4.2	Mittel- und Maximalwerte des VI und GHI im Juli 2022	27
4.3	Mittel- und Maximalwerte VI nextGEMS 02.07.2022	30
4.4	Mittel- und Maximalwerte VI nextGEMS 07.2022	31
4.5	monatliche Mittel- und Maximalwerte der gemessenen GHI	39

Kapitel 1

Einführung

Eines der Haupthindernisse für eine höhere Marktdurchdringung und Netzanbindung von Solar- und Windenergietechnologien, liegt in der Variabilität dieser Ressourcen [Marquez and Coimbra, 2013]. Die am Boden eintreffende Solarstrahlung ist durch eine räumlich als auch zeitlich hohe Variabilität gekennzeichnet. Diese wird verursacht durch die Geometrie der Sonne und den daraus resultierenden saisonalen und täglichen extraterrestrischen Zyklen. Hinzu kommen Schwankungen durch Wasserdampf, Aerosole und Treibhausgase [Schroedter-Homscheidt et al., 2018]. Studien über die Auswirkungen einer höheren Marktdurchdringung von erneuerbaren Energien betonen die Notwendigkeit genauer Prognosen, wenn große variable Kapazitäten erreicht werden sollen [Marquez and Coimbra, 2013]. Die genaue Prognose der Sonneneinstrahlung wird für die Planung und den Betrieb von Photovoltaikanlagen immer bedeutsamer, da eine präzise Vorhersage es ermöglicht den Energieertrag dieser Anlagen zu maximieren und gleichzeitig die Kosten zu senken. Der derzeitige Stand der Technik in Bezug auf die Möglichkeiten der Strahlungsvorhersage ist sehr stark auf die ältere Generation von Wettersatelliten ausgerichtet, die sowohl in der zeitlichen als auch in der räumlichen Auflösung der gelieferten Bilder (typischerweise 30 Minuten bis 1 Stunde) variieren [Bright et al., 2018]. Klimamodelle sind durch ihre grobe Auflösung von mehreren Kilometern nicht in der Lage kleinskalige Bewölkung darzustellen, da diese oftmals eine geringe horizontale Ausdehnung haben und damit vom Modell nicht repräsentiert werden können. Die kleinskalige durchbrochene Bewölkung ist wiederum hinsichtlich der Strahlungsprognose für PV-Anlagen von großem Interesse, da in diesen Situationen die Verteilung der Bestrahlungsstärke stark variieren kann und durch Wolkenränder Strahlungsüberhöhungen entstehen können.

Um präzise die Effekte von kleinskaliger Bewölkung auf die Strahlung zu repräsentieren, ist eine feine Auflösung nötig, welche durch kamerabasierte kurzfristige Strahlungsvorhersagen erreicht werden kann. Die Verwendung von Kameras zur Erfassung von Einstrahlungsinformationen bietet eine vielversprechende Möglichkeit Einstrahlungsprognosen zu erstellen [Blum et al., 2021]. Das Kameranetzwerk Eye2Sky des Instituts für Vernetzte Energiesysteme vom Deutschen Zen-

trum für Luft- und Raumfahrt in Oldenburg, gibt die Möglichkeit kurzfristige Vorhersagen der Strahlung für ein Untersuchungsgebiet von 110 x 100 km, mit dem Fokus auf die Stadt Oldenburg, zu erstellen [Schmidt et al., 2022].

Klimamodelle beziehungsweise Erdsystemmodelle (ESM) sollen langfristige Prozesse und Veränderungen simulieren können. Die Fähigkeit Wolken- und Strahlungsinformationen in realistischer zeitlicher und räumlicher Auflösung abzubilden, ist dabei eine wichtige Eigenschaft. Erdsystemmodelle haben sich im Laufe der Jahre zu komplexen Instrumenten entwickelt, die darauf abzielen, den Fluss von Energie und Materie in den Hauptkomponenten - Ozean, Land, Atmosphäre und Kryosphäre des Erdsystems zu simulieren. Aktuelle Erdsystemmodelle verwenden Gitterabstände von 100 km oder mehr, welche nicht fein genug sind, um die Hauptfaktoren für den Energie- und Materiefluss im Erdsystem explizit aufzulösen [Hohenegger et al., 2023]. Das Projekt nextGEMS (Next Generation Earthsystem Model) befasst sich mit der Entwicklung und Anwendung von hochaufgelösten Klimäläufen, um dieses Problem zu lösen. Bei nextGEMS handelt es sich um ein gemeinschaftliches europäisches Projekt, welches durch das EU-Programm Horizont 2020, finanziert wird. In diesem Projekt soll die Entwicklung der beiden bereits existierenden Modelle ICON (Icosahedral Nonhydrostatic model) vom Deutschen Wetterdienst und des IFS (Integrated Forecasting System) vom ECMWF, gefördert werden. Expertise aus insgesamt vierzehn europäischen Nationen soll dabei helfen, zwei Erdsystemmodelle der nächsten Generation zu entwickeln [nextGEMS]. Das in nextGEMS verwendete ICON Modell bietet eine Darstellung der Komponenten des Erdsystems und ihrer Wechselwirkungen mit einem Gitterabstand von 10 km und feiner [Hohenegger et al., 2023].

Die Herausforderung bei der Vorhersage der solaren Einstrahlung liegt vor allem in der genauen Projektion von wechselhaften und heterogenen Wolkensituationen, also in Situationen mit hoher Variabilität.

Um zu überprüfen wie präzise die Einstrahlungsinformationen dargestellt werden können, soll untersucht werden, wie repräsentativ die Projektion der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke (GHI) von Eye2Sky und einem ICON Lauf von nextGEMS für das Untersuchungsgebiet in Oldenburg mit einer Größe von 40 x 40 km ist.

Außerdem soll ein Vergleich von zwei unterschiedlichen Kamertypen vorgenommen werden, um die Frage zu beantworten, ob die Klassifizierung der Bewölkung aus ASI mithilfe eines Algorithmus, von Kameras mit einer deutlichen feineren Auflösung profitieren könnte. Dafür wurde im Zeitraum vom 31.10.2023 bis zum 31.12.2023 zusätzlich eine Wolkenkamera vom Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK) aus Hannover an einer der Messstationen in Oldenburg installiert.

Zuerst soll der Begriff Variabilität, insbesondere in der Unterscheidung zwischen räumlich und zeitlich, genauer definiert werden (Abschnitt 2.1). Daraufhin wird ein sogenannter Variabilitätsindex eingeführt, der in Folge als Maß für Variabilität gelten soll, bevor das Kameranetzwerk Eye2Sky und das Projekt nextGEMS detailliert vorgestellt werden. Anschließend wird die zeitliche und räumliche Mittelung der beiden Datensätze näher erläutert, die notwendig war um die

beiden Datensätze miteinander vergleichbar zu machen (Kapitel 3). Im ersten Teil der Analyse wird gezeigt, wie stark die Variabilität mit unterschiedlichen Gitterweiten beziehungsweise Auflösungen variiert (Abschnitt 2.1). Anschließend wurde die Variabilität des ICON Laufs und Eye2Sky basierend auf einem Datensatz für das Jahr 2022 verglichen (Abschnitt 4.3). Um die Projektion der GHI von Eye2Sky und dem ICON Lauf aus nextGEMS beurteilen zu können, wurden zusätzlich Bodenmessungen, der zu Eye2Sky dazugehörigen Messstationen, verwendet (Abschnitt 4.4). Abschließend wurden eine Kamera des Eye2Sky-Netzwerkes mit dem hemispherical sky imager System des Instituts für Meteorologie und Klimatologie in Hannover (IMuK) verglichen um den Einfluss einer höheren Auflösung bei der Wolkenklassifizierung zu begutachten (Abschnitt 4.5). Im letzten Teil dieser Arbeit werden die Ergebnisse der Analyse zusammengefasst (Kapitel 5) und Möglichkeiten für zukünftige Untersuchungen präsentiert (Kapitel 6).

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel soll zu Beginn der Einfluss von Wolken auf die solare Einstrahlung dargestellt werden. Die der folgenden Untersuchungen zugrunde liegenden Größen und Gleichungen werden eingeführt und der Begriff Variabilität im Rahmen der Strahlungsuntersuchung soll näher erläutert und für die räumlichen und zeitlichen Dimensionen genauer definiert werden.

2.1 Variabilität

Wolken beeinflussen die auf der Erdoberfläche eintreffende solare Einstrahlung durch Reflektion und Absorption und verringern diese dadurch maßgeblich. Insbesondere durchbrochene Bewölkung hat einen komplexen Einfluss auf die Einstrahlung und kann zu einer stark variierenden Strahlungsverteilung führen. Die vorherrschende Bewölkung variiert stark mit Zeit und Raum [Voigt et al., 2021]. Die Wirkung der Wolken auf die Einstrahlung ist ebenfalls nicht einheitlich. Dichte und Höhe der Wolken, sowie die Position der Sonne, sind Faktoren, die zu starken Variationen in der Einstrahlung führen können. Die Leistung einer kleinen, einzelnen Solarstromanlage kann innerhalb von Sekunden von beinahe voller Leistung zu keiner Leistung schwanken. Folglich ist die kurzfristige Variabilität der Solarressourcen ein Thema von großer Bedeutung für die Solarstromerzeugung in großem Maßstab [Perez et al., 2011].

Variabilität beschreibt im Allgemeinen in der Statistik die Unterschiedlichkeit beziehungsweise die Veränderlichkeit einer bestimmten Größe. Hier soll für die zu untersuchenden Vorhersagemethoden zwischen zeitlicher und räumlicher Variabilität unterschieden werden. Räumliche Variabilität bedeutet in diesem Fall die Änderung der Bestrahlungsstärke zu einem festen Zeitpunkt in einem bestimmten Untersuchungsgebiet. Die Hauptursache für räumliche Variabilität der Bestrahlungsstärke sind Wolken. Je nach Bedeckungsgrad, Wolkenart und deren Verteilung, können kleinskalige aber starke Variationen in der gemessenen Bestrahlungsstärke auftreten.

Mit zeitlicher Variabilität ist in diesem Fall die Änderung der Einstrahlungsinformation an einem Punkt, über einen bestimmten Zeitraum gemeint. Diese wird ebenfalls durch den Bedeckungsgrad

und die Wolkenart beeinflusst, allerdings sind zusätzlich die Änderungen des Sonnenzenitwinkels (SZA) über den Tag, sowie die Zyklen über einen längeren Zeitraum zu beachten. Um ein Maß für die Variabilität der solaren Einstrahlung zu finden und diese quantitativ zu beschreiben, werden im folgenden sogenannte Variabilitätsindizes verwendet. Für die Analyse der Variabilität in Einstrahlungsinformationen werden zwei unterschiedliche Ansätze von [Coimbra et al., 2013] und [Stein and Clifford Hansen, and Matthew J. Reno., 2012] eingeführt. Beide Ansätze zur Berechnung werden im folgenden in ihrer ursprünglichen Definition vorgestellt und die Adaption des Vorgehens für die Untersuchung des Modells und des Kameranetzwerks detailliert erläutert.

Variabilitätsindex

Um die kurzfristige Variabilität der Strahlung für mehrere Photovoltaikanlagen zu beschreiben, haben [Coimbra et al., 2013] ein Modell entwickelt. Dieses beschreibt die Variabilität anhand der zeit- und ortsspezifischen Informationen für einen Ort, aus stündlichen von Satelliten abgeleiteten Einstrahlungsdaten. Es werden normalisierte Indizes verwendet, da diese den Vorteil bieten, die meisten Effekte, welche durch die Sonnengeometrie verursacht werden, zu eliminieren. [Perez et al., 2011]

$$k_c = \frac{GHI}{GHI_{clear}} \quad (2.1)$$

[Coimbra et al., 2013] definieren einen Variabilitätsindex V (Gleichung 2.2) als die Standardabweichung der zeitlichen Unterschiede von k_c in einem Zeitintervall Δt . k_c ist der Clear-Sky Index (Gleichung 2.1), der sich aus dem Quotienten der gemessenen Bestrahlungsstärke und der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel zusammensetzt [Perez et al., 2011]. Dies ist ein Index in einer Größenordnung zwischen 0 und 1, welcher Auskunft über den Bedeckungsgrad gibt. Ein Wert von 1 steht dabei für einen klaren wolkenlosen Himmel, während ein Wert von 0 für einen komplett bedeckten Himmel steht. GHI_{clear} stellt die globale Sonneneinstrahlung für die betrachtete Stunde an dem gewählten Standort bei klarem Himmel dar. Hier werden die Werte für GHI_{clear} nach [Dumortier, 1995] berechnet.

$$V = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\Delta k_c)^2} \quad (2.2)$$

Dieser Index ist dimensionslos und je variabler die vorherrschende Situation ist, desto größer ist der Wert.

[Stein and Clifford Hansen, and Matthew J. Reno., 2012] haben einen einfachen, aber neuartigen Ansatz zur Quantifizierung der Variabilität der Bestrahlungsstärke über verschiedene Zeitskalen entwickelt und bewertet. Der Ansatz beinhaltet, ähnlich wie bei [Coimbra et al., 2013], den Vergleich zwischen gemessener Bestrahlungsstärke und einer Referenz, Bestrahlungsstärke

bei klarem Himmel, die ebenfalls nach [Dumortier, 1995] berechnet wurde.

Einfach gesagt, ist dieser Index definiert als das Verhältnis der „Länge“ der gemessenen Bestrahlungsstärke mit der Zeit, geteilt durch die „Länge“ der Bestrahlungsstärke unter freiem Himmel mit der Zeit. Für einen klaren Tag, unter der Annahme, dass das Clear-Sky Model perfekt mit den Messungen übereinstimmt, läge der VI bei 1, da die Summe der absoluten Gradienten der GHI gleich der Zahl der absoluten Gradienten der Clear-Sky GHI entspräche. Der VI ist damit ein Wert, der repräsentativ für die Variabilität in der solaren Einstrahlung steht. Da Wolken der stärkste Faktor für Variabilität sind, liefert der Variabilitätsindex ebenfalls indirekt Informationen über die Variabilität der Bewölkung in diesem Zeitraum. Für ein bestimmtes Zeitintervall Δt , wird der Variabilitätsindex wie folgt berechnet.[Stein and Clifford Hansen, and Matthew J. Reno., 2012]

$$VI = \frac{\sum_{k=2}^n \sqrt{(GHI_k - GHI_{k-1})^2 + \Delta t^2}}{\sum_{k=2}^n \sqrt{(GHI_{clear,k} - GHI_{clear,k-1})^2 + \Delta t^2}} \quad (2.3)$$

Dabei ist die GHI ein Vektor der Länge n der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke, gemittelt über ein Zeitintervall Δt in Minuten. Die Clear-Sky Strahlung ist ein Vektor der berechneten Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel für das gleiche zeitliche Intervall wie die Messdaten.

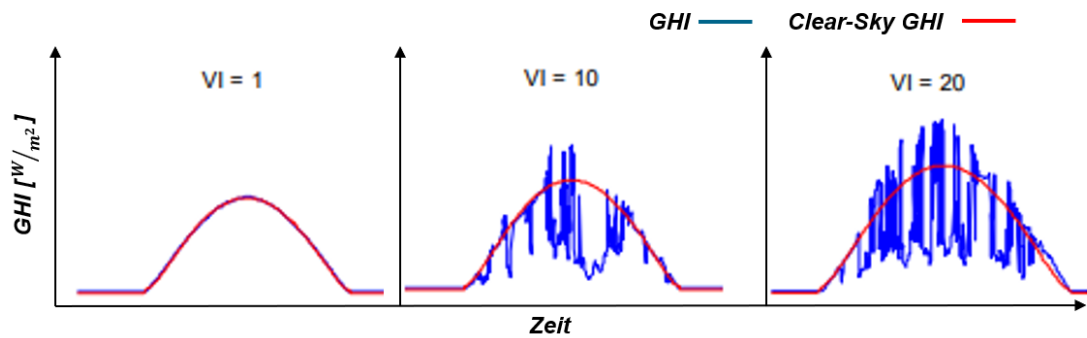


Abbildung 2.1: Beispiele für Tage mit steigenden VI-Werten aus Lanai, HI, die zeigen, wie die Variabilität in der Bestrahlungsstärke, mit dem VI zunimmt. Die gemessene Bestrahlungsstärke (GHI) ist in blau, die Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel (Clear-Sky GHI) in rot dargestellt.[Stein and Clifford Hansen, and Matthew J. Reno., 2012]

In Abbildung 2.1 sind die gemessene Bestrahlungsstärke und die Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel für drei Beispieltage aus Lanai (Hawaii), mit unterschiedlichen Variabilitätsindizes von 1 bis 20 dargestellt. Bei einem Variabilitätsindex von 1, sind die gemessene Bestrahlungsstärke und die Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel, nahezu deckungsgleich. Das bedeutet, dass die in diesem Zeitintervall vorherrschende Wolkensituation klar und homogen war, da keine Schwankungen der Bestrahlungsstärke gemessen wurden. Je stärker die Fluktuationen der gemessenen Bestrahlungsstärke innerhalb des betrachteten Zeitintervalls sind, desto größer wird auch der Variabilitätsindex. Damit kann der Variabilitätsindex als Maß für Variabilität in der

solaren Einstrahlung und damit indirekt auch als Maß für die vorherrschende Bedeckung und Wolkenverteilung innerhalb des Zeitintervalls verstanden werden.

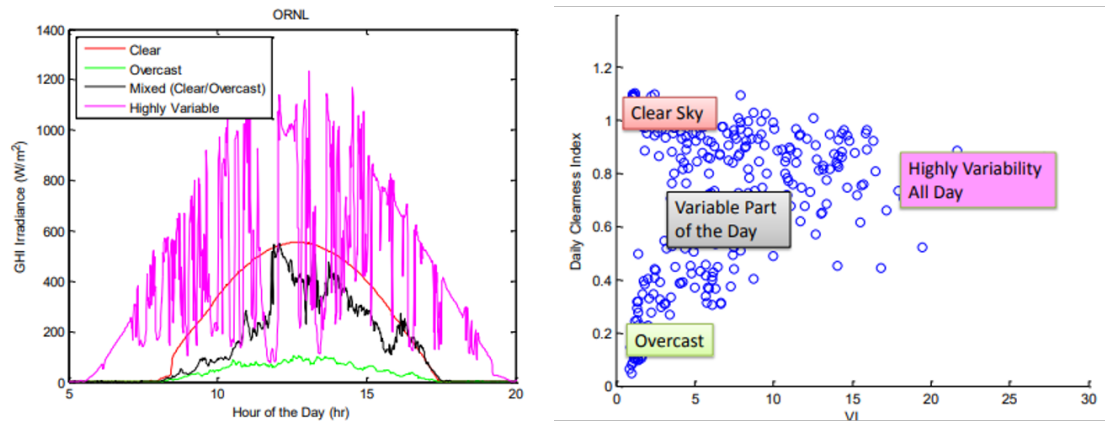


Abbildung 2.2: Scatterplot (rechts) des täglich gemittelten Variabilitätsindex mit dem Clear-Sky Index (Clearness Index) und den dazugehörigen Messungen (links) der Beispiele für homogene (rot, grün) und heterogene (violett, schwarz) Wolkensituationen. [Stein and Clifford Hansen, and Matthew J. Reno., 2012]

Anhand von Abbildung 2.2 lässt sich der Variabilitätsindex als Maßzahl erläutern. Auf der linken Seite sind vier Messungen exemplarisch ausgewählter Tage bei klarem Himmel (rot), bedecktem Himmel (grün) und variablen Bedeckungssituationen (violett, schwarz) dargestellt. Der Scatterplot der Variabilitätsindizes mit dem Clearness Index zeigt, bei welcher Bedeckung viel Variabilität vorliegt. Der Clearness Index ist genauso wie der Clear-Sky Index in Gleichung 2.1 der Quotient aus gemessener Bestrahlungsstärke und der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel und unterscheidet mit Werten zwischen 0 und 1 zwischen klarem Himmel und bedecktem Himmel. Bei homogenen Bedingungen, also einem Clearness Index nahe 0 beziehungsweise 1, häufen sich niedrige Variabilitätsindizes. Hohe Variabilität entsteht bei durchbrochener Bewölkung oder wechselnder Bewölkung. Die hohen Variabilitätsindizes tauchen also bei mittleren Clearness Indizes zwischen 0.6 und 0.9 auf.

Damit ist der Variabilitätsindex in dieser Form ein einfaches Maß für die Variabilität der Bestrahlungsstärke innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls. Dieser Ansatz soll hier in angepasster Form genutzt werden, um die räumliche Variabilität der Bestrahlungsstärke zu einem bestimmten Zeitpunkt und für ein ausgewähltes Untersuchungsgebiet zu beschreiben. Anhand dieses Index soll für die Variabilität der Einstrahlungsdaten des Kameranetzwerks Eye2Sky und der eines ausgewählten Modelllaufs von nextGEMS untersucht werden. Die Methode zur Bestimmung der zeitlichen Variabilität von [Stein and Clifford Hansen, and Matthew J. Reno., 2012] ist hier der Ausgangspunkt zur Untersuchung der räumlichen Variabilität, also der Variabilität der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke (GHI) in einem bestimmten Gebiet an einem festen Zeitpunkt.

$$VI = \frac{\sum_{k=2}^n \sqrt{(\text{GHI}_k - \text{GHI}_{k-1})^2 + \Delta x^2}}{\sum_{k=2}^n \sqrt{(\text{GHI}_{\text{clear},k} - \text{GHI}_{\text{clear},k-1})^2 + \Delta x^2}} \quad (2.4)$$

Anstatt den Variabilitätsindex für ein festes Zeitintervall Δt zu definieren, wird der Variabilitätsindex im folgenden über die Gitterweite beziehungsweise die räumliche Auflösung Δx der, aus den Kamerabildern projizierten Bestrahlungsstärke beziehungsweise der Daten des Klimamodells berechnet (Gleichung 2.4).

2.2 Eye2sky

In diesem Abschnitt wird das Wolkenkameranetzwerk Eye2Sky des Instituts für Vernetzte Energiesysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) vorgestellt. Das Kameranetzwerk und das Untersuchungsgebiet in Oldenburg wird näher beschrieben und die Strahlungsprognosen, welche durch das wolkenbasierte Kerasystem (WobaS) aus mehreren Bildern berechnet werden, wird vorgestellt. Die in dem Kameranetzwerk integrierten Messinstrumente werden beschrieben und wichtige technische Details genannt.

Kameranetzwerk

Das Eye2Sky-Netzwerk wurde im Jahr 2018 installiert und in Betrieb genommen und ist bis heute gewachsen. Im August 2022 waren insgesamt 30 Stationen an 29 verschiedenen Standorten in der Stadt Oldenburg und Umgebung aktiv. Die All-Sky-Imager (ASI) von Eye2Sky sind Kameras des Typs Mobotix Q25 6MP als Farbversion mit einem Fischaugenobjektiv, das ein Sichtfeld von 180° und Bilder mit einer Auflösung von bis zu 3072 x 2048 Pixel bietet [Mobotix]. Alle Kameras sind mit einem zusätzlichen Belüftungs- und Heizsystem ausgestattet die das Objektiv vor äußeren Einflüssen wie z.B. Staub, Tau, Schnee und Eis schützt. Da sowohl die Kameraobjektive als auch die Bestrahlungssensoren durch atmosphärische Ablagerungen (insbesondere Regen und Staub) beeinträchtigt werden, wird eine regelmäßige Reinigung durchgeführt. Der Aufwand für die regelmäßige Reinigung, wird durch operative Qualitätskontrolle der Stationsdaten durch den Vergleich mit den Referenzstationen, verringert. Diese werden mindestens in wöchentlichen Intervallen gereinigt [Schmidt et al., 2022].

Während des Tages werden die Kamerabilder mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Sekunden gespeichert [Blum et al., 2021].

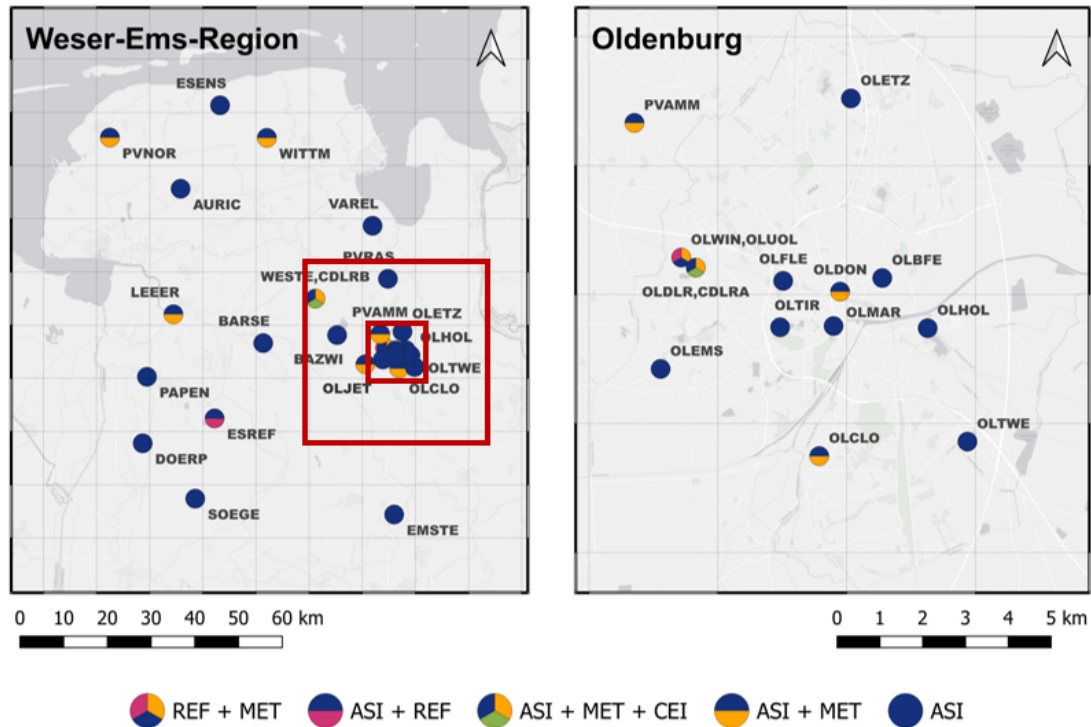
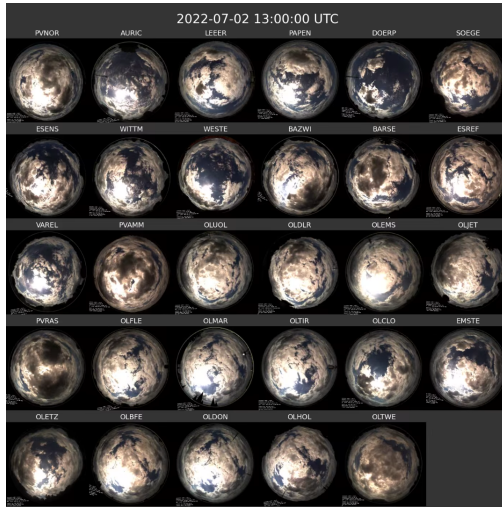


Abbildung 2.3: Abbildung der verschiedenen Messnetzwerke von Eye2Sky für die Weser-Ems Region (links) und die Stadt Oldenburg (rechts). Das Netzwerk erstreckt sich insgesamt auf ungefähr 110 x 100 km und ist gegliedert in drei Domänen: D1(Weser-Ems), D2 (Oldenburg+) und D3 (Oldenburg). Insgesamt enthält das Kameranetzwerk 30 Stationen mit ASI's, wovon 12 Stationen zusätzlich meteorologische Messinstrumente enthalten.

Das Kameranetzwerk teilt sich in drei verschiedene Untersuchungsgebiete auf, die Weser-Ems Region (D1), Oldenburg+ (D2) und das Stadtgebiet Oldenburg (D3) Abbildung 2.3. Die Untersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich auf das Untersuchungsgebiet Oldenburg+ (D2) mit einer räumlichen Ausdehnung von ungefähr 40 x 40 km. Die Referenzstationen liefern die mit einem Solartracker gemessenen Einstrahlungsdaten, sowie zusätzliche meteorologische Messungen (Wind, Niederschlag, Luftdruck) und garantieren Daten von hoher Qualität [Schmidt et al., 2022]. Abbildung 2.4(a) zeigt eine Übersicht der 29 Kameras, aus deren Bildern die Strahlungsinformationen in einer, für das ganze Gebiet einheitlichen Wolkenhöhe, in eine Karte projiziert werden.



((a)) Überblick 02.07.2022 13 UTC



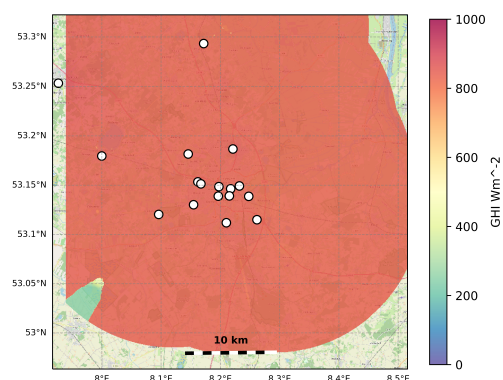
((b)) Messinstrumente [Schmidt et al., 2022]

Abbildung 2.4: (a) Beispiel Übersicht vom 02.07.2022 um 13 UTC für die 29 Kameras. (b) An einer Solaranlage befestigte Messinstrumente mit ASI (links), RSI (Mitte) und geneigten Pyranometern (rechts).

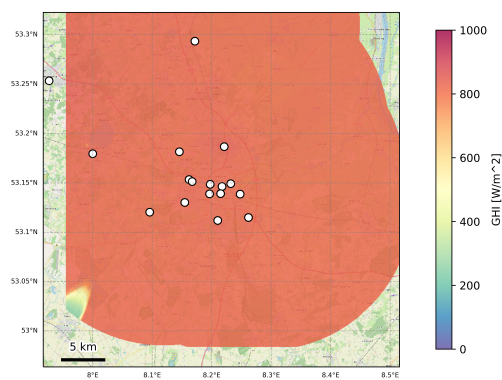
An 12 Standorten sind zusätzlich zu den ASI noch geneigte Pyranometer und rotierende Schattenband Radiometer zur Ermittlung der diffusen Strahlung angebracht (siehe Abbildung 2.4(b)). Die meteorologischen Stationen besitzen neben den Kameras noch zusätzlich rotierende Schattenband-Irradiometer (RSI) und liefern direkte normale (DNI), diffuse horizontale (DHI) und globale horizontale (GHI) Bestrahlungsstärke [Schmidt et al., 2022]. Diese werden als Minutenmittel abgespeichert. Das Kameranetzwerk Eye2Sky wird in erster Linie verwendet, um Vorhersagen der Einstrahlung für die nächsten Minuten zu erstellen. Dies gibt vor allem bezüglich der kurzfristigen Vorhersage von Variabilität, z.B. in Form von Rampen einen großen Vorteil gegenüber alternativen Vorhersagemethoden (z.B. basierend auf Satellitenbildern oder Wettervorhersagemodellen). Anlagenbetreiber, Energiehändler oder Netzbetreiber sind potentielle Interessenten für diese Art von lokalen und präzisen Prognosen [Schmidt et al., 2022].

Wolkenbasiertes Kamerasystem

Das Wolkenbasierte Kamerasystem (WobaS) von Eye2Sky ermöglicht es mit den insgesamt 29 Kameras innerhalb des gesamten Untersuchungsgebiets Weser-Ems (Abbildung 2.3), diverse meteorologische Parameter zu untersuchen. Aus den Helligkeitsinformationen der Kamerapixel, können Strahlungsgrößen wie die GHI und DNI berechnet werden und aus der Transmissivität und Wolkenhöhe, sogar Rückschlüsse auf den Bedeckungsgrad und die Art der Bewölkung gezogen werden. [Blum et al., 2021]

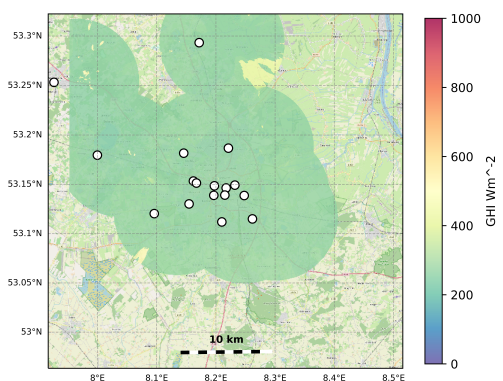


((a)) GHI klarer Himmel

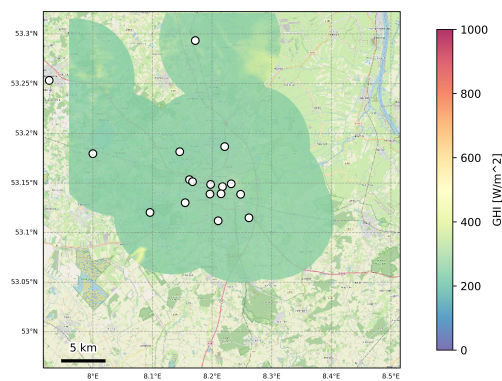


((b)) GHI klarer Himmel 30 min Mittel

Abbildung 2.5: Beispiel vom 23.06.2024 um 13 UTC für die Darstellung der GHI in Eye2Sky für das Untersuchungsgebiet D2 (Oldenburg+). In Originalauflösung (a) und gemittelt über 30 min von 13 UTC bis 13:30 UTC (b)

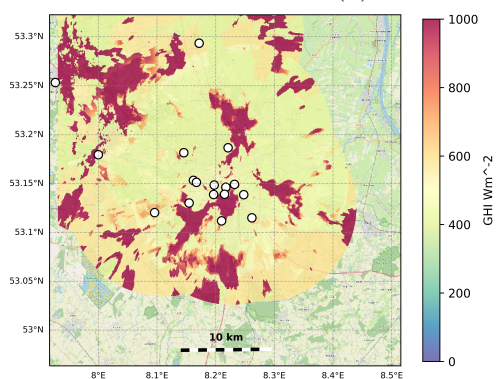


((a)) GHI bedeckter Himmel

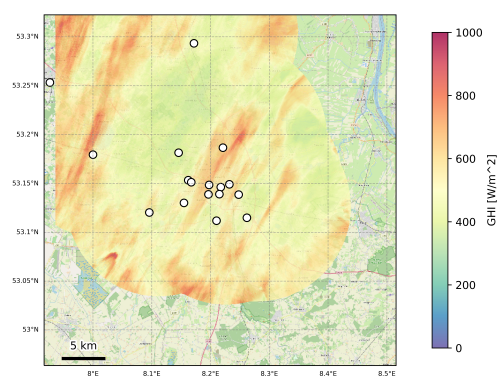


((b)) GHI bedeckter Himmel 30 min Mittel

Abbildung 2.6: Beispiel vom 14.06.2024 um 16 UTC für die Darstellung der GHI in Eye2Sky für das Untersuchungsgebiet D2 (Oldenburg+). In Originalauflösung (a) und gemittelt über 30 min von 16 UTC bis 16:30 UTC (b)



((a)) GHI durchbrochene Bewölkung



((b)) GHI durchbrochene Bewölkung 30 min Mittel

Abbildung 2.7: Beispiel vom 02.07.2024 um 13 UTC für die Darstellung der GHI in Eye2Sky für das Untersuchungsgebiet D2 (Oldenburg+). In Originalauflösung (a) und gemittelt über 30 min von 13 UTC bis 13:30 UTC (b)

Abbildung 2.5(a) zeigt die mit WobaS erzeugte Einstrahlungsinformation der GHI, für die Domäne D2 in Oldenburg vom 23.06.2022 um 13 UTC bei fast klarem Himmel. In Abbildung 2.5(b) ist die Situation über 30 Minuten gemittelt am selben Tag von 13 UTC bis 13:30 UTC dargestellt. Jedes Pixel im rechten Bild enthält somit die mittlere GHI aus 60 Aufnahmen, da die Daten ursprünglich in einer zeitlichen Auflösung von 30 s vorliegen. In diesem Zeitraum ist der Himmel überwiegend klar, was an der homogenen Strahlungsverteilung in Kombination mit einer hohen mittleren Bestrahlungsstärke von ca. $840 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ zu erkennen ist. Die Homogenität der Einstrahlungsinformation zeigt die geringe räumliche Variabilität innerhalb der Szene. Bei nahezu klarem Himmel innerhalb der 30 Minuten, dürfte die zeitliche Variabilität in der GHI ebenfalls gering sein. Die Änderung der Bestrahlungsstärke innerhalb dieses Zeitintervalls größtenteils durch die Änderung des Sonnenzenitwinkels im Tagesgang beeinflusst, welche in 30 Minuten lediglich einige Grad beträgt.

In Abbildung 2.6 und Abbildung 2.7 sind die Einstrahlungsinformationen der GHI für das gleiche Untersuchungsgebiet für eine Situation mit bedecktem Himmel und bei durchbrochener Bewölkung, dargestellt. Bei bedecktem Himmel ist ein sehr homogenes Bild, in Kombination mit geringer mittlerer Bestrahlungsstärke zu erkennen. Es fällt auf, dass im Vergleich zu der Situation bei nahezu klarem Himmel, die Informationen nur für einen kleineren Teil des Gebiets vorliegen. Das liegt daran, dass die Informationen, abhängig von der vorherrschenden Wolkensituation, in eine einheitliche Wolkenhöhe projiziert werden. Bei nahezu wolkenlosem Himmel werden die Daten in deutlich höhere Regionen projiziert, als bei vorhandener Bewölkung. Daraus resultiert die geringere Ausdehnung der Strahlungsprojektion. In den beiden homogenen Beispielen bei bedecktem beziehungsweise klarem Himmel, ist im Südwesten des Untersuchungsgebietes ein kleiner Teil mit stark abweichender Strahlung zu sehen. In das Sichtfeld der südwestlich gelegenen Kamera (OLJET), ragt ein Hindernis, welches bei homogenen Wolkensituationen die hier zu erkennende Abweichung verursacht.

In Abbildung 2.7 ist die gesamte Szene deutlich heterogener und durch viele Gradienten in der Strahlung geprägt. In solchen Bedeckungssituationen fällt der eben genannte Fehler durch das Hindernis kaum ins Gewicht. Die hier zu sehende Verteilung lässt sich auf kleinskalige oder nur zeitweilige Wolkenbedeckung innerhalb des betrachteten Zeitraums zurückführen. Besonders in Abbildung 2.7(b) wird der Effekt der zeitlichen Mittelung durch die leicht verzerrtere Darstellung deutlich. Die Bedeckung kann innerhalb einer halben Stunde sehr stark variieren, weshalb die Wolkenkanten, wie im Originalbild, nicht mehr zu erkennen sind. Durch das in diesem Zeitraum sich ändernde Wolkenbild sind Daten in Zugrichtung der Wolken verzerrt.

2.3 nextGEMS

Dieses Kapitel soll die Entwicklung und Struktur des im Jahre 2020 entwickelten Klimamodells nextGEMS näher erläutern. Darüberhinaus soll anhand eines ausgewählten Laufs die Simulation der GHI für das Untersuchungsgebiet vorgestellt werden und auf räumliche und zeitliche Varia-

bilität untersucht werden.

nextGEMS ist ein gemeinschaftliches europäisches Projekt, welches durch das EU-Programm Horizont 2020, finanziert wird. Expertise aus insgesamt vierzehn europäischen Nationen, sollen dabei helfen zwei Erdsystemmodelle der nächsten Generation zu entwickeln. Diese Modelle sollen ein besseres Verständnis und zuverlässigere Quantifizierung des Klimawandels auf globaler und regionaler Ebene ermöglichen und zukünftige Wetterlagen und bevorstehende Extremereignisse besser vorherzusagen [nextGEMS].

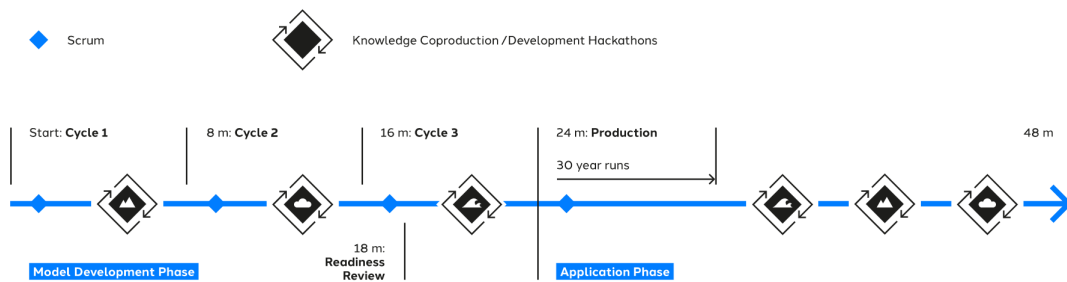


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Entwicklungs- und Anwendungsphase von nextGEMS. Die Modell Entwicklungsphase, basierend auf dem DYAMOND-winter Vergleich, besteht aus drei Zyklen und die Anwendungsphase aus einem 24 monatigen Produktionsphase mit Läufen bis zu 30 Jahre. ([nextGEMS])

nextGEMS ist ein europäisches Gemeinschaftsprojekt, dass darauf abzielt, zunächst ein neuartiges Modell zu erstellen und es dann zur Lösung von Problemen einzusetzen. NextGEMS treibt die Entwicklung von zwei europäischen sturmauflösenden Erdsystemmodellen, dem IFS vom European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) und dem ICON Modell vom deutschen Wetterdienst (DWD), voran. Daraus resultieren die beiden Phasen (Entwicklung und Anwendung) des Projekts und wie sie die Aktivitäten von Expertengemeinschaften, die mit bestimmten Erdsystem-Kopplungen verbunden sind, steuern.[nextGEMS] Der Entwicklungsprozess und die Anwendungsphase, sind schematisch in Abbildung 2.8 dargestellt. Die Entwicklungsphase des Models, teilt sich in 3 unterschiedliche Zyklen auf.

Im ersten Zyklus werden ein Jahr lang Simulationen mit einem 5 km-Gitter analysiert, die im Rahmen des DYAMOND-Winter-Vergleichs durchgeführt wurden. In den folgenden Zyklen werden die Modellkonfiguration und die Arbeitsabläufe auf der Grundlage der Analyse früherer Zyklen verbessert und optimiert und gleichzeitig die Auflösung und Länge der Simulationen in Richtung des Produktionsziels weiterentwickelt. Die Anwendungsphase ist mit dem Beginn der produktiven (multi-dekadischen) Simulationen um Monat 24 herum identifiziert. Sie legt den Schwerpunkt auf die Anwendung der SR-ESMs (Storm-Resolving Earth System Models) sowie auf künftige Modellentwicklungen für Prozesse zur Auflösung von Teilstürmen oder zur Einbeziehung zusätzlicher Erdsystemkomponenten. Die Aktivitäten in dieser Phase erfordern ein

geringeres Maß an Koordination, profitieren allerdings von der Bandbreite, die innerhalb des Projekts während der Entwicklungsphase aufgebaut wurde. Die Aktivitäten werden in der Entwicklungsphase eingeleitet und in der Anwendungsphase abgeschlossen [nextGEMS].

nextGEMS profitiert von einer bis zu fünfzigfach feineren Gitterauflösung und ist so in der Lage, wesentliche Klimaprozesse explizit darzustellen. Die verwendeten Modelle basieren auf physikalischen Ansätzen und können Komponenten des Erdsystems, wie Stürme, Wirbel in Ozeanen bis hinzu Rissen im Eis berücksichtigen, die von konventionellen Klimamodellen entweder ignoriert, oder lediglich empirisch repräsentiert werden können [nextGEMS].

Aufbau

nextGEMS treibt die Entwicklung von zwei europäischen sturmauflösenden Erdsystemmodellen, IFS und ICON, voran. Die Modelle durchlaufen drei Entwicklungszyklen mit sukzessiver Verbesserung und Optimierung der Modellkonfiguration und des Arbeitsablaufs.

Die Simulationen aus Cycle 1 basieren auf den DYAMOND-winter Simulationen und laufen für ein Jahr mit einer Auflösung von 5 km und zwei bis drei Monate mit einer Auflösung von 2.5 km nextGEMS [a].

Die Simulationen von Cycle 2 bauen auf den Simulationen von Cycle 1 für beide Modelle, IFS und ICON, auf. Sie beinhalten Verbesserungen in der Konfiguration, wie z.B. neue Schemata und Funktionen. Zu diesem Zeitpunkt, existiert für das ICON Modell eine 2-Jahres-Simulation mit einer Auflösung von 5 km (ngc2009) und eine 10-Jahres-Simulation mit einer Auflösung von 10 km (ngc2012). nextGEMS [b]

Dasselbe gilt für die ICON und IFS Läufe in Cycle 3, welche auf den Ergebnissen von Cycle 1 und Cycle 2 beruhen. nextGEMS

ICON

nextGEMS bietet, wie zuvor beschrieben, Klimäläufe des IFS und des ICON Models in verschiedenen Zyklen mit unterschiedlichen Perioden und Parametern. Die hier im weiteren untersuchten Strahlungskarten stammen aus einem ICON Lauf aus Cycle 3 mit einer nativen Auflösung von etwa 5000 m. Besonders muss hier beachtet werden, dass die Daten nicht in einem quadratischen Gitter, sondern durch ein sogenanntes HEALPix Gitter in einer Art hexagonalen Form, gegeben sind. HEALPix ist ein Akronym für „Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelation of a sphere“. Wie der Name schon sagt, erzeugt diese Pixelierung eine Unterteilung einer Kugeloberfläche, bei der jedes Pixel die gleiche Fläche wie jedes andere Pixel abdeckt Abbildung 2.9. Die wichtigsten Anforderungen bei der Entwicklung von HEALPix waren die Schaffung einer mathematischen Struktur, die eine geeignete Diskretisierung von Funktionen auf einer Kugel mit ausreichend hoher Auflösung unterstützt, und die Ermöglichung einer schnellen und genauen statistischen Analyse von massiven Full-Sky-Datensätzen [HealPIX].

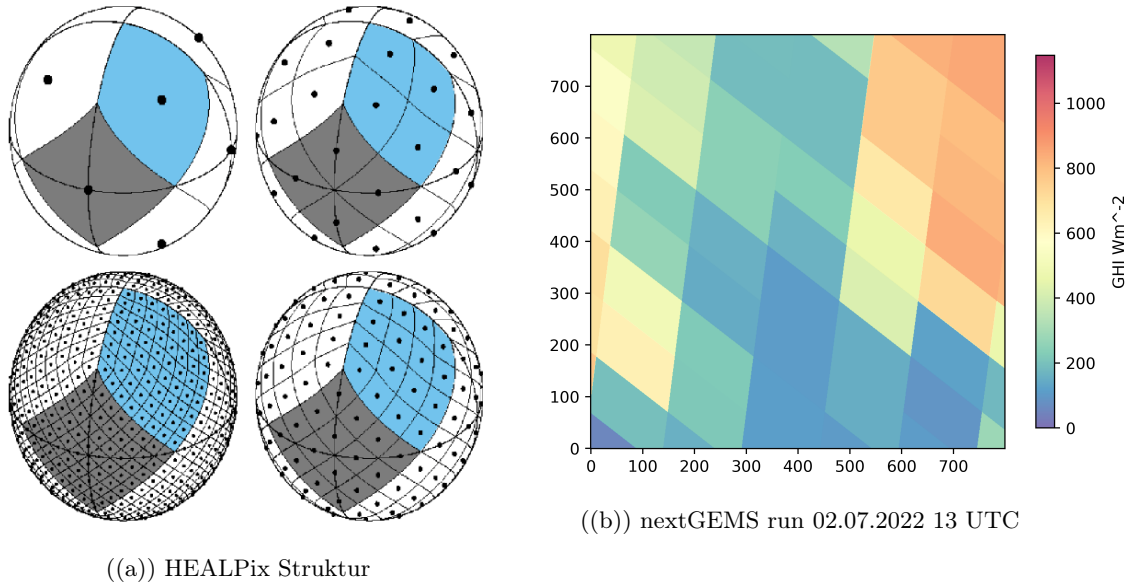


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Healpix Struktur (a) und der Zusammensetzung des Gitters der im nextGEMS verwendeten ICON Läufe [Brahem et al., 2018]. Beispiel der GHI Projektion des zu untersuchenden ICON Laufs vom 02.07.2022 um 13 UTC für das Untersuchungsgebiet Oldenburg+ (b). Die Daten wurden dazu auf ein 800 x 800 Pixel Gitter mit 50 Meter Gitterabstand interpoliert (Nearest Neighbour).

In Abbildung 2.9 ist die Projektion der GHI für das Untersuchungsgebiet D2 für den 02.07.2022 um 13 UTC abgebildet. Die Struktur des Gitters ist dort gut in Form der verschiedenen Parallelogramme zu erkennen und unterscheidet sich dadurch maßgeblich von einem klassischen Lon-Lat Gitter.

2.4 Hemispherical Sky imager

Wie in Kapitel 1 bereits genannt, sollen in dieser Arbeit zwei Kamerateypen, mit unterschiedlicher Auflösung verglichen werden. Das Hemispherical Sky imager System vom Institut für Meteorologie und Klimatologie in Hannover, welches in der Lage ist alle 60 Sekunden ein Bild der vorherrschenden Wolkensituation zu machen. Das System ist in Abbildung 2.10 abgebildet.



Abbildung 2.10: Hemispherical Sky imager System des Instituts für Meteorologie in Hannover mit integrierter Canon EOS 750D Spiegelreflexkamera

Die in diesem System verwendete Kamera ist die Canon EOS 750D digitale Spiegelreflexkamera. Sie zeichnet sich aus durch einen CMOS-Sensor für Detailschärfe mit ca. 24,2 effektiven Megapixeln aus. Damit ist das System in der Lage, Bilder der Hemisphäre mit einer Auflösung von ca. 4000 x 6000 pixeln zu liefern EOS 750D. Zusätzlich ist in dem System ist eine integrierte Heizung verbaut, um Feuchtigkeit innerhalb des Gehäuses zu vermeiden.

2.5 Algorithmus

Der Algorithmus vom Institut für Meteorologie und Klimatologie in Hannover zur Bestimmung des Bedeckungsgrades basiert auf der Rot-Grün-Blau Farbsegmentierungs-Methode nach [Yamashita et al., 2004]. Bei dieser Methode werden die Pixel eines Allsky-Bildes bezüglich des Verhältnisses der Count-werte von roter und blauer Farbebene analysiert, woraus der sogenannte SkyIndex resultiert. Diese Farbunterscheidungsmethode ist einfach aufgebaut und unterscheidet Wolken von blauem Himmel durch das Verhältnis der Countzahlen von roter, grüner und blauer

Farbebene [Schrempf, 2011].

$$\text{SkyIndex} = \frac{\text{Count}_{\text{blau}} - \text{Count}_{\text{rot}}}{\text{Count}_{\text{blau}} + \text{Count}_{\text{rot}}} \quad (2.5)$$

Der SkyIndex enthält Werte aus dem abgeschlossenen Intervall von $[-1,1]$ und typische Werte des SkyIndex für einen wolkenlosen blauen Himmel liegen im Bereich von 0.25 bis 0.6. Um die Wolkenerkennung im Unsicherheitsbereich zwischen dem SkyIndex von 0.14 und 0.2 zu verbessern, wurden die Grenzwerte in diesem Bereich höher aufgelöst [Schrempf, 2011].

$$\text{HazeIndex} = \frac{\frac{\text{Count}_{\text{rot}} - \text{Count}_{\text{blau}}}{2} - \text{Count}_{\text{grn}}}{\frac{\text{Count}_{\text{rot}} - \text{Count}_{\text{blau}}}{2} + \text{Count}_{\text{grn}}} \quad (2.6)$$

Bei einer Wolke ist die Differenz zwischen grünen und roten Counts kleiner als die zwischen blauen und grünen. Beim wolkenlosem Himmel verhält es sich entgegengesetzt. Das bedeutet, dass durch die grüne Farbebene die Genauigkeit bei der Unterscheidung von Wolken und Himmel im Unsicherheitsbereich verbessert wird und die grüne Farbebene daher in die Wolkenklassifizierung mit einbezogen werden muss. Deshalb wurde ein zusätzlicher Index definiert, der die die Position der grünen Farbebene bezogen auf das Mittel von $\text{Count}_{\text{blau}}$ und $\text{Count}_{\text{rot}}$ angibt [Schrempf, 2011]. Da mithilfe dieses Index (Gleichung 2.6) insbesondere Bereiche mit Dunst präziser untersucht werden können, wird dieser als HazeIndex bezeichnet. Liegt die grüne Countzahl näher an der roten und ist somit kleiner als das Mittel aus $\text{Count}_{\text{rot}}$ und $\text{Count}_{\text{blau}}$ so ergibt sich ein positiver HazeIndex und der Pixel wird folglich als Wolke definiert. Ist die grüne Countzahl dagegen größer als das Mittel, resultiert ein negativer HazeIndex und der Pixel stellt Himmel dar [Schrempf, 2011]. Weitere Informationen zur Funktion des Algorithmus zur Wolkenerkennung, sind in [Schrempf, 2011] zu finden.

Kapitel 3

Methodik

In diesem Abschnitt wird zuerst die Datengrundlage von Eye2Sky sowie nextGEMS, auf dessen die folgende Untersuchung basiert, näher erläutert. Im Anschluss die Datenaufbereitung dieser Daten bezüglich der räumlichen und zeitlichen Auflösung beschrieben.

3.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage für die nachfolgende Untersuchung besteht aus zwei Datensätzen. Die Einstrahlungsdaten von Eye2Sky und die Daten des ICON Laufs von nextGEMS. Beide Datensätze beziehen sich auf das Jahr 2022 und sollen hinsichtlich ihrer Variabilität der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke, für das ein Untersuchungsgebiet in Oldenburg der Größe 40 x 40 km, untersucht werden.

Die Einstrahlungsdaten von Eye2Sky werden aus den Helligkeitsinformationen der Bilder abgeleitet, die das Netzwerk liefert. Die projizierte GHI hat eine zeitliche Auflösung von 30 Sekunden und eine räumliche Auflösung von 50 Metern. Die Daten des ICON Laufs von nextGEMS haben eine räumliche Auflösung (Gitterweite) von 5000 Metern und eine zeitliche Auflösung von 30 Minuten. Der Modelllauf startet mit gegebenen Anfangsbedingungen im Jahr 2020 und läuft unter diesen bis Ende 2022. Um die Daten für die nachfolgende Untersuchung vergleichbar zu machen, werden die Daten von Eye2Sky durch Mittelung ebenfalls auf eine zeitliche Auflösung von 30 Minuten gebracht. Darüber hinaus werden die Daten für verschiedene Gitterweiten von 50 Metern bis 8000 Metern gemittelt, wie im folgenden Abschnitt näher beschrieben wird. Diese Anpassungen ermöglichen die Vergleichbarkeit der beiden Datensätze.

3.2 Datenaufbereitung

Damit eine Gegenüberstellung von Eye2Sky und nextGEMS sinnvoll ist, müssen die beiden Datensätze bei gleicher zeitliche und räumlicher Auflösung betrachtet werden. Die Daten von

Eye2Sky liegen in einer zeitlichen Auflösung von 30 Sekunden, während die Daten von nextGEMS eine zeitliche Auflösung dafür werden die Informationen von Eye2Sky über 30 Minuten gemittelt. Abbildung 3.1 zeigt die globale horizontale Bestrahlungsstärke vom 02.07.2022 um 13 UTC (links) und gemittelt über 30 Minuten von 13 UTC bis 13:30 UTC.

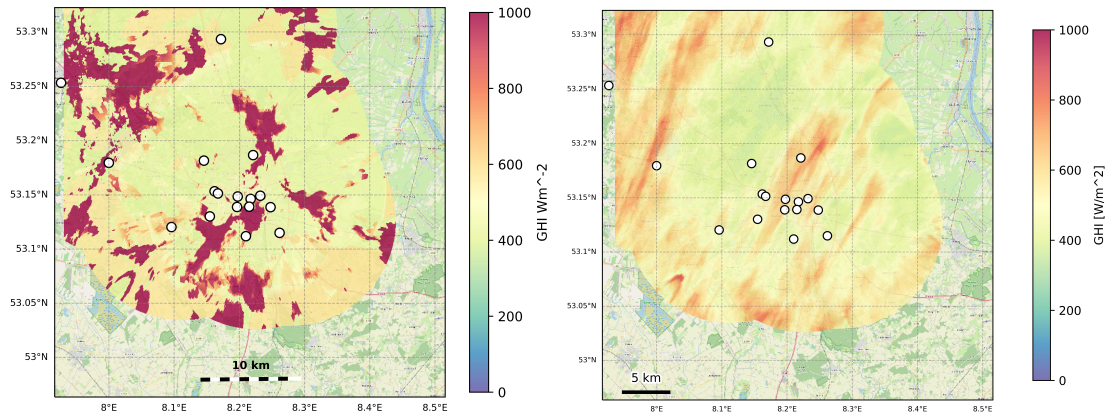


Abbildung 3.1: GHI vom 02.07.2022 um 13 UTC für Eye2Sky (links) und über 30 min von 13 UTC bis 13:30 UTC gemittelt.

Die leichte Verzerrung der Strukturen in der rechten Abbildung ist auf die zeitliche Mittelung zurückzuführen. Da die Wolkenart und -position innerhalb von 30 min sehr variabel sein kann, sind die Strukturen nicht so markant wie auf der linken Seite. Die Wolken bewegen sich in diesem Zeitraum, abhängig von Windgeschwindigkeit und -richtung weiter, weshalb beim bilden eines zeitlichen Mittels die Verzerrungen entstehen.

Für den späteren Vergleich der Variabilität von Eye2Sky und nextGEMS ist es notwendig die räumliche Auflösung der beiden Daten zu vereinheitlichen. Dafür werden die Daten von Eye2Sky in neun Schritten von der ursprünglichen räumlichen Auflösung von 50 Metern bis auf 8000 Meter gemittelt. Außerdem kann so überprüft werden, wie viel Information über Variabilität in Eye2Sky bei einer größeren Auflösung verloren geht. Beim Anpassen der räumlichen Auflösung, wurden Werte an Orten innerhalb des Untersuchungsgebietes platziert an denen ursprünglich keine vorhanden waren. Um dies zu vermeiden und die Form der ursprünglichen Verteilung beizubehalten, wurden die Karten von Eye2Sky erneut auf eine Auflösung von 800 x 800 Pixeln gebracht. Damit hat jede Karte, unabhängig von der räumlichen Auflösung, die gleiche Anzahl an Pixeln. Außerdem kann so die Berechnung des Variabilitätsindex mit einer festen Gitterweite (Δx) von 50 Metern gemacht werden. Der Datensatz des ICON Laufs von nextGEMS wurde analog hierzu ebenfalls auf die gleichen räumlichen Auflösungen gebracht. Da die Informationen in diesem Datensatz in einer räumlichen Auflösung von 5000 Metern vorliegen, stellen die feineren Auflösungen eher eine detailliertere Darstellung der Daten dar, da kein Informationsgewinn durch die Skalierung möglich ist. In Abbildung 3.2 sind die Strahlungskarten von Eye2Sky und nextGEMS exemplarisch für vier der insgesamt 9 verschiedenen Auflösungen dargestellt.

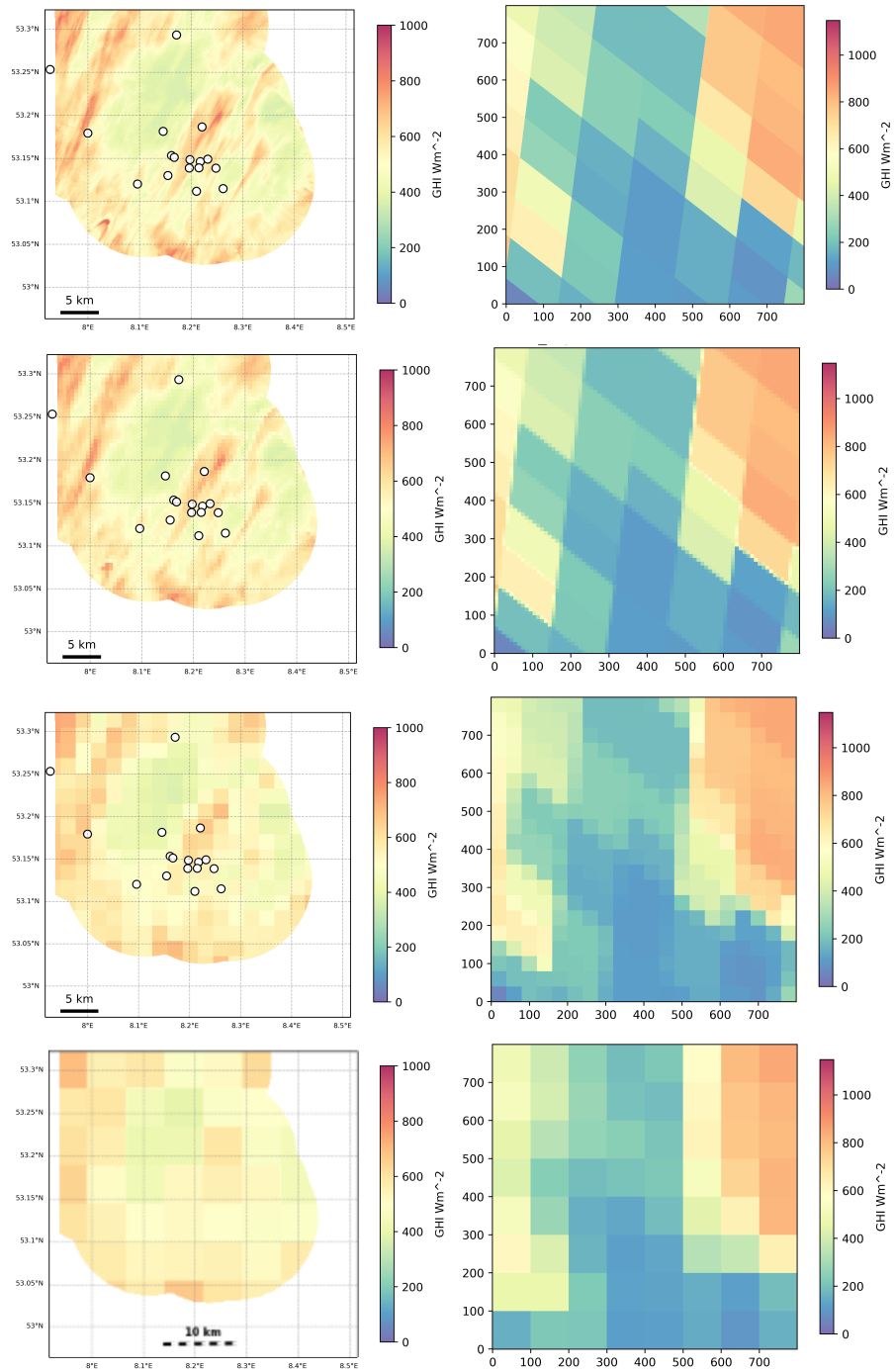


Abbildung 3.2: GHI vom 02.07.2022 um 13 UTC für Eye2Sky (links) und nextGEMS (rechts). Die Karten werden in 9 Schritten von 50 m bis 8000 m gemittelt und anschließend erneut auf eine Auflösung von 800 x 800 Pixeln gebracht. Hier sind exemplarisch die Darstellungen von oben nach unten für 50 m, 500 m, 2000 m und 5000 m dargestellt.

In der Originalauflösung von Eye2Sky von 50 Metern sind die Gradienten der Strahlung sehr detailliert zu erkennen und es lassen sich Wolkenstrukturen durch die klaren erkennbaren Kanten erahnen. Bis auf eine leicht gröbere Darstellung bei einer Auflösung von 500 Metern, sind die Details aus dem Originalbild immernoch gut zu erkennen. Ab einer Auflösung von 2000 Metern sind die detaillierten Strukturen, welche zuvor noch sehr gut erkennbar waren, durch die Änderung der räumlichen Auflösung, verloren gegangen. Mit jedem Skalierungsschritt und daraus folgender geringerer Auflösung, wird die Information über die vorherrschenden Strahlungsgradienten, immer weniger. Nicht nur sind die feinen Strukturen nicht mehr zu erkennen, sondern die Stärke der Gradienten wird ebenfalls niedriger. Bei einer Auflösung von 5000 Meter ist dieser Effekt sehr gut zu erkennen und die räumliche Strahlungsverteilung aus dem Originalbild von Eye2Sky, ist nur noch grob zu erahnen.

Betrachtet man die Karten des ICON Laufs von nextGEMS, fällt zuerst die Parallelogramm förmige Gitterstruktur auf, die im Kontrast zu Eye2Sky deutlich weniger Details aufweist, allerdings auch Werte für das gesamte Untersuchungsgebiet enthält. Es muss beachtet werden, dass die Daten des ICON Laufs eine native Auflösung von 5000 Metern haben und dementsprechend die Darstellung bei 50 Meter lediglich eine detailliertere Darstellung der Karten abbildet und die Informationen auch hier in den Gitterabständen von 5000 Metern vorliegen. Das bedeutet für die Analyse der ICON Daten, dass für die feineren Auflösungsschritte, kein Informationsgewinn zu erwarten ist. Für jede der Karten von Eye2Sky und des ICON Laufs wird der Variabilitätsindex bei unterschiedlicher Auflösung nach Gleichung 2.4 und die mittlere globale horizontale Bestrahlungsstärke berechnet. Dazu wird aus einem Modell die Informationen der Strahlung bei klarem Himmel und der Sonnenzenit- und azimutwinkel für die entsprechenden Zeitpunkte für die spätere Analyse bestimmt.

Mit Hilfe des eingeführten und angepassten Variabilitätsindex (Gleichung 2.4), soll untersucht werden, wie detailliert Gradienten der Strahlung in Eye2Sky und in nextGEMS dargestellt werden können. Für die Berechnung des Variabilitätsindex, wird die Änderung der Globalstrahlung für eine feste Gitterweite Δx berechnet und durch die Änderung des Clear-Sky Index dividiert. Da sich der Clear-Sky Index innerhalb einer halben Stunde nicht signifikant ändert, ist diese innerhalb des Untersuchungsgebietes nahezu konstant. Der Variabilitätsindex ist eine Maßzahl für die Gradienten der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke innerhalb eines festen Zeitintervalls, in Abhängigkeit zur räumlichen Auflösung Δx und beschreibt damit die Variabilität der vorherrschenden Strahlungsverhältnisse. Die eben beschriebene Anpassung der räumlichen und zeitlichen Dimensionen und die Berechnung des Variabilitätsindex für jede dieser verschiedenen Auflösungen, wurde für das Jahr 2022 für beide vorliegenden Datensätze durchgeführt. So soll analysiert werden, ob bei vergleichbarer Auflösung von 5000 Metern, auch noch ähnlich viel Information über Variabilität in der Projektion von Eye2Sky vorhanden ist, oder ob durch die gröbere Auflösung, diese Information verloren geht.

Kapitel 4

Analyse

In diesem Kapitel wird die Projektion der GHI durch das Wolkenkameranetzwerk Eye2Sky und die des ICON Laufs von nextGEMS auf Variabilität untersucht. Dafür werden beide Datensätze, wie in Kapitel 3 beschrieben, auf die gleiche zeitliche und verschiedene räumliche Auflösungen gebracht. Zuerst werden die Ergebnisse der Untersuchung des Kameranetzwerks und des Klimamodells einzeln betrachtet und im weiteren Verlauf bei vergleichbarer Gitterweite gegenübergestellt. Um die Genauigkeit der berechneten globalen horizontalen Bestrahlungsstärke bewerten zu können, werden die Messdaten von insgesamt acht Vergleichsmessstationen von Eye2Sky verwendet. Abschließend werden die beiden Kamertypen, die Mobotix Q25 6MP und die Canon EOS 750D, hinsichtlich des Einflusses der Auflösung auf die Wolkenklassifikation mit einem dafür vorgesehenen Algorithmus verglichen.

4.1 Variabilität in Eye2Sky

Wie zuvor beschrieben, sollen mit Hilfe des eingeführten Variabilitätsindex die Einstrahlungsinformationen für Eye2Sky für das Jahr 2022 analysiert werden. Um das Verhalten des Variabilitätsindex bei unterschiedlicher räumlicher Auflösung zu zeigen, soll im folgenden exemplarisch die Situation vom 02.07.2022 betrachtet werden, da an diesem Tag überwiegend heterogene Bewölkung vorherrschend war. In Abbildung 4.1 ist ein Kamerabild dieses Tages um 11 UTC abgebildet.

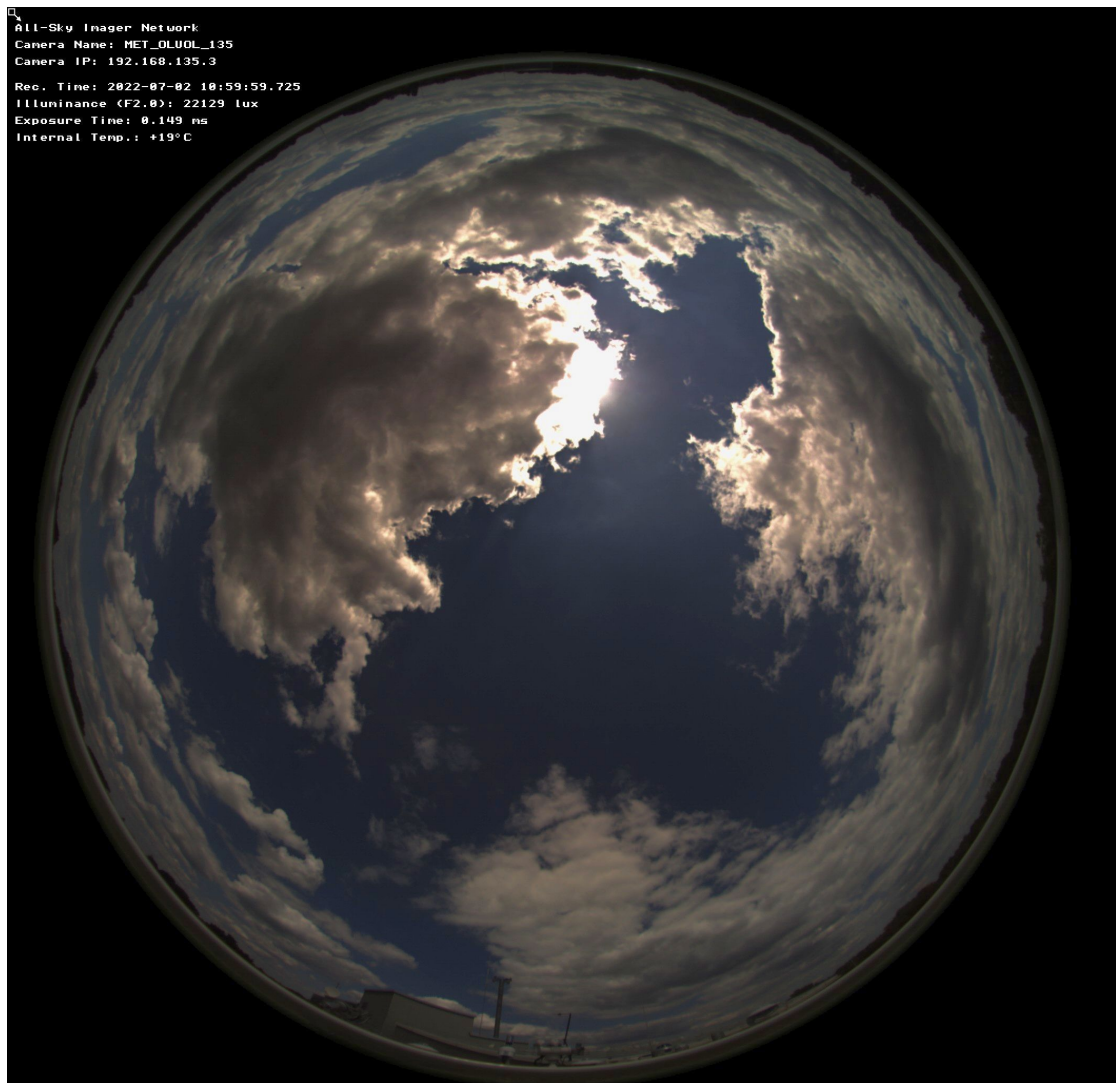


Abbildung 4.1: AllSky Bild vom 02.07.2022 um 11 UTC der Kamera OLUOL von Eye2Sky.

Das hier ausgewählte Bild einer Kamera des Eye2Sky Netzwerks, soll zeigen weshalb dieser Tag als Beispiel für die Variabilitätsanalyse verwendet wurde. Das Bild zeigt die durchbrochene Bewölkung, die an diesem Tag über einen längeren Zeitraum vorhanden war und soll aufzeigen, welche Bedingungen als variabel beziehungsweise heterogen bezeichnet werden. Unter solchen Bedingungen sind starke Strahlungsgradienten zu erwarten, da es Bereiche gibt die komplett klar sind und gleichzeitig Bereiche erkennbar sind, die von Wolken fast komplett bedeckt werden. Deshalb liegt der Fokus der folgenden Analyse insbesondere auf dem Sommer, da die Frequenz von Cumuluswolken in dieser Zeit am höchsten ist [Öktem and Roms, 2021].

Die berechneten Variabilitätsindizes für die räumlichen Auflösungen von 50 Meter bis 8000 Meter vom 02.07.2022 sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Die dieser Grafik zugehörigen Mittel- und

Maximalwerte der Variabilitätsindizes und der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke, sind Tabelle 4.1 zu entnehmen.

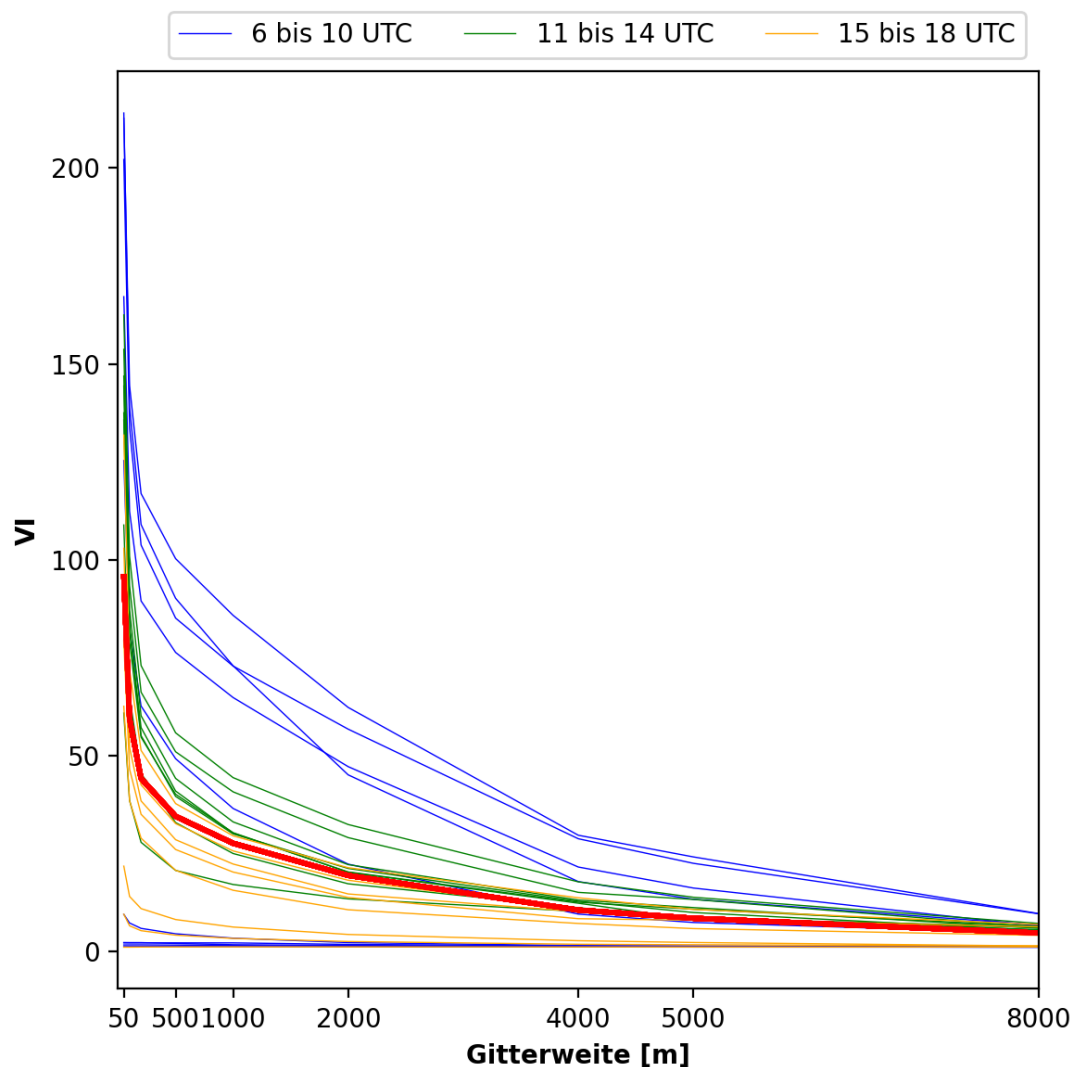


Abbildung 4.2: Die Variabilitätsindizes nach Stein für Eye2Sky vom 02.07.2022 von 06 bis 18 UTC, über 30 Minuten gemittelt, für die verschiedenen Gitterweiten von 50 m bis 8000 m. Die Werte sind in drei Zeitabschnitte von 6 bis 10 UTC (blau), 11 bis 14 UTC (grün) und 15 bis 18 UTC (orange) eingeteilt. Zusätzlich ist der berechnete Mittelwert (rot) über den gewählten Zeitraum dargestellt.

Variabilität in Eye2Sky				
Gitterweite [m]	VI _{MEAN}	VI _{MAX}	GHI _{MEAN} [Wm ⁻²]	GHI _{MAX} [Wm ⁻²]
50	95.7	214.0	474.2	682.4
100	59.4	144.4	474.2	682.4
200	44.2	116.9	474.2	682.2
500	34.5	100.3	474.0	681.8
1000	27.6	85.8	473.8	681.7
2000	19.4	62.3	473.6	682.7
4000	10.6	29.7	472.8	676.8
5000	8.5	24.2	472.3	684.0
8000	4.7	9.7	474.6	680.1

Tabelle 4.1: Mittel- und Maximalwerte des VI und der GHI vom 02.07.2022 bei unterschiedlichen Gitterweiten

Durch die sehr feine Originalauflösung von 50 Meter können die starken Gradienten der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke an den Wolkenkanten am besten dargestellt werden. Daher ist hier der VI im Mittel mit einem Wert von 95.7 am höchsten. Schon nach den ersten Schritten der Reduktion der Auflösung, fallen die Variabilitätsindizes sehr stark ab. Schon bei einer Gitterweite von 1000 Metern liegen die Werte im Mittel nur noch bei 27.6, also ca. einem Drittel des VI bei Originalauflösung. Die Abnahme der absoluten VI Werte im Mittel, nimmt mit jedem Schritt der Vergrößerung ab, wobei die prozentuale Abnahme steigt. Die Werte sind dabei in drei verschiedene Zeiträume von 6 - 10 UTC (blaue Linien), 11 bis 14 UTC (grüne Linien) sowie von 14 bis 18 UTC (orange Linien) eingeteilt. Es ist für diesen Beispieltag festzustellen, dass die höchsten VI zwischen 6 - 10 UTC vorkommen, obwohl zu erwarten wäre, dass die meiste Variabilität zwischen 11 und 14 UTC durch die hohe Einstrahlung vorhanden ist. Bei der Betrachtung der Wolkenbilder dieses Tages lässt sich feststellen, dass der Bedeckungsgrad und die vertikale Mächtigkeit der Wolken am Nachmittag und Abend stärker ist, als am Morgen.

Um zu überprüfen, ob die globale horizontale Bestrahlungsstärke sich ebenfalls bei größer werdener räumlicher Auflösung ändert, wurden die Mittel- und Maximalwerte zu jedem Aggregierungsschritt berechnet. Tabelle 4.1 zeigt, dass diese wie zu erwarten war, unabhängig von der räumlichen Auflösung und nur minimale Abweichungen zeigen. Die Reduktion des Variabilitätsindex mit jedem Auflösungsschritt ist daher das Ergebnis der Glättung von Gradienten im Einstrahlungsfeld.

Die Variabilitätsindizes für den gesamten Monat Juli 2022 für die unterschiedlichen Gitterweiten, ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die dazugehörigen Mittel- und Maximalwerte der Variabilitätsindizes und der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

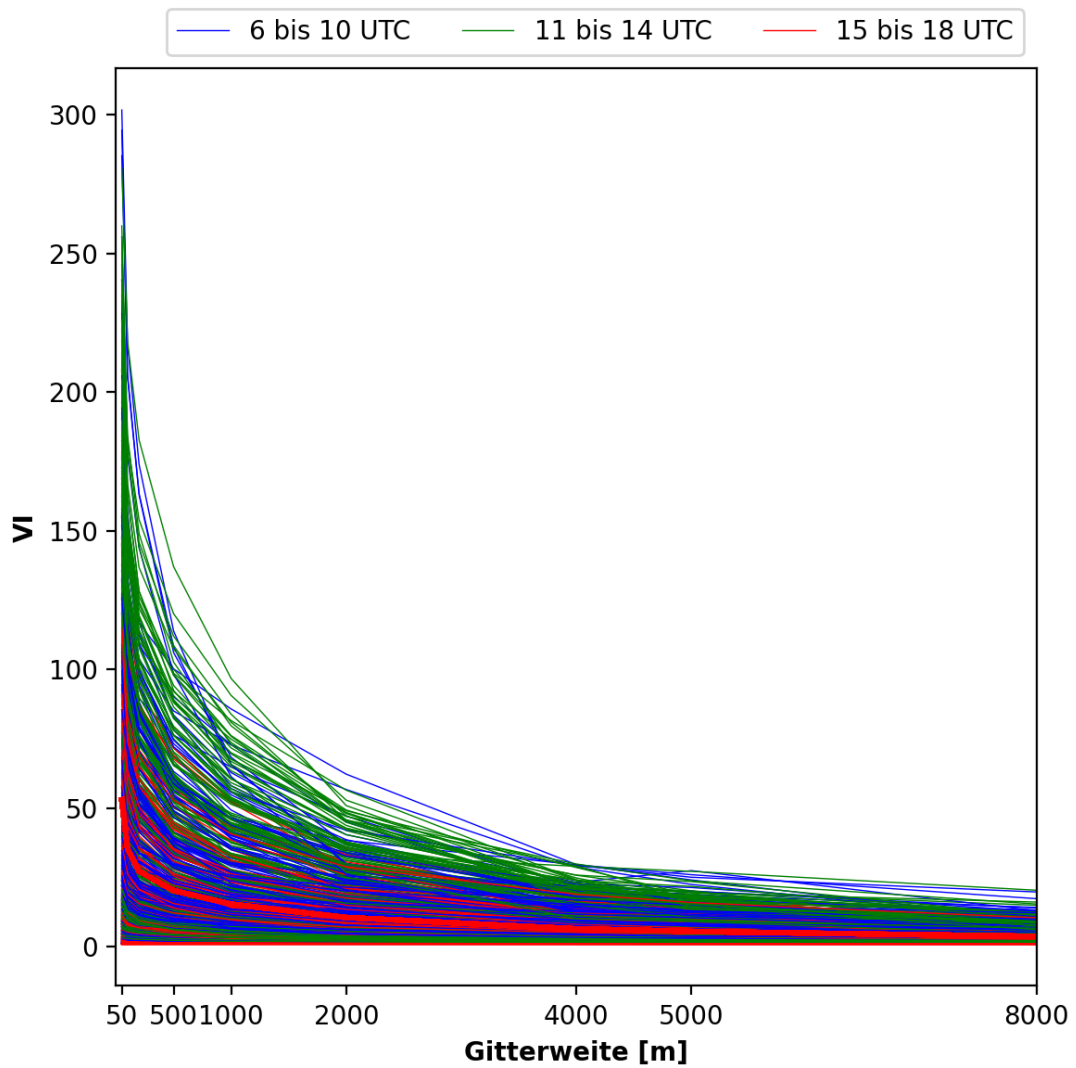


Abbildung 4.3: Die Variabilitätsindizes nach Stein für Eye2Sky im Juli 2022, täglich gemittelt, für die verschiedenen Gitterweiten von 50 m bis 8000 m. Die Werte sind in drei Zeitabschnitte von 6 bis 10 UTC (blau), 11 bis 14 UTC (grün) und 15 bis 18 UTC (orange) eingeteilt. Zusätzlich ist der berechnete Mittelwert (rot) über den gewählten Zeitraum dargestellt.

Variabilität in Eye2Sky				
Gitterweite [m]	VI _{MEAN}	VI _{MAX}	GHI _{MEAN} [Wm ⁻²]	GHI _{MAX} [Wm ⁻²]
50	53.1	301.8	366.8	856.9
100	35.4	218.3	366.8	856.9
200	27.3	182.8	366.7	856.9
500	20.3	137.1	366.6	856.9
1000	15.4	96.8	366.4	857.0
2000	10.6	62.3	366.1	857.1
4000	6.5	29.9	366.0	857.9
5000	5.6	27.5	366.0	856.9
8000	3.8	20.5	366.1	857.6

Tabelle 4.2: Mittel- und Maximalwerte des VI im Juli 2022 bei unterschiedlichen Gitterweiten

In dieser Grafik sind analog zu der vorigen Darstellung des Beispieltages, die Variabilitätsindizes in drei Zeitintervalle von 6 - 10 UTC (blaue Linien), 11 bis 14 UTC (grüne Linien) und von 14 bis 18 UTC (orange Linien) unterteilt. Die Reduktion der Indizes mit gröber werdender Auflösung ist auch hier gut zu erkennen. Bei einer Auflösung von 50 Metern liegt der mittlere Variabilitätsindex im Mittel bei 95.7 und reduziert sich bis 1000 Meter auf 27.6. Anders als in dem zuvor gewählten Beispiel, treten über einen Monat betrachtet die höchsten Werte größtenteils zwischen 11 UTC und 14 UTC auf. Durch die hohe Einstrahlung in diesem Zeitraum herrschen am wahrscheinlichsten günstige Bedingungen für konvektive Bewölkung. Außerdem lässt sich dies durch die Abhängigkeit des Variabilitätsindex vom Sonnenzenitwinkel erklären. In dieser Zeit ist der Sonnenzenitwinkel am niedrigsten und damit die Clear-Sky Strahlung am höchsten. Wie zuvor beschrieben, sind die Strahlungsgradienten unter diesen Umständen am stärksten, was sich auf die Absolutwerte des VI auswirkt. Der Strahlungsgradient, den eine Wolke verursacht, ist bei niedrigem Sonnenstand und damit einhergehender niedriger Clear-Sky Strahlung geringer, als bei hohem Sonnenstand mit hoher Clear-Sky Strahlung. Das bedeutet, dass anhand des Variabilitätsindex nicht direkt auf die Wolkenart und -verteilung geschlossen werden kann, sondern die Höhe des Index ein Maß für die vorherrschenden Strahlungsgradienten darstellt. Für die Strahlungsprognose hinsichtlich der Photovoltaikplanung sind allerdings die absoluten Gradienten von Bedeutung.

Für die Analyse des gesamten Jahres sind in Abbildung 4.4 die kumulativen Häufigkeiten der Variabilitätsindizes für 2022 bei den unterschiedlichen Gitterweiten dargestellt.

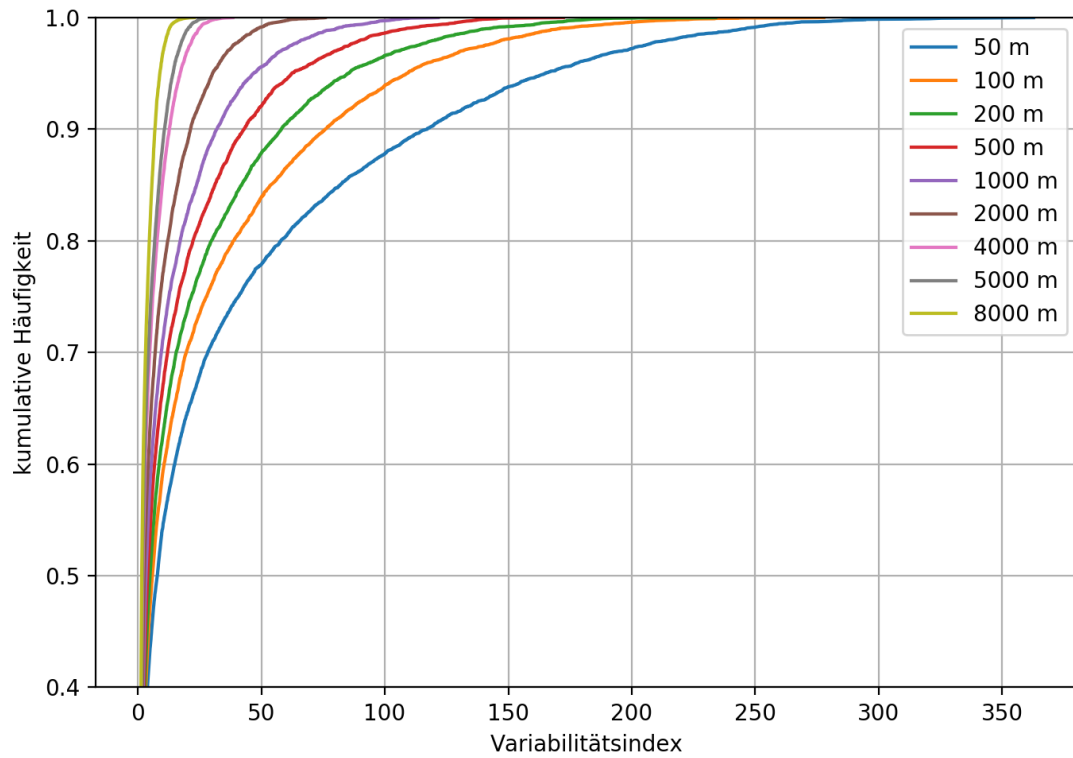


Abbildung 4.4: kumulative Häufigkeit der Variabilitätsindizes nach Stein für Eye2Sky, über 30 Minuten gemittelt, im Jahr 2022 für die verschiedenen Gitterweiten von 50 m bis 8000 m.

An dieser Grafik lässt sich ebenfalls deutlich der Einfluss der räumlichen Auflösung, durch die kleiner werdende Spanne in der Verteilung der Variabilitätsindizes, bei größer werdender Gitterweite, erkennen. Für ungefähr 40% der Daten, sind die VI Werte unabhängig der räumlichen Auflösung sehr gering. Darunter fallen sämtliche homogenen Situation, also sehr bedeckte Wolkensituationen und Situationen bei nahezu klarem Himmel. Bei einer Auflösung von 50 Metern haben die berechneten Variabilitätsindizes eine Spanne zwischen 1 und 300. Diese reduziert sich deutlich und die Indizes liegen bei 1000 Metern noch zwischen 1 und 100. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass je nach Gitterweite eine deutlich feinere Unterscheidung der variableren Situationen möglich ist.

4.2 Variabilität in nextGEMS

Im Folgenden wird, wie zuvor mit Eye2Sky bereits erfolgt, die Variabilität in dem ICON Lauf des Klimamodells nextGEMS für das Jahr 2022 analysiert. Der zu untersuchende Lauf startet im Jahr 2020 und simuliert von da an die GHI bis Ende 2022. Die native räumliche Auflösung liegt hier bei 5000 Metern und die Werte kommen in einer 30-minütigen zeitlichen Auflösung. Wie in Abschnitt 3.2 kann die Berechnung des Variabilitätsindex nach Gleichung 2.4 hier direkt auf die Daten des Laufs, ohne vorherige zeitliche Mittelungen angewandt werden. Die Berechnung des Variabilitätsindex wird ebenfalls für dieselben Skalierungsschritte durchgeführt, wobei zu beachten ist, dass die feineren Auflösungen über 5000 Meter hier durch Interpolation der Daten errechnet wurde. Dadurch sind die unterschiedlichen Gitterweiten in der Bewertung von nextGEMS weniger von Bedeutung, da durch das Hochskalieren kein Informationsgewinn möglich ist. Deshalb werden in der folgenden Betrachtung die gröberen räumlichen Auflösungen zwischen 2000 Metern und 8000 Metern betrachtet. Mit einer Gitterweite von mehreren Kilometern kann kleinskalige Bewölkung für ein Untersuchungsgebiet dieser Größe, nicht repräsentiert werden, so wie zuvor mit Eye2Sky. Da die explizite Auflösung von Wolken eines der Ziele der neuen Erdsystemmodelle ist, soll dennoch überprüft werden, ob variable Wolkensituationen in der Simulation der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke in dem ICON Lauf repräsentiert werden können. Dafür soll erneut der Variabilitätsindex für einen einzelnen Tag und der Verteilung nach der Tageszeit betrachtet werden, um zu beurteilen, wie die Verteilung des Variabilitätsindex im Tagesgang verläuft.

Um zu zeigen wie sich der VI für an einem prognostizierten Beispieltag im Modell verhält, sind in Abbildung 4.5 die berechneten Werte für den Modelllauf, bei unterschiedlicher Skalierung, für den zuvor betrachteten Beispieltag am 02.07.2022, dargestellt. Die berechneten Mittel- und Maximalwerte des Variabilitätsindex und der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke sind in Tabelle 4.3 abgebildet.

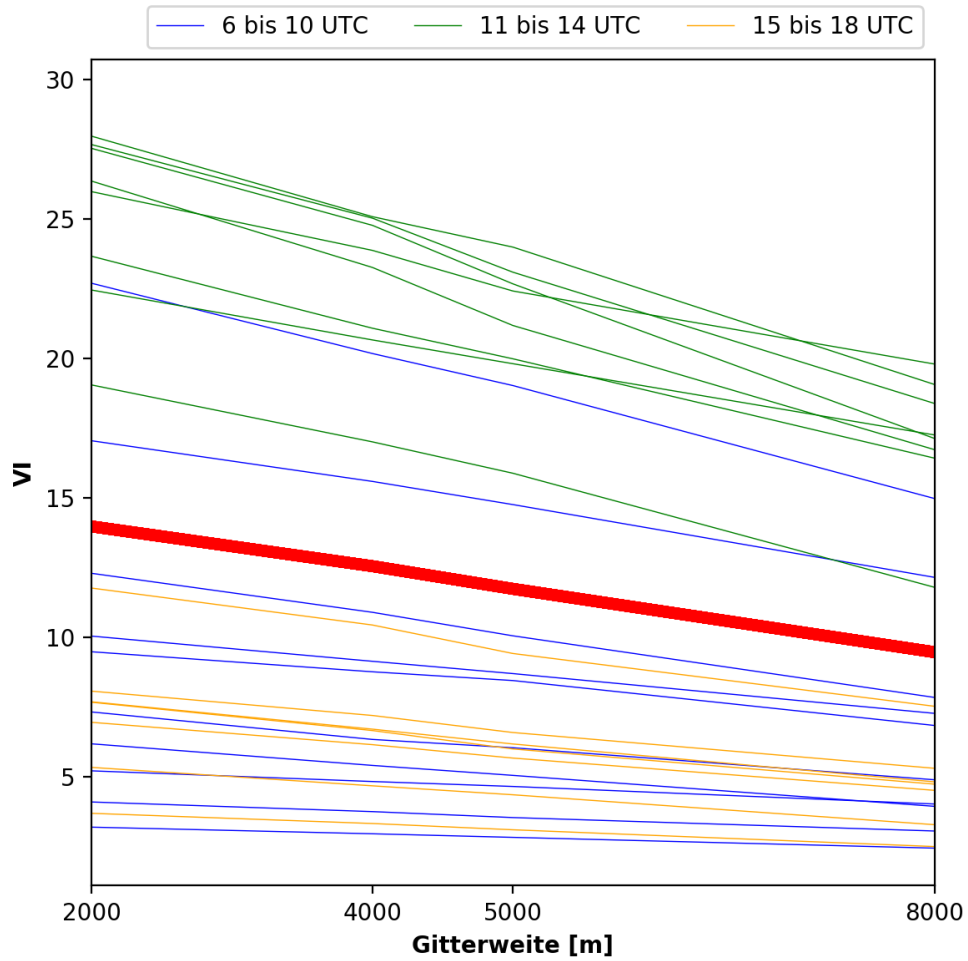


Abbildung 4.5: Die Variabilitätsindizes nach Stein für nextGEMS vom 02.07.2022 von 06 bis 18 UTC für die verschiedenen Gitterweiten von 2000 m bis 8000 m. Die Werte sind in drei Zeitabschnitte von 6 bis 10 UTC (blau), 11 bis 14 UTC (grün) und 15 bis 18 UTC (orange) eingeteilt. Zusätzlich ist der berechnete Mittelwert (rot) über den gewählten Zeitraum dargestellt.

Variabilität in nextGEMS				
Gitterweite [m]	VI _{MEAN}	VI _{MAX}	GHI _{MEAN} [Wm ⁻²]	GHI _{MAX} [Wm ⁻²]
2000	14.0	27.9	357.9	543.4
4000	12.5	25.1	357.9	543.4
5000	11.7	24.0	357.9	543.4
8000	9.5	19.8	357.9	543.4

Tabelle 4.3: Mittel- und Maximalwerte des VI und der GHI vom 02.07.2022 bei unterschiedlichen Gitterweiten für den ICON Lauf von nextGEMS

Die Variabilitätsindizes sind erneut in drei Zeitintervalle von 6 - 10 UTC (blaue Linien), 11 bis 14 UTC (grüne Linien) und von 14 bis 18 UTC (orange Linien) eingeteilt. Die Indizes reichen im Tagesgang von niedrigen Werten nahe 1 bis 27.9 und liegen im Mittel, bei der Originalauflösung von 5000 Metern bei 11.7. Die globale horizontale Bestrahlungsstärke ist unabhängig von der räumlichen Auflösung und liegt im Mittel konstant bei 357.9 Wm^{-2} und maximal 543.4 Wm^{-2} . Aus der Grafik ist ersichtlich, dass die hohen Variabilitätsindizes besonders im Zeitraum zwischen 11 bis 14 UTC vorkommen. Die hohen Werte tauchen also bei niedrigem Sonnenzenitwinkel und hoher Clear-Sky Strahlung zur Mittagszeit auf.

Der hier zu erkennende leichte Anstieg in den feineren interpolierten Auflösungen, ist höchstwahrscheinlich auf statistische Effekte bei der Skalierung zurückzuführen, da durch die Interpolation nicht mehr Information über Variabilität in den feineren Gitterweiten vorhanden sein kann.

In Abbildung 4.6 sind die VI des Monats Juli im Jahr 2022 von 2000 Metern bis 8000 m dargestellt. Die Mittel- und Maximalwerte der Variabilitätsindizes und der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke im Juli 2022 sind Tabelle 4.4 zu entnehmen.

Variabilität in nextGEMS				
Gitterweite [m]	VI _{MEAN}	VI _{MAX}	GHI _{MEAN} [Wm ⁻²]	GHI _{MAX} [Wm ⁻²]
2000	8.5	29.5	417.3	867.5
4000	7.7	26.2	417.3	867.5
5000	7.2	24.3	417.3	867.5
8000	5.9	21.2	417.3	867.5

Tabelle 4.4: Mittel- und Maximalwerte des VI und der GHI vom 07.2022 bei unterschiedlichen Gitterweiten für den ICON Lauf von nextGEMS

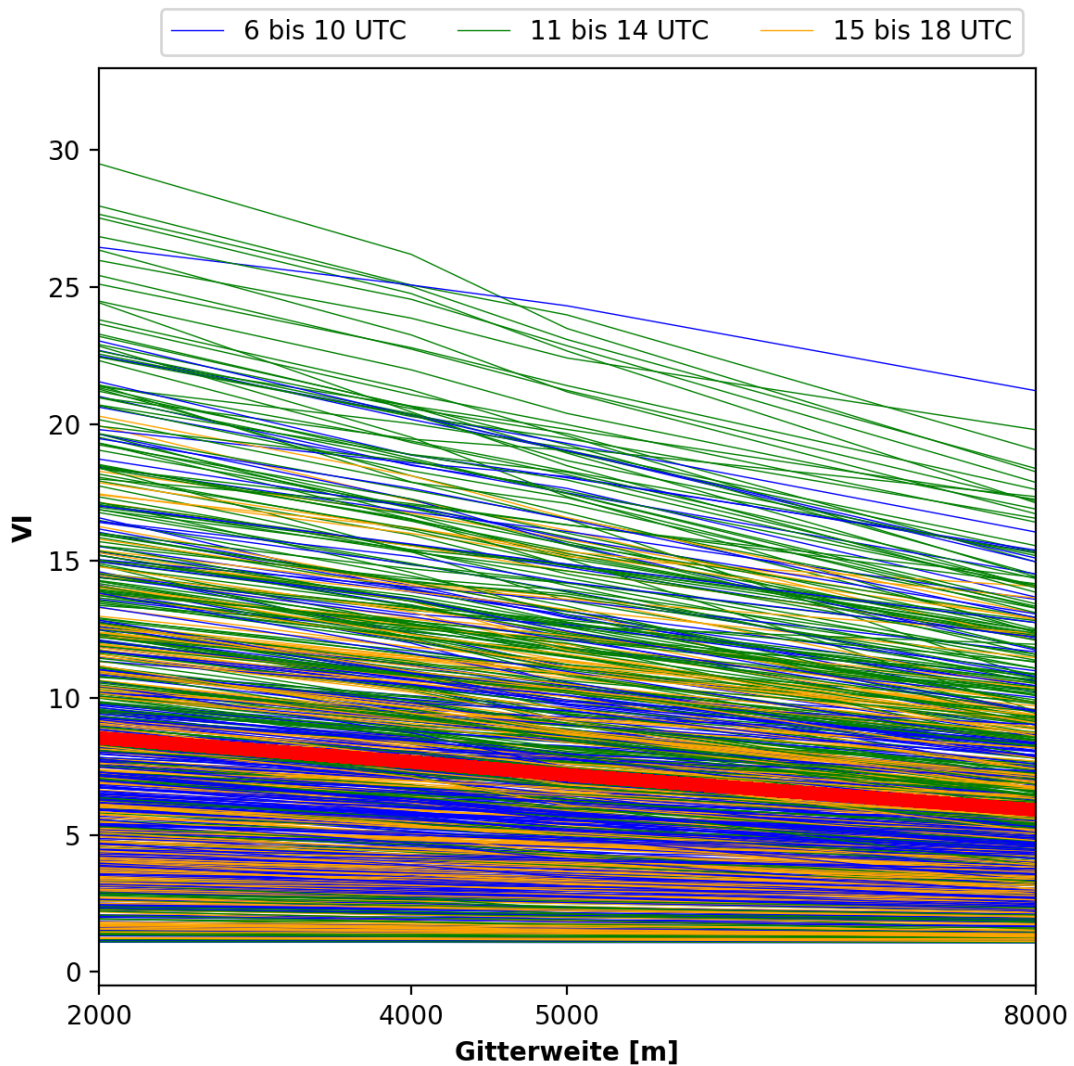


Abbildung 4.6: Die Variabilitätsindizes nach Stein für nextGEMS vom Juli 2022 von 06 bis 18 UTC für die verschiedenen Gitterweiten von 2000 m bis 8000 m. Die Werte sind in drei Zeitabschnitte von 6 bis 10 UTC (blau), 11 bis 14 UTC (grün) und 15 bis 18 UTC (orange) eingeteilt. Zusätzlich ist der berechnete Mittelwert (rot) über den gewählten Zeitraum dargestellt.

Die Variabilitätsindizes im Juli 2022 sind hier ebenfalls in drei Zeitabschnitte von 6 - 10 UTC (blaue Linien), 11 bis 14 UTC (grüne Linien) und von 14 bis 18 UTC (orange Linien) unterteilt. Die Werte liegen im Mittel bei 7.2 und bewegen sich zwischen 1 und 24.3 bei originaler Auflösung von 5000 Metern.

In allen drei Zeitintervallen tauchen Situationen mit hoher Variabilität auf, allerdings häufen sich auch hier die höchsten Werte in der Mittagszeit zwischen 11 und 14 UTC bei niedrigem Sonnenzenitwinkel und damit einhergehender hoher Clear-Sky Strahlung.

Die kumulative Häufigkeit der Variabilitätsindizes von nextGEMS für das Jahr 2022 ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

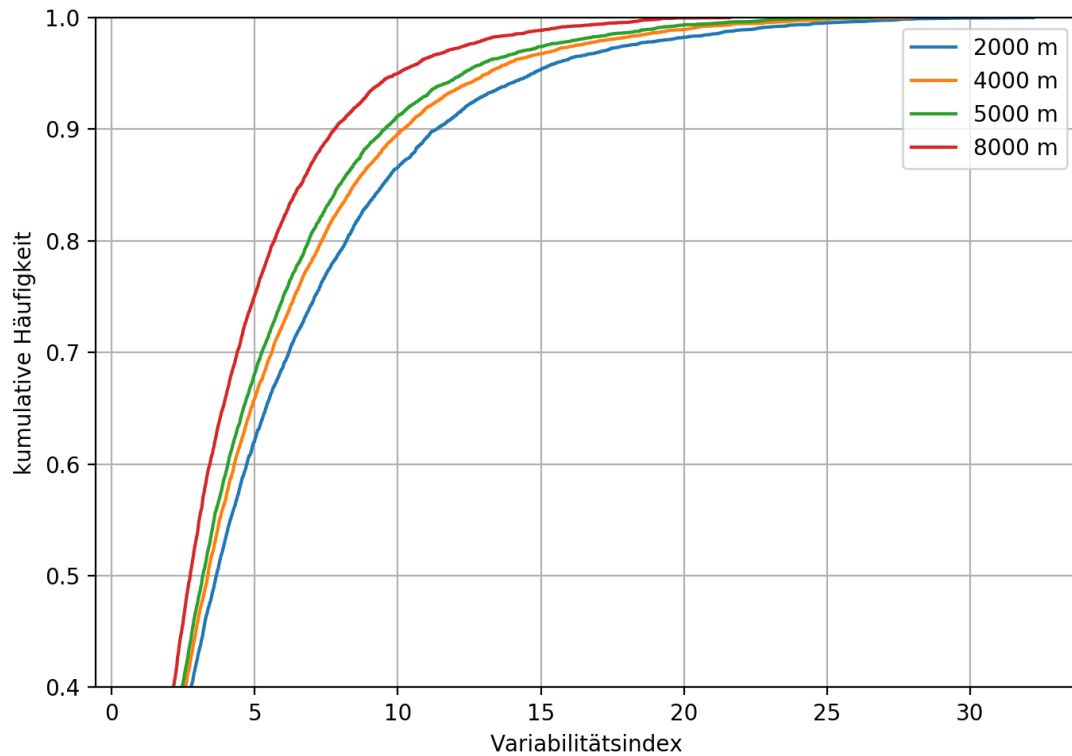


Abbildung 4.7: kumulative Häufigkeit der VI von nextGEMS für das Jahr 2022 bei räumlicher Auflösung von 2000 m (blau), 4000 m (orange), 5000 m (grün) und 8000 m (rot).

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Verteilung der Variabilitätsindizes für alle räumlichen Auflösungen nah zusammen liegen. Wie zuvor beschrieben, ist für die Daten mit einer räumlichen Auflösung unter 5000 Metern, kein Informationsgewinn zu erwarten, weshalb die Verteilung der Indizes für alle dargestellten Gitterweiten in ähnlicher Größenordnung liegt. Bei nativer Auflösung von 5000 Metern (grün), erreicht der berechnete Variabilitätsindex ein Maximum von 26.6 im Jahr 2022. Es lässt sich feststellen, dass der Index in ca. 10% der betrachteten Situationen einen Wert von 10 oder größer erreicht.

4.3 Vergleich Eye2Sky mit nextGEMS

Die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Untersuchungen für Eye2Sky und nextGEMS hinsichtlich der Variabilität werden nun verglichen. Wie in Abschnitt 3.2 bereits erwähnt, lassen sich die Simulationen von Eye2Sky und nextGEMS zeitlich nicht direkt gegenüberstellen. Bei Eye2Sky handelt es sich um eine kurzfristige Projektion der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke basierend auf Wolkenkamerabildern. Die Simulation der Bestrahlungsstärke basiert also auf Bildern die direkt zu dem betrachteten Zeitpunkt aufgenommen wurden, während die GHI aus dem ICON Lauf von nextGEMS Ergebnisse eines Klimamodells sind. Zusätzlich dazu kann Eye2Sky durch die sehr feine Auflösung von 50 Metern auch Einflüsse durch kleinskalige Bewölkung erfassen, während bei einer Auflösung von 5000 Metern detaillierte Wolkenstrukturen in dieser Größenordnung nicht repräsentiert werden können. Für die folgende Gegenüberstellung werden Tages- und Monatsmittelwerte für 2022 betrachtet, da ein Vergleich einzelner Tage als nicht sinnvoll erachtet wird. Um die Daten vergleichbar zu machen, sollen im folgenden die Untersuchungen beider Datensätze bei gleicher zeitlicher und räumlicher Auflösung betrachtet werden. Damit soll überprüft werden, ob durch die ursprünglich feinere Auflösung von Eye2Sky mehr Variabilität vorhanden ist, beziehungsweise wie viel Variabilität, trotz der relativ groben Auflösung des Klimamodells, dargestellt werden kann.

Unter der Annahme, dass besonders in den Sommermonaten vermehrt variable Situationen vorkommen, die durch konvektive Bewölkung geprägt sind, werden vorrangig die Sommermonate betrachtet und gegenübergestellt.

Es wird angenommen, dass die zeitliche und räumliche Auflösung der berechneten Eye2Sky-Daten aufgrund der höher aufgelösten Datenbasis die vorherrschende Strahlungssituation am genauesten abbilden können. Daher sollen diese als Referenz dienen.

Dafür sollen zu Beginn die Variabilitätsindizes für das Jahr 2022 bei Gitterweiten betrachtet werden, die von Klimamodellen erreicht werden können. In Abbildung 4.8 sind die berechneten Monatsmittel des Variabilitätsindex für die Gitterweiten von 2000 Meter bis 8000 Meter dargestellt.

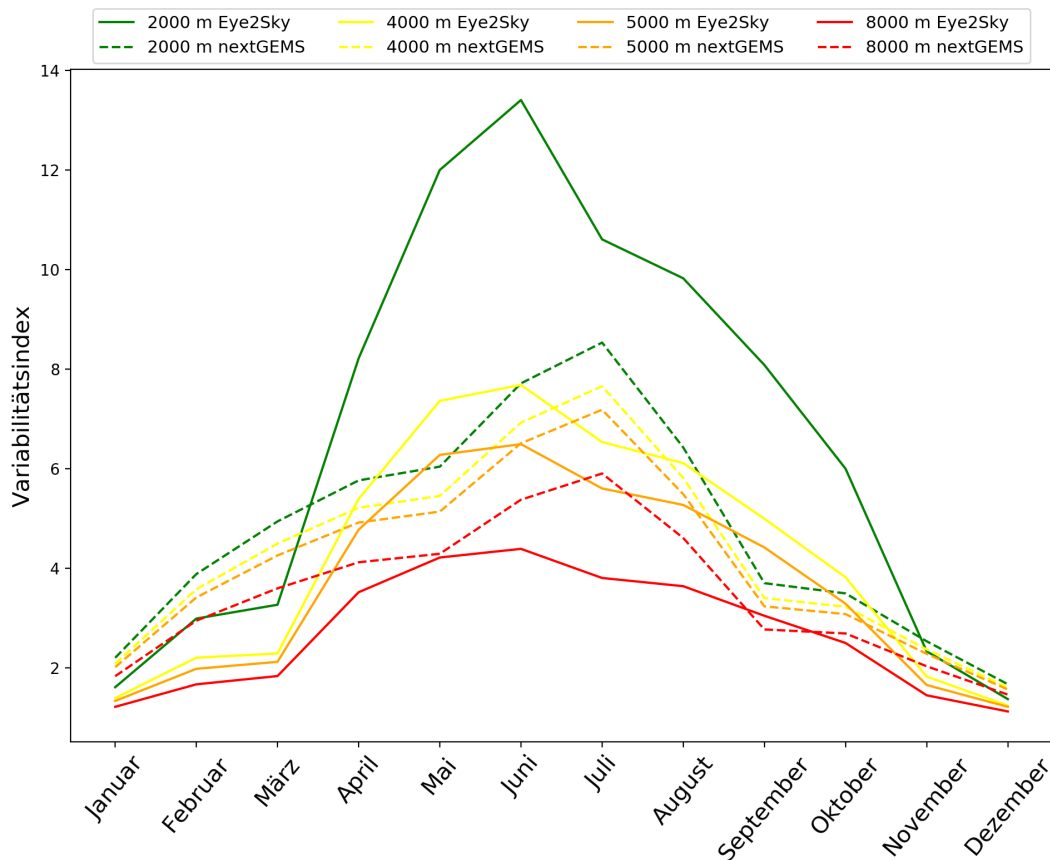


Abbildung 4.8: zeitlicher Verlauf der für das Jahr 2022 berechneten Variabilitätsindizes, monatlich gemittelt für Eye2Sky (durchgezogene Linie) und nextGEMS (gestrichelte Linie), bei unterschiedlichen Gitterweiten von 2000 m bis 8000 m. Zu beachten ist die unterschiedliche Skala auf der y-Achse.

In der Abbildung sind die berechneten monatlichen Mittelwerte des Variabilitätsindex von Eye2Sky und nextGEMS im Jahresverlauf für die Gitterweiten 2000 Meter (grün), 4000 Meter (gelb), 5000 Meter (orange) und 8000 Meter (rot), dargestellt. Die in Eye2Sky bestimmte Variabilität erreicht das Maximum im Juni und ist im Dezember am geringsten. Der Verlauf der Variabilität in nextGEMS ist im Dezember ebenfalls am geringsten, aber erreicht das Maximum im Juli.

Die Variabilität in Eye2Sky ist bei 2000 Metern ungefähr doppelt so hoch, wie die Variabilität in nextGEMS. Durch die sehr feine Auflösung kann Eye2Sky kleinskalige Bewölkung und die dadurch verursachten Gradienten erfassen und zeigt somit bei sehr feiner Auflösung auch mehr Variabilität. Durch die erhöhte Strahlung bei klarem Himmel im Sommer und die dadurch günstigeren Bedingungen für Konvektion, kommen die höchsten Werte in den Sommermonaten vor. Der Einfluss der räumlichen Auflösung in Eye2Sky zeigt sich erneut durch die Stauchung der

Kurven bei steigender Gitterweite. Bei einer Auflösung von 5000 Metern, also in vergleichbarer Auflösung zu nextGEMS, bewegen sich die Indizes in einer ähnlichen Größenordnung.

Um zu überprüfen, ob in der Berechnung des Variabilitätsindex auch durch Wolken bedingte variable Situationen, die nicht zu Zeitpunkten bei niedrigem Sonnenzenitwinkeln beziehungsweise hoher Clear-sky Strahlung repräsentiert werden, soll die Korrelation des VI mit dem Clear-Sky Index nach Gleichung 2.1, untersucht werden.

Die Korrelation der täglich gemittelten Variabilitätsindizes mit dem Clear-Sky Index von Eye2Sky und nextGEMS für das Jahr 2022 bei vergleichbarer Gitterweite von 5000 Metern, ist in Abbildung 4.9 abgebildet.

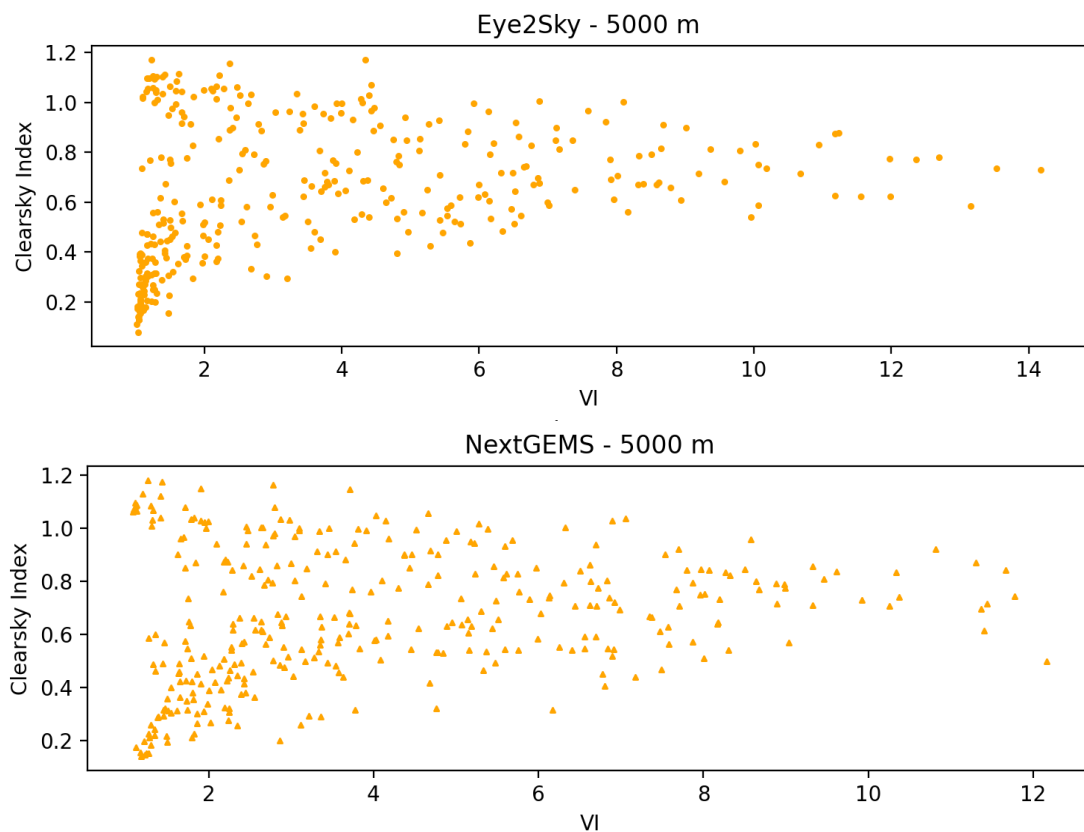


Abbildung 4.9: Scatterplot des Clear-Sky Index und dem entsprechenden VI, täglich gemittelt, für das Jahr 2022 bei einer Auflösung von 5000 m. Es muss beachtet werden, dass die Skalen der x-Achsen unterschiedlich sind.

In der Abbildung sind, ähnlich wie in Abbildung 2.2, sowohl für Eye2Sky als auch nextGEMS, Häufungen niedriger Variabilitätsindizes bei hohen und niedrigen Clear-Sky Indizes zu erkennen. Homogene Wolkenverhältnisse werden folglich mit niedrigen Variabilitätsindizes bewertet. Hohe Variabilität ist hauptsächlich in heterogenen Wolkensituationen bei Clear-Sky Indizes zwischen 0.6 und 0.9 zu verzeichnen. Die Höhe des Variabilitätsindex lässt folglich auch Rückschlüsse auf

die vorherrschende Bewölkung zu. Soll der Variabilitätsindex präzise Aussagen über die Bewölkung ermöglichen, muss der Index auf die mittlere Clear-Sky Strahlung normiert werden. Damit wäre der Index nicht mehr abhängig von den Absolutwerten der eingehenden Bestrahlungsstärke und die damit ermittelte Variabilität wäre gänzlich durch Wolken verursacht.

Bei einer vergleichbaren Auflösung von 5000 Metern ist die Größenordnung der täglich gemittelten Indizes mit einem Maximum von 14 für Eye2Sky und 12 für nextGEMS, sehr ähnlich. Um zu beurteilen, wie oft die jeweiligen Indizes in der Analyse von Eye2Sky beziehungsweise nextGEMS auftauchen, werden erneut die Häufigkeiten betrachtet.

In Abbildung 4.10 ist die kumulative Häufigkeit der halbstündig berechneten Variabilitätsindizes für das Jahr 2022 abgebildet.

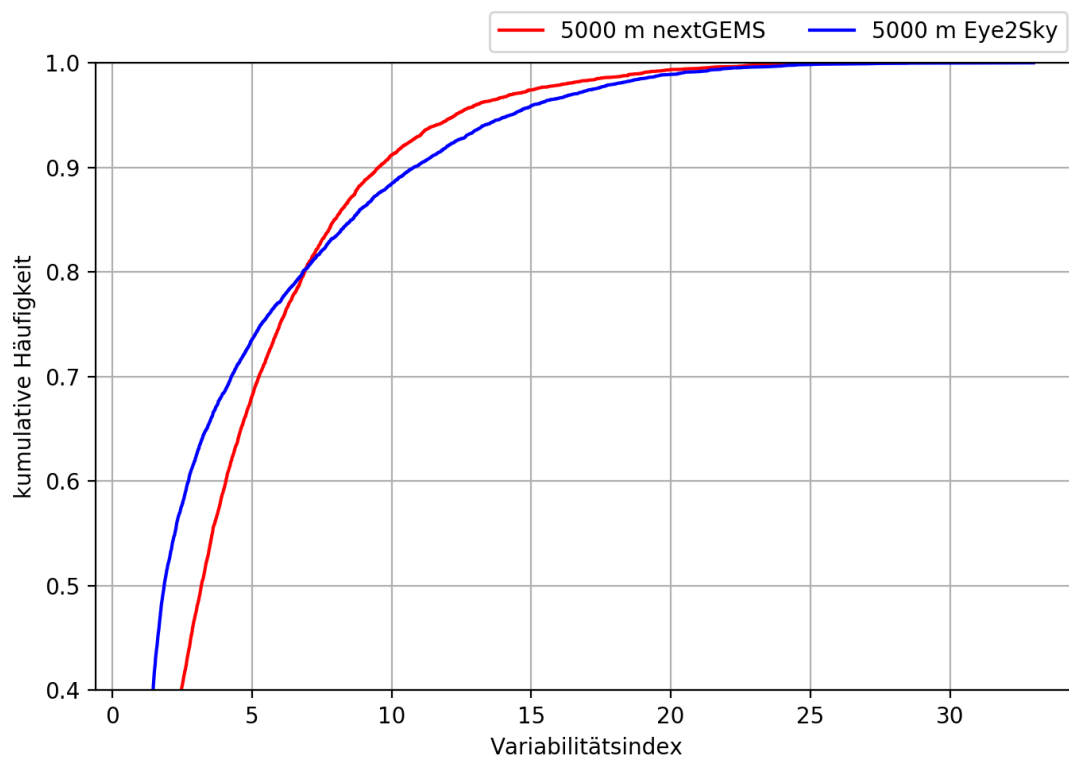


Abbildung 4.10: kumulative Häufigkeit der Variabilitätsindizes nach Stein für Eye2Sky, über 30 Minuten gemittelt, im Jahr 2022 für die verschiedenen Gitterweiten von 50 m bis 8000 m.

Betrachtet man die kumulativen Häufigkeiten der Variabilitätsindizes bei einer vergleichbaren räumlichen Auflösung von 5000 Metern von Eye2Sky und nextGEMS, zeigen diese eine ähnliche Verteilung in einer Spanne von 1 bis maximal 26. Die Verteilung der kumulativen Häufigkeiten zeigt auf, dass bei einer vergleichbaren Gitterweite die Variabilität in beiden Projektionen für das Jahr 2022, in ähnlicher Größenordnung und Häufigkeit prognostiziert ist. Für 80% der ausgewerteten Situationen im Jahr liegen die Variabilitätsindizes von Eye2Sky und nextGEMS

bei maximal 7. Für 20% der ausgewerteten Situationen im Jahr zeigt die Variabilitätsanalyse Werte über 7 bis maximal 26 für Eye2Sky und 24 für nextGEMS. Der etwas flachere Verlauf der Häufigkeitsverteilung bei Eye2Sky deutet darauf hin, dass bei relativ homogenen Situationen, die Details nicht so gut erfasst werden können, weshalb die Verteilung der niedrigen Variabilitätsindizes keine ganz so große Spanne aufzeigt, wie dies bei nextGEMS der Fall ist. In Situationen mit viel Variabilität ist es umgekehrt und die Variabilitätsindizes verteilen sich breiter als in der Analyse des Klimamodells.

Für eine abschließende Bewertung des Vergleichs zwischen Eye2Sky und nextGEMS sollen die absoluten Häufigkeiten betrachtet werden. In Abbildung 4.11 sind die Häufigkeiten der täglich gemittelten Variabilitätsindizes für das Jahr 2022 dargestellt.

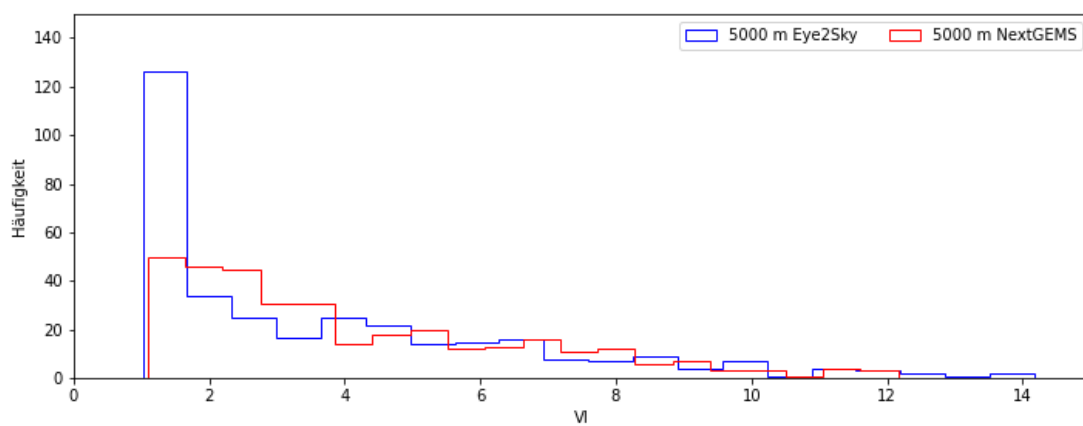


Abbildung 4.11: Häufigkeit der Variabilitätsindizes nach Stein für Eye2Sky, über 30 Minuten gemittelt, im Jahr 2022 für die verschiedenen Gitterweiten von 50 m bis 8000 m.

Der zuvor gewonnene Eindruck, dass die Differenzierung in homogenen Situationen in Eye2Sky nicht so stark ausgeprägt ist, wird durch diese Grafik bestätigt. Die Verteilung der Häufigkeiten des Index bei gleicher räumlicher Auflösung von 5000 Metern für Eye2Sky zeigt, dass homogene Situationen deutlich häufiger mit einem Variabilitätsindex von 1 bewertet werden, als dies bei nextGEMS der Fall ist. Ein Variabilitätsindex von 1 kommt mit einer Häufigkeit von über 120 in Eye2Sky deutlich häufiger vor, als im betrachteten nextGEMS Lauf mit ungefähr 50. Die Verteilung und damit die Bewertung der Variabilität der beiden Prognosen ist allerdings auch hier ähnlich verteilt und unterscheidet sich merklich nur in der breiteren Differenzierung von hoher Variabilität von Eye2Sky und der breiteren Verteilung bei homogenen Situationen im Klimamodell.

4.4 Vergleich der absoluten GHI mit Bodenmessungen

In diesem Abschnitt soll beantwortet werden, wie repräsentativ die Darstellung der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke im Jahr 2022 durch Eye2Sky beziehungsweise nextGEMS ist. Da es sich bei beiden Produkten, um Prognosen handelt, sind für diese Beurteilung Messwerte zur Referenz nötig. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, gehören zu den Kameras in Eye2Sky noch acht Messstationen, die mithilfe der beschriebenen Messinstrumente die Strahlung für das betrachtete Untersuchungsgebiet punktuell, mit einer zeitlichen Auflösung von 60 Sekunden, bestimmen können. Anhand der Daten soll beurteilt werden, wie repräsentativ die Projektionen der GHI von Eye2Sky und nextGEMS hinsichtlich der tatsächlich gemessenen Bestrahlungsstärke sind. In Abbildung 4.12 sind die monatlich gemittelten Werte der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke, von Eye2Sky, nextGEMS und der mittleren gemessenen Bestrahlungsstärke zu sehen. Die dazugehörigen Werte und die Differenzen zu den aus Eye2Sky und nextGEMS bestimmten Mittelwerten, sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

GHI 2022 Oldenburg+ in Wm^{-2}				
Monat	GHI _{MEAN}	GHI _{MAX}	$\Delta\text{GHI}_{\text{E2S}}(\%)$	$\Delta\text{GHI}_{\text{nextGEMS}}(\%)$
Januar	68.8	276.0	-0.4 (-0.7%)	4.9 (6.5%)
Februar	130.5	447.3	2.9 (2.2%)	19.3 (12.7%)
März	283.2	634.3	20.2 (6.7%)	-68.4 (-31.5%)
April	346.4	790.2	-1.6 (-0.5%)	-15.6 (-4.7%)
Mai	398.8	864.5	-8.8 (-2.2%)	38.6 (8.8%)
Juni	430.5	990.6	-3.9 (-0.9%)	56.7 (11.6%)
Juli	371.6	840.9	-5.2 (-1.4%)	46.1 (11.0%)
August	428.5	802.3	5.3 (1.2%)	-23.9 (-5.9%)
September	279.1	699.0	-8.2 (-3.0%)	84.3 (23.2%)
Oktober	227.4	623.4	-12.4 (-5.6%)	-17.8 (-8.3%)
November	93.7	604.1	10.1 (9.7%)	16.8 (14.9%)
Dezember	60.0	284.8	7.2 (10.7%)	5.6 (8.5%)

Tabelle 4.5: monatliche Mittel- und Maximalwerte der gemessenen Bestrahlungsstärke für das Gebiet Oldenburg+ und die Differenz zu den Projektionen von Eye2Sky und nextGEMS (Modell - Messung).

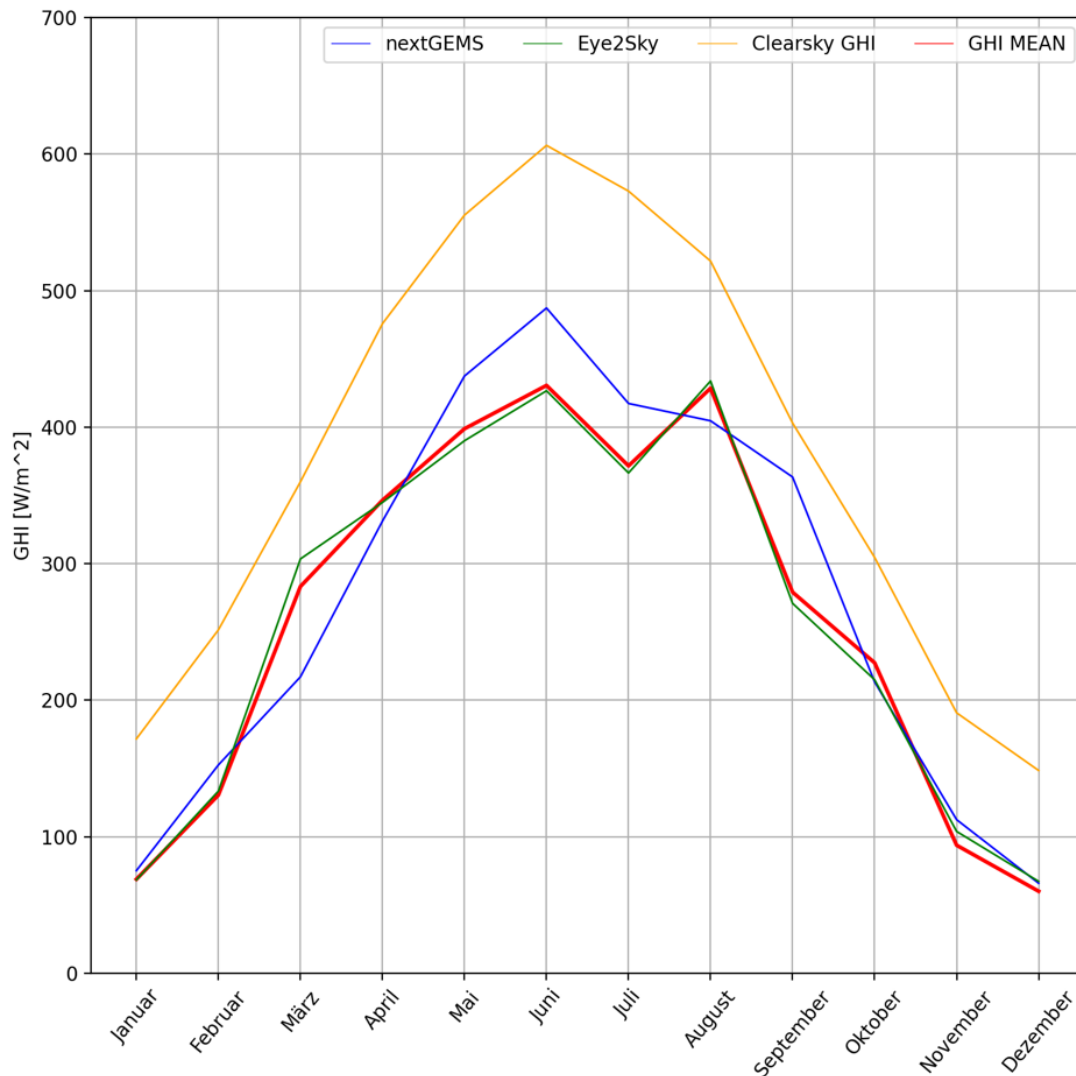


Abbildung 4.12: Clear-Sky GHI(orange) und GHI von nextGEMS(blau), Eye2Sky(grün) und der gemittelten gemessenen Bestrahlungsstärke (rot) der acht Messstationen im Untersuchungsgebiet Oldenburg+.

Die Grafik zeigt die monatlichen Mittelwerte der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke für nextGEMS (blau), Eye2Sky (grün), der Clear-Sky Strahlung (orange) und der Messstationen (rot) für das Untersuchungsgebiet Oldenburg+. Die rote Kurve stellt den Mittelwert der Bestrahlungsstärke dar, die an den acht Messstationen von Eye2Sky, die sich in dem Untersuchungsgebiet befinden, aufgenommen wurde. Im Jahresverlauf steigt die mittlere gemessene Bestrahlungsstärke im Juni auf maximal 430.5 Wm^{-2} an und fällt bis zum Dezember auf ein Minimum von 60 Wm^{-2} . Die projizierte mittlere Bestrahlungsstärke von Eye2Sky erreicht ihr Maximum im

Juni mit 433.8 Wm^{-2} und ihr Minimum mit 67.2 Wm^{-2} im Dezember. Die Bestrahlungsstärke in nextGEMS ist im Juni mit 487.2 Wm^{-2} am höchsten und ebenfalls im Dezember mit 65.6 Wm^{-2} am geringsten.

Die nextGEMS Daten zeigen größtenteils eine Überschätzung der tatsächlichen Bestrahlungsstärke. Im Mittel weicht die Bestrahlungsstärke des Modells um 12.3% von den Messdaten ab. Die größte prozentuale Abweichung ist im März mit einer Unterschätzung der Messdaten von 31.5%.

Eye2Sky simuliert die tatsächliche Bestrahlungsstärke sehr treffend mit einer mittleren Abweichung von 3.7% und einer maximalen Abweichung von 10.7% im Dezember. Die Abweichung im Dezember beträgt lediglich 7.2 Wm^{-2} und die vergleichsweise hohe prozentuale Abweichung ist auf die niedrige mittlere Einstrahlung im Winter zurückzuführen.

4.5 Vergleich der Kameratypen

In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche Kameratypen, hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Auflösung untersucht. Zwischen dem 31.10.2023 und dem 31.12.2023 wurde in Oldenburg, bei der Station OLUOL von Eye2Sky, das hemispherical sky imager System vom Institut für Meteorologie und Klimatologie installiert. Die zu vergleichenden Kameras sind die Mobotix Q25 6MP, die im Eye2Sky Netzwerk verwendet werden und die Canon EOS 750D, welche in dem hemispherical sky imager System verwendet wird. Die Bilder beider Kameras wurden mit einem Algorithmus zur Wolkenerkennung analysiert, um die Effektivität der Auflösung bei der Identifizierung und Differenzierung von Wolken auf Bildern zu bewerten. Der verwendete Algorithmus wurde ebenfalls am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover entwickelt.

Die Mobotix Q25 6MP besitzt eine Auflösung von 6 Megapixeln und kann Bilder mit bis zu 3072×2048 Pixeln erzeugen [Mobotix]. In Eye2Sky werden mit diesem Kameratyp alle 30 Sekunden Bilder des Himmels aufgenommen. Im Gegensatz dazu verfügt die Canon EOS 750D Spiegelreflexkamera über eine höhere Auflösung von ca. 24.2 Megapixeln (ca. 4000×6000 Pixel) und nimmt jede Minute ein Bild auf [EOS 750D].

Bei der Aufnahme der Kamerabilder mit dem hemispherical sky imager System trat, trotz integrierter Heizung, häufig Feuchtigkeit innerhalb des Geräts auf. Dies führte bei der Auswertung der Bilder häufig zu Fehlern bei der Wolkenklassifizierung. Deswegen soll die Analyse der Kamerabilder hier anhand eines Fallbeispiels vom 17.11.2023 um 13:27 UTC durchgeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt war die Bedeckung variabel und durch Cumulus geprägt. Die Kameras konnten beide nicht exakt gleich ausgerichtet werden. Aus diesem Grund sind die Bilder der Mobotix Kamera um 40° gedreht, damit die Sonne in beiden Bildern am gleichen Punkt steht und die Bilder visuell besser zu vergleichen sind.

Insbesondere bei durchbrochener Bewölkung sollte die Canon Kamera feine Details erfassen, die

von der Mobotix Kamera aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Auflösung nicht dargestellt werden können. Bei klarem Himmel und bedecktem Himmel sollten die Unterschiede weniger ausgeprägt sein, da größtenteils homogene Wolkensituationen weniger komplexe Strukturen aufweisen. Da die Erfassung von Wolken bei komplett bedecktem Himmel beziehungsweise bei klarem Himmel nicht die primäre Herausforderung in der Wolkenklassifikation darstellen, beschränkte sich die Untersuchung auf möglichst heterogene Wolkensituationen.

Es fällt auf, dass die Bilder der Mobotix Kamera deutlich dunkler sind, was einen Einfluss auf die Wolkenerkennung hat, da der Algorithmus die Unterscheidung zwischen Wolke oder keiner Wolke aus den Helligkeitsinformationen im aufgenommenen Bild trifft. Aus diesem Grund wurde die Helligkeit der Bilder, die mit der Mobotix Q25 6MP aufgenommen wurden, vor der Analyse erhöht und der Helligkeit der Bilder der Canon EOS 750D angepasst. Außerdem wurde überprüft, wie stark der Einfluss der Farbverhältnisse innerhalb des Bildes die Klassifizierung der Wolken beeinflusst. Dafür wurden zum Vergleich die Blauwerte des Bildes erhöht und die Rotwerte reduziert.

In Abbildung 4.13 ist das Ergebnis der Analyse des genannten Fallbeispiels vom 17.11.2023 um 13:27 UTC, welches mit der Canon EOS 750D aufgenommen wurde, dargestellt.

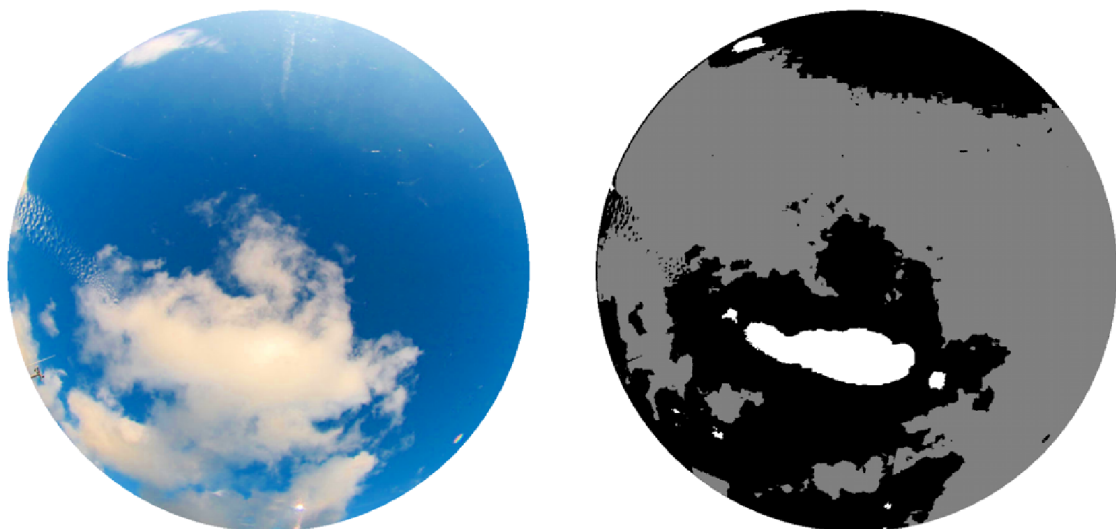


Abbildung 4.13: Analyse der Bedeckung mit CC Algorithmus aus ASI vom 17.11.2023 13:27 UTC. Auf der linken Seite ist ein Ausschnitt des AllSky image, welches mit der Canon EOS 750D Kamera vom IMuK aufgenommen wurde. Rechts ist die mit dem Algorithmus bestimmte Wolkenklassifikation dargestellt.

Auf der linken Seite ist der Ausschnitt des Bildes zu sehen. Die rechte Seite des Bildes zeigt die Klassifikation der vorherrschenden Bewölkung mit dem Algorithmus. Auch in diesem Fallbeispiel, ist die zuvor beschriebene Feuchtigkeit zu erkennen, die zu Problemen in der Wolkenklassifizierung führt. Die zum selben Zeitpunkt mit der Mobotix aufgenommene Wolkensituation und dessen Auswertung mit dem Algorithmus ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

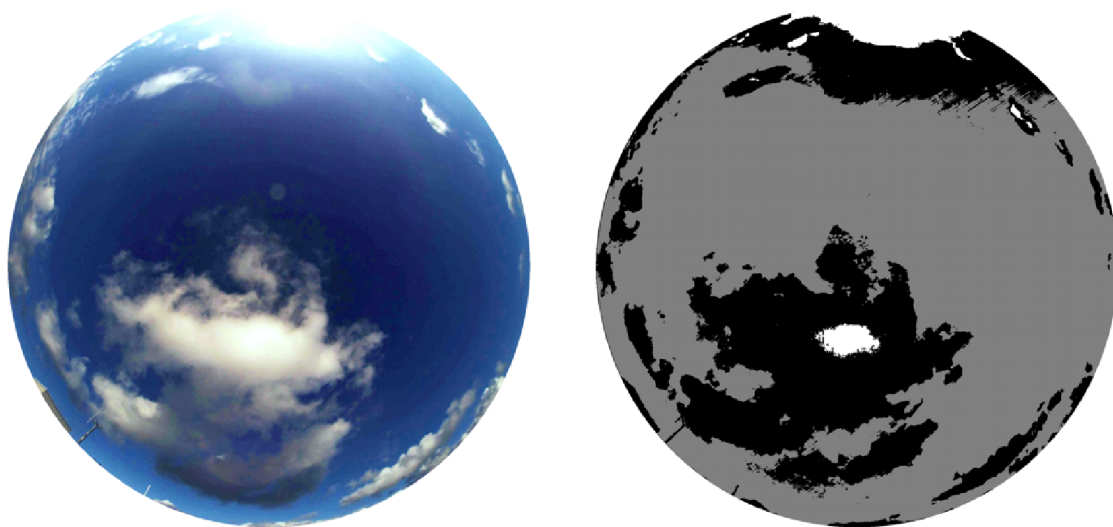


Abbildung 4.14: Analyse der Bedeckung mit CC Algorithmus aus ASI vom 17.11.2023 13:27 UTC. Auf der linken Seite ist ein Ausschnitt des AllSky image, welches mit der Mobotix Q25 6MP vom DLR aufgenommen wurde. Rechts ist die mit dem Algorithmus bestimmte Wolkenklassifikation dargestellt. Damit die Bilder mit dem Algorithmus klassifiziert werden konnten, wurde mit einer Tonwertkorrektur die Helligkeit erhöht.

Grundlegend lassen sich in der Klassifikation beider Bilder die Wolkenkanten und auch feine Strukturen gut erkennen. Die Wolke in Abbildung 4.13 erscheint sehr hell, weshalb das Zentrum der Wolke, fälschlicherweise als Sonne klassifiziert wird. Der gleiche Fehler, wenn auch weniger ausgeprägt, taucht auch in Abbildung 4.14 auf. Bereiche im Bild, die durch die Sonne etwas heller erscheinen, werden dadurch fälschlicherweise als Wolke klassifiziert. Dieser Fehler fällt in der Analyse der Bilder der Mobotix Kamera etwas geringer aus.

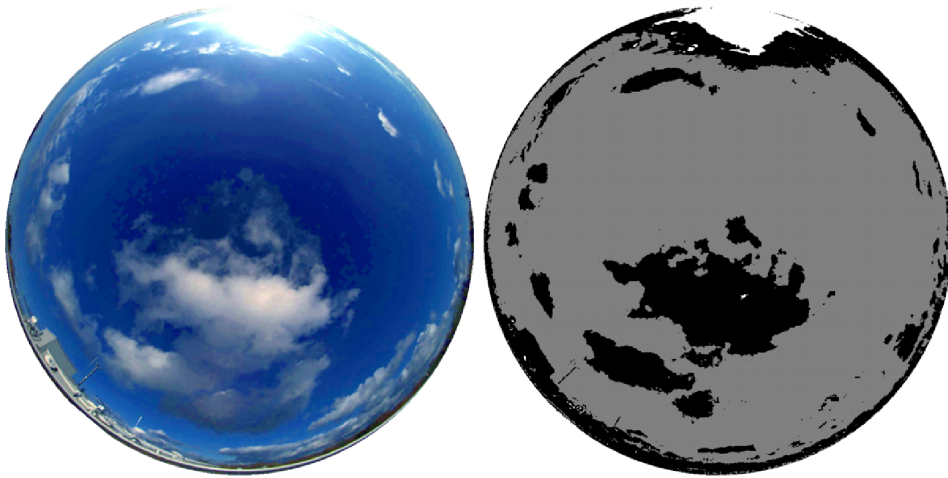


Abbildung 4.15: Analyse der Bedeckung mit CC Algorithmus aus ASI vom 17.11.2023 13:27 UTC. Auf der linken Seite ist ein Ausschnitt des AllSky image, welches mit der Mobotix Q25 6MP vom DLR aufgenommen wurde. Rechts ist die mit dem Algorithmus bestimmte Wolkenklassifikation dargestellt. Damit die Bilder mit dem Algorithmus klassifiziert werden konnten, wurde mit einer Tonwertkorrektur die Helligkeit erhöht. Zusätzlich wurde in diesem Beispiel der Blauwert erhöht und der Rotwert reduziert.

Die Tonwertkorrektur und die Reduktion der Helligkeitsgrenze im Algorithmus führten zu maßgeblichen Veränderungen in der Wolkenklassifikation (Abbildung 4.15). Das Zentrum der Wolke wird nicht mehr fälschlicherweise als Sonne klassifiziert. Die Änderung der Tonwerte lässt die Wolke etwas dunkler erscheinen, als in dem Beispiel zuvor. In Kombination mit dem reduzierten Grenzwert für Helligkeit im Algorithmus, wird dieser Fehler reduziert. Die horizontale Ausdehnung, der sich im Zentrum des Bildes befindenden Wolke, ist in diesem Beispiel etwas geringer und einige Wolkenstrukturen werden nicht detailliert oder gar nicht erfasst.

Die Untersuchung deutet darauf hin, dass für eine präzise Erfassung der Wolkenstrukturen nicht nur die Auflösung, sondern der Algorithmus selbst von entscheidender Bedeutung ist, da in der Analyse beider Kameras feine Details erkennbar sind. Die Erfassung der Wolken wird maßgeblich von den Farb- beziehungsweise Helligkeitsverhältnissen beeinflusst. Trotz der vergleichsweise niedrigen Auflösung der Mobotix Q25 6MP, lassen sich auch in der Analyse der Bilder feine Wolkenstrukturen erkennen.

Um allerdings eine verlässliche Aussage hierüber treffen zu können, sind Anpassungen im Algorithmus und zukünftige statistische Untersuchungen über einen größeren Zeitraum nötig.

Kapitel 5

Fazit

Der Variabilitätsindex nach [Stein and Clifford Hansen, and Matthew J. Reno., 2012] hat sich als gutes Maß erwiesen, um mittels der räumlichen Gradienten der globalen horizontalen Einstrahlung (GHI) dessen vor allem durch Bewölkung verursachte Variabilität zu beschreiben. Die Untersuchung von Eye2Sky zeigte, dass mit jeder räumlichen Mittelungsstufe von 50 m bis 8000 m Information über Variabilität verloren geht. Die Skalierung auf gröbere Gitterweiten führte zu einer signifikanten Reduktion des Variabilitätsindex, während die räumliche Mittelung keinen merklichen Einfluss auf die mittlere Bestrahlungsstärke im Untersuchungsgebiet hatte. Bei einer Gitterweite von 1000 Metern, liegt der VI noch bei ca. einem Drittel im Vergleich zur Originalauflösung von 50 Metern. Die zeitliche Mittelung wirkte sich ebenfalls auf die Höhe des Variabilitätsindex aus. Im Jahr 2022 bei einer Gitterweite von 50 Metern bewegten sich die halbstündig gemittelten Variabilitätsindizes in einer Spanne zwischen 1 und 300. Über einen Monat gemittelt erreicht der Variabilitätsindex nur noch ein Maximum von 70.

Die räumliche Skalierung in den ICON Daten von nextGEMS hat keinen starken Einfluss. Da die native Auflösung des ICON Laufs bei 5000 Metern liegt, zeigen die feineren Gitterweiten lediglich eine durch mehr Pixel erreichte, höhere aufgelöste Darstellung der globalen horizontalen Bestrahlungsstärke. Durch die Skalierung ist kein Informationsgewinn bei feinerer Auflösung zu erwarten und der leichte Anstieg des Variabilitätsindex ist wahrscheinlich auf statistische Effekte in der Gradientenberechnung zurückzuführen.

Die Variabilitätsanalyse des ICON Laufs von nextGEMS zeigte bei dessen nativer Auflösung von 5000 Metern für das Jahr 2022 Variabilitätsindizes zwischen 1 und 35. In berechneten Tagesmittelwerten bei nativer Auflösung schwanken die Indizes zwischen 1 und 12 und im Monatsmittel zwischen 1 und 7.

Bei einer vergleichbaren Gitterweite von 5000 Metern liegen die Variabilitätsindizes für Eye2Sky und nextGEMS in einer ähnlichen Größenordnung. Die täglich gemittelten VI im Jahr 2022 für Eye2Sky liegen zwischen 1 und 14 und für den ICON Lauf von nextGEMS zwischen 1 und 12. Das hohe Variabilität vorrangig bei durchbrochener Bewölkung auftritt, wird bestätigt durch die

Korrelation von hohen Variabilitätsindizes mit mittleren Clear-Sky Indizes. Die Klassifikationen der homogenen Situationen mit einem Clear-Sky Index nahe 0 beziehungsweise 1 bestätigen dies durch die dazugehörigen niedrigen VI. Eye2Sky differenziert weniger zwischen homogenen Situationen als das Klimamodell und klassifiziert diese vermehrt mit einem VI von 1. Bei heterogenen Gegebenheiten differenziert Eye2Sky allerdings mehr.

Bei der Beurteilung des Variabilitätsindex muss die Abhängigkeit vom Sonnenstand beziehungsweise der Clear-Sky Strahlung beachtet werden. Der Variabilitätsindex, so wie er hier berechnet und verwendet wurde, repräsentiert die durch Wolken verursachte Variabilität in der Einstrahlung und nicht ausschließlich die Variabilität in der Wolkenverteilung. Damit ist er eine einfache und sinnvolle Quantifizierung genau der Strahlungseffekte, die potentiell interessant für Netzbetreiber, Energiehändler etc. sind.

Die für das Jahr 2022 bestimmte globale horizontale Bestrahlungsstärke von Eye2Sky weicht im Mittel 3.7% und maximal 10.7% von der gemittelten gemessenen Bestrahlungsstärke an acht der insgesamt 12 Messstationen ab. Die Prognose des ICON Laufs zeigt Abweichungen im Mittel von 12.3% und maximal 31.5%. Die vergleichsweise große Abweichung bei Eye2Sky mit 10.7% liegt im Dezember bei relativ niedrigen Strahlungswerten von 60 Wm^{-2} . Die GHI weicht lediglich 7.2 Wm^{-2} von der monatlich gemittelten Bestrahlungsstärke im Dezember ab. Im Mittel wird die gemessene Bestrahlungsstärke überschätzt, wobei die größten Abweichungen im März (-31.5%) und im September (-23.9%) unter der tatsächlich gemessenen Bestrahlungsstärke liegen. Für die Bewertung des Klimamodells muss beachtet werden, dass die Simulation abhängig von den Startbedingungen frei läuft. Die Projektionen des Kameranetzwerks basieren auf zu dem jeweiligen Zeitpunkt aufgenommenen ASI und sind damit deutlich näher an den realen Strahlungsverhältnissen.

Der Vergleich beider Kamerateypen deutet darauf hin, dass für die Wolkenklassifikation nicht nur die Auflösung, sondern auch der für die Auswertung verwendete Algorithmus entscheidend ist. Feuchtigkeit in der Kamera selbst führte häufig zu Fehlern bei der Wolkenklassifikation, weshalb eine statistische Untersuchung anhand vieler Daten nicht möglich war. Die Wolkenklassifikation mit beiden Kameras zeigt eine detaillierte Auflösung von Wolkenstrukturen. Anhand des gewählten Fallbeispiels konnte gezeigt werden, dass auch mit einer geringeren Auflösung, einem angepassten Algorithmus, sowie angepasster Helligkeit, feine Wolkenstrukturen erkannt werden konnten.

Die Erkenntnisse dieser Variabilitätsanalyse unterstreichen die Bedeutung einer sorgfältigen Auswahl und Anpassung von Analysemethoden zur Bewertung der Variabilität von Einstrahlungsinformationen.

Kapitel 6

Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert Erkenntnisse hinsichtlich der Variabilitätsanalyse der neuartigen Klimamodelle und kamerabasierten Strahlungsvorhersagen. Es sollen abschließend weitere Analyseoptionen beziehungsweise noch zu klärende Aspekte formuliert werden, die für zukünftige Arbeiten von Interesse sind.

Anstatt der halbstündigen Mittelung der Eye2Sky-Daten könnte möglicherweise jede halbe Stunde eine Momentaufnahme für die Untersuchung verwendet werden. Die zeitliche Auflösung der Strahlungsdaten im Modell liegt bei ca 12 Minuten. Damit gibt das Modell ebenfalls jede halbe Stunde einen Mittelwert aus, in welchem nur zwei bis drei Werte berücksichtigt sind. Ein interessanter Ansatzpunkt für zukünftige Arbeiten besteht darin, die Berechnung des Variabilitätsindex zu ändern. Die Normalisierung des Variabilitätsindex auf die Clear-Sky Strahlung könnte in Betracht gezogen werden, um den Einfluss des Sonnenstands zu eliminieren und den Fokus ausschließlich auf die Bewölkung zu legen.

Die Erkenntnisse aus der Kameraanalyse legen nahe, dass der verwendete Algorithmus ein entscheidender Faktor bei der Wolkenklassifikation darstellt. Für eine verlässliche Bewertung und Verbesserung sind Untersuchungen einer größeren Datenreihe nötig. Licht- und Farbverhältnisse haben einen bedeutenden Einfluss auf das Analyseergebnis. Zukünftige Untersuchungen könnten sich daher darauf konzentrieren, die Licht- und Farbcharakteristika genauer zu quantifizieren und deren Auswirkungen auf die Klassifikationsgenauigkeit zu bewerten. Es wäre auch sinnvoll, den Algorithmus hinsichtlich der Farbverhältnisse und Helligkeitsgrenzwerte anzupassen, um eine präzisere Wolkenklassifikation zu ermöglichen.

Die vorgeschlagenen Ansätze zur Optimierung der Methodik und zur Erweiterung der Analyse könnten dazu beitragen, auf der einen Seite die Aussagekraft des Variabilitätsindex hinsichtlich der Bewölkung zu verstärken und auf der anderen Seite die Wolkenklassifikation aus ASI mit dem Algorithmus zu verbessern.

Literaturverzeichnis

- N. B. Blum, B. Nouri, S. Wilbert, T. Schmidt, O. Lünsdorf, J. Stührenberg, D. Heinemann, A. Kazantzidis, and R. Pitz-Paal. Cloud height measurement by a network of all-sky imagers. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(7):5199–5224, 2021.
- M. Braham, K. Zeitouni, and L. Yeh. Astroide: A unified astronomical big data processing engine over spark. *IEEE Transactions on Big Data*, PP:1–1, 10 2018. doi: 10.1109/TBDATA.2018.2873749.
- J. M. Bright, S. Killinger, D. Lingfors, and N. A. Engerer. Improved satellite-derived PV power nowcasting using real-time power data from reference PV systems. *Solar Energy*, 168:118–139, 2018.
- C. F. Coimbra, J. Kleissl, and R. Marquez. Overview of Solar-Forecasting Methods and a Metric for Accuracy Evaluation. In J. Kleissl, editor, *Solar energy forecasting and resource assessment*, pages 171–194. Elsevier Ltd, Oxford, 2013. ISBN 9780123971777.
- D. Dumortier. Modelling global and diffuse horizontal irradiances under cloudless skies with different turbidities. *Daylight II, jou2-ct92-0144, final report vol, 2*, 1995.
- EOS 750D. Canon eos 750d bedienungsanleitung. URL https://gdlp01.c-wss.com/gds/7/0300018457/03/EOS_750D_Instruction_Manual_DE.pdf. [Online; accessed 23-May-2024].
- HealPIX. HEALPix - Features. URL <https://healpix.sourceforge.io/>. [Online; accessed 22-May-2024].
- C. Hohenegger, P. Korn, L. Linardakis, R. Redler, R. Schnur, P. Adamidis, J. Bao, S. Bastin, M. Behraves, M. Bergemann, J. Biercamp, H. Bockelmann, R. Brokopf, N. Brüggemann, L. Casaroli, F. Chegini, G. Datseris, M. Esch, G. George, M. Giorgetta, O. Gutjahr, H. Haak, M. Hanke, T. Ilyina, T. Jahns, J. Jungclaus, M. Kern, D. Klocke, L. Kluff, T. Kölling, L. Kornblueh, S. Kosukhin, C. Kroll, J. Lee, T. Mauritsen, C. Mehlmann, T. Mieslinger, A. K. Naumann, L. Paccini, A. Peinado, D. S. Praturi, D. Putrasahan, S. Rast, T. Riddick, N. Roeber, H. Schmidt, U. Schulzweida, F. Schütte, H. Segura, R. Shevchenko, V. Singh, M. Specht, C. C. Stephan, J.-S. von Storch, R. Vogel, C. Wengel, M. Winkler, F. Ziemann, J. Marotzke, and

- B. Stevens. ICON-Sapphire: simulating the components of the Earth system and their interactions at kilometer and subkilometer scales. *Geoscientific Model Development*, 16(2):779–811, 2023.
- G. Lohmann. Irradiance Variability Quantification and Small-Scale Averaging in Space and Time: A Short Review. *Atmosphere*, 9(7):264, 2018.
- R. Marquez and C. F. M. Coimbra. Proposed Metric for Evaluation of Solar Forecasting Models. *Journal of Solar Energy Engineering*, 135(1), 2013.
- Mobotix. Q25-kamerahandbuch. URL https://www.mobotix.com/sites/default/files/2017-10/Mx_ML_Q25M-6MP_de_20160518_0.pdf. [Online; accessed 23-May-2024].
- nextGEMS. nextGEMS Cycle 1 — easy.gems documentation, a. URL <https://easy.gems.dkrz.de/DYAMOND/NextGEMS/cycle1.html>. [Online; accessed 24-May-2024].
- nextGEMS. nextGEMS Cycle 2 — easy.gems documentation, b. URL <https://easy.gems.dkrz.de/DYAMOND/NextGEMS/cycle2.html>. [Online; accessed 24-May-2024].
- nextGEMS. About | nextGEMS. URL <https://nextgems-h2020.eu/about/>. [Online; accessed 22-May-2024].
- R. Öktem and D. M. Romps. Prediction for cloud spacing confirmed using stereo cameras. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021.
- R. Perez, S. Kivalov, J. Schlemmer, K. Hemker, and T. Hoff. Parameterization of site-specific short-term irradiance variability. *Solar Energy*, 85(7):1343–1353, 2011.
- T. Schmidt, J. Stührenberg, N. Blum, J. Lezaca, A. Hammer, and T. Vogt. A network of all sky imagers (ASI) enabling accurate and high-resolution very short-term forecasts of solar irradiance. In *21st Wind & Solar Integration Workshop (WIW 2022)*, pages 372–378. IET, 2022. ISBN 978-1-83953-833-9.
- M. Schrempf. Entwicklung eines algorithmus zur wolkenerkennung in digitalbildern des himmels. 2011.
- M. Schroedter-Homscheidt, M. Kosmale, S. Jung, and J. Kleissl. Classifying ground-measured 1 minute temporal variability within hourly intervals for direct normal irradiances. *Meteorologische Zeitschrift*, 27(2):161–179, 2018.
- J. Stein and Clifford Hansen, and Matthew J. Reno. The variability index: A new and novel metric for quantifying irradiance and PV output variability, 2012.
- A. Voigt, N. Albern, P. Ceppi, K. Grise, Y. Li, and B. Medeiros. Clouds, radiation, and atmospheric circulation in the present-day climate and under climate change. *WIREs Climate Change*, 12(2):e694, 2021. doi: <https://doi.org/10.1002/wcc.694>. URL <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.694>.

M. Yamashita, M. Yoshimura, and T. Nakashizuka. Cloud cover estimation using multitemporal hemisphere imageries. 2004.