Abschlussbericht zur "Machbarkeitsstudie von Kurzfristprognosen der solaren Einstrahlung am Beispiel der 1 MW PV-Anlage Solardach München-Riem"

Thomas Schmidt

14. März 2016

Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die wesentlichen Ergebnisse der "Machbarkeitsstudie von Kurzfristprognosen der solaren Einstrahlung am Beispiel der 1 MW PV-Anlage Solardach München-Riem", wie in der Solarenergieförderverein Bayern(SeV)-Förderzusage vom 16. Dezember 2014 und im anschließenden Sponsoringvertrag vereinbart. Dieser oder Teile daraus dürfen wie vereinbart auf der SeV-Homepage veröffentlicht werden. Die Machbarkeitsstudie wurde vom SeV mit einer Aufwandsentschädigung finanziell unterstützt, um notwendige Hardware sowie Reisekosten zu finanzieren. Ziel der Studie war die Erstellung und Evaluierung von Kurzfristprognosen der solaren Einstrahlung sowie der PV-Leistung einer Anlage der MW-Klasse mit Hilfe von Wolkenkamerabildern. Dieses Verfahren wurde im Vorfeld bereits an der Universität Oldenburg entwickelt und sollte nun auf eine große PV-Anlage angewandt werden. Zu Beginn des Projekts wurden vor Ort auf der Besucherplattform der Messe eine Wolkenkamera sowie die notwendigen elektronischen Komponenten zur Erfassung und Archivierung der Bilder installiert. In den kommenden Monaten waren einige Besuche zu Wartungszwecken und um technische Modifikationen durchzuführen, notwendig. Das System wurde im späten Herbst 2015 wieder demontiert und die Anlage sowie der Datenspeicher zur Auswertung an die Universität Oldenburg zurückgeschickt. Die Auswertung der aufgezeichneten Bilder, die Anwendung des Prognosemodells sowie die Evaluierung anhand der Messdaten der PV-Anlage wurde in den kommenden Monaten durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Rahmen des 31. Symposiums photovoltaische Solarenergie in einer Präsentation vorgestellt und in einem mehrseitigen Bericht im Tagungsband veröffentlicht. Die dort vorgestellten und veröffentlichten Ergebnisse finden sich auch in diesem Abschlussbericht wieder.

Inhaltsverzeichnis

1	Ein	eitung	2								
2	Exp	eriment	3								
	2.1	Installation und Chronologie	3								
		2.1.1 Komponenten	3								
		2.1.2 Konfiguration und Datenerfassung	3								
		2.1.3 Chronologie	4								
	2.2	Kamerabilder	5								
	2.3	Messdaten	6								
3	Prognosemodell										
	3.1	Methode	7								
	3.2	Bildauswertung	8								
		3.2.1 Wolkenerkennung	8								
		3.2.2 Kamerakalibrierung und Bildaufbereitung	8								
		3.2.3 Wolken- und Schattenprojektion	8								
	3.3	Strahlungsmodellierung	8								
	3.4	Strahlungsprognose	10								
	3.5	Leistungsberechnung	10								
4	Erg	ebnisse	11								
	4.1 Auswertungskonzept										
	4.2	2 Resultate & Diskussion									
		4.2.1 Analyse	12								
		4.2.2 Prognose der absoluten Strahlung und Leistung	13								
		4.2.3 Prognose Bewölkungszustand	14								
		4.2.4 Prognosegüte bei unterschiedlicher Variabilität der Einstrahlung	14								
5	Faz	t	16								

Einleitung

Die Prognose der Verfügbarkeit solarer Einstrahlung wird mit steigendem Anteil an solaren Erzeugungskapazitäten im Stromnetz zunehmend bedeutender. Insbesondere die durch Veränderungen in der Bewölkung verursachte Variabilität der Solarstrahlung stellt hohe Anforderungen an Prognosemodelle (1). Bei weiter steigender Anzahl von Photovoltaikanlagen werden Fehler in der Prognose der Einstrahlung steigende Unsicherheiten und Anforderungen an den Ausgleich im Netz zur Folge haben.

Für die sehr kurzfristigen Prognosehorizonte bis zu einer halben Stunde sind klassische Vorhersagemethoden, die auf numerischen Wettermodellen und auf Satellitenbildern basieren, vor allem aufgrund der zu geringen räumlichen wie zeitlichen Auflösung nur eingeschränkt geeignet (2).

Für die lokale, räumlich und zeitlich sehr hoch aufgelöste Einstrahlungsprognose wurde in den letzten Jahren ein Schwerpunkt auf die Analyse von hemisphärischen Wolkenfotos gesetzt, die in den meisten Fällen mit Fischaugenobjektiven ausgestatteten Kameras aufgenommen werden (engl. "Whole/All/Total Sky Imager"). Solche Aufnahmen wurden schon früher vor allem in der Meteorologie zur Beobachtung der Bewölkung (3; 4) und der Analyse des Aerosolgehalts verwendet (5). Die Entwicklung von Strahlungs- und PV-Leistungsprognosen basierend auf diesen Wolkenbildern wurde in den vergangenen Jahren zunehmend Inhalt der Forschung (6; 7; 8; 9).

An der Universität Oldenburg wird seit Herbst 2013 an der Entwicklung eines kamerabasierten Prognosesystems geforscht. Dazu wurden Algorithmen implementiert, welche die Informationen über die aktuelle Bewölkung, den Wolkenzug sowie die daraus resultierende Einstrahlung am Boden abschätzt. Das Verfahren wurde zunächst an parallel durchgeführten Strahlungsmessungen in Oldenburg evaluiert. In einer größeren Studie wurde das Verfahren im Hinblick auf die Analyse- und Prognosegüte auf einem Datensatz bestehend aus 99 räumlich verteilten Pyranometern getestet (15).

In dieser Machbarkeitsstudie wird die Anwendung dieses Modells für eine 1-MW Photovoltaikanlage und die Ausweitung auf elektrische Leistung untersucht. Prognosen der minütlichen Einstrahlung bis zu 15 Minuten im Voraus, erstellt im Abstand von 10 Sekunden, werden in die Anlagenleistung umgerechnet und auf Basis von Messungen evaluiert. Die kamerabasierten Prognosen werden gegenüber Persistenz, also der einfachen Extrapolation des Istzustandes, evaluiert. Da die Persistenz kurzfristige Änderungen in der Bewölkung und der Einstrahlung nicht abbilden kann, wird ein Fokus auf die Abhängigkeit der Prognosegüte von der Einstrahlungsvariabilität gesetzt.

Experiment

Das auf der Besucherplattform der Messe von März bis November 2015 installierte Kamerasystem besteht aus drei Komponenten: Der Kamera (Vivotek FE8174), ein Raspberry Pi als Datenerfassungseinheit und eine externe Festplatte zur Archivierung der Daten (siehe Abb. 2.1). Zusätzlich war zunächst ein GPS-Empfänger zur Zeitsynchronisation notwendig, da der Raspberry Pi ohne "Real Time Clock (RTC)" ausgestattet ist.

2.1 Installation und Chronologie

2.1.1 Komponenten

Das System wurde in Oldenburg vorbereitet und am 17. März 2015 in München installiert. Die Kamera wird über ein 25 m langes Netzwerkkabel mit dem Raspberry Pi verbunden, der sich in einer wasserfesten Box befindet. Auch die Stromversorgung der Kamera wird über das Netzwerkkabel sicher gestellt. Der zugehörige "Power-over-Ethernet (PoE)"-Adapter wurde in der Box verstaut. Mit ihm zusammen wurden auch die externe Festplatte und der GPS-Empfänger in der Box verstaut. Zu einem späteren Zeitpunkt wurde noch ein UMTS-Webstick und ein USB-Hub mit externer Stromversorgung hinzugefügt. Die Kamera wurde auf dem Geländer der Besucherplattform so installiert, dass möglichst wenig Objekte im Sichtfeld der Kamera sind, als hochragende Gebäudeteile, Masten, Bäume, etc. möglichst weit entfernt stehen. Die Kamera wurde sorgfältig horizontal ausgerichtet.



Abbildung 2.1: Links: Kamerasystem mit Kamera und wasserdichter Anschlussbox vor der Installation. Auf diesem Foto fehlen noch Raspberry Pi, externe Festplatte und GPS-Empfänger bzw. UMTS-Stick. Rechts: Die Kamera nach der Installation auf der Besucherplattform.

2.1.2 Konfiguration und Datenerfassung

Der Raspberry Pi wurde zunächst so konfiguriert, dass die Bildaufzeichnung zu jeder Zeit gewährleistet ist, z.B. nach kurzfristigem Ausfall des Systems nach einer Stromabschaltung. Damit sollte der Datenverlust über einen größeren Zeitraum verhindert werden, da die Wartungsintervalle aufgrund der Entfernung

zwischen Oldenburg (Arbeitsplatz) und München (Kamera) verhältnismäßig lang ausfallen werden. Die Aufzeichnung der Kamerabilder erfolgte im 10 Sekunden Intervall zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Die Bilder werden zunächst auf der internen SD-Karte abgelegt und aus Speicherplatzgründen in der Nacht auf die externe Festplatte verschoben. Die interne Uhrzeit wird bei jedem Neustart sowie stündlich mit der GPS-Zeit abgeglichen.

Die hier geschilderte Konfiguration benötigt für den Betrieb lediglich eine 230 VAC Stromversorgung. Eine Versorgung mit 12 VDC aus einer Batterie ist möglich und damit ein autarkes System bei gleichzeitiger Anbindung an z.B. Solarmodule denkbar. Dies stand in diesem Fall allerdings nicht im Mittelpunkt der Forschung. Eine Verbindung an das Netzwerk der Messe wäre wünschenswert gewesen, damit das System von außen beobachtet werden kann und Bilder auch in Echtzeit nach Oldenburg transferiert hätten werden können. Dies war allerdings nicht möglich. Mit dem Einsatz eines UMTS-Websticks wurde ab August dieses Monitoring ermöglicht. Eine schematische Übersicht der Hardware-Konfiguration zeigt Abb. 2.2.

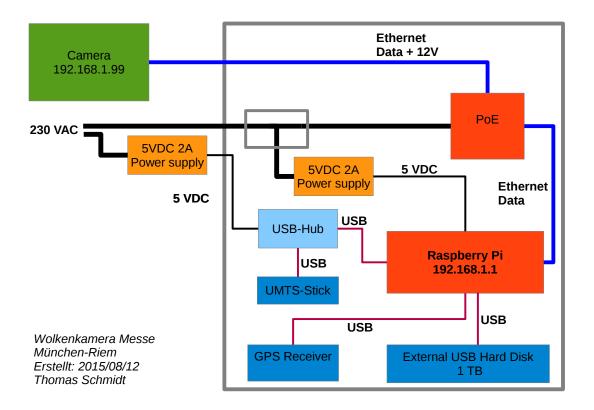


Abbildung 2.2: Schematischer Anschlussplan der Elektronikeinheit zur Aufnahme und Archivierung der Kamerabilder

2.1.3 Chronologie

Drei Wochen nach der Installation wurde das System zum ersten Mal gewartet. Es stellte sich heraus, dass das System ohne Ausfall durchgehend Bilder aufzeichnete. Ein falscher Datumsstempel der Bilder durch Fehler in der Programmierung konnte korrigiert werden. Somit konnten die ersten Bilder ausgewertet werden (siehe Abb. 2.3).

Die nächste Wartung wurde am 10. August durchgeführt. Hier musste festgestellt werden, dass die Aufzeichnung Ende Mai stoppte. Ursache hierfür war ein Speicherplatzproblem. Da nicht immer alle Bilder von der SD-Karte auf die externe Festplatte verschoben wurden lief der interne Speicher mit der Zeit voll. Damit konnten leider keine Bilder in den Sommermonaten bis August aufgezeichnet werden. Um den Betrieb noch sicherer zu gewährleisten, wurde jetzt ein UMTS-Webstick installiert, der den Zugang

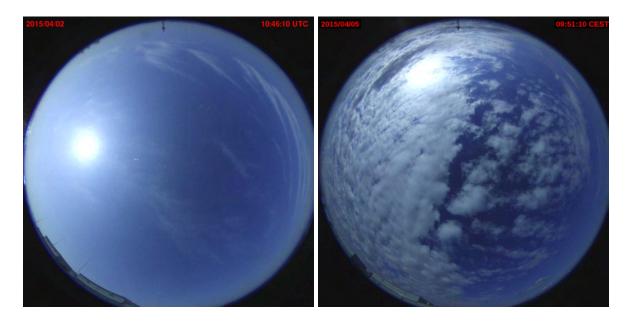


Abbildung 2.3: Beispielaufnahmen der Kamera bei fast wolkenfreiem Himmel (links) und Stratocumulus-Bewölkung (rechts)

von außen über das Handynetz ermöglichte. Dazu wurde vom Raspberry Pi ein ssh-Tunnel zu einem Server in Oldenburg aufrecht gehalten, der den Login über diesen Server ermöglichte. Hiermit konnte die Aufzeichnung nun dauerhaft überwacht werden. Zusätzlich konnte auf den GPS-Empfänger verzichtet werden, da jetzt die Uhrzeit mit einem Zeitserver im Internet abgeglichen werden kann. Die Aufzeichnung der Bilder wurde jetzt bis zum Abbau des Systems am 19. November aufrecht gehalten.

2.2 Kamerabilder

An dieser Stelle sollen einige Eigenschaften der Kamerabilder sowie vorbereitende Schritte zur Prozessierung der Bilder für die spätere Leistungsprognose genannt werden.

Die verwendete Vivotek 8174V¹ ist mit einem Fischaugenobjektiv ausgestattet, das den nötigen 360-Blick (siehe Abb.2.3) ermöglicht. Der Bildsensor ist ein 5 Megapixel CMOS-Sensor (Bildradius bis zum Horizont ca. 922 Pixel). In der Vorbereitung wurden einige Einstellungen (Farbeinstellungen, Weißabgleich, etc.) an eine Vivotek FE8174, die seit 2013 in Oldenburg im Betrieb ist, angepasst. Damit sollte sichergestellt werden, dass Algorithmen und Parameter der Bildauswertung, die an die Kamera in Oldenburg angepasst sind, auch in München verwendet werden können. Weiterhin wurde die Kameralinse mit dem Programm "OCamCalib Toolbox" (16) kalibriert. Mit der Kalibration wird die radiale Verzerrung des Bilder bzw. der Zusammenhang zwischen optischem Einfallswinkel und Bildradius bestimmt. Dies ist für die spätere Positionsbestimmung von Wolken und Sonne wichtig. Die Kalibration wurde in Oldenburg mit Aufnahmen eines Schachbrettmusters (regelmäßig angeordnete gerade Linien) durchgeführt.

An dieser Stelle soll auch erwähnt sein, dass es sich bei der Vivotek FE8174 um eine Netzwerkkamera handelt, die im Regelfall im Sicherheits- und Überwachungsbereich eingesetzt wird und für diese Zwecke ausgelegt ist. Dies bedeutet im Umkehrschluss auch, dass die Kamera wahrscheinlich Nachteile im Vergleich zu speziell für die Himmelsaufnahme konzipierten, aber wesentlich teureren Kameras, aufweist. Ein qualitativer und quantitativer Vergleich mehrerer in Forschung und Anwendung eingesetzter Kameras steht noch aus.





Abbildung 2.4: Links: Ausschnitt der PV-Anlage auf dem Dach der Messe München-Riem. Rechts: Besucherplattform mit Kamera in der rechten Geländerecke mit Messedach inm Hintergrund.

2.3 Messdaten

Die PV-Anlage (siehe Abb. 2.4), für die in dieser Studie experimentell Leistungsprognosen erstellt und evaluiert werden, hat eine installierte Kapazität von 1016 kW. Die Anlage erstreckt sich über sechs Hallendächer und nimmt eine Fläche von etwa 600 mal 200 Metern ein. Die Module sind bei südlicher Ausrichtung 28 Grad geneigt. Zur Überwachung der Anlage werden neben anderen die Einstrahlung horizontal und in Modulebene an einem Standort ca. 150 Meter entfernt von der Kamera gemessen (siehe Draufsicht in Abb.2.5). Zusätzlich wird die Modultemperatur an sechs verschiedenen Modulen gemessen und aufgezeichnet. Diese Parameter werden zur Evaluierung der Prognosen und zur Simulation der Gesamtleistung verwendet. Die Parameter werden sekündlich aufgezeichnet und als Minutenmittelwerte bereitgestellt.



Abbildung 2.5: Draufsicht auf die Messedächer. Die untersuchte PV-Anlage befindet sich auf den 6 Hallendächern in der mittleren Reihe. Die Kamera befindet sich zwischen der vierten und fünften Halle von links, die Wetterstation auf der dritten Halle. Quelle: GoogleEarth

 $^{^{1} {}m http://www.vivotek.com/fe8174/}$

Prognosemodell

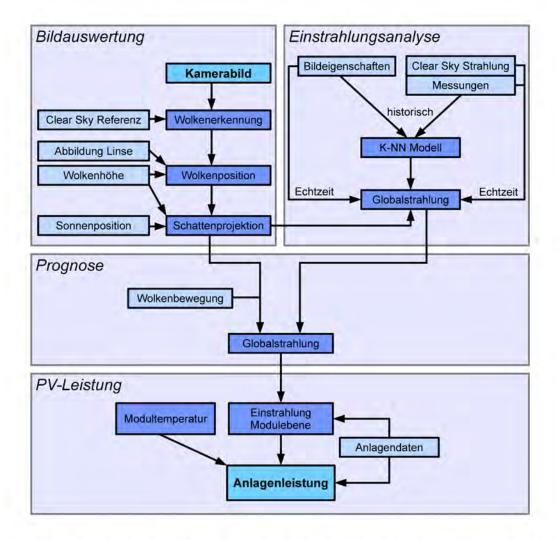


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der verwendeten Schritte von der Auswertung der Kamerabilder zur Prognose der Anlagenleistung.

3.1 Methode

Um die Leistung einer PV-Anlage aus den Informationen der Wolkenbilder berechnen zu können, sind mehrere Prozessierungsschritte notwendig. Dieses Kapitel unterteilt die Prozesskette in die Bildauswer-

tung, die Ableitung der bodennahen Strahlung, deren Vorhersage und die Simulation der Anlagenleistung. Ein Überblick über die einzelnen Schritte der Datenverarbeitung ist in Abbildung 3.1 gegeben.

3.2 Bildauswertung

3.2.1 Wolkenerkennung

Zur Identifizierung von Wolken in den Himmelsbildern wird ein binärer Klassifikationsansatz genutzt, der jedes Pixel anhand ihrer Farbwerte als entweder bewölkt oder unbewölkt einteilt. Die Klassifikation basiert auf der bereits häufig in der Wolkenanalyse von Himmelsbildern verwendeteten Analyse des Rot-Blau-Verhältnisses eines Pixels (Red-Blue-Ratio, RBR) (14). In dieser Studie wird eine Modifikation des klassischen Ansatzes verwendet, die den gesättigten Bildbereich um die Sonne besser berücksichtigt. Dazu werden Referenzbilder von mindestens einem klaren Tag mit repräsentativen Sonnenpositionen verwendet. Details zur verwendeten Methode werden in (15) beschrieben. Es ist hier anzumerken, dass aus der binären Klassifikation (Wolke/Himmel) zunächst keine Unterschiede in den optischen Eigenschaften der Bewölkung (v.a. Lichtdurchlässigkeit bzw. Transmissivität) gemacht werden. Eine Kalibration der jeweils aktuellen Einstrahlung wird daher in der Strahlungsmodellierung durchgeführt.

3.2.2 Kamerakalibrierung und Bildaufbereitung

Zur Bestimmung der Position eines bestimmten Pixels in einem georeferenzierten Koordinatensystem muss zunächst die Abbildungsfunktion der Linse bekannt sein. Zu deren Kalibrierung wurden mehrere Aufnahmen mit einem Schachbrettmuster in verschiedenen Positionen gemacht. Die Verzerrung der geraden Linien des Musters wurde zur Berechnung des funktionalen Zusammenhangs zwischen dem Einfallswinkels eines Pixels und der Entfernung zur Bildmitte nach (16) verwendet. Zuletzt wurde das Bild visuell anhand der Sonnenposition nach den Himmelsrichtungen orientiert.

Künstliche Objekte im Bild (Gebäude, Antennen) sowie der Bereich nahe des Horizonts (<15 Grad) wurden aufgrund der starken Verzerrung maskiert und damit nicht verarbeitet.

3.2.3 Wolken- und Schattenprojektion

Für diese Studie wurden Punktanalysen und -prognosen für den Standort der Kamera berechnet. Im Gegensatz zu der Prognose für einen Standort weiter entfernt von der Kamera, bedarf es in diesem Fall nicht der Kenntnis der Wolkenhöhe. Mit der zusätzlichen Information der Wolkenhöhe könnte eine Flächenprognose für die gesamte Anlage gerechnet werden können.

Aufgrund der Mittelung der Mess- und Prognosewerte auf eine Minute und der Ausdehnung der Anlage von etwa $670 \times 200 \,\mathrm{Meter}$ ist die Anwendung einer Punktprognose vertretbar. Hier nicht gezeigte Vergleiche der Minutenmittel der gemessenen Anlagenleistung an den Wechselrichtern (stellen ein Flächenmittel dar) und den Minutenmitteln des Strahlungssensor bestätigen diese Annahme.

Unter dieser Annahme werden die Wolken- und Schattenprojektionen unter Berücksichtigung der Abbildungsfunktion der Linse und des Sonnenstandes in dieser Studie mit einer konstanten Wolkenhöhe gerechnet.

3.3 Strahlungsmodellierung

Für die Strahlungsmodellierung werden das anhand der Wolkenmaske berechnete Schattenmuster, weitere Eigenschaften des aktuellen Kamerabildes, sowie Echtzeitmessungen der horizontalen Globalstrahlung (GHI) genutzt (siehe Schema in Abb. 3.1). Dazu wird angenommen, dass das Schattenmuster ein Indikator für die Verteilung der Direktnormalstrahlung (DNI) ist. Die Diffusstrahlung ergibt sich aus der gesamten Wolkenverteilung und wird als räumlich homogen verteilt angenommen. Aus diesen beiden Komponenten kann anschließend GHI an jedem Ort berechnet werden:

$$GHI = DHI + DNI * cos(\theta_{Sonne})$$
(3.1)

Die quantitative Bestimmung von *DHI* und *DNI* basiert auf zwei Schritten. Zunächst werden aus den Bildeigenschaften beide Komponenten anhand eines k-Nächste-Nachbar (kNN) Modells geschätzt. Dieses kNN-Modell wurde an einem einjährigen Datensatz aus Bildeigenschaften und gemessenen *DHI*- bzw. *DNI*-Messungen in Oldenburg gelernt (17). Dieses neue Verfahren wurde für diese Studie erstmals für einen anderen Standort als dem Trainingsort des Modells getestet. Es stellte sich heraus, dass das Modell sehr sensititiv auf Kameraeinstellungen ist und daher nur bei gleichen Einstellungen der Kamera ähnliche Resultate wie am Trainingsort liefert.

Da das Modell eine Schätzung des aktuellen Strahlungsniveaus liefert, werden die Messungen von GHI der letzten zwei Minuten noch zu einer Anpassung der Modellabschätzung an die Messungen herangezogen. Dieser Wert wird im Folgenden als Analyse bezeichnet und wird als Ausgangswert für die Prognose von GHI verwendet.

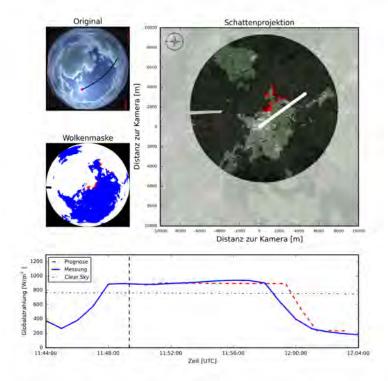


Abbildung 3.2: Beispiel-Vorhersage vom 9. September 11:49:20 UTC bei typischer Cumulus-Bewölkung. Gezeigt sind das Originalwolkenbild (links oben) und die Wolkenmaske (links mittig). Im Originalbild ist der prognostizierte Wolkenzug in Richtung Sonne eingezeichnet. In der Schattenprojektion (angenommene Wolkenhöhe 2000 m) ist der gleiche Pfad in weiß gezeichnet. Die zugehörige Strahlungsprognose bis zu 15 Minuten Zeithorizont ist im Vergleich zu den Messungen im unteren Teil dargestellt.

3.4 Strahlungsprognose

Die Strahlungsprognose basiert auf der Analyse der Wolkenbewegung mit dem "Optical Flow"-Verfahren (18) (siehe Abb.3.3 links). Dieses ermittelt Wolkenzugvektoren insbesondere an den Wolkenrändern. Im Gegensatz zu einer früheren Studie (15) wurde das Verfahren dahin erweitert, dass für Punktprognosen nur die Wolkenzugvektoren zur Mittelung eines globalen Vektors herangezogen werden, die in einem Sektor von 60 Grad in Wolkenzugrichtung liegen. Das führt dazu, dass im Falle von unterschiedlichen Zugrichtungen (z.B. unterschiedliche Wolkenschichten) nur die für den Ort der Prognose relevanten Vektoren berücksichtigt werden.

Der gemittelte Wolkenzugvektor wird dann benutzt, um die analysierten Schattenmuster für die Prognose zu extrapolieren. Die Einstrahlung GHI wird nach Gleichung 3.1 aus dem aktuellen ermittelten Niveau von DHI und DNI (DNI=0 im Fall von Verschattung) berechnet. Für diese Studie wurde die Prognose mit einer Auflösung von 1 Sekunde gerechnet und zu Minutenmitteln zusammengefasst. Es ist zu bemerken, dass damit nur eine Advektion des aktuellen Wolkenfeldes, aber keine Entwicklungen der Wolken berücksichtigt werden.

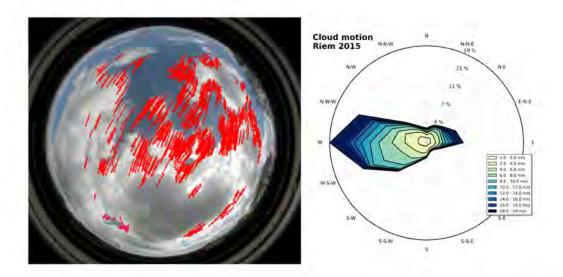


Abbildung 3.3: Links: Beispiel der Anwendung von "Optical Flow" auf Wolkenkamerabilder. In rot sind die ermittelten Wolkenzugvektoren von aufeinanderfolgenden Bildern dargestellt. Rechts: Verteilung von Wolkenzugrichtung- und Geschwindigkeit aus der Auswertung aller Bilder unter Annahme einer Wolkenbasishöhe von 2000 m.

Abbildung 3.2 zeigt eine Beispielprognose. In der Schattenprojektion stellt der weiße Strich, der vom Zentrum der Karte in Richtung Nordosten zeigt, die zukünftige Verschattung am Ort der Kamera bzw. die entgegengesetzte Wolkenzugrichtung dar. Es ist zu erkennen, dass die Bewölkung im Nordosten sich in Richtung der Anlage bewegt. Unter Berücksichtigung der ermittelten Wolkengeschwindigkeit ergibt sich eine Ankunftszeit von etwa 10 Minuten. Die prognostizierte Einstrahlung im unteren Teil der Abbildung verdeutlicht dies. Die qualitativ gute Übereinstimmung mit den Messwerten zeigt die praktische Anwendbarkeit der Prognose wolkenbedingter Einstrahlungsänderungen.

3.5 Leistungsberechnung

Aus der prognostizierten horizontalen Globalstrahlung GHI wird zunächst die Strahlung in Modulebene (POA) berechnet (19). Zusammen mit der aktuellen Modultemperatur wird daraus die DC-Leistung der Anlage auch für die Prognose nach (20) berechnet. Die Berücksichtigung der prognostizierten Einstrahlung, der thermischen Trägheit und falls verfügbar Windeinflüssen kann sicherlich zur Reduktion der Fehler beitragen.

Ergebnisse

4.1 Auswertungskonzept

Es wurden für die Evaluierung der Analyse- und Prognosegüte über 200 000 Einzelprognosen an über 90 Tagen vom 11. August bis 17. November 2015 herangezogen. Dabei wurde auf eine Auswertung bei tiefen Sonnenständen unter 20 Grad verzichtet, da hier zum einen die maximal zu erwartenden Leistungen gering sind und die Prognose des Wolkenzugs in Richtung der tief stehenden Sonne erschwert ist.

Der ermittelte Prognosefehler wurde mit einer naiven Persistenzprognose, welche lediglich die aktuelle Leistung unter Berücksichtigung des Sonnenstandes fortschreibt, verglichen. Als Gütemaße wurden zunächst die mittlere Abweichung (Bias) und der mittlere quadratische Fehler (RMSE) verwendet:

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i) \qquad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2},$$
(4.1)

mit den Messungen x bzw. die Prognosen y.

Wir haben weiterhin die Prognosen auf ihre Fähigkeit hin ausgwertet, den Bewölkungszustand (binär bewölkt oder unbewölkt) korrekt vorherzusagen. Der Zustand wurde anhand des Clear Sky Index k^*

$$k^* = \frac{GHI_{Messung}}{CSI},\tag{4.2}$$

welcher weitestgehend unabhängig vom Tages- und Jahresgang ist, bestimmt. Als Schwellwert wurde k^* = 0,7 verwendet. Bei dieser Betrachtung werden Prognosefehler durch ein inkorrektes Strahlungsniveau nicht berücksichtigt. Für die praktische Anwendung wird es oft auch weniger von Bedeutung sein, ob die exakte Leistung prognostiziert werden kann, sondern vielmehr die Änderung von einem Zustand in den anderen (Rampen). Als Fehlermaß wurde die Korrektklassifikationsrate (engl. Accuracy) genutzt, welche den Anteil der korrekt prognostizierten Zustände beschreibt:

$$Accuracy = \frac{RS + RW}{RS + RW + FS + FW}, \tag{4.3}$$

wobei RS = richtig sonnig, RW = richtig bewölkt, FS = falsch sonnig und FW = falsch wolkig sind. Eine anderer Aspekt auf den in diesem Beitrag näher eingegangen wird, ist die Prognosegüte bei unterschiedlicher Variabilität der Einstrahlung. Als Variabilitätsmaß wurde die Standardabweichung von k^* im Prognosezeitraum definiert:

$$\sigma_{k^*} = \sqrt{\frac{1}{14} \sum_{i=1}^{15} (k_i^* - \bar{k^*})^2}$$
 (4.4)

4.2 Resultate & Diskussion

4.2.1 Analyse

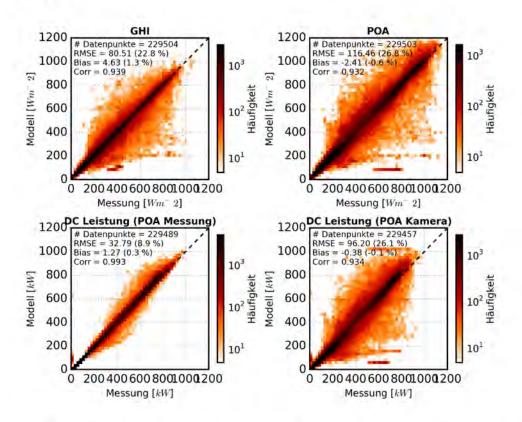


Abbildung 4.1: Vergleich der simulierten und gemessenen Parameter zum Analysezeitpunkt: horizontale Globalstrahlung (*GHI*, links oben), Umrechnung in die Modulebene (*POA*, rechts oben), berechnete DC Leistung aus gemessener *POA*-Einstrahlung und Modultemperatur (links unten) und berechnete DC Leistung aus den Kamerainformationen (rechts unten). Datengrundlage sind Minutenmittelwerte. Der relative Fehler bezieht sich auf den Mittelwert der Messungen.

Zunächst wurde ermittelt, welche Güte die Strahlungsableitung und Gesamtleistungsberechung für den Ausgangszustand, also für den Moment der Aufnahme des Bildes erreicht. Aus den Streudiagrammen in Abbildung 4.1 ist zu erkennen, dass das Ausgangsprodukt des Prognosetools, die Globalstrahlung (GHI), einen geringen Bias aufweist und mit der Messung gut korreliert. Vor allem schnelle Änderungen in der Einstrahlung und Limitierungen der Strahlungsmodellierung sind für einen RMSE von etwa $80.5\,\mathrm{W/m^2}$ bzw. $22.8\,\%$ der mittleren Einstrahlung verantwortlich. Weiterhin ist zu bedenken, dass zwischen Messstation und Kamera eine Distanz von fast 200 Metern liegt, was auch bei einem Minutenmittel bereits zum Fehler beiträgt. Nach der Umrechnung in die Modulebene (POA) erhöht sicher der RMSE auf $26.8\,\%$. Weiterhin wird die Güte der verwendeten Leistungssimulation aus den gemessenen Werten von POA und der Modultemperatur dargestellt. Hieraus ist zu erkennen, dass die Umrechnung in die Anlagenleistung bei geringem Bias einen Fehler von etwa $9\,\%$ verursacht. Der endgültige RMSE der analysierten Leistung liegt bei etwa $96\,\mathrm{kW}$ bzw. $26\,\%$.

4.2.2 Prognose der absoluten Strahlung und Leistung

Tabelle 4.1 gibt den RMSE für die weiteren Vohersagehorizonte an. Zusätzlich sind die Fehler für die Persistenzvorhersage gezeigt. Es wird deutlich, dass der Fehler der Persistenz schnell mit dem Horizont ansteigt (von 0 auf 32,8%), jedoch durchgehend kleiner ist als der Fehler der kamerabasierten Prognose (40,3% bei 15 Minuten).

Tabelle 4.1: Vergleich des absoluten RMSE (oben) und relativen RMSE (unten)	Tabelle 4.1:	Vergleich des	absoluten	RMSE	(oben)	und	relativen	RMSE	(unten))
---	--------------	---------------	-----------	------	--------	-----	-----------	------	---------	---

		GHI [Wm^2]	POA [Wm ⁻²]	DC [kW] Persistenz	DC [kW] Prognose
1t	Analyse	80.5	116.5	0.0	96.2
olc	5 Minuten	118.2	163.1	34.4	145.5
absolut	10 Minuten	138.8	189.1	119.2	155.1
ಹ	15 Minuten	139.3	189.9	127.4	156.6
	Analyse	22.8	26.88	0.0	26.1
tiv	5 Minuten	33.0	37.1	24.4	36.0
relativ	10 Minuten	37.7	41.6	30.9	40.3
r	15 Minuten	37.6	41.4	32.8	40.3

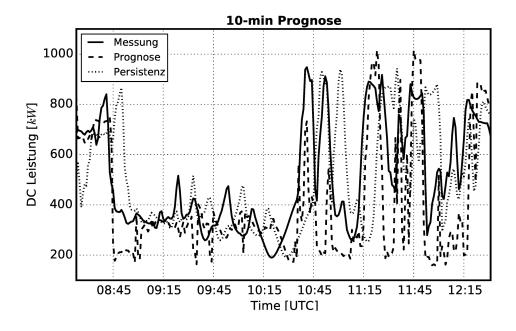


Abbildung 4.2: Beispielprognosen der Anlagenleistung in kW für einen Tagesverlauf (24. August 2015) mit variabler Einstrahlung. Dargestellt ist die 10-Minuten-Prognose mit Persistenz im Vergleich dazu.

Bei dieser Betrachtung der Prognosegüte über den kompletten Zeitraum ist zu bedenken, dass hier alle Wettersituationen zusammengefasst sind. Das bedeutet, dass auch alle Situationen mit klarem Himmel oder homogener Bewölkung mit einfließen, die praktisch keine Variation der Einstrahlung bewirken und damit einfach vorherzusagen sind. Der zusätzliche Nutzen der kamerabasierten Prognose liegt jedoch im Einsatz in Situationen mit hoher Variabilität der Bewölkung beziehungsweise wenn Änderungen der Einstrahlungsbedingungen erwartet werden.

Die Zeitreihe in Abbildung 4.2 zeigt einen typischen Tag mit variabler Einstrahlung. Die zugehörige 10-Minuten-Prognose der Anlagenleistung zeigt in mehreren Situationen, dass sie viele der großen Leistungssprünge qualitativ erkennen konnte (08:45 UTC, 11:15 UTC, 11:45 UTC, 12:15 UTC). Im Gegensatz wird deutlich, dass viele Leistungsänderungen auch bei dieser Anlagengröße in weniger als 10 Minuten passieren und diese daher nicht von einfacher Persistenz abgebildet werden können. Unzulänglichkeiten der kamerabasierten Prognose sind auch deutlich. Dazu zählen die ungenügende Prognose geringer Änderungen durch Änderungen in den optischen Eigenschaften der Bewölkung (09:15 - 10:15 UTC) oder auch Strahlungssituationen unter durchscheinenden Wolken, die durch den binären Wolkenerkennungsalgorithmus nicht berücksichtigt werden (z.B. 12:00 UTC). Erkennbare Abweichungen nach unten (sehr geringe Werte) oder oben (Spitzen) sind sehr wahrscheinlich auf Fehler bei der Modellierung des Strahlungsniveaus zurückzuführen.

4.2.3 Prognose Bewölkungszustand

Um die Prognose unabhängig von der Strahlungsmodellierung zu evaluieren, wurden die Prognosen in zwei Klassen aufgeteilt: in unbewölkt oder sonnig und bewölkt. Damit soll untersucht werden, ob der Bewölkungszustand über der Anlage richtig wiedergegeben werden kann. Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf der Accuracy (zu den Fehlermaßen siehe Kap. 4.1) mit dem Vorhersagehorizont. Während der Unterschied der Prognose zur Persistenz zu Beginn noch sehr groß ist, nähern sich beide Kurven mit länger werdendem Horizont an. Bei 15 Minuten liegt die Accuracy für beide bei etwa 0,88 bzw. 12 % Fehlerrate.

Zusätzlich ist in Abbildung 4.3 der Verlauf der Accuracy für Situationen hoher Variabilität (der GHI Messungen) gezeigt (Gl. 4.4). Für Prognosen bei einer Variabilität von $\sigma_{k^*} >= 0.15$ schneiden sich beide Kurven ab etwa 6 Minuten Vorhersagehorizont, da die Persistenz per Definition keine wolkenbedingten Änderungen prognostizieren kann und daher sehr schnell an Genauigkeit verliert. Damit wird das Potential der kamerabasierten Prognose in Situationen hoher Variabilität deutlich.

4.2.4 Prognosegüte bei unterschiedlicher Variabilität der Einstrahlung

Zur Verallgemeinerung dieser Erkenntnis zeigt Abbildung 4.4 eine Auswertung der Schnittpunkte beider Kurven in Abhängigkeit des angesetzten Variabilitätsschwellwertes. Es wurde σ_{k^*} von 0 bis 0,27 (0,27 entspricht 97% aller Prognosen unterhalb diesem Schwellwert) variiert. Aus dieser Grafik lässt sich ableiten, ab welchem Vorhersagehorizont bei gegebener Variabilität sich der Einsatz von kamerabasierten Prognosen lohnen kann. Die Auswertung ist sowohl für die Accuracy (für die Prognose des Bewölkungsszustands) als auch für den RMSE (für die Strahlungsprognose) gezeigt. In Situationen geringer Variabilität ($\sigma_{k^*} < 0.05$) wird der Schnittpunkt erst sehr spät (ca. 10 Minuten Horizont) für den Bewölkungszustand oder garnicht für die Strahlungsprognose erreicht. Bei höherer Variabilität ($\sigma_{k^*} > 0.25$) liegt dieser Zeitpunkt sowohl bei Betrachtung der Accuracy als auch des RMSE bereits bei 5 Minuten. Diese hohe Variabilität ist vor allem auf große Änderungen (Rampen) der Einstrahlung zurückzuführen.

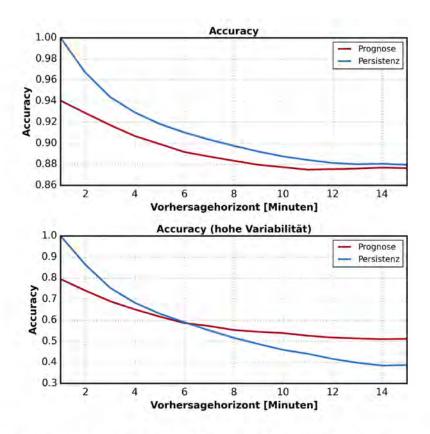


Abbildung 4.3: Auswertung der Accuracy von Prognose und Persistenz in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts für den gesamten Zeitraum (oben) und gefiltert nach Situationen hoher Variabilität $\sigma_{k^*} > 0.15$ (unten).

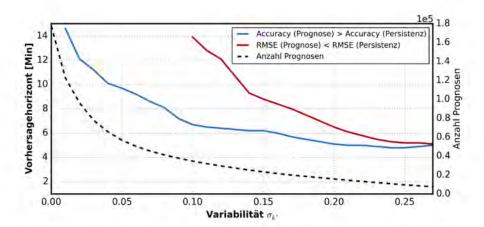


Abbildung 4.4: Auswertung des Einsetzens einer höheren Accuracy (gestrichelt) und eines niedrigeren RMSE (durchgezogene Linie) der Prognose gegenüber der Persistenz in Abhängigkeit der minimalen Variabilität des clear sky index σ_{k^*} im Prognosezeitraum. Weiterhin ist die Anzahl der ausgewerteten Prognosen zu jedem Varibilitätskriterium dargestellt (gepunktet, Skala rechts).

Fazit

Mit der Studie konnte zunächst gezeigt werden, dass die Erstellung von Leistungsprognosen auf Basis von Wolkenkamerabildern, in diesem Fall einer herkömmlichen Netzwerkkamera, möglich ist. Für den Einsatz an einer bestehenden PV-Anlage sollten Stromversorgung und ein Netzwerkzugang zum Monitoring des Systems aber auch für die Echtzeitauswertung bzw. -prognose zur Verfügung stehen. Die Kamera sollte an einem möglichst freistehenden Platz installiert werden und sorgfältig horizontal ausgerichtet werden. Zur Echtzeitkalibration der Einstrahlungsbestimmung aus der detektierten Wolkenmaske ist mindestens ein Pyranometer mit zeitlich hochauflösender Abtastrate erforderlich. Weitere Echtzeitmessungen, wie z.B. Diffus/Direktstrahlung, Strahlung in Modulebene, Modultemperatur sowie Aussentemperatur können den Prognosefehler weiter reduzieren, da sie wichtige Zusatzinformationen zur Simulation der Anlagenleistung liefern.

Für einen Zeitraum von etwa 3 Monaten von August bis November 2015 wurden Prognosen der Anlagenleistung einer 1-MW Photovoltaikanlage auf Basis von Wolkenkamerabildern erstellt und ausgewertet. Das für diese Studie entwickelte Modell zur Auswertung der Bilder und Berechnung der Leistungsprognose wird vorgestellt. Es werden die Eigenschaften und Potentiale dargestellt. An dieser Stelle ist die binäre Wolkenklassifikation, die nur eine unzureichende Unterscheidung optisch unterschiedlich durchlässiger Wolken zulässt, zu nennen. Bei der Prognose ist zu beachten, dass das Verfahren nur die Advektion, aber keine zeitlichen Entwicklungen der Wolken berücksichtigt. Diese Aspekte werden Schwerpunkte zukünftiger Entwicklung von kamerabasierten Prognosemodellen sein.

Die Prognosegüte im Vergleich zur naiven Persistenz wird in Abhängigkeit des Vorhersagehorizonts und auf Basis von Minutenmittelwerten zunächst für den gesamten Datensatz evaluiert. Es zeigt sich, dass sich im Mittel keine Verbesserungen gegenüber der Persistenz einstellen. Eine Annäherung an die Persistenzgüte ist allerdings mit zunehmendem Vorhersagehorizont zu beobachten. Der Hauptgrund für die bessere Persistenzgüte ist vor allem darin zu sehen, dass die Einstrahlungsvariabilität im Kürzestfristbereich in wolkenfreien sowie bedeckten Situationen stark reduziert ist und Persistenz in diesen Fällen nahezu fehlerfrei ist. Die Güte der kamerabasierten Prognosen ist weiterhin in schwierigen Wolkensituationen (semi-transparente Cirrusbewölkung, Wolken in mehreren Schichten und Cumulusbewölkung die starker Veränderung im Prognosezeitraum unterliegt) aufgrund der noch fehlenden Berücksichtigung dieser im Modell reduziert.

Auf Grundlage einer binären Auswertung von zwei Zustandsklassen (sonnig oder bewölkt) kann gezeigt werden, dass der Anteil der korrekt klassifizierten Fälle bei etwa 94 % bis 88 % (15 Minuten-Prognose) liegt. Die gleiche Auswertung wurde für Situationen hoher Einstrahlungsvariabilität durchgeführt. Dabei konnte der Zusammenhang zwischen Variabilität und Prognosegüte hervorgehoben werden. Es wurde gezeigt, dass bei zunehmender Variabilität der Zeitpunkt eines geringeren Prognosefehlers im Vergleich zur Persistenz sich deutlich zu früheren Vorhersagehorizonten veschiebt. Ebenso werden die Vorteile der Bewölkungsprognose (binäre Zustände) im Vergleich zur direkten Strahlungsprognose deutlich.

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen also, dass eine differenzierte Fragestellung von Anwenderseite notwendig ist, um eine Aussage über die Anwendbarkeit von Leistungsprognosen im Kürzesfristbereich auf Basis von Wolkenkamerabildern treffen zu können. Es sollte hier zwischen absoluter Einstrahlung oder Modulleistung (Punktinformation) und Gesamtanlagenleistung (Flächenmittel) unterschieden wer-

den. Die Betrachtung der zeitlichen Auflösung der Prognose (Instantan- oder Mittelwerte bzw. Leistungsoder Energieprognose) ist insofern von Bedeutung, da je nach Betrachtung die Prognosegüte erheblich
schwanken kann. So könnte die Anforderung an die Prognose in einem PV-Diesel-Hybridsystem sein,
möglichst genau und mit hoher Sicherheit das Eintreffen von Bewölkung (also einer signifikanten Leistungsreduktion der PV-Anlage) für die Bereitstellung von Dieselkraftwerken vorherzusagen. Dies kann
keine Persistenzprognose leisten, auch wenn sie den Großteil der Zeit zuverlässige Prognosen liefert.

Literaturverzeichnis

- [1] SAYEEF, S.; HESLOP, S.; CORNFORTH, D.; MOORE, T.; PERCY, S.; WARD, JK; BERRY, A.; ROWE, D.: Solar Intermittency: Australia's Clean Energy Challenge: Characterising the Effect of High Penetration Solar Intermittency on Australian Electricity Networks. CSIRO Sydney, Australia, 2012
- [2] INMAN, R. H.; PEDRO, H. T. C.; COIMBRA, C. F. M.: Solar forecasting methods for renewable energy integration. In: Progress in Energy and Combustion Science 39 (2013), Nr. 6, 535 – 576. ISSN 0360–1285
- [3] PFISTER, G.; MCKENZIE, R. L.; LILEY, J. B.; THOMAS, A.; FORGAN, B. W.; LONG, C. N.: Cloud Coverage Based on All-Sky Imaging and Its Impact on Surface Solar Irradiance. In: *Journal of Applied Meteorology* 42 (2003), Oktober, Nr. 10, 1421–1434. ISSN 0894–8763
- [4] CAZORLA, A.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L.: Development of a sky imager for cloud cover assessment. In: Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision 25 (2008), Januar, Nr. 1
- [5] Olmo, F. J.; Cazorla, A.; Alados-Arboledas, L.; Lopez-Alvarez, M. A.; Hernandez-Andres, J.; Romero, J.: Retrieval of the optical depth using an all-sky CCD camera. In: *Applied Optics* 47, No.34 (2008), Dezember, S. 182–189
- [6] Chu, Y.; Li, M.; Pedro, H. T. C.; Coimbra, C. F. M.: Real-time prediction intervals for intra-hour {DNI} forecasts. In: Renewable Energy 83 (2015), 234 – 244. ISSN 0960-1481
- [7] West, S. R.; Rowe, D.; Sayeef, S.; Berry, A.: Short-term irradiance forecasting using skycams: Motivation and development. In: Solar Energy 110 (2014), Nr. 0, 188 207. ISSN 0038–092X
- [8] YANG, H.; KURTZ, B.; NGUYEN, D.; URQUHART, B.; CHOW, C. W.; GHONIMA, M.; KLEISSL, J.: Solar irradiance forecasting using a ground-based sky imager developed at {UC} San Diego. In: Solar Energy 103 (2014), Nr. 0, 502 – 524. ISSN 0038-092X
- [9] Chow, C. W.; Urquhart, B.; Lave, M.; Dominguez, A.; Kleissl, J.; Shields, J.; Washom, B.: Intra-hour forecasting with a total sky imager at the {UC} San Diego solar energy testbed. In: Solar Energy 85 (2011), Nr. 11, 2881 2893. ISSN 0038–092X
- [10] Blanc, P.; Wald, L.: A library for computing the relative position of the sun and the earth / GMES. 2011. Forschungsbericht
- [11] FONTOYNONT, M.; DUMORTIER, D.; HEINEMANN, D.; HAMMER, A.; OLSETH, J.; SKARVEIT, A.; INEICHEN, P.; REISE, C.; PAGE, J.; ROCHE, L.; OTHERS: Satellight: a WWW server which provides high quality daylight and solar radiation data for Western and Central Europe. In: 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, American Meteorological Society Ed., Boston, Massachusetts, USA, 1998, S. 434–437
- [12] BOURGES, D. B.: Yearly variations of the Linke turbidity factor. In: Climatic data handbook of Europe. 1992, S. 61–64
- [13] Dumortier, D.: The Satellite model of turbidity variations in Europe. 1998. Technical report
- [14] SHIELDS, J. E.; KARR, M. E.; TOOMAN, T. P.; SOWLE, D. H.; MOORE, S. T.: The whole sky imager a year of progress. 1999

- [15] SCHMIDT, T.; KALISCH, J.; LORENZ, E.; HEINEMANN, D.: Evaluating the spatio-temporal performance of sky imager based solar irradiance analysis and forecasts. In: *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 15 (2015), Nr. 19, 26997–27039.
- [16] SCARAMUZZA, D: OCamCalib: Omnidirectional Camera Calibration Toolbox for Matlab [WWW Document]. https://sites.google.com/site/scarabotix/ocamcalib-toolbox. Version: 2014
- [17] SCHMIDT, T.; KALISCH, J.; LORENZ, E.; HEINEMANN, D.: Retrieving direct and diffuse radiation with the use of sky imager pictures. In: EGU General Assembly 2015 Bd. 17. Vienna, Austria, 2015
- [18] LUCAS, Bruce D.; KANADE, Takeo: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. In: *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence Volume 2.* San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1981 (IJCAI'81), 674–679
- [19] Klucher, Thomas M.: Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. In: *Solar energy* 23 (1979), Nr. 2, S. 111–114
- [20] BEYER, Hans G.; BETCKE, J; DREWS, Anja; HEINEMANN, Detlev; LORENZ, Elke; HEILSCHER, Gerd; BOFINGER, Stefan: Identification of a General Model for the MPP Performance of PV-Modules for the Application in a Procedure for the Performance Check of Grid Connected Systems. In: 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France Bd. 7, 2004, S. 2004