



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Frederik Hannes Fröhlich

Konzeption und Entwicklung eines
Kamerasystems zur Kurzfristvorhersage von
Wolkenbewegungen und Leistungsprognose
einer Photovoltaik-Anlage

Frederik Hannes Fröhlich

Konzeption und Entwicklung eines Kamerasystems
zur Kurzfristvorhersage von Wolkenbewegungen
und Leistungsprognose einer Photovoltaik-Anlage

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Jörg Dahlkemper
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Florian Wenck

Abgegeben am 18. Dezember 2017

Frederik Hannes Fröhlich

Thema der Bachelorthesis

Konzeption und Entwicklung eines Kamerasystems zur Kurzfristvorhersage von Wolkenbewegungen und Leistungsprognose einer Photovoltaik-Anlage

Stichworte

Bildverarbeitung, Kamera, Embedded Vision, Background Subtractor, Optischer Fluss, Wolken, Meteorologie, Energietechnik, Photovoltaik, Sky-Imager, Kurzfristvorhersagen, Kurzfristprognose, Solarstrahlung, Globalstrahlung, Diffusstrahlung, Direktstrahlung

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Embedded Vision Systems zur Vorhersage von Wolkenbewegungen und den dadurch beeinflussten Leistungsertrag der Photovoltaik-Anlage des Energie Campus Bergedorf CC4E. Die vom dem System erstellten Prognosen sollen in Zukunft für den wirtschaftlichen Energiehandel und die Netzsteuerung, z.B. innerhalb eines Smart-Grid, genutzt werden können.

Frederik Hannes Fröhlich

Title of the paper

Development and construction of a camera based system for short-term forecast of cloud movement and power prediction of a photovoltaic plant

Keywords

image processing, camera, embedded vision, Background Subtractor, Optical Flow, Clouds, meteorology, energy management, photovoltaics, Sky-Imager, short-term forecast, short-term prediction, solar radiation, global radiation, diffuse sky radiation, direct sky radiation

Abstract

Inside this report an embedded vision system is developed which generates a short-term power prediction of the photovoltaic plant at Energie Campus Bergedorf CC4E affected by cloud movement. In the future these predictions should be used for a more efficient energy trade and energy management.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die mich während des Studiums und im besonderen dieser Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt dabei:

- Prof. Dr.-Ing. Jörg Dahlkemper, der mir die Möglichkeit geboten hat, dieses interessante und anspruchsvolle Thema zu bearbeiten, sowie für die Betreuung und Unterstützung während dieser Arbeit,
- Prof. Dr.-Ing. Florian Wenck, der sich bereit erklärt hat, die Zeitprüfung dieser Arbeit zu übernehmen,
- Matthias Kühl (M. Sc.), Dipl.-Ing. (FH) Bastian Hey (M. Eng.) und Sebastian Farrenkopf (B. Eng) für die Betreuung von Seiten des Energie Campus Bergedorf CC4E,
- meinen Eltern Sabine Fröhlich und Dirk Bürsing für die finanzielle und seelische Unterstützung, sowie die kreativen Anregungen und Bestärkungen,
- meinen Freunden, die mich während dieser Arbeit unterstützt und mir Rückhalt gegeben haben.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Vorstellung des Energie Campus Bergedorf CC4E	4
2 Stand der Technik	5
2.1 Bewegungserkennung	5
2.1.1 Differenzbild	5
2.1.2 Background Subtraction	7
2.1.3 Optical Flow	8
2.2 Vorhersageverfahren	10
2.2.1 Zeitreihenverfahren	10
2.2.2 Fundamental-physikalische Verfahren	10
2.2.3 Statistische Verfahren mit numerischen Wettervorhersagen	11
2.2.4 Verfahren für Solarenergie	11
2.2.4.1 Sky-Imager der Firma Yankee Environmental Systems	12
2.2.4.2 Fischaugenkamera	12
2.3 Bestimmung der Sonnenposition und Solarstrahlung	13
2.3.1 Sonne	13
2.3.1.1 Spektrum des Sonnenlichts	14
2.3.1.2 Strahlung auf der Erde	15
2.3.2 Berechnung der Sonnenposition	16
2.3.3 Berechnung der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel	17
2.3.4 Scheinbarer Durchmesser der Sonne	18
2.4 Entfernen von Verzeichnungen aus Kamerabildern	19
3 Anforderungen	20
3.1 Hardware	20
3.1.1 Bildverarbeitungsrechner	20
3.1.2 Kamera und Objektiv	21
3.1.2.1 Abdeckung eines Blickwinkels von mindestens $\frac{1}{2}\pi$	21
3.1.2.2 Schutz des Kamerasensors vor direkter Sonneneinstrahlung	21
3.1.3 Versorgung	22

3.1.4	Gehäuse	22
3.1.4.1	Schutz vor Witterungseinflüssen	22
3.2	Software	23
3.2.1	Programmiersprache und Bildverarbeitungsbibliothek	23
3.2.2	Verzeichnungen	23
3.2.3	Position der Sonne	23
3.2.4	Segmentierung von Wolken und Himmel	23
3.2.5	Prognose der Bestrahlungsstärke	24
3.3	Zusammenfassung der Anforderungen	24
4	Konzeption	26
4.1	Hardware	26
4.1.1	Bildverarbeitungsrechner	26
4.1.2	Kamera und Objektiv	27
4.1.2.1	Sensortechnologie	27
4.1.2.2	Farbaufnahme	28
4.1.2.3	Objektive	29
4.1.2.4	Filter	30
4.1.2.5	Variante I: Mehrere Raspberry Pi Kameras + Kamera-Switch	31
4.1.2.6	Variante II: Eine Raspberry Weitwinkelkamera	32
4.1.2.7	Variante III: Basler Dart Kamera	32
4.1.2.8	Vergleich der Varianten	33
4.1.3	Versorgung	35
4.1.4	Gehäuse	35
4.1.4.1	Material	36
4.2	Software	37
4.2.1	Programmiersprache und Bildverarbeitungsbibliothek	37
4.2.2	Verzeichnungen	37
4.2.3	Position der Sonne	38
4.2.4	Segmentierung von Wolken und Himmel	38
4.2.4.1	Variante I: Verhältnis Rot zu Blau	39
4.2.4.2	Variante II: Farbwinkel	40
4.2.4.3	Vergleich der Varianten	40
4.2.5	Prognose der Bestrahlungsstärke	41
4.2.5.1	Bewegungsanalyse und -vorhersage	41
4.2.5.1.1	Variante I: Kontur der Wolke als Wiedererkennungsmerkmal	41
4.2.5.1.2	Variante II: Background Subtractor	42
4.2.5.1.3	Variante III: Opical Flow	42
4.2.5.1.4	Vergleich der Varianten	43

4.2.5.2	Prognosezeitraum	43
4.2.5.3	Verdeckung der Sonne und resultierende Bestrahlungsstärke	44
5	Entwicklung	45
5.1	Hardware	45
5.1.1	Kamera und Objektiv	45
5.1.2	Gehäuse	46
5.2	Software	52
5.2.1	Kameraparameter	54
5.2.2	Segmentierung von Wolken und Himmel	54
5.2.2.1	Einteilung des Bildes in Sektoren	56
5.2.2.2	Klasse Clouds	56
5.2.3	Prognose der Bestrahlungsstärke	57
5.2.3.1	Berechnung der Sonnenposition	57
5.2.3.2	Berechnung der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel	57
5.2.3.2.1	Bestimmung der diffusen Strahlung	58
5.2.3.2.2	Bestrahlung der geneigten Kollektoren und Bestimmung der Leistung	58
5.2.3.3	Bewegungsanalyse und Vorhersage	60
5.2.3.4	Verdeckung der Sonne und resultierende Bestrahlungsstärke	61
5.2.4	Programmablauf der Vorhersage	62
6	Implementierung und Test	64
6.1	Vorbereitung des Raspberry Pi	64
6.2	Automatischer Start und Stopp der Software	64
6.3	Coding-Style	64
6.4	Konfiguration	64
6.5	Aufbau	65
6.6	Anbindung an die IT-Infrastruktur des Gebäudes	66
6.7	Test des Systems	66
6.7.1	Bestrahlung bei klarem Himmel	67
6.7.2	Segmentierung von Wolken und Himmel	68
6.7.3	Bewegungsanalyse und Vorhersage	69
7	Fazit	70
7.1	Zusammenfassung	70
7.2	Ausblick	71
	Literaturverzeichnis	72

Tabellenverzeichnis

2.1	Verschiedene Klassen zur Einteilung der Bildpunkte $C_1 - C_5$ [GBE12]	13
2.2	Wellenlängen und die dazugehörigen Farbtöne [Qua13]	14
3.1	Zusammenfassung der Anforderungen	24
4.1	Auswahl des Bildverarbeitungsrechners	26
4.2	Anzahl der vertikalen Pixel der Kameravarianten	33
4.3	Vergleich der Kamera-Varianten gegenüber den Anforderungen	34
4.4	Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung	34
4.5	Vergleich getrennter Versorgung und PoE-Versorgung	35
4.6	Vergleich Aluminium und Kunststoff	36
4.7	Vergleich Glas und Acrylglas	36
4.8	Allgemeine Softwareanforderungen	37
4.9	Vergleich Fisheye-Modell und Teilentzerrung	38
4.10	Vergleich der Ansätze zur Bestimmung der Sonnenposition	38
4.11	Vergleich Farbwinkel und Verhältnis mit den Anforderungen	40
4.12	Vergleich Differenzbild-Ansatz mit den Anforderungen	41
4.13	Vergleich der Varianten mit den Anforderungen	43
5.1	Ergebnis des Projektionstests in $[\circ]$	45
5.2	Entwickelte Softwaremodule und deren Funktion	52
5.3	Kameraparameter	54

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vergleich zweier Differenzbild-Methoden	7
2.2	Bewegung benachbarter Bildpunkte [Mün05, S. 3]	8
2.3	Darstellung Optical Flow [Hat17]	9
2.4	Schematische Darstellung eines fundamentalen Verfahrens [Gra14, S. 89] . .	11
2.5	Schematische Darstellung eines fundamentalen Verfahrens [Gra14, S. 92] . .	11
2.6	Total Sky Imager [Con11]	12
2.7	Spektren des Sonnenlichtes. [Qua13]	14
2.8	Diffuse und direkte Solarstrahlung [Mer11]	15
2.9	Winkelbezeichnungen des Sonnenstandes. [Qua13]	16
2.10	Definition von Ausrichtungswinkel und Neigungswinkel [Qua13, S. 71]	18
3.1	Winkeldefinitionen	21
4.1	Systemarchitektur und Module	26
4.2	Blooming-Effekt [Hun06]	27
4.3	Aufbau der CMOS-Sensor-Schaltung [Yun12]	28
4.4	Vergleich der Blickwinkel verschiedener Objektive [Pra17]	29
4.5	Bandpass BP550 (MidOpt) - Diagramm (links), Schema Filter (rechts) [Sys17a]	31
4.6	OpenCV-Match Shapes [Dev17b]	42
5.1	Technische Zeichnung der Acrylglas-Kuppel	45
5.2	Technische Zeichnung der Acrylglas-Kuppel	46
5.3	Technische Zeichnung des Verbindungsringes	49
5.4	Technische Zeichnung der Kamerabefestigungsplatte	50
5.5	Technische Zeichnung des Gesamtgehäuses	51
5.6	Ablaufdiagramm Hauptprogramm (Anhang 4)	53
5.7	(a): Originalbild, (b): Darstellung des Farbwinkel-Kanals, (c): Farbwinkel-Kanal + Schwellwert-Operation ($S = 80$)	55
5.8	(a): Originalbild, (b): unmaskiertes Wolken-Bild, (c): maskiertes Wolken-Bild .	55
5.9	(a): Sektoren, (b): Sektoren während der Bewegungserkennung	56
5.10	Bestrahlung auf horizontaler und geneigter Fläche	58
5.11	Regressionsgrade	59
5.12	(a): Farbwinkel, (b): Schwellwert-Operation, (c): allgemeine Bewegungsvektoren, (d): Zugeordnete Bewegungsvektoren	60
5.13	Verdeckung der Sonnen	62
5.14	Ablaufdiagramm des Vorhersage-Subprozesses	63
6.1	(a): Nahaufnahme des Systems, (b): Gesamtaufnahme des Systems	65

6.2	Blockschaltbild des Gesamtsystems	66
6.3	Vergleich der vom implementierten Algorithmus (blau) und der professionell Software (rot) berechneten Werte für die Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel (horizontale Ebene) - Daten des 22. November 2017	67
6.4	(a),(c): Originalbild, (b),(d): erkannte und nicht erkannte Wolken	68
6.5	(a): Vorhersage t_0 , (b): tatsächliche Wolkenkonstellation $t_0 + 30$ Sekunden, (c): Vergleich der Vorhersage und der Realität	69

1 Einleitung

Die erneuerbaren Energien haben sich in den vergangenen Jahren, mit großer Dynamik, zu einem bedeutenden, wirtschaftspolitischen Element entwickelt. Von 1990 bis 2016 hat sich ihr Anteil an der Energieversorgung in Deutschland annähernd verzehnfacht. Der größte Teil davon wird mit Hilfe von Windkraft erzeugt, aber auch Photovoltaik-Anlagen haben mit rund 20 % einen großen Anteil an der deutschen Energieversorgung durch erneuerbare Energien [Umw17].

Durch die Knappheit der fossilen Brennstoffe, werden die erneuerbaren Energien in Zukunft noch mehr an Bedeutung gewinnen. Ein Beispiel, für den in diesem Bereich stattfindenden Fortschritt, stellt die Norddeutsche Energiewende NEW4.0 dar. Dabei handelt es sich um ein länderübergreifendes Großprojekt mit dem Ziel, eine Gesamtregion von 4,5 Millionen Einwohnern bis 2035 vollständig mit elektrischer Energie aus regenerativen Erzeugern zu versorgen.

Um dies zu erreichen, werden die Verfahren zur Energiegewinnung bezüglich Wirkungsgrad und Herstellungsaufwand stetig weiterentwickelt. Der Energie Campus Bergedorf CC4E ist Teil der NEW4.0 und stellt einen der Standorte dar, an denen die Systeme zur Energiegewinnung und Netzsteuerung untersucht werden.

Auch die Smart-Grid-Technologie (dt. intelligentes Stromnetz) ist ein bedeutender Teil dieser Entwicklung und ebenfalls eins der Gebiete, die im Energie Campus Bergedorf CC4E untersucht werden. In einem Stromnetz, bestehend aus Verbrauchern und Erzeugern, übernehmen Smart-Grid-Steuerungen die Aufgabe, inhomogene Erzeuger, wie Photovoltaik- oder Windkraftanlagen, besser zu integrieren und so für ein stabiles und ausgeglichenes Netz zu sorgen.

1.1 Motivation

Die übergeordnete Motivation für diese Arbeit ist die wirtschaftlichste und bestmögliche Nutzung der Photovoltaik-Anlage. Dies gilt sowohl für den, durch die Prognosen vereinfachten, Energiehandel, als auch für die Netzsteuerung.

Ohne eine solche automatisierte Prognose sind Betreiber meist auf numerische Wettervorhersagen angewiesen. Diese sind jedoch besser für den längerfristigen, als für den kurzfristigen Handel geeignet [Bau17, S. 86].

Ein übliches System zur Leistungsprognose für erneuerbare Energien ist beispielsweise das Zeitreihenverfahren (Kapitel 2.2.1). Dabei werden Daten aus der nahen Vergangenheit für die Prognose genutzt. Dieses Verfahren eignet sich zum Beispiel für die Energiegewinnung durch Windkraftanlagen, da die Windgeschwindigkeit und die damit verbundenen Leistungserträge in der Regel beständig sind oder sich gleichmäßig verändern. Für die Energiegewinnung mit Hilfe von Photovoltaik-Anlage eignet sich dieses Verfahren aufgrund der Unbeständigkeit der Solarstrahlung nicht.

Besonders im Bereich der Energiegewinnung aus Solarstrahlung kommt es durch den Durchzug von Wolkenfeldern und der daraus resultierenden Verschattung der Sonne zu starken, oft sprunghaften Leistungsschwankungen. Diese Leistungsschwankungen können bei herkömmlichen Prognoseverfahren nicht berücksichtigt werden, da sie die relativen Positionen der Wolken zur Sonne nicht berücksichtigen.

Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit mit der Entwicklung eines Sky-Imagers. In der Vergangenheit wurden bereits Sky-Imager-Systeme entwickelt. Dabei handelte es sich jedoch meist um wissenschaftliche Arbeiten und es existiert nur ein kommerzielles Produkt, welches in diesem Bereich vertrieben wird (Abschnitt 2.2.4). Diese Systeme bieten den Vorteil, dass sie durch die direkte Beobachtung der Wolken und die Analyse ihrer Bewegungen die Richtung und Geschwindigkeit der einzelnen Wolkenfelder bestimmen können. Anhand dieser Informationen ist es möglich, eine Prognose zu erstellen, ob es innerhalb des Vorhersagezeitraumes zu Verschattungen der Sonne kommt und wie diese sich auf die Bestrahlungsstärke am Kamerastandort auswirken. Aus der prognostizierten Bestrahlungsstärke kann im Anschluss der voraussichtliche Leistungsertrag der Photovoltaik-Anlage berechnet werden.

Für ein solches System sind verschiedene Einsatzbereiche möglich. Zum einen der Energiehandel, welcher sich aus verschiedenen Märkten zusammensetzt, wobei der kurzfristige Handel am Intraday-Markt stattfindet. Dort kann in elektrische Energie in 15-Minuten-Einheiten gehandelt werden. Allerdings muss dies mit einer Vorlaufzeit von 30 Minuten geschehen. Dies bedeutet für das System einen Prognosezeitraum von mindestens 45 Minuten.

Da Wolkenkonstellationen häufig unbeständig sind, ihre Form ändern oder sich gar neu bilden oder auflösen, ist es in vielen Fällen nicht möglich, eine ausreichend genaue Prognose

se für einen derart langen Zeitraum zu erstellen. Darüber hinaus kann es, abhängig von der Windgeschwindigkeit, vorkommen, dass Wolken, die für die Prognose derartig langer Zeiträume relevant sind, noch nicht im Erfassungsbereich der Kamera liegen.

Der interessantere Einsatzbereich ist aber die Netzsteuerung. Hier werden Informationen über die zukünftigen Leistungserträge für kürzere Zeiträume benötigt. Dort sind Prognosen für Zeiträume von maximal 5 Minuten ausreichend. Besonders innerhalb der Smart-Grid-Technologie sind diese Informationen unerlässlich, um ein stabiles und zuverlässiges Netz bereitzustellen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und der Aufbau eines kostengünstigen, kamera-basierten Systems zur Prognostizierung von Leistungserträgen der Photovoltaik-Anlage des Energie Campus Bergedorf CC4E. Dabei sollen die Positionen und Bewegungen der einzelnen Wolken am Himmel analysiert werden und daraus deren voraussichtliche Bewegungen abgeleitet und bewertet werden. Mit den daraus gewonnenen Informationen soll das System in der Lage sein, die, auf die Photovoltaik-Anlage treffende, Solarstrahlung und die damit verbundenen Leistungserträge vorherzusagen. Es soll dabei untersucht werden, unter welchen Bedingungen es möglich ist, eine zuverlässige Prognose über, die für den Energiehandel notwendigen, 45 Minuten zu erstellen.

Um diese Aufgabe zu erfüllen, muss das System dazu in der Lage sein, die Wolken am Himmel zuverlässig zu segmentieren. Darüber hinaus ist es notwendig, die Bewegungen der Wolken aufzuzeichnen und daraus Bewegungsvektoren zu erzeugen, die Auskunft darüber geben, in welche Richtung die Wolken sich bewegen werden. Um die Bewegungen der Wolken in Relation zur Sonne betrachten zu können, wird auch die Position der Sonne benötigt. Zur Bewältigung dieser Aufgabe müssen sowohl verschiedene Verfahren zur Wolken-Segmentierung und als auch zur Bewegungsanalyse betrachtet und verglichen werden. Des Weiteren muss untersucht werden, in welchem Maße die Wolken die globale Solarstrahlung beeinflussen.

Da das System im Freien zum Einsatz kommt, gibt es neben den funktionalen Anforderungen auch mechanische Anforderungen an den Aufbau. So darf es zum Beispiel durch Witterungseinflüsse, wie Regen oder starke Sonneneinstrahlung, nicht zu einem Ausfall der elektronischen Komponenten kommen.

1.3 Vorstellung des Energie Campus Bergedorf CC4E

Das CC4E stellt den Mittelpunkt des Energie-Campus in Bergedorf dar. Es beinhaltet ein Windlabor und ein Smart-Grid-Labor, in denen Studierende und Wissenschaftler gemeinsame Forschung an den Erneuerbaren Energien betreiben. Dazu besitzt das CC4E eine Photovoltaik-Anlage und verfügt außerdem über einen eigenen Windpark in der direkten Umgebung. Das Windlabor und der Windpark ermöglichen die Erprobung neuer Technologien im Bereich der Windenergie und bietet beispielsweise die Möglichkeit neue Werkstoffe im Modelleinsatz zu testen.

Das Smart-Grid-Labor untersucht das Zusammenspiel von Erzeugern und Verbrauchern innerhalb eines Netzes. Durch den wachsenden Anteil der erneuerbaren Energien, steigt die Komplexität der Netze und intelligente Netz-Steuerungen gewinnen stetig an Bedeutung. Um solche intelligente Netze zu untersuchen, beinhaltet das CC4E alle dafür relevanten Elemente und stellt somit ein Smart-Grid in kleinem Umfang dar.

Neben der Forschung zur Verbesserung der erneuerbaren Energien, finden im CC4E auch Untersuchungen statt, die das Ziel haben die Akzeptanz der Bürger gegenüber erneuerbaren Energien zu steigern.

2 Stand der Technik

2.1 Bewegungserkennung

Die Bewegungserkennung ist eine der bedeutendsten Techniken der Bildverarbeitung. Sie dient in vielen Anwendungen an Grundlage. Zum Beispiel:

- Verkehrsanalyse, mittels Verkehrskameras
- Sicherheitsanwendungen
- Eye-Tracking (Analyse von Blickbewegungen)

Die Bewegungserkennung beschreibt den Prozess, die physikalische Position eines Objektes in Relation zur Kamera zu beobachten und deren Veränderungen wahrzunehmen und zu analysieren.

Die Kamera nimmt dazu Bilder in bestimmten, meist äquidistanten Zeitabständen ΔT auf. Die Aufnahmefrequenz, auch „Framerate“ f_{ps} genannt, ist definiert als:

$$f_{ps} = \frac{1}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Je nach Anwendung und Umwelteinflüssen, wie z.B. die Helligkeit der Umgebung, muss die Framerate unterschiedlich hoch eingestellt werden. Bei einem Objekt, welches sich nur langsam bewegt, beispielsweise eine Wolke bei geringer Windgeschwindigkeit, kann es bei zu hohen Framesrates dazu kommen, dass kein Unterschied der Objektposition in zwei aufeinanderfolgenden Bildern zu erkennen ist.

In der heutigen Zeit arbeiten die Algorithmen zur Bewegungserkennung bzw. -analyse üblicherweise nach einem der drei folgenden Ansätze [Wil17, S. 10f].

2.1.1 Differenzbild

Durch die geringe Verarbeitungszeit des Differenzbild-Algorithmus, verglichen mit den anderen Verfahren, handelt es sich um ein äußerst schnelles und echtzeitfähiges Verfahren. Dabei wird für jeden Bildpunkt die absolute Differenz des aktuellen Bildes und eines zweiten, vorangegangenen Bildes berechnet.

$$D(x, y) = |I_k(x, y) - I_{k-N}(x, y)| \quad (2.2)$$

I_k stellt hierbei das aktuelle Bild dar, I_{k-N} das N -Aufnahmen zuvor aufgenommene Bild. D ist das aus der Berechnung resultierende Bild. Da auch die Werte der Hintergrundpixel, beispielsweise durch Helligkeitsveränderungen, gewissen Schwankungen unterliegen, nimmt $D(x, y)$ nur selten den Wert Null an. Um eine klare Trennung von Vorder- und Hintergrund zu gewährleisten, wird nach der Differenzbild-Operation noch eine Threshold-Operation (dt. Schwelle, Schwellwert) durchgeführt.

$$TH(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{falls } D(x, y) > S \\ 0 & \text{falls } D(x, y) < S \end{cases} \quad (2.3)$$

TH ist das aus der Threshold-Operation resultierende Bild. Der Schwellwert S muss je nach Anwendung definiert oder anhand eines automatischen Verfahrens berechnet werden (dynamischer Threshold).

Ein gängiger Ansatz ist das Arbeiten mit einem Referenz-Bild. Dabei wird ein Referenzbild I_1 von dem Hintergrund aufgenommen, vor dem die Bewegung stattfinden wird. Für jedes weitere aufgenommene Bild wird die Differenz zu diesem Referenzbild gebildet ($I_{k-N} = I_1$). Unter der Voraussetzung, dass das zu erkennende Objekt nicht die gleiche Farbe wie der Hintergrund hat, taucht das Objekt im Ganzen in dem Differenzbild auf. Der Nachteil dieses Ansatzes ist es, dass ein Referenzbild zur Verfügung stehen muss. Darüber hinaus können Veränderungen der Helligkeit zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Wenn das Hintergrundbild bei deutlich geringerer Helligkeit aufgenommen wird, als das Bild, in dem das Objekt erkannt werden soll, kann dies dazu führen, dass das gesamte Bild als Differenz zum Referenz-Bild erkannt wird.

Ein weiterer üblicher Ansatz ist die Nutzung des letzten vorangegangenen Bildes zur Differenzbildung, also $N = 1 \Rightarrow I_k = I_{k-1}$. Bei diesem Ansatz besteht die Gefahr, dass langsame oder zwischen den aufgenommenen Bildern stillstehende Objekte gar nicht oder nur teilweise erkannt werden. Das rührt daher, dass sämtliche Pixel, die ein einfarbiges Objekt repräsentieren, den gleichen Wert haben. Im Differenzbild zeigen sich somit keine oder nur geringe Differenzen. Diese können dann von der Threshold-Operation nicht als Teil des Objektes interpretiert werden.

Abbildung 2.1 zeigt ein Beispiel für die zwei beschriebenen Differenzbild-Verfahren. Es wurden drei Bilder aufgenommen. Zum einen ein Referenzbild des Hintergrundes und zwei weitere mit einem Objekt, in diesem Fall eine Hand, das sich vor diesem Hintergrund bewegt. Neben den Aufnahmen ist das jeweilige Differenzbild, gefolgt von einer Threshold-Operation, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in dem ersten Differenzbild die Hand erkannt wird, aber zusätzlich auch die von der Hand geworfenen Schatten. Im zweiten Differenzbild, welches den Ansatz verdeutlichen soll, bei dem die Differenz zu dem vorangegangenen Bild berechnet wird, ist zu erkennen, dass der Arm doppelt zu sehen ist. Es wird sowohl die Differenz an der Stelle, an der sich der Arm im vorherigen Bild befindet, als auch die, an der er sich im zweiten Bild befindet, sichtbar [Wil17, S. 10ff].

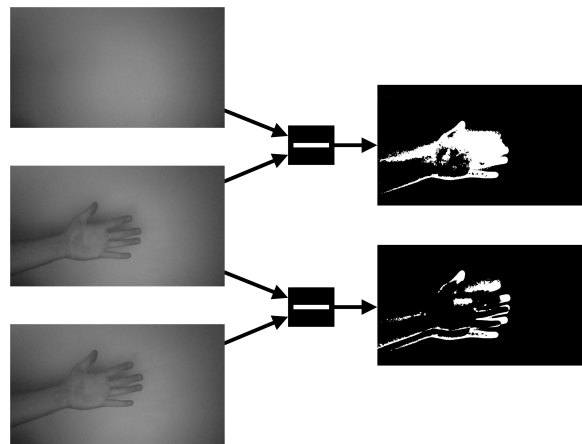


Abbildung 2.1: Vergleich zweier Differenzbild-Methoden

2.1.2 Background Subtraction

Bei dem „Background Subtraction“-Algorithmus handelt es sich um eine der wichtigsten Techniken zur Bewegungserkennung in der heutigen Zeit. Der Algorithmus erzeugt dabei ein „Hintergrund-Modell“. Mit der Differenz zwischen diesem Modell und dem aktuellen Bild können die Objekte im Vordergrund von denen im Hintergrund unterschieden werden.

Dieses Verfahren ist vergleichbar mit dem des Differenzbildes mit $I_{k-N} = I_1$. Der Unterschied besteht darin, dass das Referenz-Bild, mit dem das aktuelle Bild verglichen wird, auf komplexere Art gebildet wird. Wie beschrieben, muss bei diesem Differenzbild-Ansatz das Referenz-Bild des Hintergrundes vorliegen. Der „Background Subtraction“-Algorithmus erzeugt hingegen ein dynamisches Modell des Hintergrundes. Dabei können verschiedene Ansätze verfolgt werden.

Einer dieser Ansätze ist der **Median-Filter**, bei dem für jeden Bildpunkt $BGM(x, y)$ des Modells der Median über die Intensität des Bildpunktes $I(x, y)$ der N vergangenen Bilder genutzt wird.

$$BGM_N(x, y) = \text{Median}(I_k(x, y), I_{k-1}(x, y), I_{k-2}(x, y), \dots, I_{k-N}(x, y)) \quad (2.4)$$

Dieser Ansatz ist erfordert nur einen geringen Rechenaufwand, birgt aber auch gewisse Herausforderungen. So können beispielsweise Objekte, die sich langsam bewegen, zu Fehlern im Hintergrund-Modell führen. Um dies zu verhindern, muss ein geeigneter Wert für den Parameter N bestimmt werden.

Es existieren noch weitere Verfahren zur Bildung des Hintergrund-Modelle, auf die jedoch in diesem Kapitel nicht weiter eingegangen wird, da es nur dem Überblick über die möglichen Ansätze der Bewegungserkennung dient [Wil17].

2.1.3 Optical Flow

Der Optical Flow (dt. „Optischer Fluss“) ist eine weitverbreitete Technik zur Analyse von Bewegungen in der Bildverarbeitung. Der Ansatz bestimmt die Bewegung eines bestimmten Bildpunktes unter der Annahme, dass sich die Intensität, also der Grauwert $I(x, y)$, zwischen zwei Bildern nicht verändert. Dieser Ansatz wurde erstmals von Berthold K. P. Horn und Brian G. Schunk im Jahre 1980 vorgestellt [Wil17, S. 13].

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (2.5)$$

Das Ziel des Algorithmus ist dabei, einen Vektor $\mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ bestehend aus

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ \frac{\Delta y}{\Delta t} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

zu berechnen, der die Bewegung des entsprechenden Bildpunktes in x - und y -Richtung repräsentiert. Die im Folgenden dargestellte Berechnung bezieht sich auf die **Lucas-Kanade** Methode [Wil17, S. 14]. Hierbei handelt es sich die gängigste und genaueste Methode. Zusätzlich zu der Gleichung 2.5 gilt die Annahme, dass sich die benachbarten Bildpunkte in die gleiche Richtung bewegen, wie der betrachtete Bildpunkt (2.2 - B) und es nicht zu sich kreuzenden Bewegungsvektoren kommt (2.2 - A).

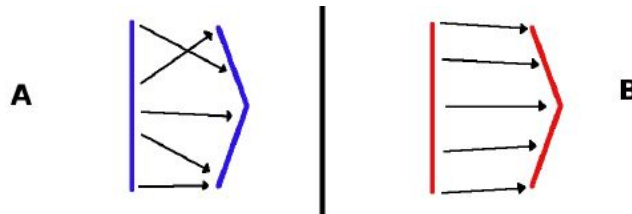


Abbildung 2.2: Bewegung benachbarter Bildpunkte [Mün05, S. 3]

Ausgehend von der Gleichung 2.5, mit einer Taylorentwicklung der rechten Seite, ergibt sich:

$$I(x, y, t) = I(x, y, t) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t \quad (2.7)$$

Diese Gleichung beschreibt, dass die Intensität des Bildpunktes im aktuelle Bild, dem im vorangegangenen Bild, zuzüglich der Änderung in x -Richtung, y -Richtung und der Zeit t , entspricht. Ersetzt man die Bewegungen in x -Richtung und y -Richtung durch die in dem

Vektor \mathbf{v} definierten Komponenten und dividiert die Gleichung durch Δt , ergibt sich:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\Delta y}{\Delta t} &= -\frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{\partial f}{\partial x} v_x + \frac{\partial f}{\partial y} v_y &= -\frac{\partial f}{\partial t}\end{aligned}\quad (2.8)$$

Hier zeigt sich, warum die zweite Forderung von großer Bedeutung ist. Die Gleichung 2.8 enthält zwei Unbekannte, v_x und v_y , und ist somit nicht lösbar. Setzt man nun voraus, dass die Bildpunkte $k_2 \dots k_n$ in der direkten Nachbarschaft zu dem betrachteten Bildpunkt k_1 die gleiche Bewegung vollziehen, ergibt sich:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial x}(k_1)v_x + \frac{\partial f}{\partial y}(k_1)v_y &= -\frac{\partial f}{\partial t}(k_1) \\ \frac{\partial f}{\partial x}(k_2)v_x + \frac{\partial f}{\partial y}(k_2)v_y &= -\frac{\partial f}{\partial t}(k_2) \\ \vdots &= \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x}(k_n)v_x + \frac{\partial f}{\partial y}(k_n)v_y &= -\frac{\partial f}{\partial t}(k_n)\end{aligned}\quad (2.9)$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x}(k_1) \\ \frac{\partial f}{\partial x}(k_2) \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x}(k_n) \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \mathbf{v} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{\partial f}{\partial t}(k_1) \\ -\frac{\partial f}{\partial t}(k_2) \\ \vdots \\ -\frac{\partial f}{\partial t}(k_n) \end{pmatrix}}_{\mathbf{b}}$$

Das so entstehende Gleichungssystem ermöglicht die Berechnung von \mathbf{v} [Wil17, S. 13ff]:

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (2.10)$$

Abbildung 2.3 zeigt den Bewegungsvektor für ein einfaches Beispiel:

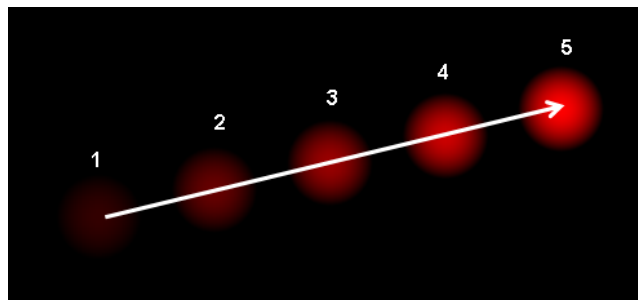


Abbildung 2.3: Darstellung Optical Flow [Hat17]

Ein Nachteil des Optical Flow Algorithmus besteht darin, dass er einen verhältnismäßig hohen Rechenaufwand bedeutet. Im Gegensatz zu den anderen Algorithmen bietet er allerdings den Vorteil, dass er direkt den Bewegungsvektor der einzelnen Bildpunkte berechnet. Die anderen beschriebenen Algorithmen zeigen nur an, dass eine Bewegung stattgefunden hat, nicht aber deren Richtung. Wenn die Bewegungsrichtung bzw. -geschwindigkeit für die Auswertung von Bedeutung ist, stellt der Optical Flow somit einen interessanten Ansatz dar.

2.2 Vorhersageverfahren

2.2.1 Zeitreihenverfahren

Das Zeitreihenverfahren beschreibt ein Verfahren der Leistungsprognose, basierend auf den historischen Daten über die erzeugte Leistung oder der zugrundeliegenden physikalischen Größe (Wind, Solarstrahlung). Dieser Ansatz ist, verglichen mit anderen Ansätzen der Leistungsprognose, mit wenig Aufwand umsetzbar. Es muss im Allgemeinen nur darauf geachtet werden, wie viele der historischen Daten für die Prognose genutzt werden. Zu weit in der Vergangenheit liegende Daten können die Prognose verfälschen.

Würde dieses Verfahren zum Beispiel für eine Photovoltaik-Anlage genutzt werden, wären zur Mittagszeit die historischen Daten vom Vormittag, an dem die Solarstrahlung auf Grund der Sonnenposition deutlich geringer ist, ungeeignete Daten. Aus diesem Grund eignet sich das Zeitreihenverfahren auch nicht für die Photovoltaik-Technologie. Die Solarstrahlung, im Besonderen die Direktstrahlung, ist stark abhängig davon, ob die Sonne von Wolken verschattet wird. Wenn die Sonne zum Beispiel in einem gegebenen Zeitraum $[t_{-10min}, t]$ mehrfach von der Sonne verdeckt worden ist, aber in der näheren Zukunft keine Wolken mehr am Himmel sind, würde die Prognose für den Zeitraum $[t, t_{+10min}]$ voraussichtlich eine hohe Abweichung zu der tatsächlichen Leistung aufweisen [Gra14, S. 87ff.].

2.2.2 Fundamental-physikalische Verfahren

Bei fundamental-physikalischen Verfahren basieren die Prognosen auf numerischen Wettervorhersagen. Die Daten aus diesen Vorhersagen werden mit Hilfe von Standort- und Anlagendaten und der Leistungskennlinie zu einer Leistungsprognose verarbeitet [Gra14, S. 89].

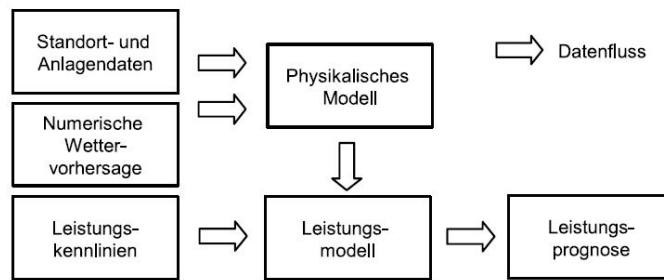


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines fundamentalen Verfahrens [Gra14, S. 89]

2.2.3 Statistische Verfahren mit numerischen Wettervorhersagen

Dieses Verfahren nutzt als Eingangsdaten historische Zeitreihen der Erzeugungsleistung, sowie meteorologische Daten aus numerischen Wettervorhersagen. Es wird also nicht wie bei dem fundamental-physikalischen Verfahren mit Anlagen- oder Standortdaten gearbeitet. Aus den Eingangsdaten erzeugt das statistische Verfahren direkt eine Prognose [Gra14, S. 91].

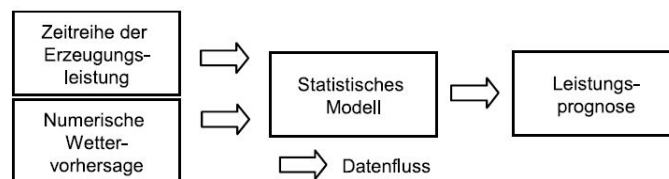


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines fundamentalen Verfahrens [Gra14, S. 92]

2.2.4 Verfahren für Solarenergie

Es existieren verschiedene Verfahren für die Vorhersage von Leistungserträgen aus Photovoltaik-Anlagen. Die Wahl des Verfahrens ist in erster Linie davon abhängig, wie lang der Prognosezeitraum sein soll. Dieser kann von wenigen Sekunden oder Minuten (Intra-Hour) bis hin zu mehreren Stunden (Intra-Day) gewählt werden. Für Prognosen über mehrere Stunden sind die Betreiber auf numerische Wettervorhersagen angewiesen. Für sehr kurze Prognosezeiträume kommen Systeme in Form von Sky-Imagern, wie das in dieser Arbeit entwickelte System, zum Einsatz.

2.2.4.1 Sky-Imager der Firma Yankee Environmental Systems

Bei den so genannten „Total Sky Imager“ der Firma Yankee Environmental Systems (kurz: Y.E.S.) handelt es sich um das einzige kommerzielle Produkt. Bei dieses System wird ein Kugelspiegel genutzt, um den Himmel auf eine nach unten gerichtete Kamera zu projizieren. Um die Kamera vor der direkten Strahlung der Sonne zu schützen, ist auf dem Kugelspiegel ein nicht-reflektierendes Schutzband befestigt, das etwa 14% des Bildes verdeckt, wodurch Teile des Bildes nicht für die Prognoseberechnung benutzt werden können [Sys17b] [Kle13, Kap. 9].



Abbildung 2.6: Total Sky Imager [Con11]

2.2.4.2 Fischaugenkamera

Die französischen Entwickler Charlotte Gauchet, Philippe Blanc und Bella Espinar, haben ein System entwickelt, das mit einer Kamera mit Fischaugen-Objektiv arbeitet. In den aufgenommenen Bildern werden die einzelnen Bildpunkte in verschiedene Klassen unterteilt und ihnen wird eine Wertigkeit auf Grundlage ihrer Position zugeordnet [GBE12]. Dabei existieren folgende Klassen:

Mit Hilfe der Wertigkeiten, der Einteilung in die verschiedenen Klassen $C_1 - C_5$ und der horizontalen Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel, werden die verschiedenen Strahlungsanteile berechnet.

Tabelle 2.1: Verschiedene Klassen zur Einteilung der Bildpunkte $C_1 - C_5$ [GBE12]

Klasse	Beschreibung
C_1	klarer blauer Himmel
C_2	helle Wolken
C_3	dunkle Wolken
C_4	freie Fläche innerhalb der Sonnen-Scheibe
C_5	freie Fläche innerhalb der vergrößerten Sonnen-Scheibe

Der Vergleich von vorhergesagten und tatsächlichen Strahlungswerten für die Globalstrahlung, Direktstrahlung und Diffusstrahlung, bei einem Vorhersage-Zeitraum von etwa 5 Minuten, zeigt, dass die Vorhersagen durchaus zutreffend sind. Zu vereinzelt Zeitpunkten kommt es jedoch bei diesem System zu Abweichung von über $500 \frac{W}{m^2}$ [GBE12, Abbildung 5, S. 3].

2.3 Bestimmung der Sonnenposition und Solarstrahlung

2.3.1 Sonne

Bei der Sonne handelt es sich nicht nur um das größte Objekt unseres Sonnensystems (etwa der 109-fache Durchmesser der Erde [Qua13]), sondern auch um den Zentralstern. Die übrigen Planeten des Sonnensystems bewegen sich, aufgrund der zwischen ihnen und der Sonne bestehenden Gravitationskraft, in elliptischen Bahnen um sie herum. Da die Sonne überwiegend aus Wasserstoff und zu großen Teilen aus Helium besteht, kommt es zu einem Kernfusionsprozess. Durch die auf der Sonnenoberfläche stattfindenden Kernfusionsprozesse, sendet die Sonne Strahlung aus und entwickelt dabei eine Oberflächentemperatur von 5777 Kelvin [Qua13], was etwa 5503°C entspricht.

Für die auf die Erde treffende Strahlung der Sonne ergibt sich eine mittlere extraterrestrische¹ Bestrahlungsstärke von $E_0 = 1368 \frac{W}{m^2}$. Diese Bestrahlungsstärke E_0 wird als Solar-konstante bezeichnet [EFK⁺07].

¹extraterrestrisch: außerhalb der Erde inkl. ihrer Atmosphäre am äußeren Rad der Erdatmosphäre

2.3.1.1 Spektrum des Sonnenlichts

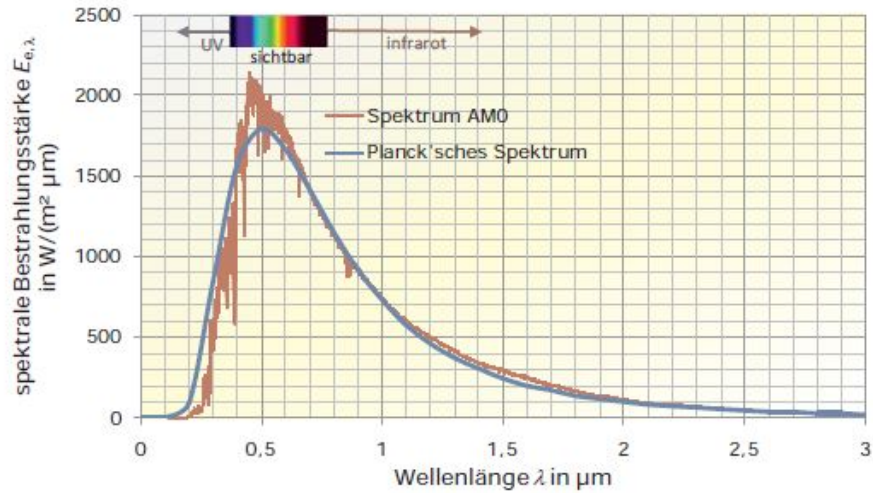


Abbildung 2.7: Spektren des Sonnenlichtes. [Qua13]

Die Strahlung der Sonne setzt sich aus verschiedenen Wellenlängen λ zusammen. Dazu gehören die kurzwellige ultraviolette, die sichtbare und die längerwellige infrarote Strahlung. Der sichtbare Anteil der Strahlung teilt sich dabei in mehrere Abschnitte, die vom Menschen als Farbe wahrgenommen werden. In der Tabelle 2.2 sind die den verschiedenen Farbtönen, sowie der ultravioletten und infraroten Strahlung, entsprechenden Wellenlängen aufgetragen.

Tabelle 2.2: Wellenlängen und die dazugehörigen Farbtöne [Qua13]

Farbton	Wellenlänge [nm]	Farbton	Wellenlänge [nm]
Ultraviolett	< 380	Gelbgrün	560 ... 570
Purpurbau (Violett)	380 ... 450	Grünlichgelb	570 ... 575
Blau	450 ... 482	Gelb	575 ... 580
Grünlichblau	482 ... 487	Gelblichorange	580 ... 585
Cyan (Blaugrün)	487 ... 492	Orange	585 ... 595
Bläulichgrün	492 ... 497	Rötlichorange	595 ... 620
Grün	497 ... 530	Rot	620 ... 780
Gelblichgrün	530 ... 560	Infrarot	> 780

2.3.1.2 Strahlung auf der Erde

Da die Strahlung der Sonne, abhängig von der Position der Erde in Relation zur Sonne und dem Ort auf der Erde an dem die Strahlung gemessen wird, verschiedenen lange Wege durch die Erdatmosphäre zurücklegen muss, ergeben sich für die Strahlung auf der Erdoberfläche geringere Werte, als für die extraterrestrische Bestrahlungsstärke.

Dabei kann zwischen verschiedenen Gründen für die Reduktion der Strahlungsstärke auf dem Weg durch die Atmosphäre unterschieden werden:

- Reflexion der Atmosphäre
- Absorption der Atmosphäre
- Rayleigh-Streuung
- Mie-Streuung

Diese Reduktionen sind im Allgemeinen von dem Einstrahlungswinkel und somit von dem Höhenwinkel der Sonne γ_s abhängig. Der AM-Wert (Air Mass) ist definiert als $AM = \frac{1}{\sin \gamma_s}$ und beschreibt, wie oft der Weg der Sonnenstrahlung dem kürzesten Weg durch die Atmosphäre entspricht. [Qua13, S. 61]

Durch die Atmosphäre und die Wolken am Himmel kommt es dazu, dass nicht nur direkte Solarstrahlung auf die Erde trifft, sondern auch diffuse Solarstrahlung. Die diffuse Strahlung entsteht durch die Reflexion an Partikeln und Wolken in der Atmosphäre. Die Zusammensetzung der Globalstrahlung E_{global} aus direkter und diffuser Solarstrahlung ist über den Zusammenhang

$$E_{global} = E_{direkt} + E_{diffus} \quad (2.11)$$

definiert.

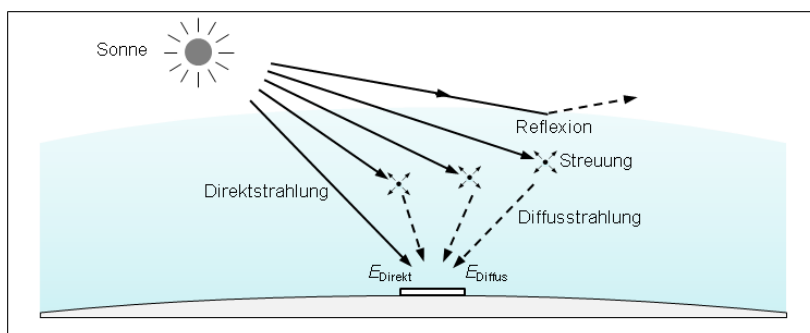


Abbildung 2.8: Diffuse und direkte Solarstrahlung [Mer11]

2.3.2 Berechnung der Sonnenposition

Mit Hilfe der entsprechenden Daten, lässt sich die Position zu einer bestimmten Zeit und an einem bestimmten Datum berechnen. Dabei werden nur die folgenden Daten benötigt.

- Längen- und Breitengrad des Kamerastandortes
- Tag des Jahres (als Zahl von 1-365 bzw. 366)
- Anzahl der Tage im Jahr
- Lokale Uhrzeit
- Zeitzone des Kamerastandortes

Um die Position zu beschreiben, werden zwei Winkel definiert:

- Der Höhenwinkel der Sonne γ_s
- Der Sonnenazimut α_s

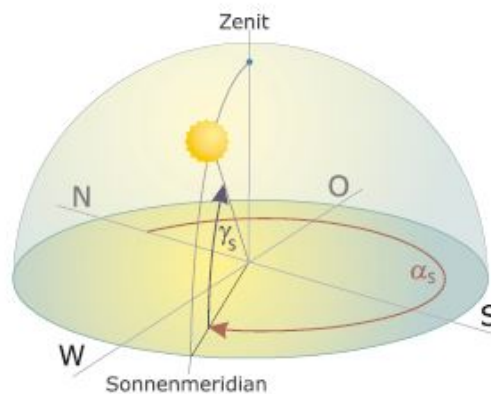


Abbildung 2.9: Winkelbezeichnungen des Sonnenstandes. [Qua13]

Der Höhenwinkel der Sonne γ_s wird dabei vom Horizont (0°) positiv zum Zenit (90°) gezählt. Der Sonnenazimut wird von Norden (0°) positiv in Richtung Osten (45°) gezählt.

2.3.3 Berechnung der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel

Die Bestrahlungsstärke auf einer horizontalen Fläche, bei klarem Himmel $E_{dir,hor}$, kann mit Hilfe gegebener Parameter berechnet werden [SG00, S. 37ff]:

$$E_{dir,hor} = E_0 \cdot \epsilon \cdot e^{-0,8662 T_{LK} m \delta_r(m)} \cdot \sin \gamma_s \quad [B_c] = \frac{W}{m^2}$$

mit E_0 : Solarkonstante

ϵ : Korrekturfaktor für mittlere Sonnenentfernung (2.12)

T_{LK} : Trübungsfaktor

m : optische Dichte der Luftmasse

$\delta_r(m)$: Rayleigh optische Dichte

Für die optische Dichte der Luftmasse m gilt:

$$m = \frac{\frac{p}{p_0}}{\sin \gamma_s + 0.50572(\gamma_s + 6.07995^\circ)^{-1.6364}} \quad (2.13)$$

mit $\frac{p}{p_0}$: Druckausgleichsfaktor für Stationshöhe

mit der Näherung:

$$\frac{p}{p_0} = e^{\frac{-z}{H_R}} \quad (2.14)$$

mit z : Stationshöhe über dem Meeresspiegel

H_R : 8400 m

Für die Rayleigh optische Dichte gilt:

$$\frac{1}{\delta_r(m)} = \begin{cases} 6.6296 + 1.7513m - 0.1202m^2 \\ \quad + 0.0065m^3 - 0.00013m^4 & \text{falls } m \leq 20 \\ 10.4 + 0.718m & \text{falls } m > 20 \end{cases} \quad (2.15)$$

Sind die Neigung und Ausrichtung der Fläche bekannt, kann aus der der Bestrahlungsstärke auf die horizontale Fläche, die auf die geneigte Fläche berechnet werden. Dafür muss der Einfallswinkel Θ_{gen} bestimmt werden. Für die Berechnung werden der Ausrichtungswinkel α_E und der Neigungswinkel γ_E der Fläche folgendermaßen definiert [SG00, S.34ff].

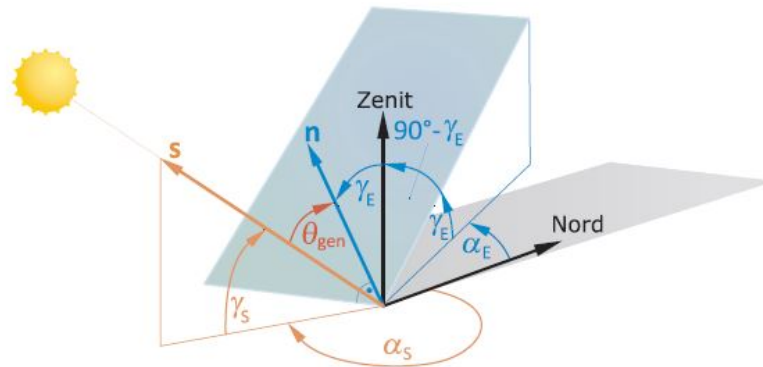


Abbildung 2.10: Definition von Ausrichtungswinkel und Neigungswinkel [Qua13, S. 71]

Mit den so definierten Winkeln gilt für den Einfallswinkel:

$$\Theta_{gen} = \arccos(\cos \gamma_s \sin \gamma_E \cos(\alpha_s - \alpha_E) + \sin \gamma_s \cos \gamma_E) \quad (2.16)$$

Für die direkte Strahlung $E_{dir,gen}$ und die diffuse Strahlung $E_{diff,gen}$ gilt dann:

$$\begin{aligned} E_{dir,gen} &= E_{dir,hor} \cdot \frac{\cos \Theta_{gen}}{\sin \gamma_s} \\ E_{diff,gen} &= E_{diff,hor} \cdot \frac{1}{2}(1 + \cos \gamma_E) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Um die aktuell gemessene Bestrahlungsstärke $E_{G,horr}$ in die diffusen und direkten Anteile aufzuteilen, gilt [Qua13, S. 67f]:

$$\frac{E_{diff,gen}}{E_{G,horr}} = \begin{cases} (1,020 - 0,254 \cdot k_T + 0,0123 \cdot \sin \gamma_s) & \text{für } k_T \leq 0,3 \\ (1,400 - 1,749 \cdot k_T + 0,177 \cdot \sin \gamma_s) & \text{für } 0,3 \leq k_T < 0,78 \\ (0,486 \cdot k_T - 0,182 \cdot \sin \gamma_s) & \text{für } k_T \geq 0,78 \end{cases} \quad (2.18)$$

Mit:

$$k_T = \frac{E_{G,horr}}{E_0 \cdot \sin(\gamma_s)} \quad (2.19)$$

2.3.4 Scheinbarer Durchmesser der Sonne

Der scheinbare Radius der Sonne R'_S beträgt [EFK+07]:

$$R'_S = 16'22'' = 0,267^\circ \quad (2.20)$$

2.4 Entfernen von Verzerrungen aus Kamerabildern

Ein Punkt in einem Verzerrten Bild kann mithilfe einer Koordinatentransformation in einen unverzerrten Punkt umgerechnet werden [Lan16].

$$p^{\text{verzerrt}} \mapsto p^{\text{unverzerrt}} \quad (2.21)$$

Seien x' und y' die Koordinaten des verzerrten Punktes p^{verzerrt} bezogen auf den Mittelpunkt M mit den Koordinaten $M = (a, a)$.

$$\begin{aligned} x' &= x - a \\ y' &= y - a \end{aligned} \quad (2.22)$$

Diese werden im nächsten Schritt in Hemisphärenkoordinaten umgerechnet:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(x')^2 + (y')^2} \\ \alpha &= \arctan 2(x', y') \\ \epsilon &= 90^\circ \left(1 - \frac{r}{a}\right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Aus den Hemisphärenkoordinaten können die Polarkoordinaten bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} &= \alpha \\ \hat{r} &= H \cdot \tan(90^\circ - \epsilon) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Mithilfe der Polarkoordinaten ergeben sich die unverzerrten Bildkoordinaten zu:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \hat{r} \sin \hat{\alpha} \\ \hat{y} &= \hat{r} \cos \hat{\alpha} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Mit der inversen Funktion kann ein unverzerrter Punkt in einen verzerrten zurücktransformiert werden.

$$p^{\text{unverzerrt}} \mapsto p^{\text{verzerrt}} \quad (2.26)$$

3 Anforderungen

Um die möglichen Ansätze zu vergleichen und die Entwicklung zielgerichtet durchführen zu können, befasst sich dieses Kapitel mit den Anforderungen und Auflagen, die durch das endgültige System erfüllt werden sollen. Dies umfasst sowohl die grundsätzliche Funktionsweise des Systems, als auch die gesonderten Anforderungen, die beispielsweise durch den Aufstellort, die Umgebungsbedingungen und die gewünschte Zuverlässigkeit des Systems bestehen.

Die Aufgabe besteht darin ein witterungsbeständiges Embedded-Vision-System aufzubauen, das dazu dient die Wolkenbewegungen am Himmel zu beobachten und vorherzusagen. Es schätzt dabei ab in welchem Maße es während des Prognosezeitraumes zu einer Verschattung der Sonne kommt und wie sich die Bestrahlung und der damit verbundene Leistungsertrag der Photovoltaik-Anlage dadurch verändern. Dazu muss das System die Wolken zuverlässig vom Himmel trennen können und die Bewegung der einzelnen Wolken aufzeichnen, um daraus die zukünftige Bewegung abzuleiten. Darüber hinaus ist es notwendig die Position der Sonne zu bestimmen und im Falle einer Verdeckung die Veränderung der Bestrahlungsstärke zu beurteilen. Dazu wird das System in unterschiedliche Module aufgeteilt. Die Kamera wird auf dem Dach des Energie Campus Bergedorf CC4E montiert. Dadurch entsteht zum einen die Herausforderung der Befestigung der Kamera, da auf dem Dach keine Befestigungsvorrichtung vorhanden ist. Zum anderen ergeben sich durch den Aufbau des Daches und die umliegenden Gebäude Einschränkungen der Sichtverhältnisse. Je nach Größe des Blickfeldes kann es dazu kommen, dass sich der erhöhte Teil des Daches oder ein Nachbargebäude im Blickfeld der Kamera befindet. Himmelwärts existieren keine Hindernisse, die die Prognosen stören können.

3.1 Hardware

3.1.1 Bildverarbeitungsrechner

Da es sich bei dem System um ein Embedded-System handelt, wird ein Verarbeitungsrechner benötigt. Da das System dabei möglichst geringe Abmessungen haben soll, muss untersucht werden, welche Hardware dafür infrage kommt. Dabei sind neben den Abmessungen auch die Kosten und die Rechenleistung zu betrachten.

3.1.2 Kamera und Objektiv

Die Kamera und das Objektiv haben die Aufgabe die Realität in digitale Informationen umzusetzen, damit diese von der Bildverarbeitungssoftware analysiert werden können. Um diese Aufgabe zu erfüllen, ergeben sich für die Kamera unterschiedliche Anforderungen.

3.1.2.1 Abdeckung eines Blickwinkels von mindestens $\frac{1}{2}\pi$

Damit sichergestellt ist, dass ein ausreichender Teil des Himmels für die Prognosen betrachtet werden kann, wird der minimale Blickwinkel der Kamera auf $\frac{1}{2}\pi$ festgelegt.

Da die Kamera orthogonal zum Boden montiert werden muss, bedeutet einen Azimutwinkel von $\alpha_K > 360^\circ$ und einen Zenitwinkel von $\psi_K > 45$

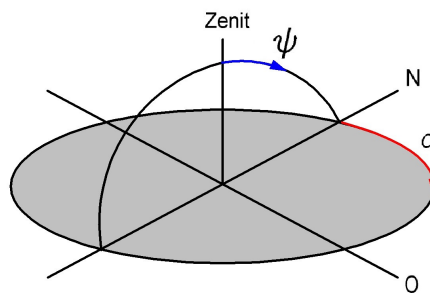


Abbildung 3.1: Winkeldefinitionen

Im Zusammenhang mit der Winkelabdeckung muss auch die Pixelanzahl betrachtet werden, da sichergestellt sein muss, dass die Sonne auf ausreichend viele Pixel projiziert wird.

3.1.2.2 Schutz des Kamerasensors vor direkter Sonneneinstrahlung

Da Videokameras nicht über eine Blende verfügen, wie es beispielsweise bei einer Fotokamera der Fall ist, ist der Kamerasensor dauerhaft der direkten Solarstrahlung ausgesetzt. Diese ständige Bestrahlung kann, wenn keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen eingeführt werden, zu einer Beschädigung des Kamerasensors führen.

Die Solarstrahlung beinhaltet neben dem sichtbaren Spektrum auch, Infrarot- und UV-Strahlung. Diese ist zwar für das menschliche Auge unsichtbar, wird aber von der Kamera aufgenommen, sofern keine Filter vorhanden sind. Eben diese Strahlung kann zu einer Erhitzung und Beschädigung des Sensors führen. Der Kamerasensor muss davor durch geeignete Filter geschützt werden.

3.1.3 Versorgung

Das System muss sowohl mit der Stromversorgung, also auch mit der informationstechnischen Infrastruktur des Energie Campus Bergedorf CC4E verbunden werden. Dabei müssen die folgenden Punkte betrachtet werden:

- den Schutz der Versorgung vor Witterung,
- der Aufwand bei der Verlegung von Leitungen.

3.1.4 Gehäuse

3.1.4.1 Schutz vor Witterungseinflüssen

Da das System im freien zum Einsatz kommt, muss es gegen Witterungseinflüsse geschützt sein. Dabei stellen Feuchtigkeit und die direkte Einstrahlung der Sonne ein Risiko für die Bauelemente dar. Es muss also sichergestellt werden, dass keine Feuchtigkeit an die elektronischen Komponenten des Systems gelangt.

Allerdings muss neben den Witterungseinflüssen in Form von Feuchtigkeit auch der Einfluss der Sonne auf das Gehäuse des Systems betrachtet werden. Jedes elektronische Gerät hat bestimmte Temperaturgrenzen, in denen es betrieben werden kann, ohne Schaden zu nehmen. Insbesondere in feuchtigkeitsgeschützten Systemen, kann es zu einem Wärmestau kommen, die die Elektronik beschädigen kann. Um dies zu erfüllen, ist das Gehäusematerial von großer Bedeutung. Das Gehäuse muss zum einen der Witterung standhalten, zum anderen in der Lage dazu sein einen Wärmestau zu verhindern. Dabei sind die folgenden Eigenschaften zu betrachten:

- Wärmeleitfähigkeit λ des Materials,
- Witterungsbeständigkeit,
- Dichte bzw. Gewicht,
- Bearbeitbarkeit,
- Kosten,
- Verfügbarkeit.

Für das Material des Gehäuseteils, das die Kamera und das Objektiv schützt, gilt zusätzlich zu dem Genannten, dass es über gute optische Eigenschaften verfügen muss, um die Aufnahmequalität der Kamera nicht zu beeinflussen.

3.2 Software

3.2.1 Programmiersprache und Bildverarbeitungsbibliothek

Neben der Funktion der Software muss entschieden werden, in welcher Programmiersprache die Software implementiert wird. Von Bedeutung ist dabei, dass die Programmiersprache auf der Hardware unterstützt wird und mit einer Bildverarbeitungsbibliothek kompatibel ist, die den Zugriff auf die Kamera unterstützt.

3.2.2 Verzeichnungen

Viele Objektiv, insbesondere Weitwinkelobjektive, erzeugen Verzeichnungen [DK17, S. 76]. Meist handelt es sich dabei um tonnenförmige Verzeichnungen. Es muss beurteilt werden, in welchem Umfang Verzeichnungen entstehen und ob die Kamerabilder von diesen bereinigt werden müssen, um korrekte Bewegungsdaten zu ermitteln.

Ist es der Fall, dass eine Entzerrung notwendig ist, müssen verschiedene Verfahren anhand ihres Einflusses auf die Informationen im Bild und ihres Umsetzungsaufwandes beurteilt werden.

3.2.3 Position der Sonne

Um beurteilen zu können, ob es innerhalb des Prognosezeitraumes zu einer Verdeckung der Sonne kommt, muss das System die Position der Sonne bestimmen können. Diese Bestimmung muss sowohl bei klarem, teilweise bedecktem und bei vollständig bedecktem Himmel zuverlässig und genau arbeiten. Die Positionsbestimmung soll beispielsweise nicht durch Wolken beeinflusst werden, die durch die Sonne angestrahlt werden.

3.2.4 Segmentierung von Wolken und Himmel

Um die Wolkenposition und Geschwindigkeit bestimmen zu können, müssen die Wolken und der Himmel voneinander segmentiert werden. Dabei muss der Algorithmus die einzelnen Bildpunkte, die zu einer Wolke gehören, zu einer Kontur zusammenfassen. Hindernisse oder die Sonne sollen dabei nicht als Wolken erkannt werden. Darüber hinaus soll die Festlegung der benötigten Schwellwerte nicht mit zu viel Aufwand verbunden sein.

3.2.5 Prognose der Bestrahlungsstärke

Die Prognose der zukünftigen Bestrahlungsstärke ist die zentrale Anforderung an das System. Aus den ermittelten Daten über die Position, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung der einzelnen Wolkenkonstellationen muss eine Prognose erstellt werden, die besagt, wann und in welchem Maße sich die Globalstrahlung an dem Standort der Kamera, und damit dem Standort der Photovoltaikanlage, innerhalb der nächsten Minuten verändert. Es sollen dabei Prognosezeiträume von bis zu 45 Minuten untersucht und die dafür nötigen Bedingungen ermittelt werden. Anhand der prognostizierten Bestrahlungsstärke soll im Anschluss die voraussichtliche Leistung der Photovoltaik-Anlage berechnet werden.

Das Verfahren soll dabei nicht zu großen Rechenaufwand und Implementierungsaufwand bedeuten und trotzdem eine zuverlässige und widerstandsfähige Analyse gewährleisten, sowohl bei Belichtungsänderungen durch die Verschattung der Sonne, als auch bei klarem oder vollständig bedecktem Himmel.

3.3 Zusammenfassung der Anforderungen

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der Anforderungen

Hardware	Anforderung
Bildverarbeitungsrechner (BV)	
<i>Ausreichende Rechenleistung</i>	
<i>Abmessung</i>	
<i>Kosten</i>	$\leq 50 \text{ €}$
Kamera und Objektiv	
<i>Winkelabdeckung</i>	$\psi_K > 45^\circ$
<i>Projektion der Sonne auf ausreichend viele Pixel</i>	$\alpha_K = 360^\circ$
<i>Framerate</i>	$\geq 4 \text{ px/l}$
<i>Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung</i>	$f_{ps} \geq \frac{1}{10}$
<i>Aufwand Montage / Ausrichtung</i>	
<i>Zusätzlich notwendige Operationen</i>	
Versorgung	
<i>Schutz der Versorgung vor Witterung</i>	$\geq IP_{x7}$
<i>Aufwand bei der Verlegung von Leitungen</i>	

Gehäuse	Anforderung
<i>Wärmeleitfähigkeit λ</i> <i>Witterungsbeständigkeit</i> <i>Dichte/Gewicht</i> <i>Bearbeitbarkeit</i> <i>Kosten</i> <i>Verfügbarkeit</i> <i>Optische Eigenschaften der Objektiv-Abdeckung</i>	$\leq 100 \text{ €}$
Software	
<i>Vom BV unterstützte Programmiersprache</i> <i>Bildverarbeitungsbibliothek</i>	
Bereinigung von Verzeichnungen	
<i>Einfluss auf die Informationen im Bild</i> <i>Aufwand bei Umsetzung</i>	
Positionsbestimmung der Sonne	
<i>Genauigkeit</i> <i>Zuverlässigkeit</i>	
Segmentierung von Wolken und Himmel	
<i>Einfache Festlegung des Schwellwertes</i> <i>Zuverlässigkeit</i> <i>Keine Fehlerkennung</i>	
Prognose der Bestrahlungsstärke	
<i>Rechenaufwand des Verfahrens</i> <i>Verarbeitung von bei klarem oder vollständig bedecktem Himmel</i> <i>Widerstandsfähigkeit gegen Belichtungsänderungen</i> <i>Implementierungsaufwand</i> <i>Genauigkeit der Bewegungsanalyse</i> <i>Möglicher Prognosezeitraum</i>	2 – 45 min

4 Konzeption

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Konzeption des Kamerasystems. Dazu werden verschiedene Konzepte vor dem Hintergrund der Anforderungen miteinander verglichen und das am besten geeignete ausgewählt. Dies beinhaltet Konzepte für den Aufbau des Gehäuses und Konzepte für die Software, bestehend aus der Erkennung von Wolken, der Bewegungsanalyse, der Vorhersage der Bewegungen und den daraus zu berechnenden Prognosen. Es werden hierzu die Konzepte der verschiedenen Module betrachtet:

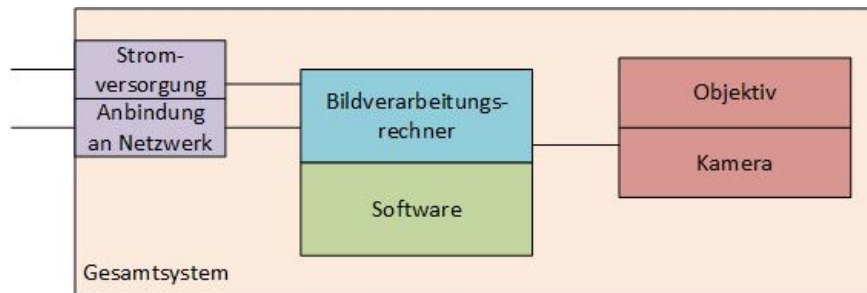


Abbildung 4.1: Systemarchitektur und Module

4.1 Hardware

4.1.1 Bildverarbeitungsrechner

Bei der Auswahl eines geeigneten Bildverarbeitungsrechners stehen die Abmessungen und die ausreichende Rechenleistung im Vordergrund, aber auch die Kosten sind von Bedeutung. In Absprache mit dem Energie Campus Bergedorf CC4E wird ein Raspberry Pi 3 verwendet. Dieser wurde vor Ort schon mehrfach für Projekte verwendet und bietet trotz geringer Größe ausreichend Rechenleistung.

Tabelle 4.1: Auswahl des Bildverarbeitungsrechners

Anforderung	Raspberry Pi 3
Ausreichende Rechenleistung	+
Abmessung	85,6 x 56,0 mm
Kosten	ca. 35 EUR

4.1.2 Kamera und Objektiv

Es gibt eine große Auswahl an Kameras, die für die Bildverarbeitung genutzt werden können. Diese unterscheiden sich in Sensortechnologie, Farbaufnahmetechnik und in ihrer Datenschnittstelle. Dieses Kapitel bietet einen Überblick über die verschiedenen Technologien.

4.1.2.1 Sensortechnologie

In der Bildverarbeitung kommen im Wesentlichen nur zwei Sensortypen zum Einsatz: CCD- (Charged-coupled-devices; dt.: ladungsgekoppeltes Bauteil) und CMOS- (complementary metal-oxide semiconductor; dt. sich ergänzender Metall-Oxid Halbleiter) Sensoren. . In der Anfangsphase kamen überwiegend Kameras mit CCD-Sensoren zum Einsatz, da diese eine höhere Auflösung und bessere Bildqualität liefern konnten. Der Vorteil der CMOS-Sensoren beschränkte sich zu dieser Zeit darauf, dass sie kostengünstiger hergestellt und vertrieben werden konnten. Aufgrund ihrer Architektur sind mit CMOS-Sensoren jedoch deutlich höhere Framerates möglich und durch Weiterentwicklungen, wie die Global-Shutter Technologie und eine Verbesserung der Empfindlichkeit, beispielsweise durch Mikrolinsenarrays, können sie inzwischen auch im Bereich der Bildqualität mit den CCD-Sensoren mithalten. Einen großen Vorteil bieten CMOS-Sensoren bei starkem Licht, da es hier nicht zu „Blooming“-Effekten kommt. Bei hohen Bestrahlungsstärken können innerhalb eines CCD-Sensors die Ladungen von dem Potentialtopf eines Pixels in die der danebenliegenden überfließen.



Abbildung 4.2: Blooming-Effekt [Hun06]

Bei einem CMOS-Sensor handelt es sich um ein Halbleiterelement zur Lichtmessung, das in der Regel mit einer Schaltung zum Verstärken ausgestattet ist. Diese Schaltung dient dazu, das Signal direkt auslesen zu können und der Sensor wird deshalb als „Active Pixel Sensor“ bezeichnet. Die Bauelemente der Verstärkerschaltung nehmen Platz um den Sensor ein, wodurch die lichtempfindliche Fläche vergleichsweise klein ist. Erst nachdem die Reduzierung dieser Fläche so weit vorangeschritten war, dass diese nur noch etwa 30 % der Fläche

des Sensors einnimmt, war es möglich den Sensor als gleichwertigen Bildsensor zu nutzen. Der lichtempfindliche Teil eines Pixels des CMOS-Sensors besteht aus einer Photodiode, deren Strom proportional zur Belichtung ist. Lichteinfall führt zu einem Absinken der Spannung über der Photodiode, die nach Ablauf der Belichtungszeit über die dahinter liegende Schaltung ausgelesen werden kann. Darüber hinaus beinhaltet die Schaltung einen Transistor, durch den die Spannung an der Photodiode am Anfang der Belichtungszeit auf einen definierten Wert zurückgesetzt werden kann.

Dadurch, dass der Sensor direkt und nicht über eine Weiterleitung durch andere Potentialtöpfe ausgelesen werden muss, ist bei starker Belichtung oder Lichtintensität kein Überfluten des Potentials in die nebenliegenden Potentialtöpfe möglich. Dadurch wird der „Blooming-Effekt“ verhindert [DK17, S. 41]. Aufgrund dieser Eigenschaft ist eine Kamera mit CMOS-Sensor besser für die Beobachtung des Himmels geeignet.

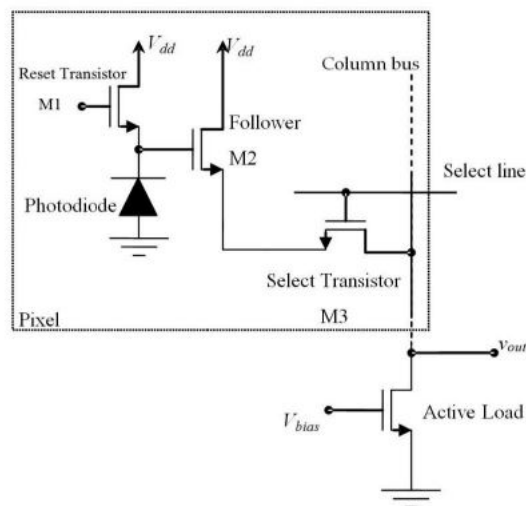


Abbildung 4.3: Aufbau der CMOS-Sensor-Schaltung [Yun12]

4.1.2.2 Farbaufnahme

Kameras, die nicht ab Werk mit speziellen Filtern ausgestattet sind, sind in der Lage dazu, auch Wellenlängen außerhalb des sichtbaren Spektrums aufzuzeichnen. Sie sind sowohl für kleinere Wellenlängen (UV-Strahlung), als auch größere Wellenlängen (Infrarote Strahlung) bis zu einer Wellenlänge von etwa 1100 nm empfindlich. Das für das menschliche Auge sichtbare Spektrum liegt in etwa zwischen 400 nm und 700 nm.

Spielen die Farben bei der Auswertung der Bilder eine Rolle, muss der gewählte Sensor in der Lage dazu sein, die unterschiedlichen Wellenlängen unterscheiden zu können.

Der Sensor nimmt dabei die Farben im RGB-Farbraum auf, wobei verschiedene Varianten existieren, durch die die verschiedenen Farben voneinander getrennt werden. Eine andere Variante, die Farben in der Auswertung zu berücksichtigen, ist der Einsatz eines Farbfilters, der das entsprechende Spektrum der Farbe von den übrigen selektiert [DK17, S. 47].

4.1.2.3 Objektive

Die Aufgabe eines Objektivs besteht darin, die realen Punkte der Objekte auf den Kamera-Sensor abzubilden. Somit handelt es sich bei der Projektion mittels Objektiv um eine Koordinatentransformation:

$$X_{real}, Y_{real}, Z_{real} \mapsto X_{Kamera}, Y_{Kamera} \quad (4.1)$$

Um diese Aufgabe zu erfüllen, bestehen Objektive, je nach Ausführung, aus einer oder mehreren Linsen. Je nach Anwendung können verschiedene Objektive zum Einsatz kommen. Grundsätzlich können Objektive in Normal-Objektive, Teleobjektive oder Weitwinkelobjektive eingeteilt werden. Bei Teleobjektiven handelt es sich um Objektive mit längerer Brennweite und kleinerem Blickwinkel im Vergleich zu Normal-Objektiven. Dadurch ist es möglich, Objekte in großer Entfernung zu betrachten. Dafür ist der Bereich, der mit einem Teleobjektiv betrachtet werden kann, verhältnismäßig klein. Das Gegenstück dazu stellt das Weitwinkelobjektiv dar. Weitwinkelobjektive verfügen über einen großen Blickwinkel, dafür jedoch nur über eine geringe Brennweite [DK17, S. 76].

In der Bildverarbeitung sind Objektive von großer Bedeutung, da sie die Aufgaben haben, alle relevanten Punkte der zu betrachtenden Objekte auf möglichst einen Sensor-Pixel zu projizieren, um diese in der Analyse der Bilder berücksichtigen zu können [DK17, S.70ff].

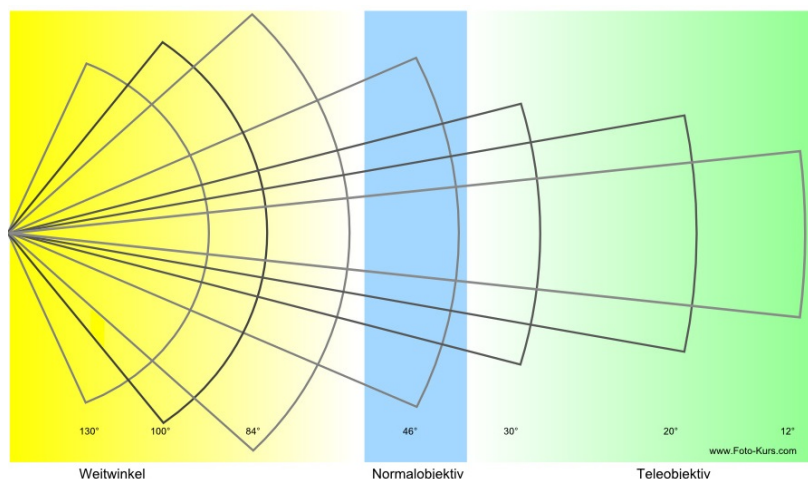


Abbildung 4.4: Vergleich der Blickwinkel verschiedener Objektive [Pra17]

Da, um möglichst viele Wolken am Himmel berücksichtigen zu können, der Blickwinkel von großer Bedeutung für das System ist, kommt nur ein Weitwinkelobjektiv oder die Nutzung mehrerer Kameras infrage.

4.1.2.4 Filter

Für Kameraanwendungen gibt es optische Filter in vielen Varianten. Je nach Anwendung können dabei verschiedene Modelle eingesetzt werden, um die gewünschten Effekte zu erreichen. Ein häufig schon ab Werk eingebauter Filter ist der Infrarot-Sperrfilter. Dieser Filter reflektiert die infrarote Strahlung, sodass diese nicht auf den Kamerasensor treffen kann. Die infrarote Strahlung geht zwar über das für den Menschen wahrnehmbare Spektrum, nicht aber über das des Kamerasensors, hinaus. Diese kann dazu führen, dass das Bild an Schärfe verliert und die Farbwiedergabe verfälscht wird, sodass diese nicht mehr dem des menschlichen Auges entspricht [DK17, S. 49].

Es gibt jedoch auch Kameras bzw. Objektive, die nicht mit einem Infrarot-Sperrfilter versehen sind. Zum Beispiel Überwachungskameras, die für Aufnahmen in unbeleuchteter Umgebung genutzt werden. Dort werden meist monochrome¹ Kameras in Kombination mit Infrarot-Scheinwerfern eingesetzt.

Eine weitere Variante von Filtern sind Farbfilter. Diese Filter sind nur für einen Teil des Lichtspektrums durchlässig, der eine bestimmte Farbe entspricht (Tabelle 2.2). Ebenso existieren auch Filter mit der gegensätzlichen Wirkung. Diese sind für den Großteil des Lichtspektrums durchlässig und reflektieren nur einen bestimmten Bereich des Spektrums. Durch diese Art von Filter ist es beispielsweise möglich nur eine Farbe aus dem Bild heraus zu filtern.

Auch Filter, die das gesamte Spektrum durchlassen, es jedoch in der Intensität verringern sind im Handel als Neutraldichte-Filter (ND-Filter) erhältlich. Diese werden in spezieller Form zum Beispiel für die Sonnenfotografie oder Sonnenbeobachtung genutzt.

¹ monochrome: einfarbig / Schwarz-Weiß

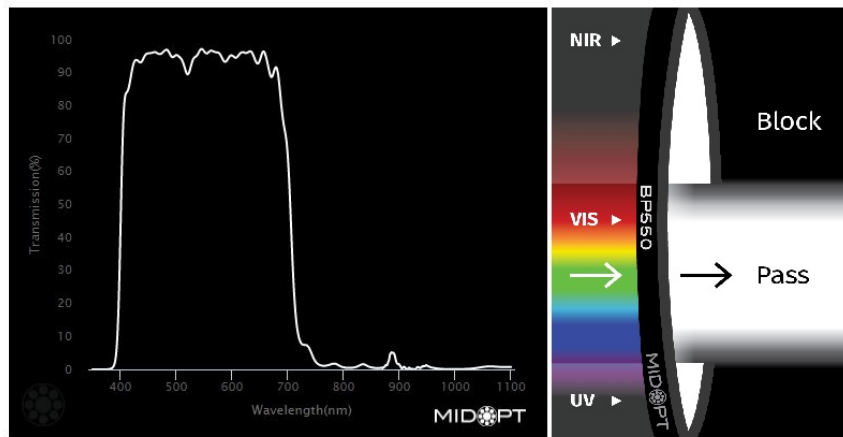


Abbildung 4.5: Bandpass BP550 (MidOpt) - Diagramm (links), Schema Filter (rechts) [Sys17a]

Für das System stehen verschiedene Kamera-Konfigurationen zur Verfügung. Eine Basler Dart daA2500-14uc mit einem Fischaugen-Objektiv mit ca. 180° Blickwinkel, eine Raspberry Pi Kamera V2.0 mit Weitwinkelobjektiv (Blickwinkel etwa 120° horizontal, 90° vertikal) oder eine Kombination aus mehreren Raspberry Pi Kameras mit Weitwinkelobjektiv, die über einen Kamera-Switch mit dem Raspberry Pi verbunden werden können. Jede dieser Konfigurationen bietet gewisse Vor- und Nachteile.

4.1.2.5 Variante I: Mehrere Raspberry Pi Kameras + Kamera-Switch

Die Variante, mehrere Raspberry Pi Kameras und einen Kamera-Switch der Firma „IVmech“ zu nutzen, bietet einen großen Blickwinkel von bis zu 180° in vertikaler und horizontaler Richtung. Die Kameras müssen mithilfe der Software entzerrt werden, um die tonnenförmigen Verzerrungen durch die Weitwinkelobjektive zu kompensieren. Außerdem müssen die Kameras verhältnismäßig genau zueinander ausgerichtet und die Bilder der Einzelkameras miteinander zu einem Gesamtbild verbunden werden. Dieser Prozess wird als Stitching bezeichnet. Da für diese Variante mindestens vier Kameras und der Switch benötigt werden, bedeutet dies Kosten von 210 €. Des Weiteren ist nicht sichergestellt, dass der Kamera-Switch mit der Version der Raspberry-Weitwinkelkamera kompatibel ist. Durch die Tatsache, dass statt einem Bild in dieser Variante vier Bilder aufgenommen werden müssen, ist die Framerate nur etwa ein Viertel der einer einzelnen Raspberry Pi Kamera, das Stitching und die Umschaltzeit zwischen den Kameras außen vor gelassen.

4.1.2.6 Variante II: Eine Raspberry Weitwinkelkamera

Die Nutzung einer einzelnen Raspberry Weitwinkelkamera bietet den Vorteil geringer Kosten (37,5 €) und die einfache Nutzung mit dem Raspberry Pi. Außerdem ist kein Stitching wie bei der Variante mit dem Switch notwendig. Allerdings muss auch hier die Weitwinkelkamera von tonnenförmigen Verzerrungen bereinigt werden, was zu einer Verkleinerung des Blickwinkels führt, der bei dieser Variante, verglichen mit den anderen, schon von vornherein geringer ist (122° Horizontal, 89,5° Vertikal). Dazu kommt, dass sich horizontaler und vertikaler Blickwinkel unterscheiden, was zu einer Differenz in der Vorhersagequalität für Wolkenbewegungen entlang der Nord-Süd-Achse und entlang der Ost-West-Achse führt. Für den Vergleich wird nur der kleinere Winkel herangezogen.

Dafür bietet diese Variante mit Abstand die höchste Framerate. Da es sich bei dieser Anwendung um langsame Objekte handelt, ist dies nur ein geringfügiger Vorteil. Es kann die Situation entstehen, dass zwischen zwei aufgenommenen Bildern die Differenz nicht groß genug ist, um eine Bewegung sicher erkennen. Somit muss die Framerate eventuell sogar softwaretechnisch verringert werden.

4.1.2.7 Variante III: Basler Dart Kamera

Bei der Basler Dart daA2500-14uc handelt es sich um eine Kamera mit USB3.0-Schnittstelle und einem Objektiv-Anschluss für CS-Mount und S-Mount Objektive. In Verbindung mit einem 180° Fischaugen-Objektiv, bietet diese Variante mit wenig Aufwand einen großen Blickwinkel. Die Kosten für die Kamera belaufen sich auf 159 € (Anhang 7) zzgl. Objektiv \approx 50 €. Somit bedeutet diese Variante vergleichbare Kosten wie die Variante I.

Da der Raspberry Pi nur über eine USB2.0-Schnittstelle verfügt, kann jedoch keine so hohe Framerate erreicht werden, wie bei den anderen Varianten. Allerdings sind die erreichbaren Framerates ausreichend für die in dieser Arbeit zu entwickelnde Anwendung.

Ein Vorteil ist, dass auch bei dieser Variante kein Stitching notwendig ist, jedoch müssen auch hier die Bilder entzerrt werden, da es zu tonnenförmigen Verzerrungen kommt.

Ein weiterer Faktor ist, dass die Verwendung der Basler Dart Kamera aufwendiger in der Vorbereitung ist. Es sind zusätzliche Konfigurationen am Raspberry Pi notwendig, um die Kamera benutzen zu können und das Einlesen der Kamerabilder ist mit mehr Aufwand verbunden, als bei den Kameras, die speziell für den Raspberry entwickelt wurden. Sind diese Konfigurationen getätigt, ist die Verwendung der Basler Dart Kamera allerdings nicht aufwendiger als die Verwendung der Raspberry Kameras.

Ein großer Vorteil der Basler Dart Kamera gegenüber den Raspberry Kameras ist, dass die Kamera auch an jedem anderen Computer nutzbar ist. Dies bietet die Möglichkeit, die Software an einem Entwicklungscomputer zu entwickeln, sodass diese nur noch auf den

Raspberry Pi übertragen werden muss. So können beispielsweise die ersten Tests mit einem Notebook und ohne eine zusätzliche Stromversorgung für den Raspberry Pi durchgeführt werden.

Da die Kamera über das Objektiv montiert werden kann, was zu einer guten und einfachen Ausrichtung auf einer Ebene führt, ist die Montage gegenüber den anderen Kamera-Varianten einfacher. Montiert man die Kamera in einer Bohrung, wird sie zwangsläufig durch die Absätze und Flächen am Objektiv ausgerichtet.

4.1.2.8 Vergleich der Varianten

Die Zahl der Pixel, auf die die Sonne projiziert wird, ergibt sich mit dem Wert aus Gleichung 2.20, der Anzahl der vertikalen Pixel des Kamerasensors $\#pxl$ und der Winkelabdeckung ψ_K nach der Gleichung:

$$r = \frac{\#pxl}{2 \cdot \psi_K} \cdot R'_S \Rightarrow A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{\#pxl}{2 \cdot \psi_K} \cdot R'_S \right)^2 \quad (4.2)$$

Tabelle 4.2: Anzahl der vertikalen Pixel der Kameravarianten

	Variante I	Variante II	Variante III
$\#pxl$	3888	1944	1944

In der nachfolgenden Tabelle sind die Kamera-Varianten gegenüber gestellt.

Tabelle 4.3: Vergleich der Kamera-Varianten gegenüber den Anforderungen

Anforderungen	Variante I	Variante II	Variante III
Winkelabdeckung	$\alpha_K = 360^\circ$ $\psi_K = 89,5^\circ$	$\alpha_K = 360^\circ$ $\psi_K = 44,75^\circ$	$\alpha_K = 360^\circ$ $\psi_K = 90^\circ$
Projektion der Sonne auf ausreichend viele Pixel	105	105	26
Framerate ²	3,75	15	1/2
Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung	IR-Filter	IR-Filter	IR-Filter
Aufwand Montage / Ausrichtung	hoch	gering	gering
Zusätzlich notwendige Operationen	Entzerrung Stitching	Entzerrung	Entzerrung

Fazit: Für den Prototyp ist Variante III die beste Wahl. In Variante I sind durch Stitching und hohen Montageaufwand klare Nachteile zu sehen. Bei Variante II ist die benötigte Anforderung an die Winkelabdeckung nicht erfüllt. Die Kosten der Varianten I und III sind vergleichbar. Der beste Kompromiss aus Winkelabdeckung und effizienter Montage ist also die Basler Dart daA2500-14uc mit einem Fischaugenobjektiv.

Die Basler Kamera verfügt über einen eingebauten IR/UV-Sperrfilter. Allerdings ist dieser direkt vor dem Kamera-Sensor angebracht. Dadurch kann die Infrarot-Strahlung zu einer Erhitzung der Kamera führen. Um diese zu minimieren, wird ein zusätzlicher Filter verbaut. Dieser wird zwischen dem Objektiv und dem Kamerasensor montiert, wodurch die infrarote Strahlung nicht in die Kamera vordringen kann, sondern bereits im Objektiv reflektiert wird. Dazu wird ein IR/UV-Filter der Firma Vision Dimension eingesetzt (Artikel-Nr.: 302062).

Tabelle 4.4: Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung

Anforderung	ohne zus. Filter	mit zus. Filter
Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung	+	++

²Bezogen auf das reine Einziehen des Bildes ohne weitere Operationen, wie z.B. Entzerrung, Stitching, Umschalten zwischen den Kameras oder die Bewegungserkennung.

4.1.3 Versorgung

Das System muss sowohl mit der Infrastruktur des Energie Campus Bergedorf CC4E verbunden, als auch mit Spannung versorgt werden. Eine Variante ist das Verlegen von getrennten Leitungen für das Netzwerk und die Spannungsversorgung. Dabei muss die Spannungsversorgung vor Regen geschützt werden. Eine weitere Variante ist die Versorgung durch PoE (Power over Ethernet). Dabei werden die Adern des Netzkabels, die nicht für die Datenübertragung genutzt werden, für die Spannungsversorgung verwendet. Dies bedeutet weniger Aufwand bei der Verlegung der Leitungen, da nur eine Leitung zu dem System gelegt werden muss. Darüber hinaus ist die Versorgung dadurch vor Witterung geschützt und das Risiko für Kurzschlüsse wird minimiert.

Tabelle 4.5: Vergleich getrennter Versorgung und PoE-Versorgung

Anforderungen	Getrennte Verlegung	PoE-Versorgung
Schutz vor Witterung und Kurzschlüssen	o	+
Aufwand bei der Verlegung von Leitungen	o	+

Fazit: Aufgrund der Vorteile einer Versorgung über PoE, wird diese umgesetzt. Da der Raspberry jedoch nicht PoE-fähig ist, muss ein PoE-Splitter eingesetzt werden, der die Energieversorgung von der Netzwerkanbindung trennt.

4.1.4 Gehäuse

Das Gehäuse hat zum einen die Aufgabe alle einzelnen Teilsysteme des Gesamtsystems zu verbinden, zum anderen aber auch das System und die darin verwendete Elektronik zu schützen. Dabei müssen die elektronischen Komponenten nicht nur vor Nässe oder Feuchtigkeit geschützt werden, sondern das Gehäuse muss auch ausreichend Schutz vor der direkten Sonneneinstrahlung bieten.

Durch den Schutz der Elektronik vor der Umgebung besteht das Risiko eines Wärmestaus. Die Kamera und die Recheneinheit erzeugen Wärme, die aus dem Gehäuse geleitet werden muss, um eine Beschädigung zu verhindern.

An dieser Stelle ist das Material von großer Bedeutung. Jedes Material hat verschiedene Eigenschaften, wie Wärmeleitfähigkeit oder Witterungsbeständigkeit, Gewicht und Bearbeitbarkeit, sowie Kosten und Verfügbarkeit.

4.1.4.1 Material

Es bieten sich hierbei zwei mögliche Materialien an: zum einen Aluminium, zum anderen Kunststoff. Beide Materialien sind, im Vergleich zu anderen, leicht zu bearbeiten und besitzen eine geringe Dichte und somit ein geringes Gewicht. Die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium, ist verglichen mit Kunststoff, zwar höher, dafür ist die Beschaffung geeigneter Bauteile problematischer und mit höheren Kosten verbunden. Allerdings benötigt ein Gehäuse aus Aluminium eine geringere Wandstärke bei gleicher Stabilität, was verbunden mit der hohen Wärmeleitfähigkeit, für eine effektivere Wärmeabfuhr aus dem Gehäuse sorgt.

Tabelle 4.6: Vergleich Aluminium und Kunststoff

Anforderungen	Aluminium	Kunststoff
Wärmeleitfähigkeit	++	--
Witterungsbeständigkeit	+	++
Dichte / Gewicht	+	++
Bearbeitbarkeit	+	++
Kosten	0	++
Verfügbarkeit	-	+

Fazit: Es ist zu erkennen, dass Kunststoff in vielerlei Hinsicht besser geeignet ist. Einzig die geringe Wärmeleitfähigkeit, muss noch im Detail betrachtet werden. Für das Gehäuse des Prototyps wird ein Kunststoffrohr eingesetzt.

Für den Schutz des optischen Systems muss jedoch ein anderes Material verwendet werden, da dort gute optische Eigenschaften benötigt werden. Dabei stehen Glas oder Acrylglas zur Auswahl.

Tabelle 4.7: Vergleich Glas und Acrylglas

Anforderungen	Glas	Kunststoff
Bearbeitbarkeit	--	++
Optische Eigenschaften	++	++

Fazit: Beide Materialien bieten gute optische Eigenschaften, jedoch ist Acrylglas zudem Bruchfest und besser zu bearbeiten, da es sich um einen Kunststoff handelt. Somit wird eine Acrylglas-Kuppel zum Einsatz kommen.

4.2 Software

4.2.1 Programmiersprache und Bildverarbeitungsbibliothek

Als Programmiersprache bietet sich Python an. Sie ist ab Werk in der Version 3.4.2 auf dem Raspberry Pi installiert. Die Hersteller des Raspberry Pi empfehlen diese Programmiersprache für die Verwendung des Rasperrys. Darüber hinaus verfügt Python über unterschiedliche Bibliotheken, die je nach Anwendung genutzt werden können.

Als Bildverarbeitungsbibliothek ist OpenCV 3.0 besonders interessant. Dabei handelt es sich um eine kostenlose Bibliothek, die eine große Zahl an Algorithmen zur Verfügung stellt. Sie ist unter anderem für die Anwendung mit Python entwickelt worden.

Tabelle 4.8: Allgemeine Softwareanforderungen

Anforderung	
Vom BV unterstützte Programmiersprache	Python 3.4.2
Bildverarbeitungsbibliothek	OpenCV 3.0

4.2.2 Verzeichnungen

Da Weitwinkelobjektive Verzeichnungen in den Kamerabildern erzeugen, muss eine Entzerrung stattfinden. Eine Variante ist es, das gesamte Bild von Verzeichnungen zu befreien. Eine andere Variante ist es nur die relevanten Informationen im Bild zu entzerren.

Entzerrung von Bildern bedeutet immer einen Verlust des Blickwinkels. Die OpenCV-Bibliothek bietet Algorithmen, die bei der Entzerrung von Bildern hilft. Dazu muss ein Programm zur Kalibrierung der Kamera entwickelt werden. Es steht dazu das „OpenCV Fisheye camera model“ zur Verfügung. Mit Hilfe dieses Modells der Kamera und des Objektivs ist es möglich das Kamerabild zu entzerren. Dieses Modell ist erst seit OpenCV 3.0 implementiert und weist daher noch große Schwächen in der Benutzung auf. Die Erzeugung des Modells ist aufwendig und liefert keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Objekte die sich am Rand des Bildes befinden werden in ihrer Größe stark verändert, wodurch es zu fehlerhaften Abbildungen kommt.

Es besteht allerdings auch die Möglichkeit das Bild nicht vollständig zu entzerren. Belässt man das Bild in dem Ursprungszustand und entzerret nur die Bewegungsvektoren, kann aus den entzerreten Bewegungsvektoren die einer Wolke zugeordnet wurden, ein unverzerrter Bewegungsvektor für die zukünftige Bewegungen berechnet werden. Verzerrt man diesen Bewegungsvektor im nächsten Schritt, kann man die zukünftige Position der Wolke in dem verzerrten Bild bestimmen. Dadurch werden die Informationen über Wolkenform und Wolkengröße beibehalten.

Tabelle 4.9: Vergleich Fisheye-Modell und Teilentzerrung

Anforderungen	Fisheye-Modell	Teilentzerrung
Einfluss auf die Informationen im Bild	hoch	gering
Aufwand bei Umsetzung	hoch	mittel

Fazit: Da die Teilentzerrung nicht die Informationen über die Größe und Form der Wolken beeinflusst und das Erstellen des Fisheye-Modells einen großen Aufwand bedeutet, wird die Teilentzerrung implementiert werden.

4.2.3 Position der Sonne

Um die Position der Sonne zu bestimmen, kann zum einen mit der Bildverarbeitung gearbeitet werden. Da die Sonne jedoch nicht zu jedem Zeitpunkt zu sehen ist und direkt angestrahlte Wolken zu fehlerhaften Ergebnissen führen können, handelt es sich dabei nicht um einen zuverlässigen Ansatz. Eine andere Variante ist es die Position der Sonne mit Hilfe der Standortinformationen und dem Datum zu berechnen (Kapitel 2.3.2). Diese Variante bietet eine hohe Genauigkeit, verlangt aber auch, dass das System genau ausgerichtet ist.

Tabelle 4.10: Vergleich der Ansätze zur Bestimmung der Sonnenposition

Anforderung	Bestimmung aus Kamerabild	Berechnung
Zuverlässigkeit	--	++
Genauigkeit	-	++

Fazit: Aufgrund der höheren Zuverlässigkeit und Genauigkeit, wird die Position der Sonne berechnet und nicht durch die Bildverarbeitung ermittelt. Die Vorteile überwiegen dem Nachteil, dass das System dazu genauer ausgerichtet werden muss.

4.2.4 Segmentierung von Wolken und Himmel

Wolken bestehen aus Wasserdampf. Durch die, im Vergleich zur Erdnähe, niedrigere Temperatur am Himmel, kondensieren die Wasserteilchen in der Luft immer da, wo die Luft feste, luftgetragene Teilchen, genannt Aerosole, als Kondensationskerne oder Eiskeime enthält und mit Wasserdampf gesättigt ist. Erreicht oder überschreitet der Partialdruck des Wasserdampfes den Sättigungspartialdruck, kondensieren und sublimieren die Wasserteilchen an den Kondensationskernen und Eiskeimen.

Durch die stetige Kondensation und Kollision mehrerer Wasserteilchen entstehen immer größere Tropfen, deren Gewicht zu hoch ist, um von der Luft getragen zu werden. Diese Tropfen fallen dann in Form von Niederschlag zur Erde [Klo16].

Einen möglichen Ansatz zur Segmentierung der Wolken vom Himmel ist es, die Farbwerte der einzelnen Kanäle Rot, Grün und Blau zu vergleichen. Da der Himmel überwiegend blau ist und die Wolken weiß bzw. grau, ist vor allem das Verhältnis zwischen dem Rot- und dem Blaukanal ein möglicher Ansatz. Bei schwarzen, grauen und weißen Pixeln, geht das Verhältnis zwischen Rot-Kanal und Blau-Kanal gegen 1. Für blaue Pixel hingegen strebt es gegen 0. In [GBE12] wird beispielsweise mit der Differenz zwischen rot und blau gearbeitet. Zusätzlich kommt dort jedoch noch ein Helligkeitskanal zum Einsatz, der sich aus den einzelnen Kanälen berechnen lässt. Die von [Lan16] verwendete Ansatz arbeitet ebenfalls mit Hilfe von verschiedenen definierten Vergleichen zwischen den Kanälen. Ein weiterer Ansatz ist die Umrechnung des Bildes in den HSV-Farbraum (Hue, Saturation, Value; dt. Farbwinkel, Sättigung und Hellwert).

4.2.4.1 Variante I: Verhältnis Rot zu Blau

Das Verhältnis $Ratio(x, y)$ und die damit verbundene Klassifizierung in Wolke und Himmel mit dem Schwellwert S ist folgendermaßen definiert

$$Ratio(x, y) = \frac{Rotwert}{Blauwert} = \begin{cases} Wolke & \text{falls } Ratio(x, y) > S \\ Himmel & \text{falls } Ratio(x, y) < S \end{cases} \quad (4.3)$$

Der Schwellwert S muss dabei empirisch ermittelt werden.

4.2.4.2 Variante II: Farbwinkel

Der Ansatz des Farbwinkels H basiert auf der Umrechnung von RGB-Werten in HSV-Werte. Dabei gilt [Dev17a]:

$$\begin{aligned}
 MAX &:= \max(R, G, B), \quad MIN := \min(R, G, B) \\
 H &= \begin{cases} 0 & \text{falls } R = G = B \\ 60^\circ \cdot \left(0 + \frac{G-B}{MAX-MIN}\right) & \text{falls } MAX = R \\ 60^\circ \cdot \left(2 + \frac{B-R}{MAX-MIN}\right) & \text{falls } MAX = G \\ 60^\circ \cdot \left(4 + \frac{R-G}{MAX-MIN}\right) & \text{falls } MAX = B \end{cases} \\
 S &= \begin{cases} 0 & \text{falls } MAX = 0 \\ \frac{MAX-MIN}{MAX} & \text{sonst} \end{cases} \\
 V &:= MAX
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Für den Fall das der Blauwert B am größten ist, ergibt sich nach der ersten Gleichung, dass der Farbwinkel H einen großen Wert annimmt. Hat einer der beiden Kanäle R oder G einen größeren Wert wird der Farbwinkel hingegen kleiner. Auch bei diesem Ansatz muss ein Schwellwert zum Einsatz kommen um die einzelnen Bildpunkte zu klassifizieren.

4.2.4.3 Vergleich der Varianten

Tests haben gezeigt, dass grundsätzlich beide Ansätze zum Erfolg führen. Einzig sehr dunkle Wolken mit bläulicher Färbung werden nicht erkannt, da sowohl das Verhältnis oberhalb des Schwellwertes S liegt, als auch der Farbwinkel diese Wolken als Blau und somit als Teil des Himmels interpretiert. Bei beiden Ansätzen, kann es durch Objekte wie Häusern oder Bäumen zu Fehlerkennungen führen. Da diese Objekte jedoch keine konstanten Farben aufweisen, müssen diese mit Hilfe einer Maske aus den Kamerabildern entfernt werden.

Tabelle 4.11: Vergleich Farbwinkel und Verhältnis mit den Anforderungen

Anforderung	Farbwinkel	Verhältnis Rot zu Blau
Einfache Festlegung des Schwellwertes	++	+
Zuverlässigkeit	+	+
Keine Fehlerkennung	-	-

Fazit: Da die Ansätze vergleichbare Ergebnisse aufweisen, der Schwellwert beim Farbwinkel-Ansatz jedoch besser zu bestimmen ist, wird dieser für die Segmentierung von Wolken und Himmel umgesetzt.

4.2.5 Prognose der Bestrahlungsstärke

Die Prognose der voraussichtlichen Bestrahlungsstärke ist das Kernelement der Software. Um diese zu erstellen, müssen die nötigen Informationen über die Wolkenkonstellationen, deren Geschwindigkeit und die Position der Sonne bekannt sein.

Darüber hinaus muss bekannt sein, wie stark die Bestrahlung für den Fall der verdeckten Sonne und den Fall der nicht verdeckten Sonne ist.

4.2.5.1 Bewegungsanalyse und -vorhersage

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, existieren verschiedene Ansätze zur Bewegungserkennung innerhalb der Bildverarbeitung. Der Differenzbild-Ansatz ist für diese Arbeit ungeeignet, da es zu starken Belichtungsunterschieden bei Verschattung der Sonne kommt, die Fehlerhaften Ergebnissen führen.

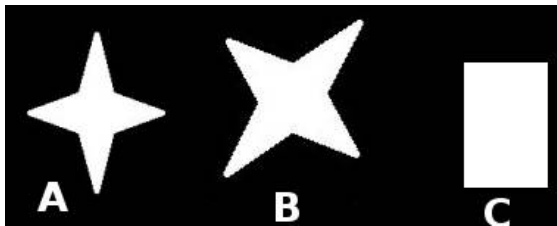
Tabelle 4.12: Vergleich Differenzbild-Ansatz mit den Anforderungen

Anforderungen	Differenzbild
Rechenaufwand des Verfahrens	gering
Zuverlässigkeit bei klarem oder vollständig bedecktem Himmel	+
Widerstandsfähigkeit gegen Belichtungsänderungen	- -
Implementierungsaufwand	gering
Laufzeit des Verfahrens	gering

Neben den „Background Subtractor“ und Optical Flow Ansätzen, besteht noch die Möglichkeit ein weiteren Konzeptes, das die Kontur der einzelnen Wolken als Wiedererkennungsmerkmal nutzt.

4.2.5.1.1 Variante I: Kontur der Wolke als Wiedererkennungsmerkmal

Dieser Ansatz beruht auf der Funktion „Match Shapes“ der OpenCV Bibliothek [Dev17b]. Dieser vergleicht zwei gegebene Konturen miteinander und gibt einen Wert für die Übereinstimmung zurück. Durch diese Funktion ist es möglich, die Konturen in mehreren, aufeinanderfolgenden Bildern der entsprechenden Instanz zuzuordnen. Über die Liste der vergangenen Mittelpunkte kann dann die Bewegungsrichtung und daraus mit Hilfe der Framerate die Bewegungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Folgendes Beispiel zeigt die Verwendung von „Match Shapes“ und dessen Ergebnis.



Vergleich von Kontur A mit A:

0, 0

Vergleich von Kontur A mit B:

0, 001946

Vergleich von Kontur A mit C:

0, 326911

Abbildung 4.6: OpenCV-Match Shapes [[Dev17b](#)]

Tests haben gezeigt, dass dieser Ansatz nicht zuverlässig ist. Dies resultiert daraus, dass die Wolken nicht zwingend ihre Form beibehalten. Dadurch verschiebt sich auch der Mittelpunkt, der über die Momente der Kontur berechnet werden kann. Durch diese Verschiebung des Mittelpunktes kommt es zu fehlerhaften Bewegungsvektoren der Wolken.

4.2.5.1.2 Variante II: Background Subtractor

Der Background Subtractor erzeugt ein Hintergrundmodell für die aufgenommenen Bilder. Durch die Differenz des aktuellen Bildes zu dem Hintergrundmodell können die Vordergrundobjekte vom Hintergrund getrennt werden. Dieser Algorithmus stellt jedoch keine Bewegungsdaten zur Verfügung. Somit muss neben dem Background Subtractor noch ein weiterer Algorithmus implementiert werden, der die Positionsveränderung der Wolken am Himmel berechnet. Dies führt zu einem hohen Implementierungsaufwand.

Darüber hinaus bewegen sich die Wolken am Himmel je nach Windgeschwindigkeit, mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, wodurch die Parametrisierung des Background Subtractors erschwert wird. Bei vollständig bedecktem Himmel kann der Background Subtractor die Wolken zu einem Teil des Hintergrundmodells machen und den Himmel als vollständig klar interpretieren.

4.2.5.1.3 Variante III: Optical Flow

Eine weitere Möglichkeit bietet der bereits in Kapitel 2.1 beschriebene „Optical Flow“-Algorithmus. Dieser berechnet die Bewegungsvektoren der einzelnen Punkte im Bild. Diese Bewegungen können den Konturen zugewiesen werden. Mittelt man alle Bewegungsvektoren der Punkte, die einer Kontur zugewiesen werden konnten, erhält man die Bewegungsvektoren der einzelnen Wolke. Da bei dieser Arbeit keine hohen Framerates notwendig sind, da die Wolken sich mit verhältnismäßig langsamer Geschwindigkeit bewegen, stellt die längere Rechenzeit des „Optical Flows“ nur ein geringfügiges Problem dar.

4.2.5.1.4 Vergleich der Varianten

Der große Vorteil des Optical Flow gegen über den anderen Ansätzen besteht darin, dass dort direkt Bewegungsvektoren berechnet werden. Der Background Subtractor trennt hingegen nur den Vordergrund von dem Hintergrund. Die Berechnung der Bewegungen, muss zusätzlich implementiert werden. Bei dem Ansatz, der die Kontur der Wolken als Wiedererkennungsmerkmal nutzt, hat sich gezeigt, dass der Algorithmus nicht zuverlässig genug ist.

Tabelle 4.13: Vergleich der Varianten mit den Anforderungen

Anforderungen	Konturen	Background Subtractor	Optical Flow
Rechenaufwand des Verfahrens	gering	mittel	hoch
Verarbeitung von klarem oder vollständig bedecktem Himmel	+	-	+
Widerstandsfähigkeit gegen Belichtungsänderungen	+	0	+
Implementierungsaufwand	hoch	hoch	mittel
Genauigkeit der Bewegungsanalyse	--	0	++

Fazit: Der Optical Flow ist der Ansatz mit der höchsten Laufzeit. Dies stellt jedoch durch die geringe Geschwindigkeit der Wolken vernachlässigbares Problem dar. Der große Vorteil, dass der Algorithmus direkt Bewegungsdaten ermittelt und dafür kein eigener Algorithmus entwickelt werden muss, ist der Grund dafür, dass dieser Ansatz umgesetzt wird.

4.2.5.2 Prognosezeitraum

Das System soll es ermöglichen, die Leistung für verschiedene Zeiträume vorherzusagen. Für die Netzsteuerung werden dabei kurze Zeiträume benötigt. Der Energiehandel verlangt jedoch nach Prognosen für Zeiträume von mindestens 45 Minuten (Intraday-Handel), da der kürzeste Zeitraum für den Handel 15-Minuten-Abschnitte mit 30 Minuten Vorlaufzeit ist. Die möglichen Prognosezeiträume sind jedoch von durch verschiedene Faktoren eingeschränkt:

- Wolken behalten ihre Struktur und Form selten über längere Zeiträume bei.
- In Deutschland herrscht überwiegend Westwind. Steht die Sonne niedrig im Westen, hat die Kamera keine Möglichkeit die von dort kommenden Wolken zu berücksichtigen.

- Bei hoher Windgeschwindigkeit, sind Wolken, die innerhalb des Prognosezeitraumes die Sonne verschatten, möglicherweise noch nicht im Erfassungsbereich der Kamera und können somit ebenfalls nicht berücksichtigt werden.

Somit sind Prognosen über Zeiträume von 45 Minuten in den meisten Fällen nicht möglich. Die einzigen Szenarien, in denen eine zutreffende Prognose denkbar ist, sind:

1. Die Sonne befindet sich mit niedriger Höhe im Osten (morgens) und es herrscht schwacher Westwind.
2. Bei vollständig bedecktem oder klarem Himmel.

Aufgrund der Veränderung der Wolkenform mit der Zeit, sind in den meisten Fällen auch morgens bei schwachem Westwind die Prognosen nicht zutreffend, sondern bieten allenfalls eine unpräzise Schätzung.

4.2.5.3 Verdeckung der Sonne und resultierende Bestrahlungsstärke

Für die Bestimmung der Verdeckung der Sonne wird der Prognosezeitraum in einzelnen Zeitabschnitte entsprechend der Framerate der Kamera aufgeteilt. Diese Zeitabschnitte werden danach vereinzelt betrachtet. In jedem dieser Abschnitte entsteht ein prozentualer Verdeckungsgrad, aus denen der Mittelwert *covered* für den Gesamtzeitraum gebildet wird.

Eine grafische Variante zur Bestimmung der Verdeckung innerhalb eines Zeitabschnittes ist, mit Hilfe des Bewegungsvektors verschobenen, Wolken in eine Maske zu projizieren und im Folgenden zu prüfen, ob sich die Position der Sonne in den belegten Bereichen der Maske befindet. Da die Funktion zum einzeichnen der Wolkenkonturen in die Maske einen hohen Rechenaufwand bedeutet, handelt es sich hierbei um ein zeitintensives Verfahren.

Alternativ kann die Sonne als ein Vektor von Punkten betrachtet werden. Es wird für jeden Zeitabschnitt geprüft, wie viele der Punkte sich innerhalb einer Wolkenkontur befinden. Tests haben gezeigt, dass diese Prüfung deutlich rechen-effizienter ist, als das Einzeichnen der Konturen in eine Maske.

Fazit: Da die Variante der „Punkt innerhalb der Kontur“-Prüfung rechen-effizienter ist, wird diese implementiert.

5 Entwicklung

5.1 Hardware

5.1.1 Kamera und Objektiv

Bei einigen Objektiven kann es zu einem Projektionsfehler kommen, sodass ein realer Winkel nicht exakt der Position im Bild entspricht [Lan16]. Um dies ausschließen zu können wurde ein einfacher Testaufbau realisiert. Dabei wurde die Kamera mit einem Winkelmesser auf einer ebenen Oberfläche befestigt. Danach wurden entlang dem Winkelmesser, definierte Winkel mit Hilfe einer Nadel markiert und der Winkel mit Software ermittelt.

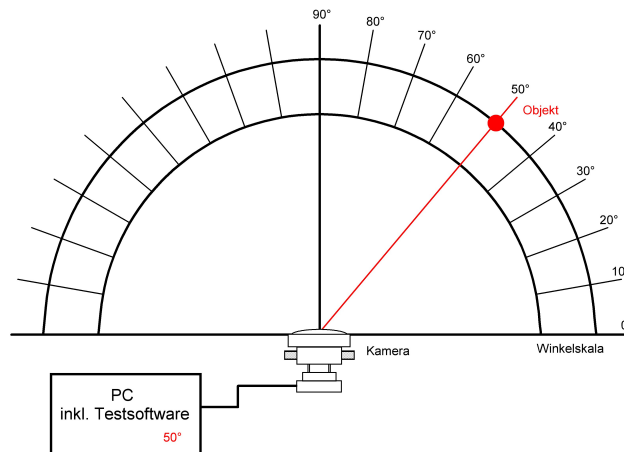


Abbildung 5.1: Technische Zeichnung der Acrylglas-Kuppel

Tabelle 5.1: Ergebnis des Projektionstests in [°]

Real	Software	Differenz	Real	Software	Differenz	Real	Software	Differenz
90,00	90,00	0,00	55,00	55,46	0,46	20,00	20,64	0,64
85,00	85,37	0,37	50,00	50,65	0,65	15,00	15,63	0,63
80,00	80,46	0,46	45,00	45,64	0,64	10,00	10,74	0,74
75,00	75,74	0,74	40,00	40,65	0,65	5,00	5,72	0,72
70,00	70,64	0,64	35,00	35,55	0,55	1,00	1,74	0,74
65,00	65,55	0,55	30,00	30,55	0,55			
60,00	60,55	0,55	25,00	25,37	0,37			

In der Tabelle ist ersichtlich, dass es nur zu einem maximalen Fehler von $0,74^\circ$ kommt. Da der Versuchsaufbau keine hohe Genauigkeit bietet und bei sämtlichen Messwerten eine vergleichbare Abweichung besteht, ist anzunehmen, dass es sich bei dem Fehler um einen Offset handelt, der auf die Ausrichtung der Kamera zurückzuführen ist. Da das Objektiv keinen nennenswerten Projektionsfehler erzeugt, wird auf eine Korrektur des Winkels [Lan16] verzichtet.

5.1.2 Gehäuse

Zum Schutz vor Feuchtigkeit und Nässe umgibt die empfindliche Elektronik ein geschlossenes System. Alle Schraubverbindungen werden so ausgeführt, dass keine Bohrungen in den Teil des Gehäuses führen, in dem sich die Elektronik befindet. Des Weiteren werden alle lösbaren Verbindungen mit Dichtungen ausgestattet, um auch kleinste Mengen Feuchtigkeit und Nässe außerhalb des Gehäuses zu halten. Eine Möglichkeit wäre es, sämtliche Baugruppen zu verkleben, um eine ausreichende Dichtheit des Gehäuses zu gewährleisten. Da dies aber den Nachteil birgt, dass in Fehler- oder Wartungsfällen kein Zugang zu den einzelnen Komponenten mehr besteht, soll das Gehäuse leicht zu öffnen und zugänglich sein, ohne, im montierten Zustand, Feuchtigkeit hinein zu lassen.

Für den Schutz des Objektivs bietet sich eine Acrylglas-Kuppel mit einer Größe von 100 mm an. Somit ergibt sich eine Höhe von etwa 50 mm. Im Handel sind solche Kuppeln verhältnismäßig günstig zu erwerben. Die genutzte Kuppel besitzt eine Krempe von etwa 15 mm, sodass sich eine Gesamtbreite von 130 mm ergibt.

Für die Montage der Kuppel wurden acht Bohrungen mit einem Durchmesser von $\varnothing 4,5$ mm in gleichmäßigen Abständen, entlang der Krempe, hinzugefügt.

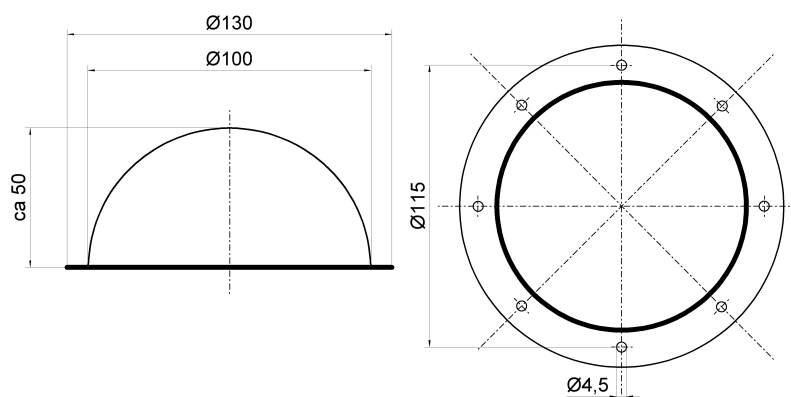


Abbildung 5.2: Technische Zeichnung der Acrylglas-Kuppel

Da das Rohr, welches als Gehäuse für die elektronischen Komponenten dient, einen geringeren Durchmesser als die Kuppel haben muss, damit die Befestigungsbohrungen außerhalb des Rohres liegen, kommt hier ein Rohr mit einem Außendurchmesser $R_a = 90 \text{ mm}$ und einem Innendurchmesser $R_i = 84 \text{ mm}$ zum Einsatz.

Um die Länge des Rohres festzulegen, muss berechnet werden, welche Länge das Rohr benötigt um die notwendige Wärmeabfuhr zu gewährleisten. Aus den Dokumentationen der Kamera und des Rasperrys geht hervor, dass die Temperatur innerhalb des Gehäuses nicht über 50°C (maximale Umgebungstemperatur der Kamera [BA17]) steigen darf.

Für diese Berechnung wird von einer Maximaltemperatur von 45°C ausgegangen, um einen Sicherheitsabstand von der Maximaltemperatur einzuhalten:

$$T_i = 45^\circ\text{C} \quad (5.1)$$

Ausgehend von einer Höchsttemperatur von etwa 30°C an einem heißen Sommertag:

$$T_a = 30^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

ergibt sich für die Temperaturen, die für die Berechnungen benötigt werden:

$$\Delta T = T_i - T_a = 45^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 15^\circ\text{C} = 15\text{K} \quad (5.3)$$

Für die Berechnung zur thermischen Dimensionierung gilt allgemein, dass Leistung in Form eines Wärmestromes \dot{Q}_L in W von der wärmeren zur kälteren Seite transportiert wird. Die treibende Kraft ist dabei die Temperaturdifferenz.

Je nach dem, was sich zwischen der wärmeren und der kälteren Seite befindet, ergibt sich ein Widerstand gegen diesen Ausgleich der Temperatur. Der formale Zusammenhang ergibt sich dabei zu [LB14, S. 95ff]:

$$\Delta T = \dot{Q}_L \cdot R_L \quad (5.4)$$

Für den hier vorliegenden Fall berechnet sich der Wärmeleitwiderstand für das Rohr zu:

$$R_L = \frac{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}{2\pi \cdot l \cdot \lambda} \quad (5.5)$$

Grundsätzlich ist für die Berechnung die gesamte Oberfläche des Gehäuses zu betrachten. Da es hier nur um eine Abschätzung des Worst-Case geht, wird nur die Oberfläche des Rohres selber betrachtet.

Die maximalen Leistung pro Port im IEEE 802.3af PoE-Standard entspricht $\dot{Q}_L = 15,4 \text{ W}$. Da keine genaueren Informationen über die Verlustleistung der Kamera oder dem Raspberry Pi 3 in den Datenblättern existieren. Da die $\dot{Q}_L = 15,4 \text{ W}$ der maximalen Leistung entsprechen, die in das Gehäuse gelangen kann, dient dieser Wert für die Worst-Case-Abschätzung. Somit folgt, ausgehend von den Formeln 5.4 und 5.5:

$$R_L = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_L} = \frac{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}{2\pi \cdot l \cdot \lambda} \Leftrightarrow l = \frac{\dot{Q}_L \cdot \ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}{2\pi \cdot \Delta T \cdot \lambda} \quad (5.6)$$

Der Wärmeleitkoeffizienten von PVC ist $\lambda_{PVC} = 0,12 \dots 0,25 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$. Für die Worst-Case-Betrachtung, wird im Folgenden von dem Wert $\lambda_{PVC} = 0,12 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ ausgegangen. Somit berechnet sich die minimale Länge l des Rohres zu:

$$l = \frac{\dot{Q}_L \cdot \ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}{2\pi \cdot \Delta T \cdot \lambda_{PVC}} = \frac{15,4 \text{ W} \cdot \ln\left(\frac{0,09 \text{ m}}{0,084 \text{ m}}\right)}{2\pi \cdot 15 \text{ K} \cdot 0,12 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}} \approx 0,094 \text{ m} = 9,4 \text{ cm} \quad (5.7)$$

Da ein Rohr mit einer Länge von $l = 9,4 \text{ cm}$ nicht ausreicht, um alle Komponenten darin unterzubringen, kommt ein Rohr mit einer Länge von $l = 18 \text{ cm}$ zum Einsatz. Bei vorläufigen Tests hat sich gezeigt, dass die Innentemperatur bei einer Raumtemperatur von 18°C und einer Betriebsdauer von 8 Stunden, nicht höher als 26°C steigt.

Allerdings hat sich gezeigt, dass die CPU-Temperatur des Raspberry Pis, beim Einsatz einer passiven Kühlung, auf bis zu 70°C ansteigt. Der Raspberry Pi schaltet bei einer CPU-Temperatur von über 85°C jedoch aus Sicherheitsgründen ab. Um zu gewährleisten, dass dies nicht geschieht wenn die Außentemperatur höher als 18°C ist, wurde auf eine aktive Kühlung mittels Lüfter umgerüstet. Mit der aktiven Kühlung ergaben sich CPU-Temperaturen von unter 60°C , ebenfalls bei einer Raumtemperatur von 18°C und einer Betriebszeit von 8 Stunden. Als zusätzliche Maßnahme zur Minimierung der Innentemperatur des Gehäuses, wird das Gehäuse weiß ummantelt. Dies dient dazu mehr Strahlung zu reflektieren und somit weniger Wärme durch die Sonneneinstrahlung aufzunehmen.

Um das Rohr und die Kuppel miteinander zu verbinden, wird ein Verbindungsring eingesetzt. Dieser hat einen Innendurchmesser entsprechend dem Außendurchmesser des Rohres und einen Außendurchmesser entsprechend dem äußeren Durchmesser der Kuppel, sowie ebenfalls acht Bohrungen in gleichmäßigen Abständen.

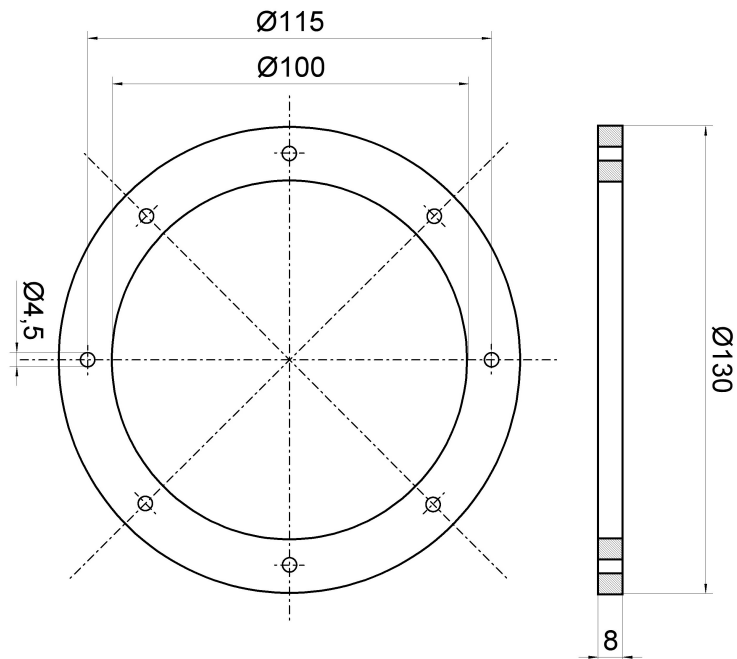


Abbildung 5.3: Technische Zeichnung des Verbindungsringes

Der Verbindungsring wird aus PVC-U gefertigt. PVC-U ist witterungsbeständig und problemlos zu bearbeiten. Darüber hinaus kann es problemlos mit dem PVC-Rohr verklebt werden.

Um die Kamera und das Objektiv zu montieren, wird zusätzlich eine Kamerabefestigungsplatte benötigt. Diese hat den gleichen Durchmesser wie der Verbindungsring und die Kuppel und ebenfalls die Montagebohrungen. Zusätzlich befindet sich in der Mitte eine Bohrung, die geringfügig größer als der Durchmesser des Absatzes des Kamera-Objektivs entspricht.

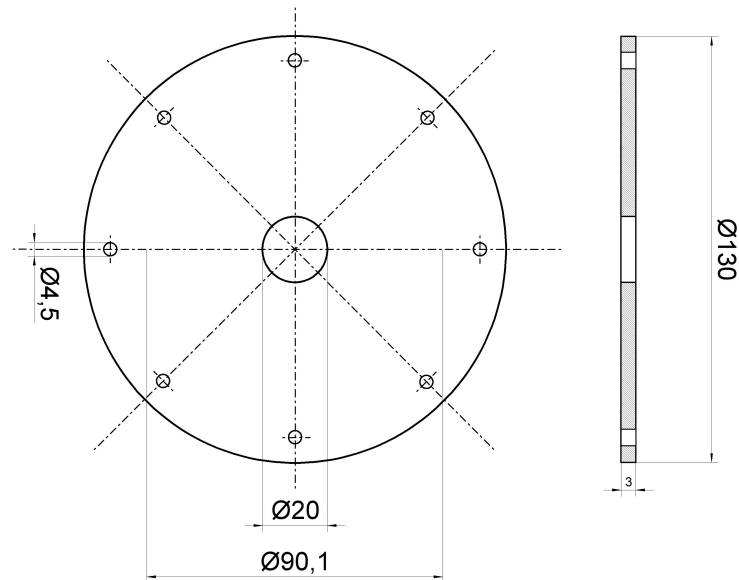


Abbildung 5.4: Technische Zeichnung der Kamerabefestigungsplatte

Auch die Kamerabefestigungsplatte wird aus PVC-U gefertigt. Es wird dabei weißes Material eingesetzt, damit sich das Material durch die Solarstrahlung nicht zu sehr erwärmt.

Damit das Gehäuse ausreichend abgedichtet ist, kommen noch zwei Flachdichtungen aus Moosgummi zum Einsatz. Diese sitzen zwischen dem Verbindungsring und der Kamerabefestigungsplatte, sowie zwischen der Kuppel und der Kamerabefestigungsplatte. Sie haben die gleiche Form wie der Verbindungsring, haben jedoch nur eine Stärke von 2 mm.

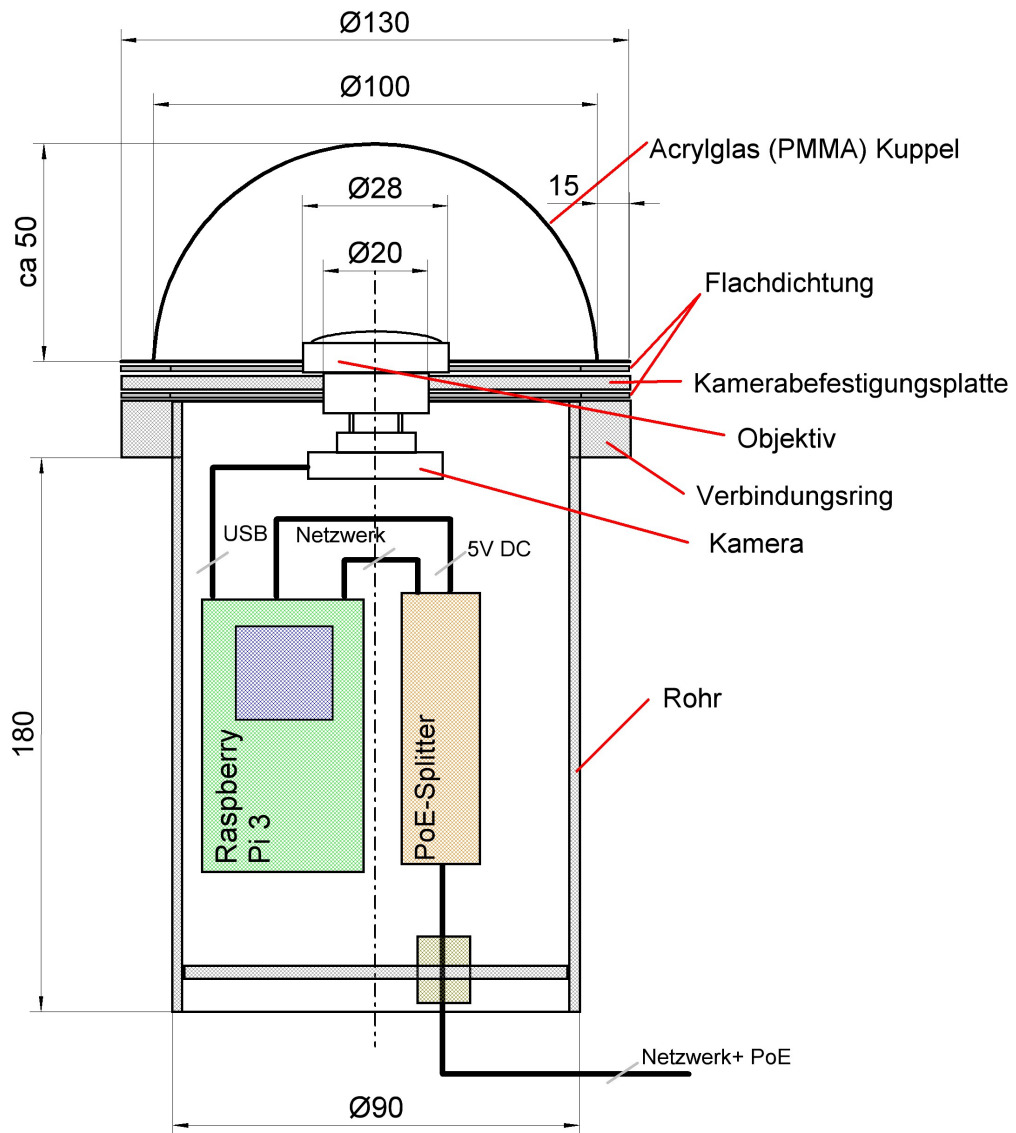


Abbildung 5.5: Technische Zeichnung des Gesamtgehäuses

5.2 Software

Aufgrund der Tatsache, dass die Berechnung der Vorhersage große Rechenzeit beansprucht, wurde die Software mit Hilfe von Subprozessen entwickelt. Dies ermöglicht dem System mehrere Programmabschnitte parallel abzuarbeiten. Das Programm wurde so entworfen, dass das Hauptprogramm die Aufgabe übernimmt, das aktuelle Kamerabild einzulesen und die Optical Flow Bewegungsspuren zu berechnen. Dadurch ist es möglich eine gleichmäßige Framerate zu gewährleisten, ohne dass die Bildaufnahme durch die Vorhersageberechnungen verzögert wird. Dabei wird der Programmabschnitt zum Einlesen und Berechnen der Bewegungsspuren in einem 5-Sekunden-Takt ausgeführt, wodurch sich eine Framerate von $fps = \frac{1}{5}$ ergibt.

Durch das Hauptprogramm werden zwei Vorhersage-Subprozesse gestartet, einer im 5-Minuten-Takt und einer im 30-Minuten Takt. Durch diese Prozesse werden Vorhersagen für die kommenden 5 bzw. 30 Minuten berechnet. Die Abstände in denen die Subprozesse gestartet werden und deren Prognosehorizont, lassen sich anpassen. Es muss dabei nur darauf geachtet werden, dass nicht mehr als drei Subprozesse gestartet werden und dass sie nicht im gleichen Zyklus des Programms gestartet werden, da dies zu einer Verzögerung des Bildeinzuges führen kann.

Die Software wurde modular aufgebaut. Das Hauptverzeichnis verfügt neben dem Hauptprogramm über drei Ordner. Zwei davon werden lediglich zum Speichern von „Log-Dateien“ und „Messwert-Dateien“ verwendet, die der Überwachung des Systems dienen. Der letzte enthält die Softwaremodule, die für die Funktion der Software benötigt werden.

Tabelle 5.2: Entwickelte Softwaremodule und deren Funktion

Modul	Funktion
BaslerDartCamera	Initialisierung und Ansteuerung der Basler Dart Kamera
ClassClouds	Klasse; Instanzen dieser Klasse repräsentieren die einzelnen Wolken
functions	Allgemeine Funktionen die innerhalb der gesamten Software genutzt werden
functionsSun	Berechnung der Sonnen-Daten (aktuelle Position, Bestrahlung)
mqtt	Ansteuerung des mqtt-Servers zum Auslesen der aktuellen Strahlungsdaten
OpticalFlow	Klasse; Realisierung des Optical Flow Trackers zur Bewegungsanalyse

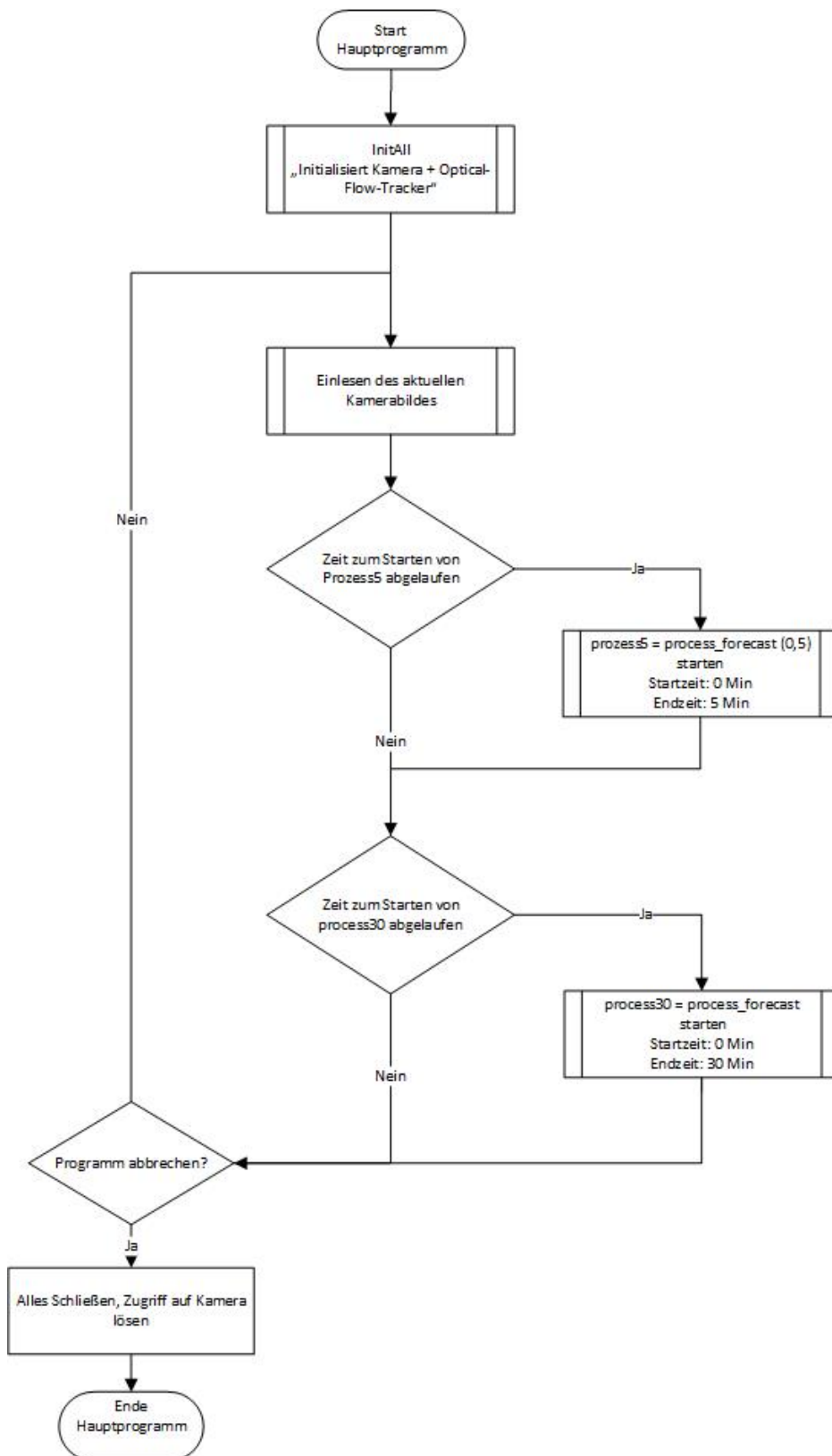


Abbildung 5.6: Ablaufdiagramm Hauptprogramm (Anhang 4)

5.2.1 Kameraparameter

Um den richtigen Bildausschnitt zu betrachten und die Sonnenblindheit der Kamera zu minimieren, werden die Kameraparameter, die das Programm zu Beginn der Initialisierung an die Kamera übermittelt, folgendermaßen gewählt:

Tabelle 5.3: Kameraparameter

Parameter	Wert
Width	1944
Height	1944
OffsetX	324
OffsetY	0
Gain	0
ColorSpaceMode	'RGB'
GainAuto	'Off'
ExposureAuto	'Off'
ExposureTime	10

Von besonderer Bedeutung ist die Wahl des „Gain“-Wertes. Dieser sorgt bei Werten $Gain > 0$ für ein starkes Rauschen im Farbwinkel-Kanal. Ebenfalls von großer Bedeutung ist die Wahl der Belichtungszeit („ExposureTime“) und der Einstellung der automatischen Belichtungszeit („ExposureAuto“). Zwar führt eine kurze Belichtungszeit dazu, dass bei vollständig bedecktem Himmel nur wenige Details auf den Kamerabildern zu sehen sind, aber bei starker Sonneneinstrahlung sorgt der niedrig gewählte Wert für eine geringere Sonnenblindheit.

5.2.2 Segmentierung von Wolken und Himmel

Wie in Kapitel 4.2.4.3 bereits beschrieben, wird in dieser Arbeit die Segmentierung der Wolken mithilfe des Farbwinkels eingesetzt. Anhand von Probeaufnahmen kann empirisch ein Schwellwert für die Segmentierung festgelegt werden, indem die Farbwinkelwerte der Wolken und des Himmels verglichen werden. Ein zufriedenstellendes Ergebnis wird dabei durch einen Schwellwert von $H_{Schwellwert} = 160^\circ$ erreicht. Da OpenCV, anders als die übliche Definition, den Farbwinkel im Bereich zwischen $[0;180]$ verarbeitet, ergibt sich für den Schwellwert $S = 80$. In Abbildung 5.7 ist zu sehen, dass dieses Verfahren die Wolken ausreichend gut segmentieren kann.

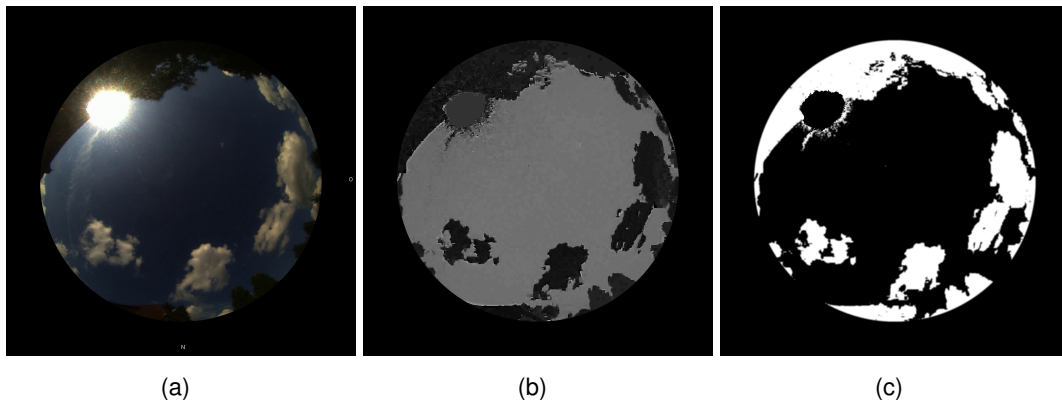


Abbildung 5.7: (a): Originalbild, (b): Darstellung des Farbwinkel-Kanals, (c): Farbwinkel-Kanal + Schwellwert-Operation ($S = 80$)

Es hat sich gezeigt, dass auch Objekte, die keine Wolken sind (z.B. Bäume oder Gebäude), als solche segmentiert werden. Um diese Objekte in der Berechnung nicht als Wolken zu berücksichtigen, müssen sie aus dem Bild entfernt werden. Dies kann durch eine geeignete Maske realisiert werden, da diese Objekte eine feste Position haben. Dazu muss einmalig eine Maske generiert werden, die die Gebäudeteile beinhaltet. Es ist zu beachten, dass eine neue Maske generiert werden muss, wenn die Kamera an einem anderen Standort zum Einsatz kommen soll.

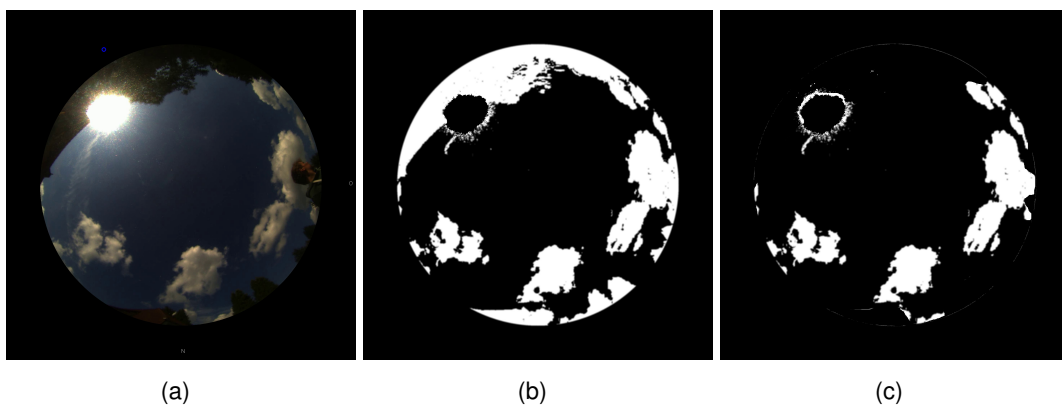


Abbildung 5.8: (a): Originalbild, (b): unmaskiertes Wolken-Bild, (c): maskiertes Wolken-Bild

5.2.2.1 Einteilung des Bildes in Sektoren

Da der Algorithmus nur die Außenkonturen der Wolken ermittelt, kann es zu Problemen durch Wolken in Ringform kommen. Es wird vom Algorithmus deshalb auch die erste untergeordnete Kontur ermittelt und diese bei der Betrachtung der Verdeckung berücksichtigt. Kommt es jedoch zu einer großen Ringstruktur, durch konstante Bewölkung am gesamten Horizont, während der Bereich in der Mitte des Bildes nur vereinzelt von Wolken bedeckt ist, hat der Algorithmus keine Möglichkeit dies zu bestimmen.

Um diese Situation korrekt beurteilen zu können, wird das Bild in mehrere Sektoren unterteilt. Dadurch werden Ringstrukturen in mehrere Wolken unterteilt und der Algorithmus kann die Situation besser interpretieren.

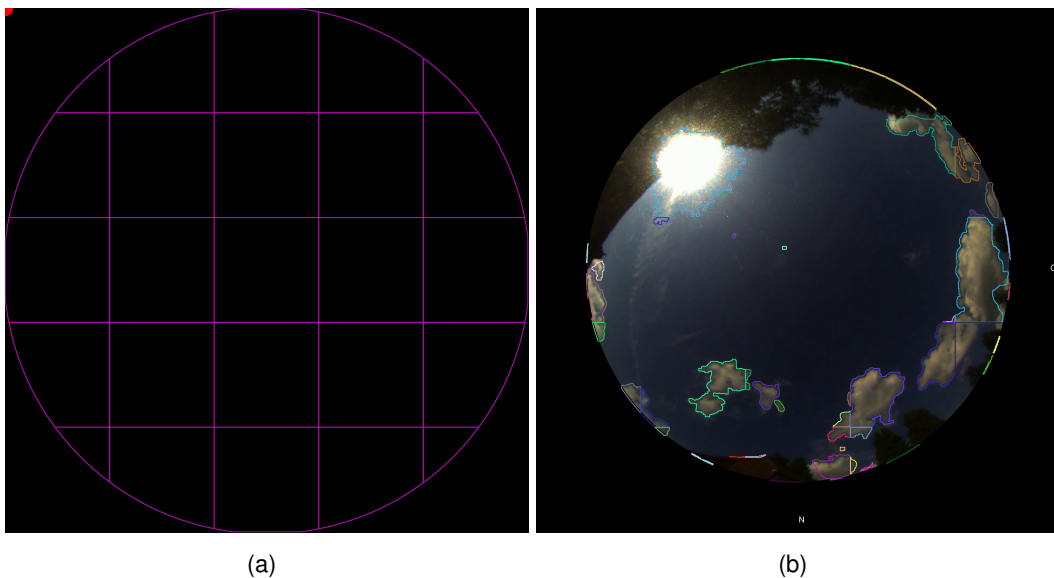


Abbildung 5.9: (a): Sektoren, (b): Sektoren während der Bewegungserkennung

5.2.2.2 Klasse Clouds

Um die Wolken als einzelne Objekte betrachten zu können, wird eine Klasse mit dem Namen „Clouds“ generiert. Diese beinhaltet eine Liste aller gefundenen Wolken-Konturen. Die vom Optical Flow berechneten Bewegungsspuren, können so den einzelnen Instanzen der Klasse Clouds und damit einzelnen Wolken zugeordnet werden. Für jede Instanz der Klasse Clouds werden die benötigten Informationen als Instanzvariablen gespeichert.

Zu diesen Informationen gehören beispielsweise:

- Die Kontur (Liste der Kontur-Punkte),
- der Mittelpunkt der Kontur,
- die zugeordneten Bewegungsspuren
- die Geschwindigkeit,
- ggf. die untergeordnete Kontur

5.2.3 Prognose der Bestrahlungsstärke

Für die Prognose der Bestrahlungsstärke wurden grundsätzlich die folgenden Annahmen getroffen:

1. Die Diffuse Strahlung ist über den Prognosezeitraum konstant, da sie von den Partikeln und Wolken am Himmel abhängig ist und deren Anzahl sich nicht sprunghaft ändert.
2. Eine vom Algorithmus erkannte Wolke, die sich zum Zeitpunkt t vor der Sonne befindet, sorgt dafür dass die direkte Strahlung den Wert $E_{direkt_t} = 0$ annimmt.

5.2.3.1 Berechnung der Sonnenposition

Die Sonnenposition wird mit Hilfe der aktuellen Zeit und des Längen- und Breitengrad des Kamerastandortes berechnet (Kapitel: 2.3). Die Funktion ist so implementiert, dass durch einen Funktionsparameter entschieden werden kann, ob die Position als X- und Y-Koordinate im Bild oder als Höhenwinkel und Azimut zurückgegeben wird.

5.2.3.2 Berechnung der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel

Die Berechnung der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel ist besonders dann nötig, wenn die Sonne zum Zeitpunkt der Prognose verdeckt ist, da dann keine Informationen über die Direktstrahlung zur Verfügung stehen, für die Zeiträume in denen die Sonne frei von Verschattung ist. Da es sich bei der berechneten Direktstrahlung nicht um einen real gemessenen Wert handelt, sondern um eine Abschätzung, wird diese in der weiteren Berechnung als \hat{E}_{dir} dargestellt.

5.2.3.2.1 Bestimmung der diffusen Strahlung

Da die Berechnung nur die Bestrahlung bei klarem Himmel berücksichtigt, kann sie nur für die Bestimmung der direkten Strahlung für den Prognosezeitraum genutzt werden.

Aus dem aktuellen Globalstrahlungswert kann mit dem Zusammenhang aus Formel 2.18 die aktuelle diffuse Strahlung auf der horizontalen Fläche berechnet werden. Unter der genannten Annahme, dass die diffuse Strahlung über den Prognosezeitraum konstant bleibt, kann diese für die Prognose verwendet werden.

5.2.3.2.2 Bestrahlung der geneigten Kollektoren und Bestimmung der Leistung

Aus der so bestimmten Bestrahlung für die horizontale Fläche kann die Bestrahlung auf die geneigten Kollektoren nach der Formel 2.17 berechnet werden.

Aus diesen Zusammenhängen, den Daten für die gemessene Globalstrahlung, der Sonnenposition und der Leistung der Photovoltaik-Anlage (01. Dezember - 11. Dezember 2017, siehe Anhang 3), kann für jeden Messwert die Bestrahlung auf den Kollektoren berechnet und der Zusammenhang zu der Leistung hergestellt werden.

Aufgrund der Wetterlage, war es nicht möglich die Zusammenhänge für sämtliche Bestrahlungsstärken aufzustellen. Es kam nur zu horizontalen Bestrahlungsstärken von maximal $E_{hor,max} = 325 \frac{W}{m^2}$.

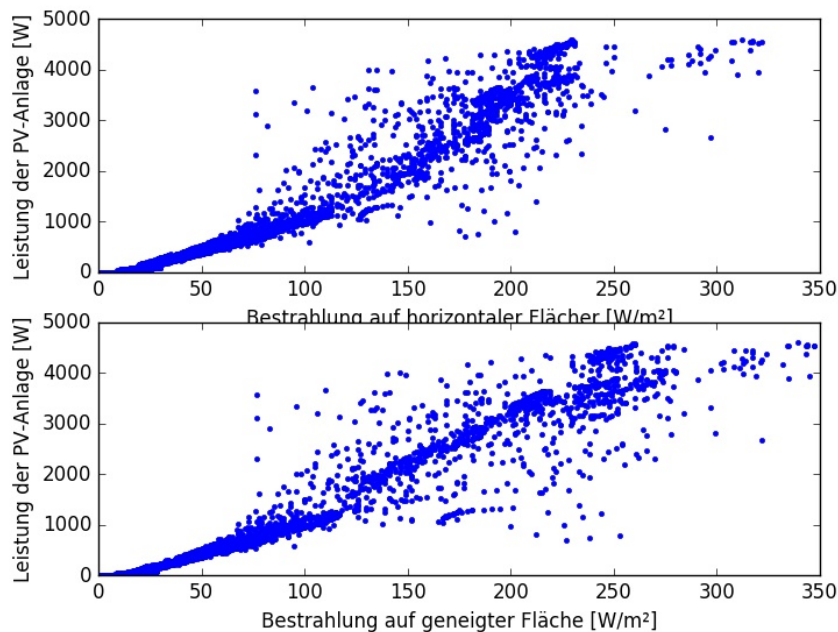


Abbildung 5.10: Bestrahlung auf horizontaler und geneigter Fläche

Mit den aufgenommenen Daten, kann eine Regressionskurve erstellt werden, mit der aus den voraussichtlichen Bestrahlungsstärken die voraussichtliche Leistung der Photovoltaik-Anlage berechnet werden kann.

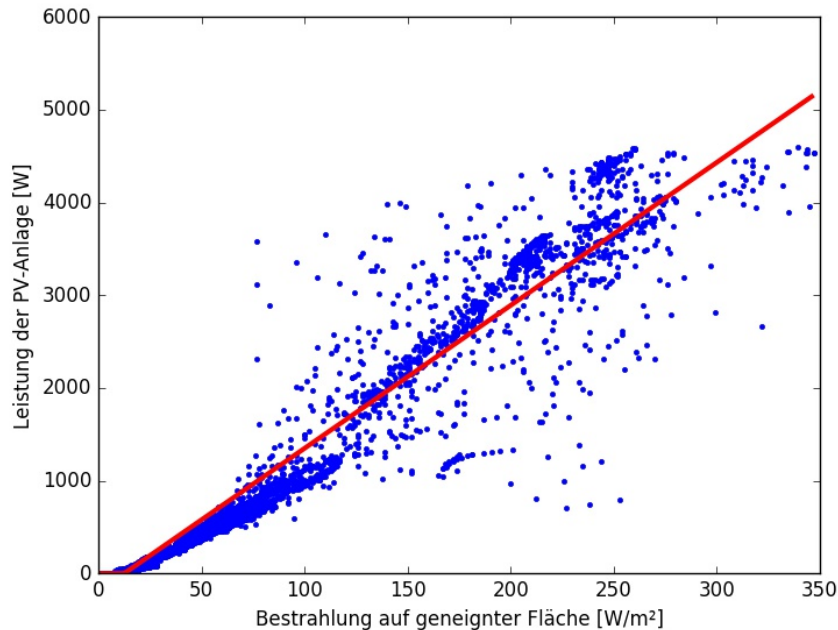


Abbildung 5.11: Regressionsgrade

Der Zusammenhang zwischen den Strahlungsdaten auf der geneigten Fläche, die mithilfe der Sonnenposition und der aufgenommenen Strahlung auf der horizontalen Fläche bestimmt wurden, und der Leistung der Photovoltaikanlage, lässt sich durch das Polynom $P(E_S)$ beschreiben:

$$P(E_S) = \begin{cases} 15,42 \cdot E_S - 192,25 & \text{falls } E_S \geq 12,5 \\ 0 & \text{falls } E_S < 12,5 \end{cases} \quad (5.8)$$

Aufgrund der Wetterbedingungen konnten nicht ausreichend Daten gesammelt werden, um eine Regressionskurve über den gesamten möglichen Bestrahlungsbereich zu erstellen. Darüber hinaus sind die für diese Kurve verwendeten Daten nicht von Ausreißern bereinigt. Für die Regression wurde im Bereich $E_S > 12,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ein Polynom 1.-Ordnung angenommen, jedoch ist es wahrscheinlich, dass eine höhere Ordnung zu einem befriedigenderen Ergebnis führt, sobald mehr Daten zur Verfügung stehen.

5.2.3.3 Bewegungsanalyse und Vorhersage

Für die Bewegungsanalyse kommt der Optical-Flow-Algorithmus zum Einsatz. Dieser ist nicht in der Lage Farbbilder zu verarbeiten, sondern nur Grau-Bilder. Da der Farbwinkel bereits für die Erkennung der Wolkenformationen einen zuverlässigen Ansatz darstellt, wurde dieser auch für die Berechnung des Optical Flow eingesetzt.

Über die jeweils aktuellsten Punkte der Bewegungsvektoren, die durch den Algorithmus berechnet werden, können diese den jeweiligen Wolken zugewiesen werden, indem geprüft wird, ob sich der Punkt innerhalb der Wolkenkontur befindet.

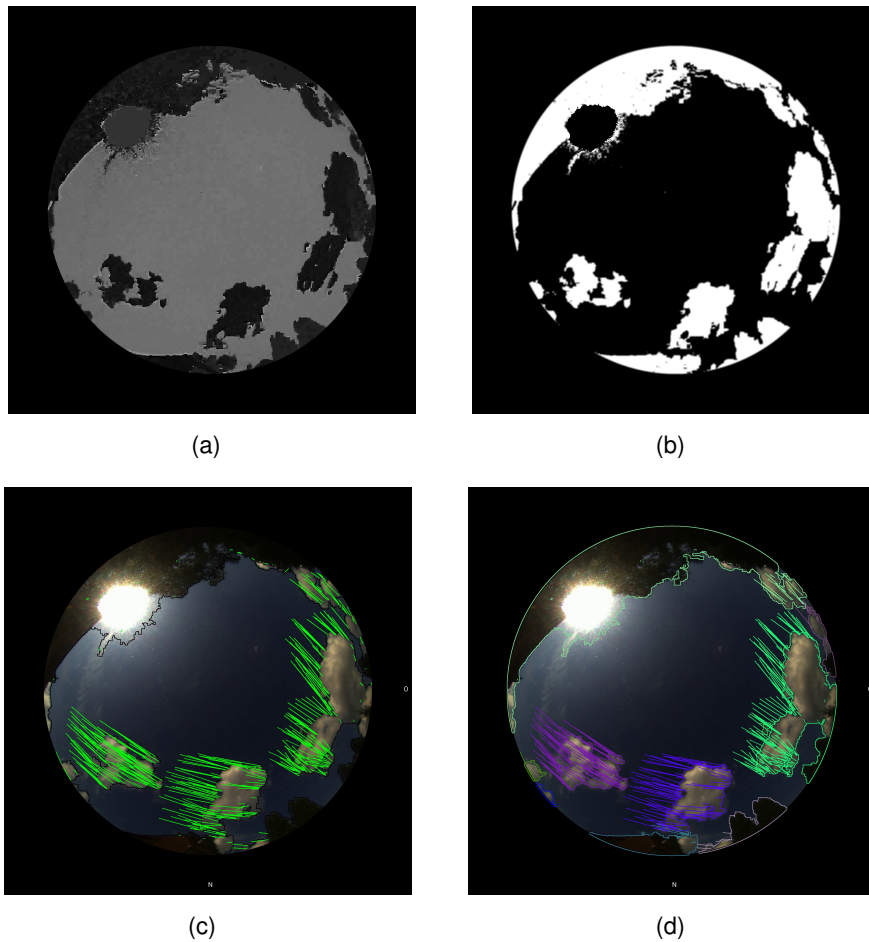


Abbildung 5.12: (a): Farbwinkel, (b): Schwellwert-Operation, (c): allgemeine Bewegungsvektoren, (d): Zugeordnete Bewegungsvektoren

Wie im Abschnitt 4.2.2 beschrieben, wird nicht das gesamte Bild entzerrt. Das bedeutet, dass die bestimmten Bewegungsspuren mit Verzeichnungen behaftet sind. Es reicht aus den jeweils ersten und letzten Punkt einer Bewegungsspur zu entzerren 2.4. Mit diesen Punkten, kann die entzerrte Geschwindigkeit $\mathbf{v}_{entzerrt}$ berechnet werden, indem die überbrückte Entfernung durch die Länge der Spur L geteilt wird.

$$\mathbf{v}_{entzerrt} = \frac{\begin{pmatrix} x_{L,entzerrt} - x_{0,entzerrt} \\ y_{L,entzerrt} - y_{0,entzerrt} \end{pmatrix}}{L} \quad (5.9)$$

Um die zukünftige Position einer Wolkenkontur zu bestimmen, wird der Mittelpunkt \mathbf{m}_{t_0} der Wolke entzerrt:

$$\mathbf{m}_{t_0,verzerrt} \mapsto \mathbf{m}_{t_0,entzerrt} \quad (5.10)$$

Dieser wird um den Vektor $\mathbf{s} = \mathbf{v}_{entzerrt} \cdot t_1$, mit verschoben und das Ergebnis wieder verzerrt. t_1 entspricht dabei dem zu betrachtenden zukünftigen Zeitpunkt:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_{t_0,entzerrt} + \mathbf{s} &= \mathbf{m}_{t_0,entzerrt} + \mathbf{v}_{entzerrt} \cdot t_1 = \mathbf{m}_{t_1,entzerrt} \\ \mathbf{m}_{t_1,entzerrt} &\mapsto \mathbf{m}_{t_1,verzerrt} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Aus den beiden Mittelpunkten für die Zeitpunkte t_0 und t_1 kann im Anschluss der verzerrte Vektor \mathbf{q} berechnet werden, der für die Verschiebung der gesamten Wolkenkontur genutzt wird.

$$\mathbf{q} = \mathbf{m}_{t_1,verzerrt} - \mathbf{m}_{t_0,verzerrt} \quad (5.12)$$

5.2.3.4 Verdeckung der Sonne und resultierende Bestrahlungsstärke

Bei der Prüfung, ob es innerhalb des Prognosezeitraumes zu einer Verdeckung der Sonne kommt, wird die Sonne als Liste von Punkten dargestellt, die sich aus ihrer Position und dem Sonnenradius ergibt. Innerhalb eines Zeitabschnittes, werden die Wolken um die entsprechenden verzerrten Bewegungsvektoren verschoben. Im Anschluss wird geprüft, wie viele der Punkte, die die Sonne repräsentieren, innerhalb der verschobenen Wolkenkontur liegen. Dabei gilt, zu Beginn eines Zeitabschnittes ist die Sonne nicht verdeckt. Sobald eine der verschobenen Konturen einen der Punkte verdeckt, wird dieser als Verdeckt vermerkt. So kann innerhalb eines Zeitabschnittes ein Punkt nicht mehrfach als verdeckt interpretiert werden, selbst wenn in dem Zeitabschnitt zwei Wolkenkonturen den Punkt verdecken. Der Verdeckungsgrad $covered_x$ des Zeitabschnittes $t_x = x \cdot \Delta T = x \cdot \frac{1}{f_{ps}}$ wird aus der Zahl der verdeckten Punkte $\#P_{verdeckt}$ im Verhältnis zu der Anzahl der Punkte $\#P_{Sonne}$ gebildet.

$$covered_x = \frac{\#P_{verdeckt_x}}{\#P_{Sonne_x}} \quad (5.13)$$

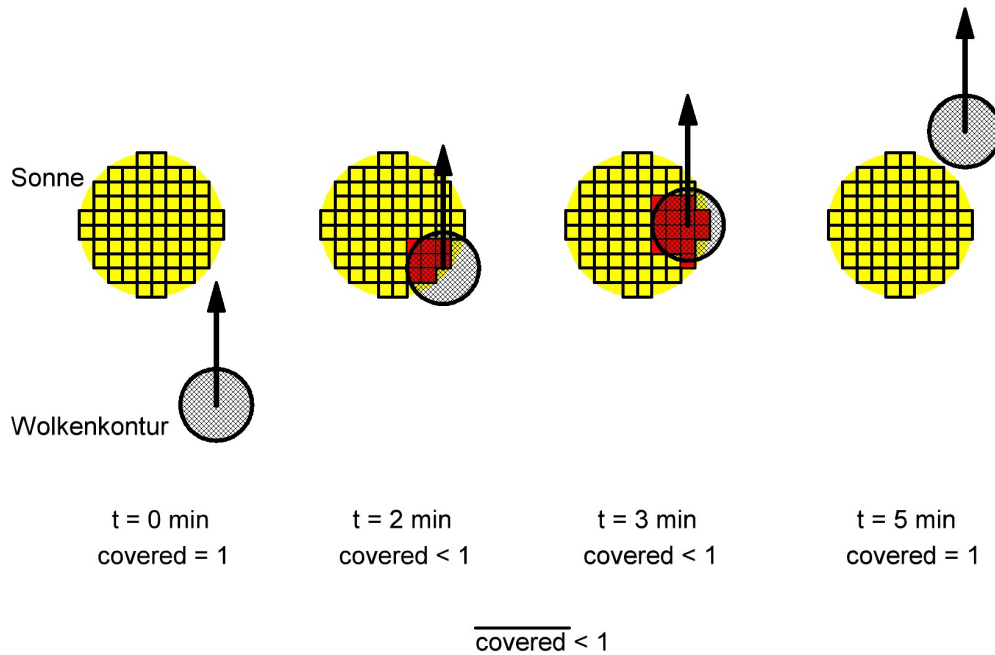


Abbildung 5.13: Verdeckung der Sonnen

So ergeben sich für die einzelnen Verdeckungsgrade $0 \leq covered_x \leq 1$. Für den gesamten Prognosezeitraum, werden die Verdeckungsgrade alle Zeitabschnitte gemittelt.

$$\overline{covered} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n covered_n = \sum_{i=0}^n \frac{\#P_{verdeckt_n}}{\#P_{Sonne_n}} \quad (5.14)$$

Die gemittelte prognostizierte Globalstrahlung ergibt sich mit dem Verdeckungsgrad $\overline{covered}$, der Berechneten Bestrahlung bei klarem Himmel \hat{E}_{dir} und der diffusen Strahlung zum Startpunkt der Prognose $E_{diff}|_{t=t_0}$ zu:

$$\hat{E}_G = \hat{E}_{dir} \cdot \overline{covered} + E_{diff}|_{t=t_0} \quad (5.15)$$

5.2.4 Programmablauf der Vorhersage

Die Vorhersage-Subprozesse folgen alle dem gleichen Ablauf. Nur die Zeiträume unterscheiden sich. Dadurch lassen sich die Prognosezeiträume mit wenig Aufwand anpassen.

Im ersten Schritt werden die Wolken vom Himmel segmentiert. Danach werden die einzelnen Bewegungsvektoren, die durch den „Optical Flow“-Algorithmus berechnet werden, den einzelnen Wolkenkonturen zugeordnet. Nach der Zuweisung der Vektoren wird aus diesen

die durchschnittliche Geschwindigkeit und Richtung der einzelnen Wolken bestimmt. Danach folgt die abschnittsweise Berechnung der Verdeckungsgrade, entsprechend Abschnitt 5.2.3.4.

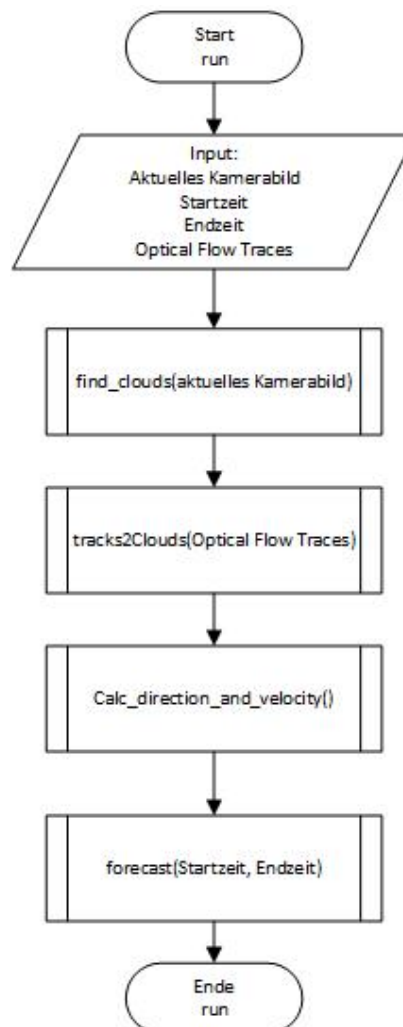


Abbildung 5.14: Ablaufdiagramm des Vorhersage-Subprozesses

Die Ablaufdiagramme der Unterprogramme sind im Anhang 4 zu sehen.

6 Implementierung und Test

6.1 Vorbereitung des Raspberry Pi

Der Raspberry wird mit dem Betriebssystem „Raspbian GNU/Linux 8 (Jessie)“ betrieben. Die verwendete Python-Version ist Python 3.4.2. Zusätzlich wird die Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV 3.0.0 installiert.

Um die Kamera mithilfe des Raspberry Pi ansteuern zu können, ist die Installation der Basler Pylon-Bibliothek notwendig. Dies kann der Anleitung „Dart USB Camera on Raspberry Pi with python and opencv“ (siehe Anhang 2) entsprechend durchgeführt werden.

6.2 Automatischer Start und Stopp der Software

Das System ist so auf dem Raspberry Pi eingerichtet, dass es die Software jeden Tag um 5 Uhr morgens startet. Gestoppt wird die Software dann, wenn nach 12 Uhr mittags der Höhenwinkel der Sonne $\gamma_s < 0$, also die Sonne unterhalb des Horizonts ist.

6.3 Coding-Style

Im gesamten Programmcode wird der PEP8-Coding-Style für Python eingehalten. Ausgenommen sind Funktionen aus offiziellen Bibliotheken wie OpenCV.

6.4 Konfiguration

Die Software verfügt über eine Konfigurationsdatei. In dieser sind sämtliche Kameraparameter, die die Kamera bei der Initialisierung vom Raspberry übermittelt bekommt, hinterlegt. Zusätzlich ist dort die Position der Kamera als Längen- und Breitengrad hinterlegt. Dies ermöglicht es die Kamera an einem anderen Standort zu montieren ohne die Software anpassen zu müssen. Auch der Verdrehungswinkel ζ ist dort hinterlegt und kann einem neuen Standort angepasst werden.

Neben den Systemparametern sind dort auch die Parameter für die Bewegungsanalyse und die Prognosezeiträume bzw. -takte der zwei vorhandenen Prognose-Subprozesse als zugängliche Variablen untergebracht. Dies soll geringfügige Anpassungen erleichtern.

6.5 Aufbau

Das System ist entsprechend der Konzeption auf einem Raspberry Pi 3 implementiert. Kamera, Raspberry Pi und der PoE-Splitter sind in dem Gehäuse verbaut. Die Kamera ist an der Befestigungsplatte (Abbildung 5.4) befestigt und darüber ausgerichtet. Um eine Verdrehung der Kamera zu verhindern, ist diese mit einem Klebepunkt fixiert. Um die senkrechte Ausrichtung der Kamera zu gewährleisten, ist zusätzlich eine Dosenlibelle auf der Platte montiert, die die Neigung des Systems anzeigt.

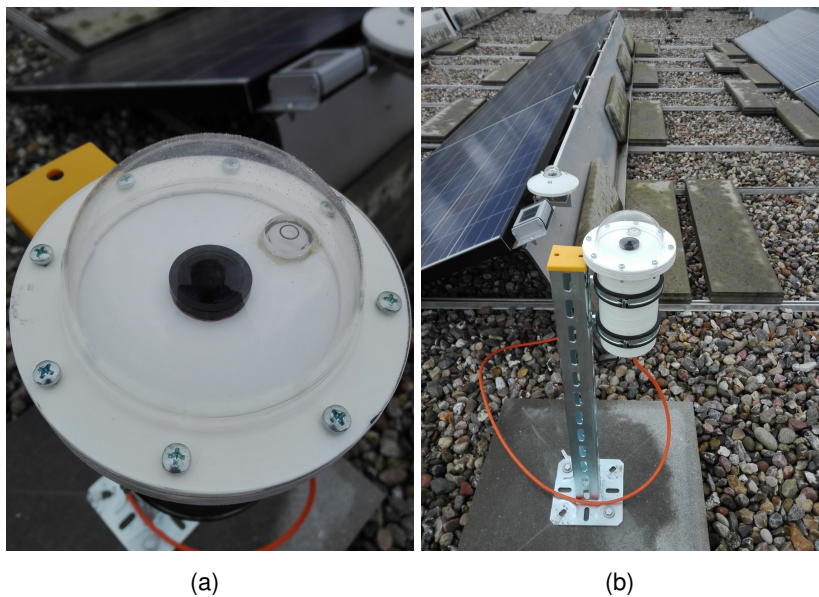


Abbildung 6.1: (a): Nahaufnahme des Systems, (b): Gesamtaufnahme des Systems

Zur Befestigung und Sicherstellung eines festen Standes, ist die Halterung auf eine Gehwegplatte geschraubt. Und das System ist mittels zweier Rohrschellen an der Halterung befestigt und ausgerichtet.

Die Versorgungsleitung, bestehend aus Netzwerk und PoE-Versorgung wird durch die Kabelkanäle der Photovoltaik-Anlage und ein Fallrohr in das Gebäude geführt. Da der Energie Campus Bergedorf CC4E noch nicht über einen PoE-fähigen Switch verfügt, wird die Versorgung durch einen zwischen den Server und die Versorgungsleitung geschalteten PoE-Injektor hergestellt.

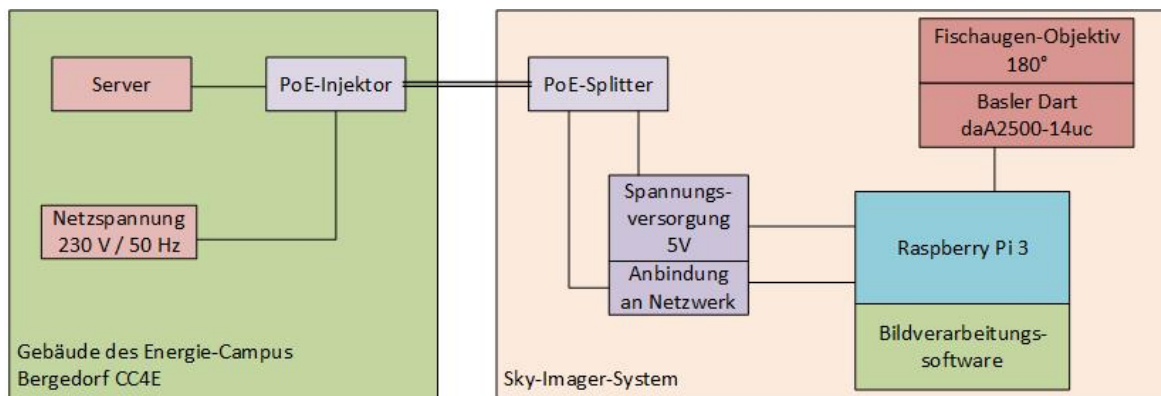


Abbildung 6.2: Blockschaltbild des Gesamtsystems

Die senkrechte Ausrichtung der Kamera kann durch die Dosenlibelle sichergestellt werden, jedoch bietet sie nicht die Möglichkeit zum Einnorden der Kamera. Zu diesem Zweck wurde der Verdrehungswinkel ζ eingeführt. Dieser korrigiert die X- und Y- Koordinate bei der Berechnung der Sonnenposition für eine beliebige Verdrehung der Kamera. Um den Wert für ζ zu bestimmen, wird ein eigens dafür entwickeltes Messprogramm eingesetzt. Dabei kann der Winkel ζ bei konstantem α verändert werden. Mithilfe dem Azimutwinkel des Mondes α_M und dem Messprogramm, kann der Verdrehungswinkel ζ bestimmt werden. Der Mond wird für diese Messung genutzt, da dieser die Kamera nicht überblendet und die Position somit besser im Bild zu erkennen ist.

6.6 Anbindung an die IT-Infrastruktur des Gebäudes

Das System kann zwar aus dem Netzwerk des Energie Campus Bergedorf CC4E Daten über die aktuelle Globalstrahlung und Leistung der Photovoltaik-Anlage beziehen, jedoch ist es aus Zeitgründen und aufgrund fehlender Berechtigungen nicht möglich auch die Veröffentlichung der Prognosen zu realisieren.

6.7 Test des Systems

Aufgrund der Jahreszeit und dem damit verbundenen Wetterbedingungen ist ein Test des Gesamtsystems nicht möglich. Jahreszeitbedingt gibt es kaum Tage an denen wenig oder keine Wolken am Himmel sind. Der Himmel ist annähernd dauerhaft vollständig bedeckt. Daher können nur die einzelnen Teilsysteme mit Hilfe von Videoaufnahmen auf ihre Funktion getestet werden.

6.7.1 Bestrahlung bei klarem Himmel

Die Berechnungen wurden nach den Formeln in Kapitel 2.3.3 umgesetzt und als Funktion implementiert. Diese Funktion wurde für einen Zeitraum von 24 Stunden mit einem Abstand von 5 Minuten aufgerufen und so ein Datensatz über die Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel erstellt. Diese Daten wurden dann mit professionell berechneten Daten verglichen [PS17].

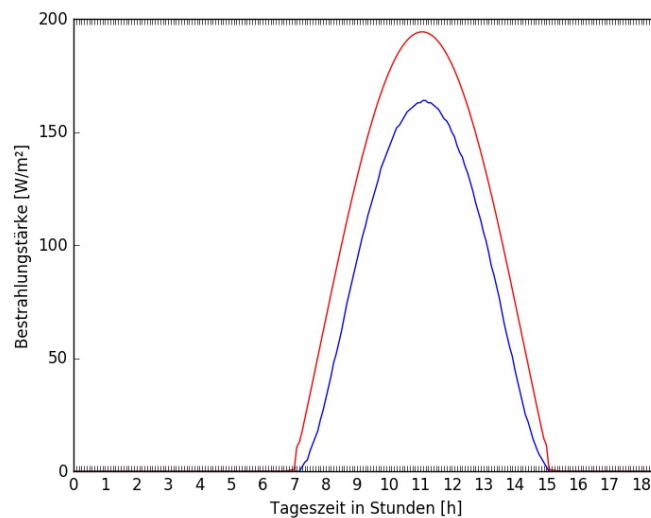


Abbildung 6.3: Vergleich der vom implementierten Algorithmus (blau) und der professionell Software (rot) berechneten Werte für die Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel (horizontale Ebene) - Daten des 22. November 2017

Es ist zu erkennen, dass eine Abweichung zwischen den Daten besteht. Da die exakte Berechnungsvorschrift der professionellen Software nicht bekannt ist, kann nicht weiter bestimmt werden, wodurch die Abweichung verursacht wird. Der wahrscheinlichste Faktor, der in Frage kommt, ist der Trübungsfaktor T_{LK} . Der implementierte Algorithmus nutzt aus historischen Daten bestimmte Trübungsfaktoren in Abhängigkeit des aktuellen Monats. Diese liegen im Bereich $T_{LK} = 3,2 \dots 4,2$. Zum Zeitpunkt der für den Vergleich genutzten Daten, wurde ein Trübungsfaktor von $T_{LK} = 3,3$ für die Berechnung verwendet. Eine gängige Annahme für den Trübungsfaktors in Europa ist der Wert $T_{LK} = 3$, es kommen jedoch auch andere Werte zum Einsatz. Ein weiterer möglicher Faktor ist, dass bei dem implementierten Algorithmus auf den Korrekturfaktor für die mittlere Sonnenentfernung verzichtet wird.

6.7.2 Segmentierung von Wolken und Himmel

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Segmentierung von Wolken und Himmel in den meisten Fällen korrekt funktioniert.

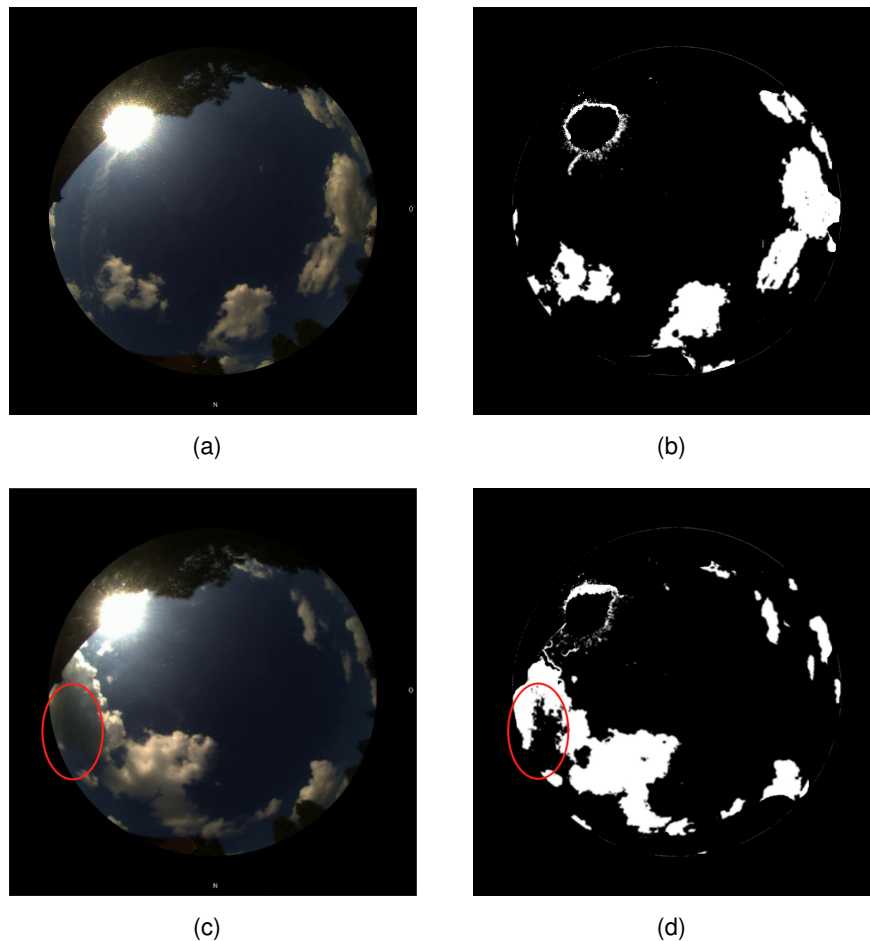


Abbildung 6.4: (a),(c): Originalbild, (b),(d): erkannte und nicht erkannte Wolken

Jedoch gibt es Einschränkungen bei der Segmentierung:

- Wolken die eine bläuliche Farbe haben, werden von dem Algorithmus nicht als Wolken segmentiert. Dies ist auf den Ansatz des Farbwinkels zurückzuführen, da dadurch alle blauen Flächen als Himmel erkannt werden. Dieses Phänomen taucht gelegentlich auf der sonnenabgewandten Seite einer Wolke auf, die von der Sonne direkt angestrahlt wird (Abbildung 6.5, (c) und (d)).
- Bei Abendrot, kann der Algorithmus nicht sicher die Wolken segmentieren. Da die rote Farbe einen Farbwinkel von $345^\circ - 15^\circ$ besitzt. Rote Flächen, die einen Farbwinkel

von $345^\circ - 15^\circ$ aufweisen, werden auf Grund des Schwellwertes nicht als Himmel interpretiert.

- Die „Blaue Stunde“ sorgt dafür, dass annähernd sämtliche Wolken eine bläuliche Färbung annehmen. Diese kann der Algorithmus ebenfalls nicht korrekt interpretieren.
- Der Bereich direkt um die Sonne, wird in den Bildern häufig als Wolke interpretiert. Dies ist auf die Werte der RGB-Kanäle zurückzuführen, die dort häufig sehr groß sind und durch die Sonnenblindheit der Kamera verursacht werden. Diese können von dem Algorithmus nicht korrekt bewertet werden Da dort der Farbwinkel sehr starken Schwankungen unterliegt.

6.7.3 Bewegungsanalyse und Vorhersage

Um die Bewegungsanalyse und die daraus resultierende Vorhersage zu bewerten, wurden die Bilder der Wolkensegmentierung für zwei Zeitpunkte aufgenommen. Zusätzlich wurde die zu den jeweiligen Zeitpunkten berechnete Verschiebung der Wolken aufgezeichnet. In der Abbildung ist der Vergleich zwischen der Vorhersage der Wolkenkonstellation bei einem Prognosehorizont von 30 Sekunden und die tatsächliche Wolkenkonstellation 30 Sekunden später dargestellt.

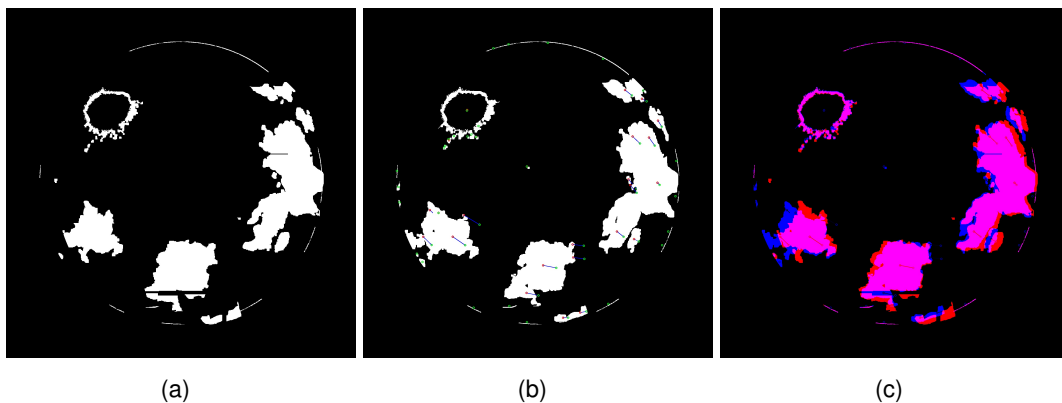


Abbildung 6.5: (a): Vorhersage t_0 , (b): tatsächliche Wolkenkonstellation $t_0 + 30$ Sekunden, (c): Vergleich der Vorhersage und der Realität

Es ist zu erkennen, dass die Prognose und die Realität nicht übereinstimmen. Dies ist darin begründet, dass der Algorithmus die Veränderung der Wolkenform nicht berücksichtigen kann. Das dargestellte Beispiel ist eine Vorhersage über 30 Sekunden. Es ist anzunehmen, dass die Veränderung der Wolkenform über Prognosezeiträume von mehreren Minuten noch stärker ist. Dies beeinflusst in hohem Maße die Genauigkeit der Prognosen.

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption und Entwicklung eines kamera-basiertes Embedded-System zur Vorhersage von Leistungserträgen der Photovoltaik-Anlage des Energie Campus Bergedorf CC4E zur Unterstützung der Netzsteuerung und des Energiehandels.

Aufgrund der Jahreszeit und den daraus resultierenden Wetterbedingungen kann die vollständige Funktion des Systems nicht getestet werden und es sind nur die Teilsysteme Segmentierung der Wolken vom Himmel, Bewegungsanalyse, Bewegungsvorhersage und Berechnung der Bestrahlungsstärke bei klarem Himmel auf ihre Funktion geprüft.

Dabei zeigt sich, dass die Nutzung des Farbwinkels für die Segmentierung nur in Grenzen zuverlässig ist. Die Bewegungsanalyse mittels Optical Flow zeigt hingegen positive Resultate. Zwar unterliegt die Vorhersage der Wolkenbewegungen gewissen Abweichungen, die jedoch meist durch die Veränderung der Wolkenform hervorgerufen werden.

Es zeigt sich, dass diese Veränderung der Wolkenform und die Position der Sonne einen bedeutenden Einfluss auf den möglichen Prognosezeitraum haben. Durch die stetige Veränderung der Form, ist es annähernd unmöglich die Wolkenkonstellation vorherzusagen, die sich in 45 Minuten ergeben wird.

Steht die Sonne im Westen, ist die Möglichkeit einer Prognose ebenfalls stark eingeschränkt. Da durch den in Deutschland vorherrschenden Westwind meist eine Wolkenbewegung von Westen nach Osten vollzogen wird und die Wolken, die sich hinter dem Horizont befinden, nicht im Erfassungsbereich der Kamera liegen. Somit eignet sich das System nicht für zuverlässige Vorhersagen über 45 Minuten, die für den Energiehandel benötigt werden. Da keine Möglichkeit zum Test des Systems besteht, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Prognosen für die Netzsteuerung ausreichend genau sind.

Bei der Berechnung der Leistungserträge aus der Bestrahlungsstärke stehen nicht ausreichend Daten zur Verfügung. Die berechneten Zusammenhänge gelten nur bei geringen Bestrahlungsstärken, da keine Daten über die Leistung der Anlage bei höheren Bestrahlungsstärken zur Verfügung stehen. Die historischen Daten der Anlage bieten nur Informationen über die horizontale Bestrahlung, die ohne die dazugehörige Sonnenposition nicht auf die geneigte Fläche umgerechnet und somit nicht für die Bestimmung der Zusammenhänge genutzt werden können.

Aus Zeitgründen ist das System nicht vollständig in das Netzwerk des Energie Campus Bergedorf CC4E integriert. Es bezieht Daten über die aktuelle Bestrahlungsstärke, jedoch kann es aufgrund von fehlenden Berechtigungen die Prognosen nicht veröffentlichen. Die erstellten Prognosen werden zurzeit nur lokal auf dem Bildverarbeitungsrechner gespeichert.

7.2 Ausblick

Das System bietet ein hohes Verbesserungspotential. So kann die Segmentierung der Wolken vom Himmel mittels eines modifizierten Ansatzes deutlich verbessert werden. Es besteht zum Beispiel die Möglichkeit den Bereich um die Sonne gesondert zu betrachten und dort andere Bedingungen zu definieren, sodass auch dort Wolken zuverlässiger erkannt werden. Auch der Einsatz eines Neutraldichte-Filters ist denkbar, dieser kann die unter Umständen die Sonnenblindheit minimieren und somit die Segmentierung der Wolken im Bereich um die Sonne verbessern.

Das größte Hindernis bei der Erstellung von Prognosen für längere Zeiträume ist die Veränderung der Wolkenform über der Zeit. Es ist ein Algorithmus denkbar, der die Veränderung der Wolkenform in der Vergangenheit aufzeichnet und damit eine Abschätzung der zukünftigen Veränderung erstellt. Dadurch sind unter Umständen deutlich längerfristige und genauere Prognosen möglich. Es ist jedoch anzunehmen, dass dafür ein Bildverarbeitungsrechner mit größerer Rechenleistung benötigt wird.

Eine weitere Verbesserung stellt es da, die Strukturen der Wolken und somit zu bestimmen, ob eine Wolke tatsächlich zu einem vollständigen Abfall der direkten Solarstrahlung führt, oder diese nur verringert wird. Es kann beispielsweise eine Klassifizierung der Wolken implementiert werden. Anhand dieser kann unter Umständen ein genauerer Einfluss einer Wolke auf die direkte Solarstrahlung prognostiziert werden.

Auch die Anbindung an das bestehende Netzwerk des Energie Campus Bergedorf CC4E kann mit geringfügigem Aufwand realisiert werden. Die Anbindung an den Server besteht bereits, es müssen nur die nötigen Berechtigungen vergeben werden und das System umgestellt werden, sodass die Daten nicht weiterhin lokal gespeichert, sondern in das System des Energie Campus Bergedorf CC4E übermittelt werden. Aktuell berechnet und speichert das System Prognosen über die zukünftigen Verdeckungsgrade und die resultierende horizontale Bestrahlungsstärke. Im Zuge der Änderungen zur Veröffentlichung, muss der Algorithmus angepasst werden, sodass er die Leistungsprognosen veröffentlicht. Entsprechende Funktionen dafür sind bereits implementiert.

Die genannten Verbesserungspotentiale bieten Raum für geeignete Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Anhang

Der Anhang zur Arbeit befindet sich auf der beigefügten CD und kann bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Dahlkemper oder Prof. Dr.-Ing. Florian Wenck eingesehen werden.

Literaturverzeichnis

- [BA17] BASLER-AG: *Produktinformationen Basler Dart daA2500-14uc*. <https://www.baslerweb.com/de/produkte/kameras/flaechenkameras/dart/daa2500-14uc/>, 2017. – [Online; Zugriff 20. November 2017]
- [Bau17] BAUER, Stefan: *Wolken Online*. <http://www.wolken-online.de/wolkenatlas.htm>, 2017. – [Online; Zugriff 11. August 2017]
- [Con11] CONVERSATION, Madden-Julian: *A visit to AMF2 site*. <http://maddenjulianconversation.blogspot.de/2011/10/we-are-modelers-in-field-program.html>, 2011. – [Online; Zugriff 7. Dezember 2017]
- [Dev17a] DEVELOPMENTTEAM, OpenCV: *OpenCV Color Conversions*. https://docs.opencv.org/3.2.0/de/d25/imgproc_color_conversions.html, 2017. – [Online; Zugriff 7. Dezember 2017]
- [Dev17b] DEVELOPMENTTEAM, OpenCV: *OpenCV Dokumentation*. <https://docs.opencv.org/3.0-beta/genindex.html>, 2017. – [Online; Zugriff 15. November 2017]
- [DK17] DAHLKEMPER, Prof. Dr.-Ing. ; KÖLZER, Prof. Dr.-Ing.: *Angewandte Industrielle Bildverarbeitung (AIBV)*. Vorlesungsscript, 2017
- [EFK⁺07] ERBRECHT, "R. ; FELSCH, M. ; KÖNIG, H. ; KRICKE, W. ; MARTIN, K. ; PFEIL, W. ; WINTER, R. ; WÖRSTENFELD", W.: *Das große Tafelwerk - interaktiv*. 1. Auflage. Cornelsen Verlag, 2007. – ISBN 978-3-464-57143-9
- [Fan09] FANTUGAS: *Wikipedia: Verzeichnung*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Verzeichnung#/media/File:Verzeichnung3.png>, 2009. – [Online; Zugriff 2. Dezember 2017]
- [GBE12] GAUCHET, Charlotte ; BLANC, Philippe ; ESPINAR, Bella: *Surface solar irradiance estimation with low-cost fish-eye camera*. 05 2012. – 4 S.
- [Gra14] GRAEBER, Dietmar R.: *Handel mit Strom aus erneuerbaren Energien*. 1. Auflage. Springer Verlag, 2014. – ISBN 978-3-658-03642-3
- [Hat17] HATFIELD, Doug: *Image demonstrating the principle of optical flow*. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Optical_flow_example_v2.png, 2017. – [Online; Zugriff 7. Dezember 2017]

- [Hun06] HUNGERHIRN: *Wikipedia: Blooming*. https://de.wikipedia.org/wiki/Blooming#/media/File:Blooming_ccd.jpg, 2006. – [Online; Zugriff 22. Oktober 2017]
- [Kle13] KLEISSL, Jan: *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. 1. Auflage. Elsevier Inc., 2013. – ISBN 978-0-12-397177-7
- [Klo16] KLOSE, Brigitte: *Meteorologie - Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. 3. Auflage. Springer Verlag, 2016. – ISBN 978-3-662-43621-9
- [Lan16] LANGE, Ingo: *Verwendung der Kamera VIVOTEK FE8174V als Wolkenkamera*. https://wettermast.uni-hamburg.de/Downloads/Wolkenkamera_FE8174V.pdf, 2016. – [Online; Zugriff 17. Oktober 2017]
- [LB14] LIENIG, Jens ; BRÜMMER, Hans: *Elektronische Gerätetechnik*. 1. Auflage. Springer Verlag, 2014. – ISBN 978-3-642-40962-2
- [Mer11] MERTENS, Konrad: *Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*. 1. Auflage. Hanser Verlag, 2011. – ISBN 978-3-446-44232-0
- [Mün05] MÜNCH, Patrick: *Optischer Fluss für Videosequenzen*. https://www10.cs.fau.de/publications/theses/2005/Muench_SA_2005.pdf, 2005
- [Pra17] PRATZNER, Axel: *Das Objektiv der Digitalkamera*. <https://www.foto-kurs.com/objektiv-digitalkamera.htm>, 2017. – [Online; Zugriff 15. November 2017]
- [PS17] PARISTECH, MINES ; SoDA, Transvalor D.: *Solarstrahlungs-Daten*. <http://www.soda-pro.com/de/web-services/radiation/helioclim-3-real-time-and-forecast>, 2017. – [Online; Zugriff 22. November 2017]
- [Qua13] QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme*. 8. Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, 2013. – ISBN 978-3-446-43526-1
- [SG00] SCHARMER, K. ; GREIF, J.: *THE EUROPEAN SOLAR RADIATION ATLAS - Vol. 1: Fundamentals and maps*. 11. Auflage. Intech, 2000
- [Sys17a] SYSTEMS, Midwest O.: *Homepage*. <http://midopt.com/filters/bp550/>, 2017. – [Online; Zugriff 22. Oktober 2017]
- [Sys17b] SYSTEMS, Yankee E.: *Homepage*. <http://www.yesinc.com/products/cloud.html>, 2017. – [Online; Zugriff 17. Oktober 2017]
- [Umw17] UMWELTBUNDEAMT: *Erneuerbare Energien in Deutschland Daten zur Entwicklung im Jahr 2016*. Publikation, 2017

- [Wil17] WILLBERGER, Benjamin: *Motion Detection and Analysis in Surveillance Videos for Prevention of False Alarms*. Masterthesis, 2017
- [Yun12] YUN, Ilgu: *Photodiodes - From Fundamentals to Applications*. École des Mines de Paris, 2012. – ISBN 978–953–51–0895–5

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 18. Dezember 2017

Ort, Datum

Unterschrift