

Analyse und Optimierung der Berechnung von Cloud Motion Vektoren in Aufnahmen von All Sky Imagern für eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Kurzzeitprognose.

von Andreas Boschert ⁽¹⁾

⁽¹⁾ TH Rosenheim, Fakultät ING, Studiengang Angewandte Forschung und Entwicklung in den Ingenieurwissenschaften, Hochschulstraße 1, 83024 Rosenheim, andreas.boschert@th-rosenheim.de

Keywords: All Sky Imager, Strahlungsprognose, Kurzzeitprognose, optischer Fluss, Lucas-Kanade-Methode, Cloud Motion Vektoren, Fischaugenobjektive, Kamera-Kalibrierung

Abstract

Die Masterarbeit befasst sich mit der Berechnung des optischen Flusses unter der Verwendung der Lucas-Kanade-Methode in Aufnahmen von All Sky Imagern (ASI). Sie ist Teil eines Projekts zur Entwicklung einer zeitlich und räumlich hochaufgelösten Einstrahlungsvorhersage für die Kurzzeitprognose von Photovoltaik-Anlagenleistungen. Im ersten Abschnitt der Arbeit werden die Fischaugenobjektive für die perspektivische Entzerrung der All Sky Images kalibriert. Der zweite Abschnitt zielt auf die Umsetzung der Lucas-Kanade-Methode zur Bestimmung von Cloud Motion Vektoren (CMV; Richtungs- und Geschwindigkeitsvektoren) der Wolkenbewegungen. Die Abschlussarbeit endet mit der Analyse und Bewertung von Optimierungsmöglichkeiten des Verfahrens, um möglichst robuste und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen.

Relevanz, Potenziale und Herausforderungen

Wolkenzüge verursachen solare Einstrahlungsüberhöhungen und -volatilitäten (Irradiance Enhancement, IE und Irradiance Volatility, IV) und führen zu komplexen Einstrahlungsszenarien und folglich zu Rampenereignissen an Photovoltaik Anlagen. Bei IE-Effekten handelt es sich um Ereignisse, bei denen die Strahlungsleistung bei bedecktem Himmel die theoretisch, möglichen Strahlungswerte unter clear sky Bedingungen übertreffen [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9]. Dieser Effekt ist in Abbildung 1 [10] für Nürnberg über einen ganzen Monat (05/2014) hinweg dargestellt. Abbildung 2 [10] zeigt die Gradienten (IV) für das gesamte Jahr. Mit dem stetigen Ausbau erneuerbaren Energien hat das fluktuierende Erzeugungslastprofil zur Folge. Daher sind für eine reibungslose Integration von Solarstrom in elektrische Netze zeitlich und räumlich hochaufgelöste Prognosen erforderlich. Diese Vorhersagen ermöglichen einen planbareren Betrieb der Netze und tragen damit wesentlich zur Frequenz- und Spannungshaltung bei. Andernfalls müssen Leistungsüberschüsse oder -defizite durch teure Regelenergie ausgeglichen werden. Auch in der Direktvermarktung des Solarstroms wirkt sich eine hohe Prognosegüte vorteilhaft aus, da Abweichungen zum tatsächlich gelieferten Ertrag zu finanzielle Einbußen für den Anlagenbetreiber führen. Prognosen ermöglichen auch eine ökonomischere und ökologischere Betriebsführung von Diesel-Hybrid Systemen. Eine zuverlässige Strahlungsvorhersage erlaubt das Abschalten von Dieselaggregaten anstatt dem Standby-Betrieb unter gleichzeitiger Sicherstellung der Stromversorgung durch Photovoltaik und Batteriespeicher. Bisherige Prognosemethoden (aus Satelliten und numerischen Methoden) werden zukünftig durch ASI sinnvoll ergänzt [11] [12] [13]. Gegenüber den bestehenden Verfahren ermöglichen Wolkenkameras eine zeitlich und räumlich höher aufgelöste Skala, die für die Vorausbestimmung der Erzeugungsleistung aus PV-Kraftwerken erforderlich ist. Allerdings weist der Stand der Technik noch Defizite in der Vorhersage auf, weshalb die Entwicklung gegenwärtiger Arbeitsschwerpunkt vieler Arbeitsgruppen ist.

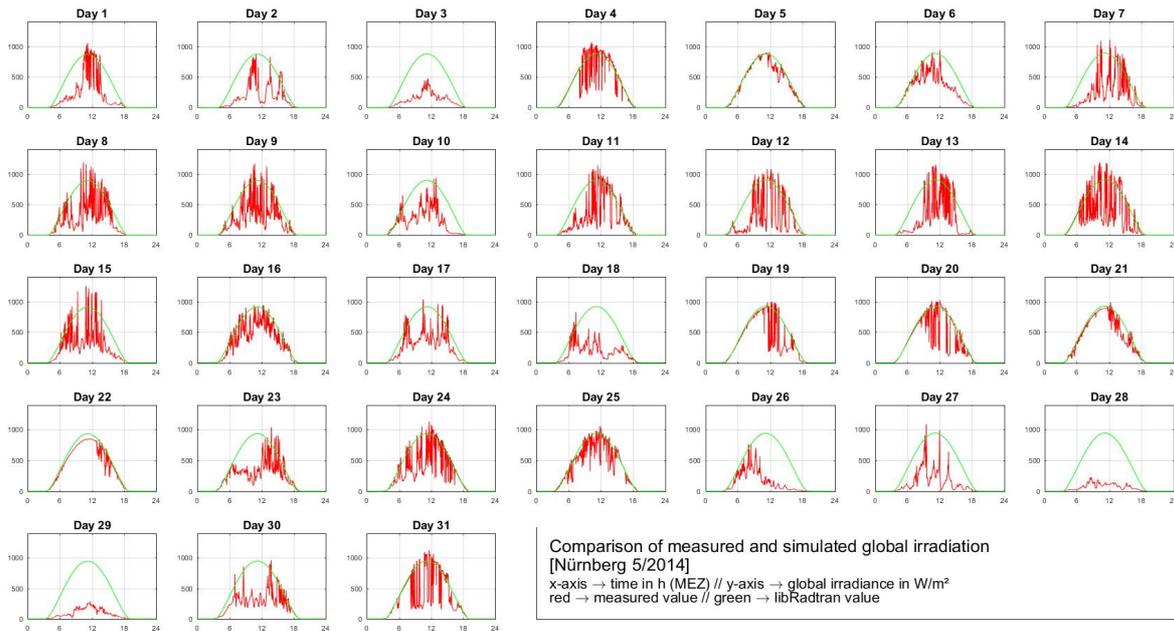


Abbildung 1: Tageweise Gegenüberstellung der simulierten Globalstrahlung (grün) mit den Messdaten (rot) für Nürnberg im Juni 2015. Auf den X-Achsen der Subplots sind die Tageszeiten (MEZ) aufgetragen, auf den Y-Achsen die Globalstrahlung in Horizontalebene in W/m². Deutlich sichtbar sind die durch Wolkenzüge verursachten Volatilitäten und Überhöhungen der Solarstrahlung.

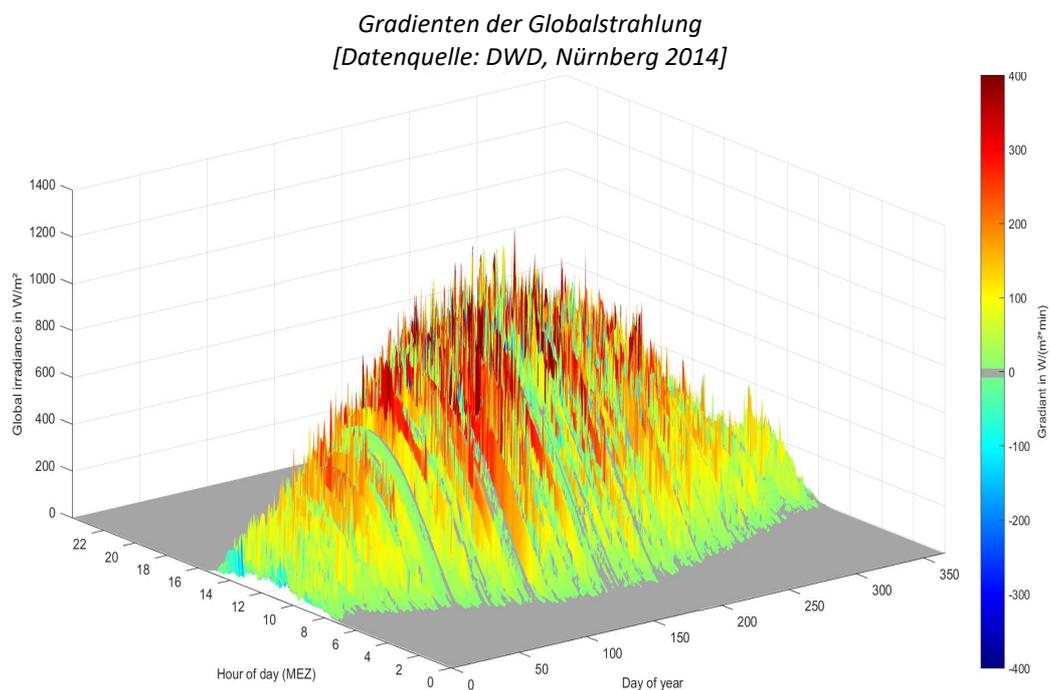


Abbildung 2: Darstellung der Einstrahlungsgradienten für Nürnberg 2014. Auf den Achsen sind die Stunden jedes Tages (in MEZ), die Tage eines Jahres und die Globalstrahlung in Horizontalebene aufgetragen. Die Colorbar unterstützt die Darstellung der Gradienten in W/m² (rot-Töne positive und blau-Töne negative Gradienten).

Messaufbau und Datengrundlage

Die Technische Hochschule Rosenheim verfügt über zwei Messaufbauten, bestehend aus einem Pyranometer¹, einem im Radiation Shield verbauten Sensor zur Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, sowie der Kamera² selbst. Zudem stehen in Kirchbichl (Österreich) zwei weitere Aufbauten zur Verfügung. Die Daten werden von Sonnenaufgang bis –untergang in einem Intervall von 15 (Kirchbichl) bzw. 20 s (Rosenheim) gespeichert. Insgesamt stehen Bild- und Messdaten beider Standorte für mehrere Jahre zur Verfügung. Im Rahmen der Analysen zu den IE/IV-Effekten wurden insgesamt 22 Standorte innerhalb Deutschlands ausgewertet. Für die Standorte standen Strahlungsdaten über einen meteorologisch aussagekräftigen Zeitraum von 10 Jahre in Minutenauflösung zur Verfügung, sowie für sieben der Standorte zusätzlich synoptische Informationen in 60-Minuten-Auflösung. Dies ermöglichte ein besonders umfangreiches und gesamtheitliches Vorgehen.

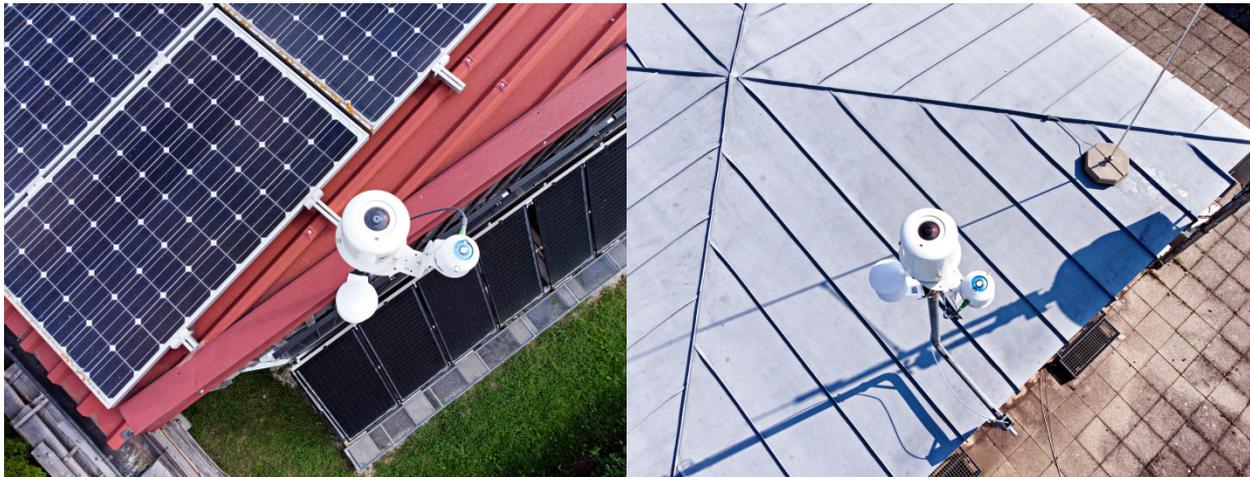


Abbildung 3: Aufnahmen von beiden Messaufbauten der All Sky Imager, Pyranometer und Radiation Shield an der Technischen Hochschule Rosenheim (links am Rosenheimer Technologiezentrum Energie und Gebäude – rot und rechts am Campus der Hochschule).

Die Kamerasysteme verfügen über einen Ventilator und einer Heizvorrichtung, sodass die Objektive bei allen Witterungsverhältnissen frei von Tau, Eis und Schnee sind. An den beiden Standorten sind jeweils zwei Kameras verfügbar, da für die Bestimmung der Wolkenhöhen aus Bildaufnahmen mindestens zwei ASI notwendig sind, um mittels Triangulationsmethoden die Höhen zu ermitteln.

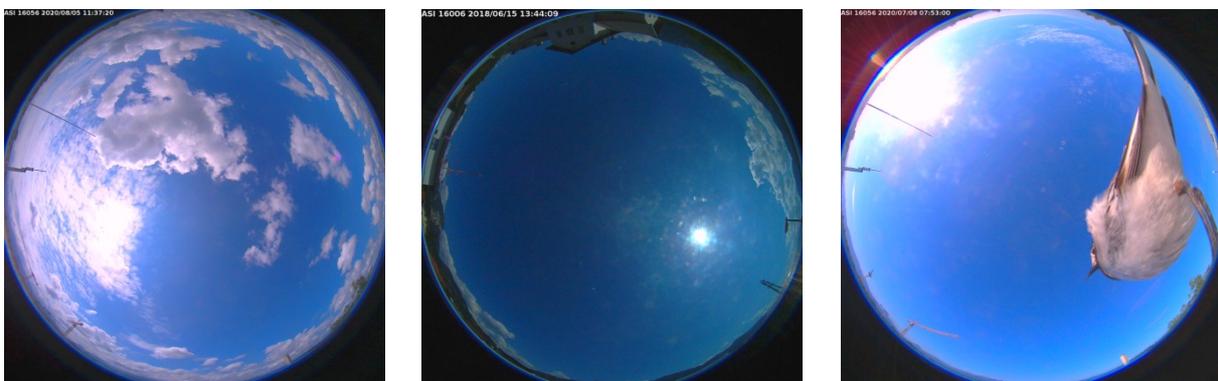


Abbildung 4: Drei exemplarische ASI-Aufnahmen aus Rosenheim und Kirchbichl.

Durch die Verwendung von Fischaugenobjektiven in ASI kann die gesamte Hemisphäre in einer Fotoaufnahme abgebildet werden.

¹ EKO MS-80M, Secondary Standard

² ASI-16/51 von CMS Ing. Dr. Schreder GmbH, Distribution durch EKO Instruments (Kirchbichl, Österreich)

Zielsetzung und Vorgehensweise

In dieser Masterarbeit wurden die CMV von Wolken unter der Anwendung von Bildverarbeitungs- methoden in Matlab berechnet. Mit der Lucas-Kanade-Methode wurden die Geschwindigkeits- und rich- tungsvektoren pixelblockweise aus dem Vergleich zweier Aufnahmen berechnet. Im Anschluss wurde das Verfahren analysiert und notwendige Optimierungen durchgeführt, um die Genauigkeit der Er- gebnisse zu erhöhen. Dieser Arbeitsschritt ist aufgrund der Dynamik der Wolkenbewegungen not- wendig. Wolken können sich sehr schnell ausbilden, sich auflösen, über die Zeit mit anderen Wolken verschmelzen oder sich deformieren. Diese Komplexität erfordert eine hohe Genauigkeit der CMV. Daher ist eine zuverlässige Berechnung Voraussetzung für die Bestimmung von künftigen Wolkenpo- sitionen in der Strahlungsprognose. Zum anderen wurden in dieser Arbeit die Objektive der All Sky Imager mit der Matlab Toolbox OCamCalib³ [14] [15] [16] kalibriert. Die Verwendung von Fischaugenobjektiven führt zu radial verzerrten Aufnahmen (siehe Abbildung 3) und damit zu systemati- schen Abbildungsfehlern. Eine steigende Verzerrung führt zu einer verkrümmten Darstellung und zu einer deutlichen Abnahme der Bildauflösung hin zu den Bildrändern.

Geometrische Kalibrierung der Fischaugenobjektive

Für die geometrische Kalibrierung werden die Kameramatrix und die Verzerrungskoeffizienten des Objektivs bestimmt. Als Kalibriermuster dienen mehrere Fotoaufnahmen von Schachbrettmustern an verschiedenen Orientierungspunkten rund um das Objektiv (siehe Abbildung 5).

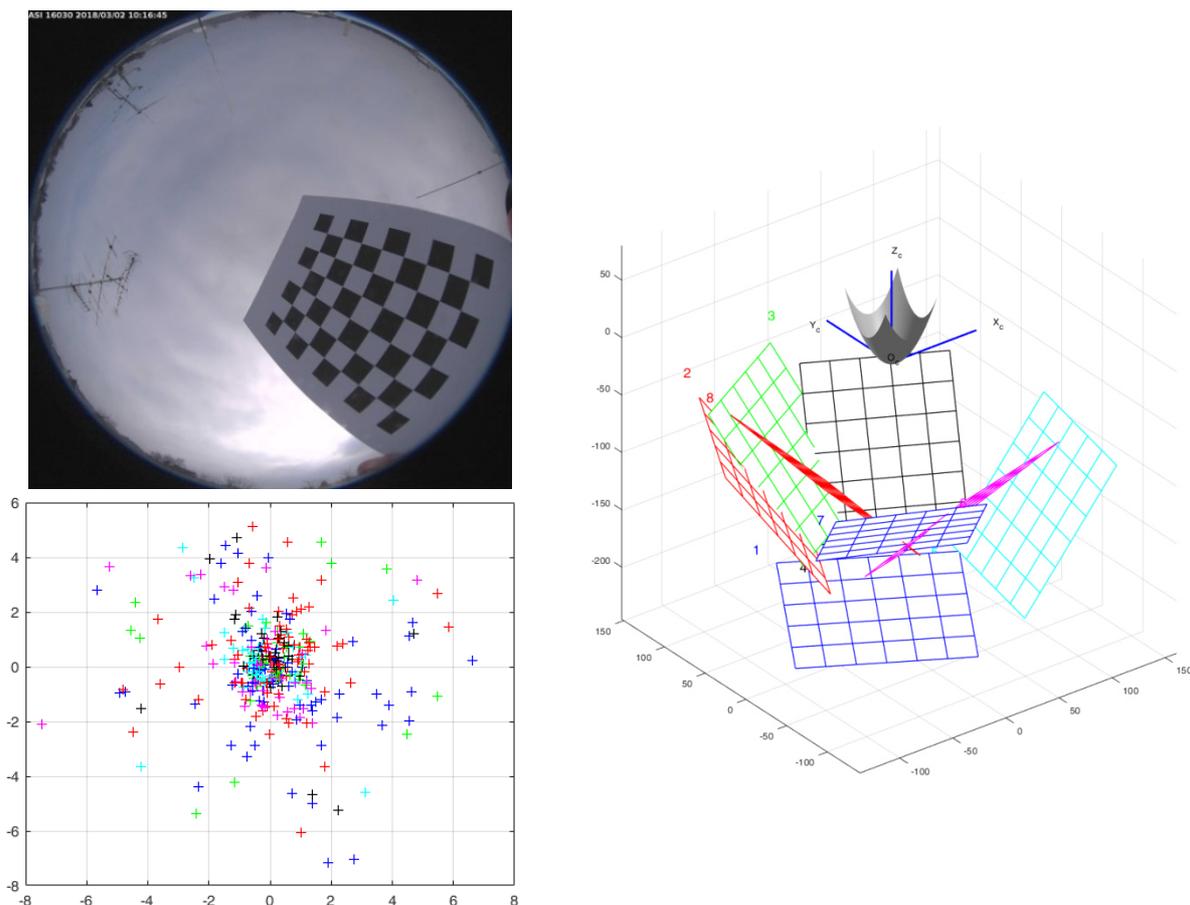


Abbildung 5: Schachbretter in verschiedenen Positionen um das Objektiv herum (links oben). Die grafische Visualisierung (rechts) in Matlab zeigt die Positionierung aller Kalibriermuster an. Die Abweichungen der detektierten Ecken in den Schachbrettmustern und deren Reprojektion zeigt die Grafik links unten an.

³ OCamCalib: Omnidirectional Camera Calibration Toolbox for Matlab

Der Kalibriervorgang beruht auf die Ecken-Erkennung in den Schachbrettern. Die Gitterecken werden extrahiert und die Verzerrungskoeffizienten im Bild bestimmt. Durch die Ermittlung der extrinsischen und intrinsischen Kamera-Parameter (Kalibrierparameter) werden im Nachgang die Gitterecken mittels eines Umrechnungspolynoms (4. Ordnung) und Kameramodells auf die Testaufnahmen reprojiert. Durch die Abweichung zwischen den detektierten und berechneten Eckpositionen wird der Reprojektionsfehler bestimmt und Rückschlüsse auf die Genauigkeit (Root Mean Square Error, RMSE) der Kalibrierung gezogen (siehe Abbildung 6). In dieser Arbeit wurde bei der Kalibrierung ein RMSE von 1,26 Pixeln und eine Standardabweichung (Standard Deviation, SDE) von 0,75 Pixeln erzielt.

Image 7 – Image points (+) and reprojected grid points (o)

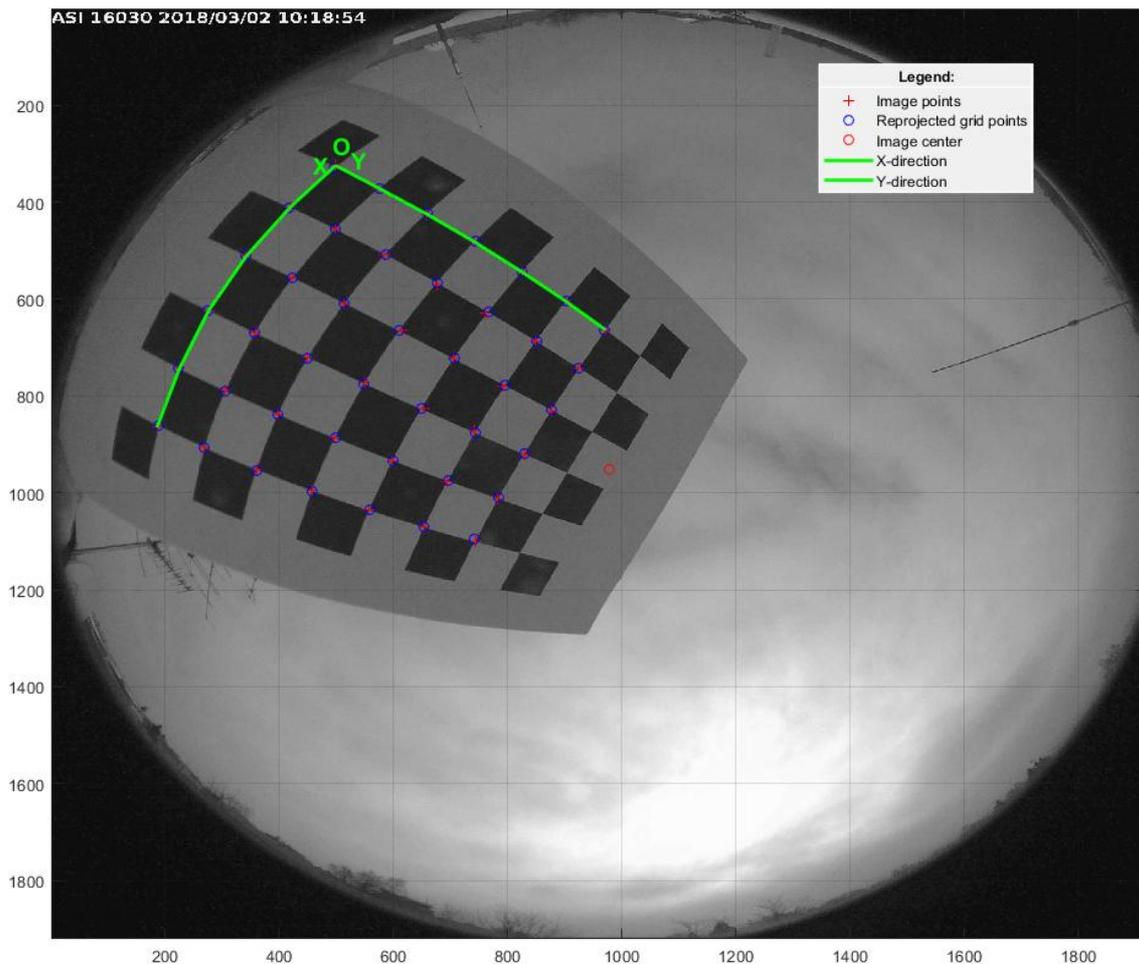


Abbildung 6: Reprojektion der Gitterecken (als blaue Kreise dargestellt). Die roten Kreuze an den Feldern des Schachbretts sind die Positionen vor der Kalibrierung. Der exakte Kreismittelpunkt ist als roter Kreis eingezeichnet. Zudem ist der Bezugsrahmen des Kalibriermodells (X-Y-Achse) in grün markiert.

Die beschriebene Differenz zwischen der Positionierung der Gitterecken und ihrer Reprojektion kann auch grafisch in einem Koordinatensystem dargestellt werden. Anhand der Farben und Art der Darstellung ist es relativ einfach möglich, Outliers zu erkennen und Rückschlüsse auf einzelne Aufnahmen zu ziehen (siehe Abbildung 5).

Nach der geometrischen Kalibrierung können die Sonnenposition und die Sonnenbahn in All Sky Images berechnet werden. Dazu wurden drei projizierte Sonnentagesgänge in Abbildung 7 eingezeichnet. Die Bildabfolgen zeigen, dass die sichtbare Sonne dem errechneten Tagesgang (rote Linie) folgt und der ermittelten Sonnenposition (roter Punkt) übereinstimmt.

(08-Apr-2018 06:30:00)

(08-Apr-2018 12:30:00)

(08-Apr-2018 17:30:00)

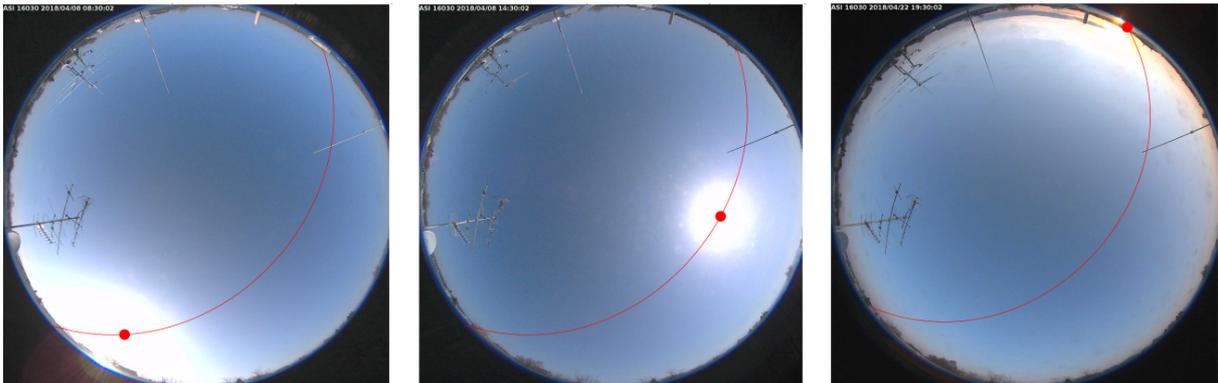
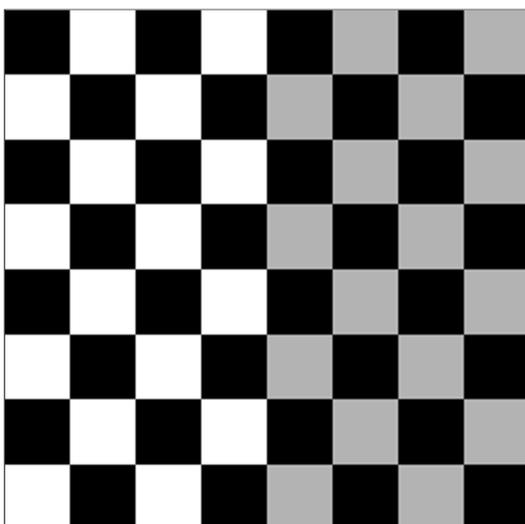


Abbildung 7: Berechnung der Sonnenposition und Sonnenbahn für All Sky Images an drei exemplarischen Aufnahmen für den Messstandort Rosenheim.

Fischaugenobjektive erweitern das Sichtfeld im Vergleich zu herkömmlichen Objektiven. Die weitwinkliger Aufnahme fläche wird erreicht, indem perspektivische Linien verzerrt werden. Aus diesem Grund ist die Kalibrierung notwendig, um die radial verzerrten Aufnahmen zu entzerren.

Die durch die Kameralinse verursachte perspektivische Verzerrung ist nicht zu vernachlässigen (siehe Abbildung 8). Zur Verdeutlichung wurde ein Testbild (Schachbrettmuster) generiert. Die linke Seite des Schachbretts besteht aus schwarzen und weißen Quadraten (4 x 8), die rechte Hälfte aus schwarzen und grauen Feldern (4 x 8). Auf das Testbild wurde der ermittelte Entzerrungsalgorithmus angewendet. Dadurch wird es möglich, die perspektivischen Linien und die durch das Fischaugenobjektiv hervorgerufene Nadelkissen-Verzerrung zu verdeutlichen. Diese Einschränkungen bringen All Sky Images mit sich mit, was eine geometrische Kalibrierung zwingend erforderlich macht.

Originalbild (eig. entzerrtes All Sky Image)



Verzerrtes Bild (eig. originales All Sky Image)

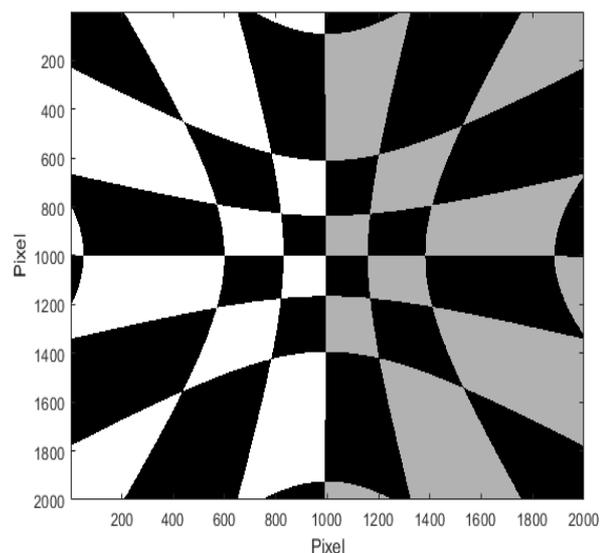


Abbildung 8: Zur Visualisierung der Verzerrung von originalen ASI-Aufnahmen wurde in dieser Grafik ein Schachbrettmuster mit 8 x 8 Feldern (rechts) mit den ermittelten Kalibrierparametern „entzerrt“. Da das ursprüngliche Muster keine Verzerrung aufweist, ist hier ein verzerrtes Muster die Folge (links). Je näher am Bildrand, desto stärker nimmt die Verzerrung der Felder zu und die Auflösung ab.

Berechnung von Cloud Motion Vektoren und Keogram

Die Berechnung von CMV stellt einen fundamentalen Baustein in der kamerabasierten Kurzzeitprognose dar. Die erforderlichen Vektoren beschreiben die Bewegungen der Wolken auf Pixelebene durch den Vergleich zweier Bilder zu unterschiedlichen Aufnahmezeiten. Die Informationen über Richtung und Geschwindigkeit der Wolkenbewegungen sind für die spätere Prognosequalität entscheidend. Die Berechnung der Lucas-Kanade-Methode [17] basiert auf der Grundgleichung des optischen Flusses und wird daher durch die Verschiebungsabschätzung der Helligkeitsgradienten aus zwei Aufnahmen ermittelt. Nachdem das Verfahren ausschließlich auf Basis der Helligkeitsuntersuchungen in den Graustufenbildern arbeitet, können vermeintliche Bewegungserscheinungen auch aufgrund unterschiedlich, einwirkender Umgebungsparameter verursacht werden. So können neben der tatsächlichen Bewegung von Wolken, die zu Helligkeitsunterschieden in Aufnahmen führen, auch Schwankungen der Umgebungsbeleuchtung zu fälschlicherweise detektierten Geschwindigkeits- und Richtungsvektoren führen. Aufgrund der Kameraausrichtung gen Himmel und der Sonneneinstrahlung sind große Helligkeitsunterschiede in den Bildern wahrscheinlich. Durch die ausführliche Analyse, Optimierung und Anpassung des Verfahrens konnten unter verschiedenen Belichtungssituationen zuverlässig die CMV berechnet werden.

*CMV für die ASI in Kirchbichl am 27.08.2018 um 13:28:00 (UTC)
Temperatur 24 °C | relative Luftfeuchtigkeit 34 % | Globalstrahlung in Horizontalebene 765 W/m²*

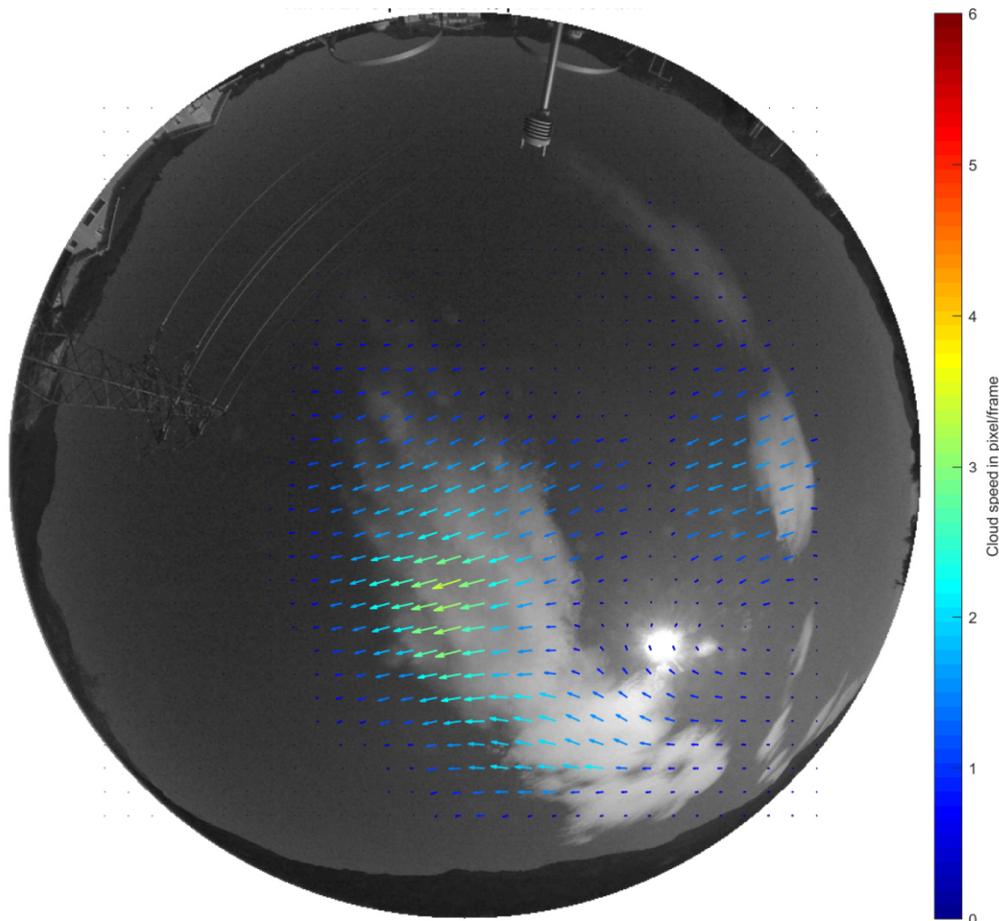


Abbildung 9: Cloud Motion Vektoren in der verzerrten All Sky Aufnahme. Die Colorbar gibt Auskunft über die jeweiligen Wolkengeschwindigkeiten in Pixel/Frame. Die Orientierungen der Pfeile geben Aufschluss über die Zugrichtungen und die Längen über die Geschwindigkeiten.

CMV für die ASI in Kirchbichl am 27.08.2018 zwischen 13:28:00 und 13:28:15 (UTC)

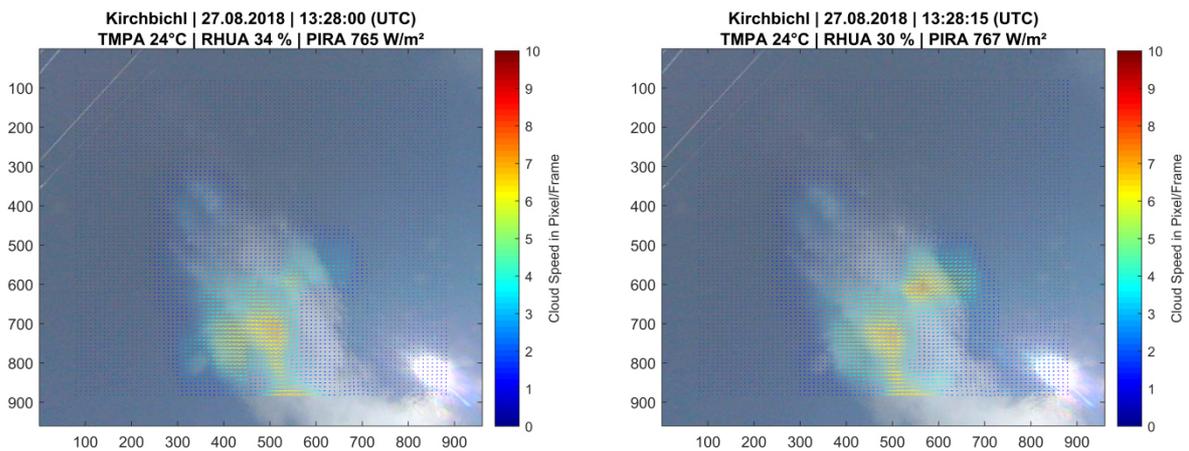


Abbildung 10: Berechnete Cloud Motion Vektoren für zwei entzerrte All Sky Images. Die Orientierungen und Längen der Pfeile geben über die Wolkenzugrichtung und Geschwindigkeit Auskunft. Die Colorbar visualisiert die Wolkengeschwindigkeiten.

Für die Berechnung der CMV sind Tage mit abwechslungsreichen Bewölkungssituationen interessant. Um spannende Aufnahmeserien in den großen Datenmengen möglichst schnell zu filtern, eignen sich Keogramme besonders. Dabei handelt es sich um ein Zeit-Breitengrad-Diagramm, welches aus Aufnahmen eines ganzen Tages entsteht. Dazu wird der mittlere Pixelstreifen aller All Sky Images zu einem Bild zusammengefügt. Die Keogramme können je nach Anliegen und Situation vor Ort sowohl nach Nord-Süd, als auch nach West-Ost ausgerichtet werden. Vorteil dieser Art der Darstellung ist, dass die Bewölkungssituation für einen gesamten Tag auf einen Blick erfasst werden kann und das aufwendige Durchsuchen großer Datenmengen erspart. Zusätzlich zu den Bildinformationen können ergänzende zugehörige Messdaten visualisiert werden.

Gemessene GHI in Korrelation mit simulierter Clear Sky Referenz und All Sky Images (Keogram)

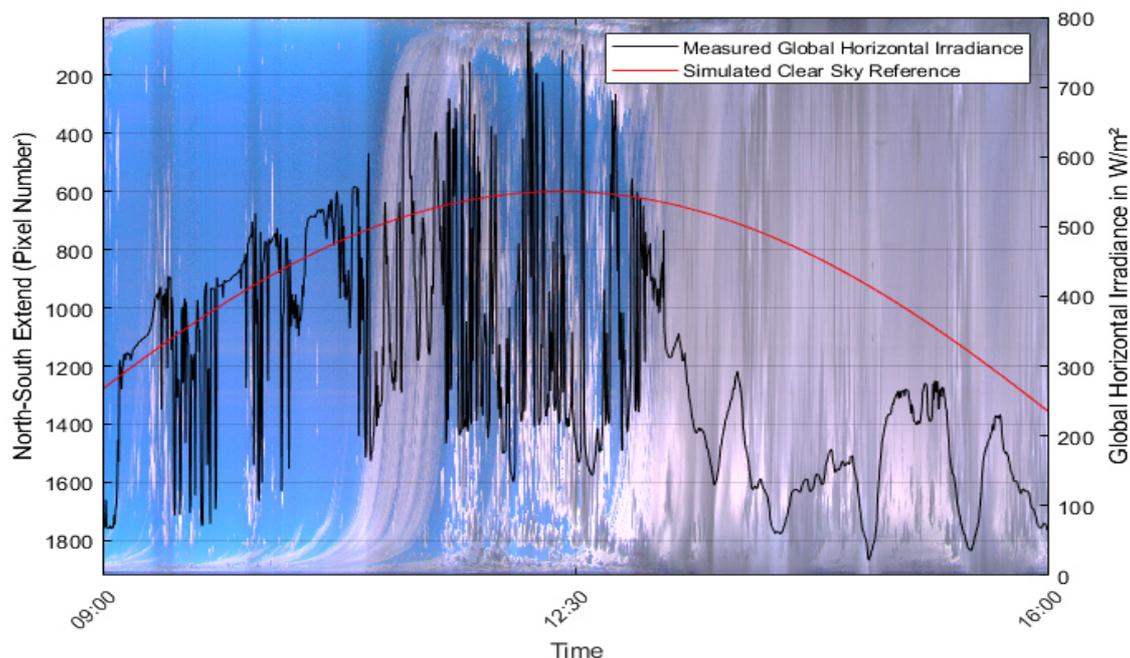


Abbildung 11: Nord-Süd-Keogram (Y-Achse) für den 26. Februar 2020 in Rosenheim inkl. Strahlungsdaten.

Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Durch Anwendung des optischen Flusses mithilfe der Lucas-Kanade Methode auf All Sky Images hat sich diese Masterarbeit im Wesentlichen mit der Bestimmung von Cloud Motion Vektoren aus All Sky Images in Matlab auseinandergesetzt [18]. Ziel der vorliegenden Arbeit war die Bestimmung von Geschwindigkeits- und Richtungsvektoren in Bildaufnahmen aus All Sky Imagern. Zudem wurden die Parametrierungen für die Bestimmung der Vektoren dahingehend optimiert, dass möglichst robuste und laufzeitoptimierte Ergebnisse möglich werden. Zusätzlich wurden die Fischaugenobjektive der Kamerasysteme mit der Toolbox OCamCalib kalibriert [19]. Die erzielten Genauigkeiten sind besonders hoch (RMSE von 1,26 Pixel und SD von 0,75 Pixeln). Dies ermöglichte die Berechnungen der CMV für radial verzerrte und entzerrte Aufnahmen. Zudem hat die Masterarbeit die Eignung der Lucas-Kanade Methode für eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste Kurzfristprognose mit Kamerasystemen bestätigt und konnte damit einen weiteren Forschungsbeitrag liefern. Durch die Berechnungen und Analysen der Wolkenbewegungen kam sowohl die Entwicklung energiemeteorologischer Charakteristika und Kenngrößen voran, als auch das Verständnis von Einstrahlungsvolatilitäten und -überhöhungen. Die hier präsentierten Arbeitspakete sind ein weiterer Baustein für ein in Entwicklung befindliches Prognose-Tool.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Zehner, T. Weigl, M. Hartmann, B. Mayer, T. Betts, R. Gottschalg, H. Lößlein, B. Giesler, G. Becker und O. Mayer, „Irradiance Enhancement – Internationalisierung der Standortbetrachtungen und Analysen in PV-Systemen,“ in *26. PV-Symposium*, Bad Staffelstein, Kloster Banz, 2011.
- [2] M. Zehner, T. Weigl, M. Hartmann, S. Thaler, O. Schrank, M. Czakalla, B. Mayer, T. Betts, R. Gottschalg, K. Behrens, G. König-Langlo, B. Giesler, G. Becker und O. Mayer, „Energy Loss Due to Irradiance Enhancement,“ in *6th EU PVSEC*, Hamburg, 2011.
- [3] M. Zehner, N. Stut, F. Kaiser, A. Boschert, B. Mayer und F. Flade, „Analysis of Irradiance Enhancement and Irradiance Volatility in High-Resolution Data Sets,“ in *EU PVSEC*, Lissabon, 2020.
- [4] M. Zehner, M. Moll, S. Thaler, O. Schrank, M. Hartmann, B. Mayer, T. Betts, R. Gottschalg, K. Behrens, W. Riecke, W. Knaupp, B. Giesler, G. Becker und O. Mayer, „Quantifizierung von Einstrahlungsüberhöhungen in hoch aufgelösten DWD-Datensätzen für verschiedene Standorte in Deutschland,“ in *27. PV-Symposium*, Bad Staffelstein, Kloster Banz, 2012.
- [5] M. Zehner, P. Bung, V. Kathan, O. Schrank, L. Nagl, T. Hellweger, G. Becker, B. Mayer, T. Betts, R. Gottschalg, D. Renne, W. Knaupp, B. Giesler, M. Schmidt und O. Mayer, „Modellierung der räumlichen Ausdehnung von Einstrahlungsüberhöhungen und Analyse von deren Abbildung in sehr hoch aufgelösten Datensätzen,“ in *27. PV-Symposium*, Bad Staffelstein, Kloster Banz, 2012.
- [6] N. Stut, A. Boschert, F. Kaiser, M. Zehner, B. Mayer und O. Mayer, „Analyse von Einstrahlungsvolatilität und –überhöhungen in hochaufgelösten Datensätzen des DWD und MIM zur Untersuchung von Korrelationen zu meteorologischen Messdaten,“ in *35. Symposium*

Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, Kloster Banz, 2020.

- [7] F. Kaiser, „Analyse des Einflusses der Wolkenbewegung auf den Strahlungstransfer und Simulation resultierender Einstrahlungsüberhöhungen mit libRadtran und Matlab,“ Rosenheim, 2019.
- [8] Y. Flucke, „Analyse des Wolkeneinflusses auf den Strahlungstransfer und Simulation resultierender Einstrahlungsüberhöhungen mit libRadtran,“ Rosenheim, 2018.
- [9] Y. Flucke, „Erläuterung verschiedener Wolkentypen, deren Eigenschaften und Analyse der statistischen Verteilungsfunktion der Wolkendaten auf Basis der synoptischen DWD Datensätze,“ Rosenheim, 2017.
- [10] A. Boschert, J. Schober, T. Liegl, J. Flucke, F. Kaiser, M. Zehner und B. Mayer, „Analyse von Einstrahlungsvolatilität und Einstrahlungsüberhöhungen in hochaufgelösten Datensätzen des Deutschen Wetterdienstes und Untersuchung von Korrelationen zur Wolkenbedeckung,“ in *33. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein, Kloster Banz, 2018.
- [11] E. Lorenz, „Solare Einstrahlung: Potentiale und Vorhersagbarkeit des Solarenergieangebotes in Niedersachsen,“ in *Vierte Niedersächsische Energietage - Fachforum 6 Solar*, 2011.
- [12] T. Schmidt, „Abschlussbericht zur "Machbarkeitsstudie von Kurzfristprognosen der solaren Einstrahlung am Beispiel der 1MW PV-Anlage Solardach München-Riem",“ 2016.
- [13] T. Schmidt, D. Heinemann und E. Lorenz, „Short-term solar forecasting based on sky images - Potential and challenges,“ in *6 th PV Performance Modeling and Monitoring Workshop*, 2016.
- [14] M. Rufli, D. Scaramuzza und R. Siegwart, „Automatic Detection of Checkerboards on Blurred and Distorted Images,“ Nizza, 2008.
- [15] D. Scaramuzza, A. Martinelli und R. Siegwart, „A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structure from Motion,“ New York, 2006.
- [16] D. Scaramuzza, A. Martinelli und R. Siegwart, „A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras,“ Peking, 2006.
- [17] B. K. Horn und B. G. Schunck, „Determining Optical Flow,“ Washington, D.C., United States, 1981.
- [18] A. Boschert, N. Stut, M. Zehner und J. F. F. Schreder, „Wolkenkamerabasierte Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Wolkenhöhen und Cloud Motion Vektoren als Grundstein für eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste solar Einstrahlungsvorhersage,“ in *34. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein, Kloster Banz, 2019.