Advisor: Prof. Dr. Klaus Zahn  
Coadvisor: Dipl. El. Ing. Andreas Rumsch

Experte: Marco Hauri

**MSE - Masterthesis**

im Studiengang  
Elektro- und Informationstechnik

vorgelegt von

**Attila Horvath**

am 01.02 2019   
an der Hochschule Luzern Technik & Architektur

*ProSekKa* – Prognose der Sonneneinstrahlung mit einer kostengünstigen Kamera

# Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel: „ProSekKa – Prognose der Sonneneinstrahlung mit einer kostengünstigen Kamera“, selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Horw, den 4.Dezember 2018 Attila Horvath

# Kurzfassung

Schnell vorbeiziehende Wolkenfelder erzeugen hohe kurzfristige Schwankungen der Sonnenstrahlung, typisch im Bereich weniger Sekunden. Die so entstehenden schnellen Änderungen der Leistungsabgabe von PV-Anlagen können kritische Rückwirkungen auf das elektrische Versorgungsnetz haben.

Für die Vorhersage der Sonneneinstrahlung werden unterschiedliche Methoden und Modelle für verschiedene Zeithorizonte verwendet. Häufig werden physikalische Modelle, basierend auf Satellitenbeobachtung, zur Vorhersage eigesetzt.

Solche Vorhersagen verfügen jedoch nicht über die räumliche und zeitliche Auflösung, um Kurzfristprognosen im Bereich von wenigen Minuten zu erstellen, da die genaue Position und Struktur der Wolken nur ungenügend genau vorhergesagt werden kann.

Total Sky Imagers oder kurz Sky Cameras zu Deutsch Himmel-Kameras, bieten die geforderte räumliche und zeitliche Auflösung für Kurzfristprognosen von 5 bis 30 Minuten. Mit den Mitteln der Bildverarbeitung können Wolken erkannt, Richtung und Geschwindigkeit bestimmt, sowie die momentane Sonneneinstrahlung berechnet werden.

Ziel der hier vorgestellten Arbeit ist die Entwicklung einer preisgünstigen Wolkenkamera, zur kurzzeitigen Vorhersage der Sonneneinstrahlung. Für den Bau der Sky Camera wurden Handelsübliche Komponenten verwendet. Zum Einsatz kamen ein Raspberry Pi Entwicklungsboard sowie ein Raspberry Pi Kamera Modul V2, mit einem günstigen Fischaugen-Objektiv. Die Software wurde vollständig in Python implementiert, da diese eine Vielzahl von nützlichen Bibliotheken bietet, wie zum Beispiel OpenCV oder SunPy.

Erwähne die HDR Bilder oder die autoexposure

**Was wurde Erreicht und wo liegen die Schwerpunkte dieser Arbeit?** Die Arbeit versucht zu klären in welchem Masse mit einfachen Mitteln eine Vorhersage der Solarstrahlung möglich ist. Kurz auf die Methodik eingehen -> paper Lopez Miguel Thomas\_Haase.

**Schlagwörter**: Wolken Kamera, HDR Bilder, Vorhersage der Sonneneinstrahlung, Wolken Position,   
Wolken Identifikation, optischer Fluss, Kamera Kalibrierung, Raspberry Pi

Die Abbildungsnummern stimmen nicht in der Nummerierung – Da neue Abbildungen in der Zwischenzeit hinzugekommen sind -> Prüfen ! !

# Abstract

In May 2017, as part of the Energy Strategy 20150, Switzerland decided for a phased withdrawal from nuclear energy. In the future, renewable energies such as water and wind power as well as solar energy will be increasingly promoted.

Motivated by falling prices and increasing efficiency, the number of privately owned photovoltaic systems is steadily increasing. At the end of 2016, the photovoltaic capacity amounted to approx. 1.5 GW, which corresponds to a total area of around 11.

Fast moving cloud fields generate high short-term fluctuations in the radiation, typically in the range of a few seconds. The resulting rapid changes in the power output of PV systems can have severe effects on the electric power grid system. In particulary, satelite images and physics based models are commonly used for prediction. However, such predictions do not have the spatial and temporal resolution to produce short-term forecasts in the range of a few minutes, since the exact position and structure oft the clouds can not be predicted with the accuracy needed.

Images from total sky cameras, can provide the required spatial and temporal resolution for short-term forecasts from 5 to 30 minutes. By means of image processing, clouds can be detected and tracked. Knowing their direction and speed, as well as the suns position, present solar irradiance can be determined.

Aim of the presented work is the development of a low-cost total sky-imager for short-term solar irradiance forecasts.

**Keywords:** total sky imager, HDR imaging, irradiance forecasting, cloud tracking, cloud identification, optical flow, camera calibration, raspberry pi

# Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung 2

Kurzfassung 3

Abstract 4

Inhaltsverzeichnis 5

Abbildungsverzeichnis 7

Tabellenverzeichnis 7

Abkürzungsverzeichnis 8

1 Einleitung 9

1.1 Motivation 9

1.2 Zielsetzung 10

2 Ursache und Wirkung der PV-Variabilität 11

2.1 Wolken 11

2.2 Intermittenz der Solarenergie 12

2.3 Zeitliche Auflösung zur Erfassung der Intermittenz 13

3 Solare Strahlung 14

3.1 Einfluss der Erdatmosphäre 15

3.2 Globale, direkte und diffuse Strahlung 16

3.2.1 Messung der direktnormalen Sonnenstrahlung 17

3.2.2 Messung der globalen Sonnenstrahlung 18

3.2.3 Messung der diffusen Sonnenstrahlung 18

3.2.4 DNI und zirkumsolare Sonnenstrahlung 18

3.3 Solarmessgeräte 18

3.3.1 Pyranometer 18

3.3.2 Pyrheliometer 19

3.4 Dreidimensionale Effekte in der Kurzeit Vorhersage 20

3.5 Auflösung 20

3.5.1 Für die Auswahl der Optik bestimmende Faktoren 20

3.5.2 Bildwinkel 20

3.5.3 Optische Verzerrung 20

3.5.4 Die Verwendung eines Fischaugenobjektivs 20

3.6 Bildverarbeitung 21

3.6.1 Eigenschaften einer Weitwinkelaufnahme 21

3.6.2 CCD 21

4 Sky Cameras - Stand der Technik 22

5 Übersicht solarer Vorhersage Methoden 25

5.1.1 Klassifikation solarer Vorhersage Methoden 26

6 Anforderungen an die Sky Camera 27

6.1 Leuchtdichte 27

6.2 Dynamikbereich 28

6.3 HDR – High Dynamic Range Fotografie 29

6.4 RAW vs. JPEG 32

6.5 Evaluation 32

7 Konzept der Vorhersage 34

8 ProSekKa Sky Camera 35

8.1 Allgemeiner Aufbau der ProSekKa Sky Camera 35

8.2 Ground Truth 36

8.3 Datensätze 38

8.4 Hardware und Aufbau der ProSekKa Sky Camera 39

8.4.1 Bestandteile der Sky Camera 40

8.4.2 Kameradom Heizung 40

8.4.3 Sensoren 41

8.4.4 Kontaktloses Infrarotthermometer MLX90614 41

8.4.5 Entfeuchtungsanlage 42

8.5 Software und Algorithmen 44

8.5.1 Software zur Sensordatenerfassung 45

8.5.2 Software der Kamerasteuerung 45

8.5.3 Software zur Wolkendetektion 45

8.5.4 YCbCr-Farbraum 46

8.5.5 Postprocessing 46

9 Schlussfolgerungen und Ausblick 48

10 Risikoanalyse 49

Anhang A: Beispiele für die Gliederung von Abschlussarbeiten 50

A.1 Literaturarbeiten 50

A.2 Systementwicklungen 50

Anhang B: Formatvorlagen 51

Glossar 52

Quellenverzeichnis 53

Stichwortverzeichnis 55

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Intensität der Sonnenstrahlung, im Vergleich zur Emission eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 5’900 K [10]. 14

Abbildung 2: Komponenten der Solaren Strahlung [11, S. 61] 15

Abbildung 3: Strahlungsbilanz der Erde Abb. 3.8 [12, S. 75] 15

Abbildung 4: Sonnenzenitwinkel, Elevation und Azimut[9, S. 15] 16

Abbildung 5: Globale, direkte und diffuse Strahlung an einem wolkenfreien Tag[9, S. 24]. 16

Abbildung 6: Um16:00 blockiert eine Wolke den direkten Anteil. GHI entspricht nun der DHI[9, S. 78]. 17

Abbildung 7: Links: Pyranometer mit thermischen Sensor, rechts: Pyranometer mit Silizium-Halbleitersensor Abb. 2.29 [11, S. 84]. 19

Abbildung 8: Pyrheliometer, links schematische Darstellung. 19

Abbildung 9: Erweiterung des Vorhersagehorizontes durch Kombination mehrerer Sky Cameras. 22

Abbildung 10: Tatsächlicher Dynamikbereich, bestimmt durch das Grundrauschen [18, S. 34] 29

Abbildung 11 : Varianz der Bildpixel gegen die Belichtungszeit [18, S. 27] 29

Abbildung 12: Aus den Bilder 1,2,3, aufgenommen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten, wird eine charakteristische Ansprechkurve (CRF) berechnet. Dabei verschiebt man die einzelnen Teile der Kurve solange, bis diese in eine glatte Kurve übergehen [20, S. 484]. 31

Abbildung 13: Kombination einzelner LDR Bilder zu einem HDR Bild [21, S. 3]. Sowie Kompression des Dynamikumfangs, zur Darstellung auf einem Bildschirm. 31

Abbildung 14: CRF aufgezeichnet für den Sony IMX219 Bildsensor. 32

Abbildung 15 : Schematischer Aufbau der ProSekKa Sky Camera. 35

Abbildung 16: Lageplan Hochschule Luzern für Technik und Architektur 36

Abbildung 17: Links Messung der diffusen und rechts der globalen Strahlung. 37

Abbildung 18: Messstation und Datenerfassung 37

Abbildung 19: Zusammenfassung der Bodenmessstation Luzern in der Allmend. 38

Abbildung 20: Kunststoffkoffer KK-S1 von Fireking, als Kamera Gehäuse. 39

Abbildung 21: Sky Camera geschlossen und geöffnet, mit eingebauter Hardware im Inneren der Kamera. 39

Abbildung 22: Bestandteile der Sky Camera 40

Abbildung 23: Links: Detailaufnahme Objektiv, Sensoren und Widerstandsheizung unter der Acrylkuppel. Rechts: Infrarot Aussenthermometer MLX90614 zur Detektion von Wolken. 41

Abbildung 24: Links Aufsicht und rechts Seitenansicht der Entfeuchtungsanlage. 43

Abbildung 25: Links: geöffnete Entfeuchtungsanlage. Rechts: Entfeuchtungsanlage von vorne. 43

Abbildung 26: NPN Transistor in Emitterschaltung zum Ein- und Ausschalten des Lüfters. 43

Abbildung 27: Molekularsieb Perlen, zur scharfen Trocknung, feuchter Luft. 44

Abbildung 28: Wolken-Kamera auf dem Dach des IHomeLab. 47

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die vier Hauptgruppen der Wolkentypen [3] 11

Tabelle 2: Typische Werte der Leuchtdichte, natürlicher Quellen [15]. 27

Tabelle 3: Spezifikationen des CMP11 Pyranometers von Kipp and Zonen 37

Tabelle 4: Spezifikationen Melexis MLX90614ESF-BCI. 41

Tabelle 5: Aufstellung der wichtigsten Formatvorlagen der Dokumentvorlage 51

# Abkürzungsverzeichnis

Sonnenstrahlung

AM Air Mass   
GHI Global Horizontal Irradiation  
DNI Direct Normal Irradiation  
DHI Diffuse Horizontal Irradiation

Bild bezogen

HDR High Dynamic Range

RGB Red, Green, Glue – Color Space

Verschiedenes

HSLU Hochschule Luzern

# Einleitung

Das iHomeLab der Hochschule Luzern ist Schweizer Denkfabrik und Forschungszentrum für Gebäudeintelligenz. Der Schwerpunkt der Forschung am iHomeLab liegt in den beiden Themenbereichen „Smart Energy Management“ (SEM) und „Ambient Assisted Living“ (AAL). In beiden Bereichen werden mittels Netzwerken verschiedener Sensoren Daten vom Gebäude, den Bewohnern und der Umgebung gesammelt, um damit das Gebäude energieeffizienter, sicherer und komfortabler, oder anders gesagt, intelligenter zu machen.

Eine zunehmend wichtige Herausforderung ist der Umgang mit elektrischer Energie, insbesondere aus neuen erneuerbaren Energiequellen wie PV-Anlagen oder Windgeneratoren. Die aus diesen Quellen erzeugte elektrische Energie fällt nicht gleichmässig an, sondern unterliegt grossen, wetterbedingten Schwankungen. Die Sonnenenergie verändert sich zusätzlich während des Tages- und des Jahresverlaufs.

## Motivation

Mit der Annahme der Energiestrategie 2050 im Mai 2017 durch das Schweizer Volk ist der Ausstieg aus der Atomenergie und die Förderung der erneuerbaren Energien beschlossen worden. Es wird künftig also einen breiteren Energiemix geben, bei dem neben den neuen Erneuerbaren auch die Wasserkraft eine grosse Rolle spielen wird. Am iHomeLab forschen wir an einem intelligenten Umgang mit der elektrischen Energie. Dabei fokussieren wir auf die Energie aus PV-Anlagen und suchen Strategien, wie der Solarstrom optimal genutzt werden kann. Dabei spielt nicht nur die Eigenverbrauchsoptimierung eines Anlagenbesitzers eine Rolle. Die Optimierung muss auch auf Ebene Quartier bis hin zum Versorgungsgebiet eines EVU betrachtet werden.

Für die Optimierung des Verbrauchs von Solarstrom ist die Kenntnis der zukünftigen Wetterentwicklung vorteilhaft. Denn so kann ein System zur Verbrauchsoptimierung die Wetterentwicklung in die Entscheidung mit einbeziehen, ob ein Haushaltgerät ein- oder ausgeschaltet werden soll. Das ist besonders bei Haushaltgeräten wichtig, die einen Aufwärmvorgang beinhalten, z.B. Waschmaschinen. Wenn das System weiss, dass in der nächsten Zeit die Sonne scheinen wird, kann es die Waschmaschine starten. Andernfalls sollte es damit noch zuwarten, bis dann die Sonne genügend Energie liefern wird.

Zur Vorhersage des Wetters für die nächsten Minuten und Stunden sind die verfügbaren Wetterdaten zu unpräzise. Besonders bei wechselnder Bewölkung liefern die öffentlichen Daten keine zuverlässigen Angaben, wann und wie lange die Sonne durch die Wolken drückt. Optimal wäre dazu ein Gerät, welches vor Ort die Vorhersage auf der Basis von lokalen Beobachtungen liefern könnte. Ein solches Gerät[[1]](#footnote-1) gibt es, ist aber auf den professionellen Einsatz von Wetterdiensten ausgerichtet. Dieses Produkt ist nicht geeignet für die Eigenverbrauchsoptimierung in Eigenheimen, da die Kosten zu hoch sind.

## Zielsetzung

In dieser Master Thesis soll eine kostengünstige Variante eines „Kurzzeitwettervorhersagers“ entwickelt werden. Das Gerät soll aus handelsübliche Komponenten z.B. Raspberry Pi mit einer Webcam aufgebaut sein, um die Kosten tief zu halten. Als Ergebnis soll die Intensität der Sonneneinstrahlung für die unmittelbare Zukunft zur Verfügung stehen. Diese Information kann anschliessend ein System zur Optimierung des Eigenverbrauchs verwenden, um darüber zu entscheiden, welche Haushaltgeräte gestartet werden sollen.

*Funktion*Das Gerät liefert die Strahlungsintensität zurück, welche im Verlauf der nächsten 60 Minuten zu erwarten ist. So kann abgeschätzt werden, wieviel Energie zu welcher Zeit verfügbar sein wird. Der Zeithorizont Vorhersage ist auf Machbarkeit hin zu prüfen. Das Gerät soll möglichst ohne Konfiguration und ohne Lernvorgang funktionieren, so dass es sofort nach Inbetriebnahme funktioniert.

*Kommunikation*  
Die Vorhersagen sollen von einem Optimierungssystem über Standard-Internetprotokolle abgerufen werden können. Die Übertragung der Daten kann drahtlose oder drahtgebundene erfolgen.

*Energieversorgung*

Der Energieverbrauch muss so gering wie möglich sein und soll eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 2 Watt nicht übersteigen. Das Gerät muss nicht für Batteriebetrieb ausgelegt werden.

*Sensorik*

Die Anforderungen an die Sensorik sind zu definieren, u.a. die Dynamik, welche ein Sensor umfassen muss. Passende Sensoren zur Beobachtung des aktuellen Wettergeschehens sind zu evaluieren. Naheliegend ist eine Kamera, es soll aber geprüft werden, ob weitere Sensoren in Frage kommen.

*Baugrösse und Kosten*Die Baugrösse ist nicht kritisch, soll trotzdem so gering wie möglich gehalten werden und nicht wesentlich über die Grösse einer Zigarettenschachtel hinausgehen.

Die Materialkosten für den Prototyp sollen 50 Franken nicht übersteigen. Es ist aufzuzeigen, welche Kosten für ein Seriengerät zu erwarten sind.

*Entwicklung und Feldtest*Die vom Gerät zur Verfügung gestellten Resultate sollen auf einem Webinterface dargestellt werden. In einem Feldtest ist die Zuverlässigkeit der Vorhersage zu evaluieren.

*Schwierigkeiten und Herausforderungen*Sollen Fehlerquellen und Problematiken aufgezeigt werden, die sich wärend dem Aufbau und dem Betrieb der Kameras ergaben. Zudem soll auf den Umgang mit grossen Datenmengen und den damit verbundenen Schwierigkeiten eingegangen werden.

*Optimierung*

Möglichkeiten zur Erhöhung der Zuverlässigkeit aufzeigen, nach Möglichkeit auch messtechnisch nachweisen.

Möglichkeiten der Kostenoptimierung aufzeigen, z.B. wie weit kann die Auflösung oder der Dynamikumfang der Kamera reduziert werden, um noch zuverlässige Ergebnisse zu erhalten?

# Ursache und Wirkung der PV-Variabilität

Hauptursachen für die Änderungen der Leistungsabgabe von Photovoltaikanlagen sind der Sonnenverlauf am Himmel und vorbeiziehende Wolken, die kurzzeitig die Sonnenstrahlung verringern. Grob betrachtet folgt die Leitungsabgabe der PV-Anlage, dem Sonnenstand. Sie erreicht ihr Maximum ungefähr zur Mittagszeit und ihr Minimum, zu Sonnenauf und -untergang. Bei genauerer Betrachtung hingegen, ist die Leistungsabgabe durch unzählige, kurzeitige Einbrüche durchzogen, bedingt durch vorbeiziehende Wolken.

Während die Variabilität bedingt durch die Sonnenbewegung präzise vorhergesagt werden kann und sich in Grössenordnungen von mehreren Minuten bis hin zu Stunden bewegt, trifft dies nicht zu für die kurzen Fluktuationen, verursacht durch Wolken.

## Wolken

Der Bewölkungsgrad bestimmt den Anteil der Sonnenstrahlung, der bis zur Erdoberfläche durchdringt. Dabei wird die Durchlässigkeit durch mehrere Faktoren bestimmt, wie die Art der Wolke, Höhe der Wolke oder ihre relative Position zur Sonne.

Reflexionsgrad und Durchlässigkeit der Wolke, werden vor allem durch ihre thermodynamische Phase bestimmt. Das bedeutet, ob sie aus Wassertröpfchen oder Eiskristallen bestehen oder aus beidem. Wolken aus Wassertröpfchen, verfügen dabei über einen höheren Reflexionsgrad.

Dicke, niedrige Schichtwolken, können die Sonneneinstrahlung um bis zu 90% verringern und Wolken in grossen Höhen, die Strahlungsintensität um bis zu 15% über den maximal zu erwartenden Wert, an einem wolkenlosen Tag, anheben [1].



Figure 1: Wolkentypen [2]

Die Klassifikation von Wolken, bedient sich lateinischer Begriffe, die Form und Erscheinungsbild, aus der Sicht eines Beobachters am Boden beschreibt. Folgende Tabelle fasst die vier Hauptgruppen zusammen.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Lateinischer Wortstamm** | Übersetzung | Beispiel |
| **cumulus** | Haufen | Schönwetter-Cumulus |
| stratus | Schicht | Altostratos |
| cirrus | Haarlocke | Cirrus |
| nimbus | Regen | Cumulonimbus |

Tabelle 1: Die vier Hauptgruppen der Wolkentypen [3]

Nach der heute gültigen Klassifizierung der Weltorganisation für Meteorologie (WMO), werden Wolken nach der Höhe ihrer Untergrenze, in vier Wolkenfamilien eingeteilt – hohe, mittlere, niedrige und solche die sich über mehrere Schichten (vertikale Wolken) erstrecken [4].

Wolkennamen mit dem Präfix "Cirrus-", beschreiben die Wolken in den höchsten atmosphärischen Schichten. Diese Schicht beginnt ab einer Höhe von 7 Kilometern. Wolken in dieser Höhe bestehen aus feinen Eiskristallen, bedingt durch die tiefen Temperaturen. Cirren sind meist formlos, schlierenartig und erscheinen transparent bis leuchtend weiss. Bei tiefen Sonnenständen, brechen die Eiskristalle das Licht und lassen Cirren, in den unterschiedlichsten Farben leuchten.

Wolken mittlerer Höhe, liegen typischer Weise zwischen 2 bis 6 Kilometer. Aufgrund der tieferen Höhenlage, bestehen diese Wolken mehrheitlich aus feinen Wassertropfen. Sie können aber auch Eiskristalle enthalten, wenn die Temperaturen tief genug sind.

Wolken in den tiefsten Schichten, unterhalb von 2 Kilometern, bestehen grundsätzlich aus Wassertröpfchen. Bei tieferen Temperaturen, wie im Winter auf der Nordhalbkugel, können diese aber auch Eis- und Schneekristalle bilden.  
Vertikal entwickelte Wolken, wie die Cumulus-Wolke, entstehen entweder durch thermale Aufwinde   
oder durch das Anheben, von sich darunter schiebenden, kalten Luftmassen, wie bei einer herannahenden Kaltfront.

## Intermittenz der Solarenergie

Der von der Solaranlage erzeugte Strom, ist proportional zur Intensität der Sonnenstrahlung. Maximale Erträge werden an klaren, wolkenfreien Tagen erzielt. Häufiger jedoch ändern die Beträge, bedingt durch Aerosole und vorbeiziehende Wolken. In solchen Fällen nimmt die Stromerzeugung, proportional zur Dämpfung der Sonnenstrahlung durch Wolken ab.

An wolkenfreien Tagen, kann die Sonnenstrahlung durchaus über den maximal zu erwartenden Wert steigen, nämlich dann, wenn die Sonnenstrahlung mehrfach, zwischen Wolken und Erdboden reflektiert wird.

Solarzellen reagieren sehr direkt, auf schnelle Änderungen der Bestrahlungsstärke. Bedingt durch die hohe Sensitivität und dem Auftreten von Wolken mit klaren Konturen, bewirkt, dass die Ausgangsleistung schlagartig, ähnlich einer Schrittfunktion ändert. In solchen Fällen spricht man von Rampen-Ereignissen (ramp-events), bei denen die Stromerzeugung Plötzlich zu- oder abnimmt.

Die Dauer von Rampen-Ereignissen kann von einer Sekunde bis hin zu mehreren zehn Minuten dauern. Lokale Messungen der Sonnenstrahlung, zeigen, dass grosse Strahlungsänderungen bereits innerhalb von wenigen Sekunden eintreten können. Dabei sind Änderungsraten von 50% innerhalb einer Sekunde, nicht ungewöhnlich [5].

Schnelle Schwankungen und Anstiegsraten von weniger als 20 Sekunden, können bei kleinen, isoliert stehenden Photovoltaikanlagen, bereits zu Spannungsstörungen führen. Werden jedoch mehrere Anlagen, verteilt über eine Fläche von einigen Quadratkilometern, in einem Verbund betrieben, dann treten Glättungseffekte auf, wodurch einzelne Schwankungen an Einfluss verlieren. Stromspeicher wie Batterien, können als Pufferspeicher eingesetzt werden, um ungewollte Effekt weiter zu reduzieren.

Stromschwankungen, müssen schlussendlich vom Stromnetz korrigiert werden. Dies gelingt, indem ein Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Energie hergestellt wird. Dabei spielt die Trägheit der schnell rotierenden Masse von Generatoren eine entscheidende Rolle, da sie als Puffer eingesetzt werden kann. Durch ändern der Drehzahl, kann die Netzfrequenz in einem sehr engen Bereich um die Nominalfrequenz von 50 Hz gehalten werden. Dabei liegt die Toleranz im Bereich von 50mHz [6].

Bei Abweichungen von der Nominalfrequenz, wird ein mehrstufiges Verfahren zur Korrektur eingesetzt. Dabei unterscheidet man zwischen primärer, sekundärer und tertiärer Frequenzkontrolle. Eine Primäre Korrektur erfolgt innerhalb von wenigen Sekunden, wobei lediglich die momentane Frequenz stabilisiert, jedoch noch nicht korrigiert wird. Die sekundäre Korrektur erfolgt nach ungefähr 30 Sekunden und setzt die Frequenz wieder auf ihren nominalen Wert. Die letzte Stufe der Regelung setzt nach 15 Minuten ein und beinhaltet die Anpassung der Stromerzeugung an die Last.

Die Intervalllänge von 15 Minuten, kann als kürzester Zeitraum aufgefasst werden, der für einen Stromnetzbetreiber, als Vorhersagehorizont noch nutzbringend einsetzbar ist. Eine Umfrage unter den Stromnetzbetreibern, in den Vereinigten Staaten, scheint dies auch zu bestätigen [7, S. 10].

Eine der grossen Herausforderungen wird in Naher Zukunft, die grossflächige Integration, der erneuerbaren Energiequellen in das bestehende Stromnetz. Netzbetreiber haben die Aufgabe, das Gleichgewicht zwischen Stromproduktion und Verbrauch aufrecht zu erhalten. Fehlt ihnen die Möglichkeit dazu, aufgrund der unvorhersehbaren Natur der erneuerbaren Energiequellen, dann lässt sich auch die Stabilität des Stromnetzes nicht mehr gewährleisten. Es ist deshalb naheliegend, dass mit zunehmender Integration von erneuerbaren Energien, die Netzbetreiber zusehends von der Fähigkeit abhängig werden, unerwarteten Störungen adäquat Rechnung tragen zu können.

Die unstetige Natur der Solarenergie bringt einige Probleme mit sich, wie Spannungsschwankungen, lokale Qualitätseinbussen und dem damit verbundenen Stabilitätsproblem des Stromnetzes. Folglich ist eine Vorhersage der Stromproduktion von Photovoltaikanlagen für den effektiven Betrieb des Stromnetzes erforderlich. Zudem können Vorhersagen dazu verwendet werden um möglichen Produktionsüberschuss frühzeitig zu erkennen, um diesen zum Beispiel auf dem Energiemarkt anzubieten.

Für den Prognosehorizont von 15 Minuten, eigenen sich Sky Cameras sehr gut. Aus ihren Bildern lassen sich sehr detaillierte Informationen über die Ausdehnung, Struktur und Bewegung zum Zeitpunkt der Aufnahme ableiten. Zudem können Sky Cameras in unmittelbarer Nähe der Photovoltaikanlage platziert werden, wodurch stark lokalisierte Prognosen möglich werden.

## Zeitliche Auflösung zur Erfassung der Intermittenz

Die ideale Auflösung wäre, ein Messwert pro Sekunde, womit die meisten potentiell, schwerwiegenden, Kurzzeitschwankungen abgebildet werden könnten. Dagegen spricht jedoch die enorme Datenmenge, die bei dieser Abtastrate anfallen würde. Eine über drei Monate dauernde Studie (Woyte et al. [8]), zur Datenerhebung mit einer Abtastrate von 1Hz, zeigte, dass nur 1% bis 2% der sehr kurzzeitigen Fluktuationen, in kürzeren Zeitabständen als 5 Sekunden auftreten.

# Solare Strahlung

Die Sonne zählt zu den mittel grossen Sternen. Die Quelle Ihrer Strahlungsenergie liegt in den Kernfusions- prozessen tief in ihrem Kern. Dabei verbinden sich Wasserstoffatome, genauer ihre Kerne, zu Heliumatomen wobei elektromagnetische und Materiestrahlung freigesetzt wird. Diese Energie steigt, begleitet durch eine Serie von Absorptionen und Remissionen, zur sichtbaren Oberfläche auf, der Photosphäre, von wo sie abgestrahlt wird. Die Verteilung des Sonnenspektrums, gleicht der eines Schwarzkörpers, der bei einer Temperatur von ungefähr 5’778 K strahlt. Das Spektrum der Sonnenstrahlung liegt zwischen rund 250 nm und 2’500 nm. Ihr Maximum liegt bei etwa 500 nm, am selben Ort, an dem sich auch die maximale Empfindlichkeit des Auges befindet[9, S. 24].



Abbildung 1: Intensität der Sonnenstrahlung, im Vergleich zur Emission eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 5’900 K [10].

Etwa 47% der einfallenden extraterrestrischen Sonnenstrahlung liegt in den sichtbaren Wellenlängen von 380 nm bis 780 nm. Der Infrarotanteil, mit Wellenlängen grösser als 780 nm machen weitere 46 % der einfallenden Energie aus. Die verbleibenden 7% der extraterrestrischen Sonnenstrahlung unterhalb von 380 nm, entsprechen dem ultraviolettem Anteil des Spektrums.

Das Vakuum des Weltalls lässt die Sonnenstrahlen ungehindert bis zur oberen Atmosphäre der Erde gelangen. Erst mit dem Eintritt in die Erdatmosphäre wird die Sonnenstrahlung durch unterschiedliche Faktoren abgeschwächt. Dazu gehören Reflexionen an der Atmosphäre oder die Absorption durch unterschiedliche Gase. So wird vor allem ein Grossteil der ultravioletten Strahlung in der Atmosphäre reflektiert und absorbiert. Luftmoleküle streuen die kürzeren Wellenlägen stärker als die langwelligen. Dieser Umstand wird durch die sogenannte Rayleigh und Mie-Streuung beschrieben, welche die Bestrahlstärke weiter reduzieren.

Rayleigh-Streuung entsteht durch Reflexionen des Lichts an den Molekülen der Luft. Dabei nimmt der Einfluss der Rayleigh-Streuung mit abnehmender Wellenlänge des Lichtes zu. Die Mie-Streuung dagegen wird durch wesentlich grössere Partikel, wie zum Beispiel Staub, verursacht. Mie-Streuung ist deshalb von geographischen Gegebenheiten abhängig, wie zum Beispiel, Höhe über Meer oder dem Grad der lokalen Luftbelastung [11, S. 56].

Ein längerer Weg durch die Atmosphäre, unabhängig von der Zusammensetzung, führt zu einer grösseren Dämpfung der Bestrahlstärke. Dabei beschreibt die sogenannte Air Mass (AM) in welchem Verhältnis, der kürzest mögliche Weg, in der Erdatmosphäre, zum tatsächlichen steht. Ist die Sonne im Zenit, dann beträgt die Air Mass eins und im Weltall null.

## Einfluss der Erdatmosphäre

Die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und eintretender extraterrestrischen Sonnenstrahlung bewirkt eine Aufteilung in einen gerichteten und ungerichteten Anteil der Sonnenstrahlung. Der gerichtete Anteil wird als Direktnormalstrahlung (DNI) bezeichnet und der ungerichtete Anteil als Diffusstrahlung (DHI). Die Summe der beiden Anteile ergibt die auf der Erdoberfläche messbare Gesamtstrahlung, die auch als Globalstrahlung (GHI) bezeichnet wird.



Abbildung 2: Komponenten der Solaren Strahlung [11, S. 61]

An wolkenlosen Tagen, mit optimalen Wetterbedingungen und hohen Sonnenständen sind Bestrahlungsstärken um zu erwarten. Ziehen einzelne Wolken an solchen Tagen auf, kann durch einen erhöhten Reflexionsgrad, die Bestrahlstärke kurzeitig sogar zunehmen.   
Die Abbildung 2, zeigt die Zusammensetzung der Strahlungsbilanz der Erde, bedingt durch die unterschiedlichen Wechselwirkungen in der Atmosphäre. Der linke Teil, zeigt die Aufteilung der vom Weltall einfallenden Gesamtstrahlung, bedingt durch Absorption und Reflexion. Von den ursprünglich 100 % Gesamtstrahlung, bleiben insgesamt noch 47% in Form von direkter und diffuser Strahlung übrig. Der Vollständigkeit halber wird in der rechten Hälfte, die Strahlungsbilanz, bedingt durch Wärmeabstrahlung im langwelligen Bereich vervollständigt.



Abbildung 3: Strahlungsbilanz der Erde Abb. 3.8 [12, S. 75]

## Globale, direkte und diffuse Strahlung

Die Sonnenstrahlung wird in Watt pro Quadratmetern gemessen und entspricht dem Energiefluss der durch eine Fläche von einem Quadratmeter pro Sekunde hindurchtritt. Je stärker der Einfallswinkel von der Normalen durch die Fläche abweicht, desto geringer ist der Energiefluss. Die globale Bestrahlungsstärke ergibt sich aus der Summe des direkten Anteils multipliziert mit dem Kosinus des Sonnenzenitwinkels (sza) und dem diffusen Anteil.

(3.1)

Der Sonnenzenitwinkel ist der Winkel zwischen der Vertikalen durch den Zenit und dem Sonnenmittelpunkt, gemessen vom Beobachtungspunkt aus. Nahe bei Sonnenhöchststand, nimmt der Sonnenzenitwinkel (sza) die kleinsten Werte an, im Gegensatz zu Sonnenaufgang und Sonnenuntergang, wo er beträgt. Mittels der Sonnenhöhe (Elevation) und dem Sonnenazimut (az), kann der aktuelle Sonnenstand eindeutig festgelegt werden [9, S. 15].



Abbildung 4: Sonnenzenitwinkel, Elevation und Azimut[9, S. 15]

Die Gleichung 2.1 beschreibt lediglich den momentanen Zusammenhang zwischen den Komponenten der Bestrahlungsstärke, da sich der Sonnenzenitwinkel mit der Zeit ändert. Kurzeitig kann der der gemessene GHI, grössere Werte als die extraterrestrische Strahlung annehmen, bedingt durch Wolken in der Erdatmosphäre die das einfallende Sonnenlicht reflektieren.

Der direkte Anteil der Strahlung, DNI, hängt vom zurückgelegten Weg durch die Atmosphäre ab. Während des Tages, ändern sich die Weglängen kaum, ganz im Gegensatz zu den Morgen- und Abendstunden, wenn die Sonne tief am Horizont steht. Die DNI Kurve verläuft entsprechend flach im Scheitel und steil an ihren Enden. Die globale horizontale Strahlung, GHI, ist vom Kosinus des Sonnenzenitwinkels abhängig, weshalb die Kurve der GHI, kosinusförmig verläuft und einer Glockenkurve ähnelt.



Abbildung 5: Globale, direkte und diffuse Strahlung an einem wolkenfreien Tag[9, S. 24].

Wolken zwischen Sonne und Messgerät können den direkten Anteil vollständig reflektieren, womit dieser gegen null geht. In der folgenden Abbildung 6, tritt eine Wolke um 16:00 vor die Sonne und blockiert den normalen Anteil der Sonnenstrahlung, sodass dieser auf null fällt. Mit dem Fehlen des direkten Anteils, folgt die Globalstrahlung nun dem diffusen Anteil.

Der direkte Anteil der Sonnenstrahlung spielt eine wichtige Rolle in der Elektrizitätsgewinnung durch Solarzellen, da nur dieser Teil der Sonnenstrahlung, die höchste Energiedichte bietet.



Abbildung 6: Um16:00 blockiert eine Wolke den direkten Anteil. GHI entspricht nun der DHI[9, S. 78].

In den frühen Morgenstunden und am späten Nachmittag, bei tiefem Sonnenstand, nimmt der direktnormale Anteil grössere Werte als die Globalstrahlung an. Abhängig vom Ort und Jahreszeit, kann der direktnormale Anteil, zur Mittagszeit, die Globalstrahlung überschreiten.

### Messung der direktnormalen Sonnenstrahlung

Aufwand und Kosten zur Messung des direktnormalen Anteils der Sonnenstrahlung sind grundsätzlich am höchsten. Der direkte Anteil wird in der Regel mittels einem Pyrheliometer[[2]](#footnote-2) gemessen. Die höheren Kosten für den Betrieb eines Pyrheliometer liegen nicht im Preis begründet, denn selbst gute Geräte sind günstiger als ein Pyranometer. Doch im Gegensatz zu einem Pyranometer muss ein Pyrheliometer exakt auf die Sonnen ausgerichtet werden und für die Messung während eines Tages nachgeführt werden.   
Eine Alternative zur Messung des direktnormalen Anteils mittels einem Pyrheliometer, bietet die Kombination eines Pyranometers mit einem rotierenden Schattenband. Dabei deckt das gleichmässig rotierende Schattenband in regelmässig Abständen das Pyranometer ab. Zu den Zeitpunkten, wenn das Pyranometer freie Sicht hat, misst es die globale Strahlung. Ist es hingegen abgeschattet, dann misst es den diffusen Anteil der Sonnenstrahlung. Erfolgen diese Messungen an einem wolkenfreien Tag, dann entspricht die Differenz der beiden Messwerte der horizontalen Komponente, der direktnormalen Sonnenstrahlung. Eine Division durch ergibt den direktnormalen Anteil [9, S. 80].

### Messung der globalen Sonnenstrahlung

Die globale horizontale Strahlung entspricht dem Gesamtfluss durch die Himmelshalbkugel, gemessen auf einer horizontalen Fläche. Diese entspricht, wie bereits beschrieben, dem auf eine horizontale Ebene projizierten Anteil der direktnormalen Strahlung, sowie einem diffusen Anteil der aus unterschiedlichen Richtung stammt. Gemessen wird die globale Strahlung, in der Regel, mittels eines Pyranometers[9, S. 103].

### Messung der diffusen Sonnenstrahlung

Unter einem anderen Blickwinkel betrachtet, entspricht der diffuse Anteil dem Rest der übrigbleibt, wenn der direkte Anteil von der globalen Strahlung entfernt wurde. Der diffuse Anteil wird in der Regel durch ein abgeschattetes Pyranometer gemessen. Alternativ lässt sich der diffuse Anteil auch aus der Differenz der gemessenen Globalstrahlung und des direktnormalen Anteils berechnen.

Vor der Entwicklung automatischer Nachführsysteme, benutzte man manuell einstellbare Schattenringe, um die Sonnen im Blickfeld des Pyranometers, von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang auszublenden. Da der Schattenring bis zu 20 % des diffusen Anteils ausblendet, müssen die Messwerte durch einen Korrekturfaktor angepasst werden. Die Berechnung des Korrekturfaktors ist von einer Reihe von Parametern abhängig und nicht trivial. Genauere Messergebnisse erhält man bei der Verwendung eines nachgeführten Schattenballs[11, S. 83].

### DNI und zirkumsolare Sonnenstrahlung

Die DNI ist definiert als die Bestrahlstärke auf einer Fläche, die senkrecht auf dem Vektor des Beobachters zum Mittelpunkt der Sonne steht und nicht mit der Atmosphäre wechselwirkt. Jedoch ist ein Messgerät wie das Pyranometer, nicht in der Lage zu bestimmen, ob ein Photon gestreut wurde oder nicht. Auch dann nicht, wenn es direkt aus der Richtung der Sonne stammt. Deshalb gibt es eine weitere, von der ersten Definition, abweichenden Variante. In dieser wird die DNI, als diejenige Strahlung aufgefasst, welche der Beobachter, aus einem kleinen Raumwinkel von 5°, mit Zentrum auf der Sonnenscheibe, erhält [13].

## Solarmessgeräte

Zur Messung der globalen Bestrahlungsstärke haben sich zwei Messprinzipien durchgesetzt. Dabei werden entweder Halbleitersensoren oder thermische Sensoren eingesetzt. Messgeräte die auf einem dieser Sensortypen basieren, werden als Pyranometer bezeichnet [11].

### Pyranometer

Bei den Halbleitersensoren handelt es sich um photovoltaische Solarzellen aus Silizium. Der erzeugte Strom im Halbleiter steigt proportional mit der Bestrahlungsstärke der Sonne. Über einen Messwiderstand, lässt sich der Strom in ein Spannungssignal umwandeln. Halbleitersensoren reagieren empfindlich auf Temperaturänderungen, deshalb sollte auch die Temperatur aufgezeichnet werden und gegebenenfalls eine Korrektur der Messwerte vorgenommen werden. Ein weiterer Nachteil von Halbleitersensoren ist, dass nicht alle Wellenlängenbereiche der Sonnenstrahlung gleichermassen erfasst werden. So ist es möglich, dass bei tiefen Sonnenstand, falsche Werte gemessen werden.

Ein thermischerer Sensor, siehe Abbildung 7Abbildung 7, besteht aus einer geschwärzter Empfängerfläche, die durch einen doppelwandigen Glasdom thermisch, von der umgebenden Luft, isoliert ist. Die Sonnenstrahlen durchdringen den Glasdom und erwärmen die Empfängerfläche. Die Temperaturdifferenz zwischen der Aussentemperatur und der Temperatur im Innern des Glasdoms, nimmt proportional mit der Bestrahlungsstärke zu. Im Gegensatz zum Halbleitersensor zeichnet sich der thermische Sensor, durch konstante spektrale Empfindlich, über grosse Teile des Spektrums aus.



Abbildung 7: Links: Pyranometer mit thermischen Sensor, rechts: Pyranometer mit Silizium-Halbleitersensor Abb. 2.29 [11, S. 84].

Eine optische Anomalie die bei Pyranometern beobachtet werden kann, tritt ein, wenn die Sonne an einem bestimmten Ort am Himmel steht. Über einem Zeitraum von einer Stunde, fällt zuerst der Messwert, um anschliessend auf einen ungewöhnlich hohen Wert anzusteigen, bevor die Messwerte sich wieder einpendeln. Verursacht wird diese Anomalie durch Reflexionen am doppelwandige Glasdom. Dabei entsteht, in der Nähe des Sensors, ein Heller Lichtfleck. Staub oder andere Verschmutzung auf dem Glasdom, können diesen Effekt verstärken[9, S. 122].

### Pyrheliometer

Das Pyrheliometer eignet sich besonders gut zur Messung der direktnormalen Strahlung. Es besteht aus einem Rohr, an dessen Ende meistens ein thermischer Sensor angebracht ist. Das Verhältnis von Durchmesser zur Länge des Rohrs, bedingt, dass das Pyrheliometer genau auf die Sonne ausgerichtet werden muss. Der Öffnungswinkel beträgt 5°, sodass praktisch nur die Sonnen abgebildet wird. Nur bei präziser Ausrichtung, können Sonnenstrahlen den Sensor am Ende des Rohres erreichen. Wird nun das Pyrheliometer kontinuierlich auf die Sonnen ausgerichtet, dann misst es lediglich den direkten Anteil der Sonnenstrahlung, ohne den ungerichteten diffusen Anteil.



Abbildung 8: Pyrheliometer, links schematische Darstellung.

## Stattdessen hier die ganze Kamera Kalibrierung

## Dreidimensionale Effekte in der Kurzeit Vorhersage

*Jan Kleissel Solar Energy Forecasting S70 Kap 3.7.1 Three-Dimesional Effekts in short-Term Forecasting*

## Auflösung

Diverse Arbeiten: All Sky Kam Astro MANGO Report

Jan\_Kleissel S200 Image Sensors (Reader S 195)

### Für die Auswahl der Optik bestimmende Faktoren

### Bildwinkel

*Diverse Arbeiten: All Sky Kam Astro MANGO Report S27*

In the fields of imaging and photography, angle of view describes the angular extent of a given scene that is imaged by a camera. The wider the angle, more angle of the scene is captured and the opposite the holds true. The angle of view of a lens is a function of the focal length of the lens and is inversely proportional to its tangent in normal lenses. Thus, longer the focal length, narrower will be the angle of view. This can be seen in Figure 2.9.



To this point, it might seem that lenses with wider-angle views are better since they capture more information. While this is true, there are consequences of using wide-angle lenses. Wide-angle lenses are prone to optical distortion.

### Optische Verzerrung

*Diverse Arbeiten: All Sky Kam Astro MANGO Report S27*

In the field of Optics, distortion is an optical aberration where straight lines in a scene do not appear as straight lines in the image. Majority of camera lenses produce images in line with the law of central perspective. This means that relative to the observer, all the converging lines lead towards a single vanishing point at the center of the image. This kind of projection of three-dimensional space onto a two-dimensional image surface is called rectilinear projection or gnomonic projection. The reason this rule is not obeyed, especially in wide-angle optics, is that the image scale is not constant throughout the entire image field. This means that the focal length of a lens showing distortion changes with the distance of an image point from the optical axis [21]. The effect of distortion when using wide-angle optics can be seen in Figure 2.10.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bildwinkel>

### Die Verwendung eines Fischaugenobjektivs

*Diverse Arbeiten: All Sky Kam Astro MANGO Report S28*

As solid-state (CCD) imagers improved with technology, new systems have started employing wide-angle optics which can view emissions over large geographic areas. Fisheye lenses are ultra-wide-angle lenses that achieve extremely wide angles of view by losing the straight lines of perspective as seen in rectilinear

images. Figure 2.11 shows a picture take using a fisheye lens. It is worth noting how the image is different from the conventional rectangular image taken from a rectilinear lens, which appears more natural to a human observer. Due to the optical distortion because of fisheye lenses and the effect of undesirable characteristics of all-sky images, post-processing of these images is required. The need for this and the generally applied techniques are discussed in more detail in the following section.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Weitwinkelobjektiv>

## Bildverarbeitung

### Eigenschaften einer Weitwinkelaufnahme

*Diverse Arbeiten: All Sky Kam Astro MANGO Report S29*

Cameras used for all-sky imaging record rasterized images with a finite number of pixels (picture elements). This means that an image acquired using these cameras have a finite number of dots defined in the horizontal as well as the vertical axis. Since the images are stored as files with pixelwise information, no information about the geographical coordinates is present in the image.

Furthermore, since the images are taken using a fisheye lens, they are not rectilinear. The aforementioned characteristics of the images are a consequence of the imaging technique employed. Apart from these, other effects may be noticeable because of the content of the actual scene. Other systematic errors may also exist in the image which would then need correction. For instance, CCDs are prone to having read-out noise especially when they have faint background levels, which is the noise associated with reading each on-chip amplifier [25]. Figure 2.12 shows how a preprocessed image may appear.

### CCD

*Booklet: Photovoltaic and solar Forecasting: state oft the Art; Reports IEA PVPS T14-01:2013 S13*

At the University of California San Diego, sky imagers (USIs) have recently been specifically developed for solar forecasting applications and feature high resolution, high dynamic range, high stability imaging chips that enable cloud shadow mapping and solar forecasting at unprecedented spatial detail (Figure 3a).

# Sky Cameras - Stand der Technik

Himmel-Kameras respektive Skycams, Sky Cameras oder auch Whole/Total Sky Imagers, wie sie im Englischen genannt werden, bilden eine Klasse von digitalen Kameras, die ausschliesslich für die Himmelsbeobachtung verwendet werden. Kennzeichnend für Sky Cameras, ist ihr enormes Gesichtsfeld, dass sie mittels eines Fischaugenobjektivs oder der Verwendung eines hemisphärischen Spiegels erhalten. Sie sind deshalb in der Lage, den gesamten Himmel abzubilden.

Ihr Anwendungsbereich ist vielfältig. Fluglotsen setzen sie ein, um lokale Wetterbedingungen, besser einschätzen zu können. Astronomen, zur Beobachtung des nächtlichen Himmels und Detektion von Kometen. Jedoch am häufigsten, werden sie zur Prognose von Wetter und Sonnenenergie verwendet.

Sky Cameras waren bislang für den Einzelanwender, eher unerschwinglich. Doch mit dem Aufkommen von günstigen, hochauflösenden CMOS-Bildsensoren und leistungsstarken Einplatinencomputer, sinken nicht nur die Preise für die Hardwarekomponenten. Einplatinencomputer wie das Raspberry-Pi, bringen bereits die benötigte Rechenleistung, für anspruchsvolle Bildverarbeitung mit. Eine günstige und für den durchschnittlichen PV-Anlagebesitzer, praktikable Variante einer Sky Cameras, zur Kurzeitprognose der Sonnenstrahlung, scheint realisierbarer denn je.

Sky Cameras liefern im Gegensatz zu anderen Verfahren, lokale visuelle Informationen über den Zustand und die Veränderung des sichtbaren Himmels. Kombiniert man Bildverarbeitung mit maschinellem Lernen, dann sind Sky Cameras in der Lage die Beschaffenheit und Bewegung der Wolken zu bestimmen. Entsprechend können kurzeitige Schwankungen der Sonnenstrahlung, insbesondere die globale und direkte Strahlungsstärke vorhergesagt werden.

Der Zeithorizont über den diese Informationen bereitgestellt werden können, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Dies sind das Gesichtsfeld, Geschwindigkeit der Wolken und die benötigte Verarbeitungszeit der Bildinformationen. Typisch sind maximale Vorhersagehorizonte von ungefähr 20 Minuten, mit einer Aktualisierungsfrequenz zwischen 10 und 30 Sekunden. Dabei hängt die obere Grenze des Vorhersagehorizonts, hauptsächlich davon ab, wie lange eine Wolke vom Rand des Gesichtsfeldes bis zur Sonnen unterwegs ist. Hindernisse im Blickfeld wie Gebäude, die das Gesichtsfeld einengen, verringern den Vorhersagehorizont. Verwendet man jedoch weitere Kameras, so lassen sich einzelne Himmelsausschnitte zusammenfügen, wodurch der maximale Vorhersagehorizont erweitern wird [14].

Die folgende Abbildung illustriert die Kombination von zwei Sky Cameras zur Erweiterung des Vorhersagehorizontes. Wolken benötigen im Schnitt etwa 10 bis 20 Minuten um das Gesichtsfeld einer Sky Camera zu durchqueren. Kombiniert man 2 bis 3 Kameras, liessen sich so Vorhersagen von ungefähr einer Stunde erreichen.



Abbildung 9: Erweiterung des Vorhersagehorizontes durch Kombination mehrerer Sky Cameras.

Ihre Bilder haben eine höhere Auflösung als Satellitenbilder. Zudem sind sie in der Lage auch Wolken in geringer Tiefe zu erfassen.

Sehr gute Einleitung und Zusammenfassung: Seite 5  
C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\Feature Extraction\ Short-term irradiance forecasting using skycams Motivation and developement.pdf

**Beispiele von Kommerziellen Produkten:**

C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Forcasting solar irradiance\ UTSA Sky imager knapp und gut.pdf

**Unterschiedliche Produkte:**

http://www.yesinc.com/products/data/tsi880/

Gute kurze Zusa zur State oft he Art in Kap 2.0 und 2.1

C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Cloud Tracking\Very short term solar forecasting inexpensive fisheye camera.pdf

🡪 C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\state of the art

C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\detecting cloudmotion for intra-hour solar forecasting\VON CAM A Low Cost, Edge Computing, All-Sky Imager for Cloud Tracking Copy.pdf

Kap 7.2.1.1 (intro zum Stand der Technik)

„forecasted (see Figure 7-2). Maximum possible forecast horizons strongly depend on

cloud conditions—i.e., cloud height and velocity. They are limited by the time the monitored cloud scene

has passed the location or area of interest, typically up to 15 minutes to 30 minutes ahead. “

C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\State of the art\Photovoltaic\_and\_Solar\_Forecasting\_State\_of\_the\_Art\_REPORT\_PVPS\_\_T14\_01\_2013.pdf

Design of WHARSIS

C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Soumyabrata\PAPERS\DESIGN OF LOW-COST, COMPACT AND WEATHER-PROOF whole sky imagers for high-dynamic-range captures soumyabrata dev.pdf

C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\State of the art\Gutes-Diagramm state-of-the-art and proposition for future developments for small-scale insular grids.pdf





# Übersicht solarer Vorhersage Methoden

Hier wird auf die Vorhersage Modelle eingegangen in bezug auf temporal und spatialer Auflösung. 🡪 äussesrst brauchbar S 185(reader) ! Zudem wird kurz das Verfahren mit All-Sky Cameras beschrieben ! Seite 187

Depending on the application and the corresponding requirements with respect to forecast horizon and temporal and spatial resolutions, different data and forecast models are appropriate, as illustrated in Figure 7-1.  
  
“Note, however, that a single-point forecast for the position of the sky imager does not require information about cloud height but can be derived by simply evaluating the movement of cloudy pixels toward the pixel at the position of the sun. Different”

C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Solare Variabilität und Stromnetz\ NREL Best Practice Handbool for the Collection of Solar Data.pdf

ein ähnlich Paper im selben Ordner: siehe dort Kapitel 3.1.1 Total Sky Imagery Seite 13(reader)  
 wird recht ausführlich erklart inclusive wo die Schwierigkeiten liegen !  
Photovoltaic\_and\_Solar\_Forecasting\_State\_of\_the\_Art\_REPORT\_PVPS\_\_T14\_01\_2013-1.pdf

Kap 4 S 21„point forecast and area forecast“ 🡪 upscaling Weshalb 2 Kameras verwenden  
C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\state of the art\Photovoltaic\_and\_Solar\_Forecasting\_State\_of\_the\_Art\_REPORT\_PVPS\_\_T14\_01\_2013.pdf

**Sehr gute kurz gehaltene Übersicht zu den unterschiedlichen Methoden des Forecastens: sollte rein !**

C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\state of the art\Machine Learning methodes for solar radiation forcasting a review.pdf

Gute Tabelle Seite 16 vor allem die letzte Kolone !

C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\state of the art\Presentationen\Marion\_Schroedter\_Presentation.pdf  




### Klassifikation solarer Vorhersage Methoden

Gute kurze Zusammenfassung über die unterschiedlichen Methoden inklusive einer kleinen Tabelle

*C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\state of the art\California Renewable Energy Forecasting, state of the art.pdf*

*Jan Kleissel Solar Energy Forecasting S166 Kap 8 Overview of solar-Forecasting Methods and a Metric for Accuracy Evaluation*

The choice of solar-forecasting method depends strongly on the timescales involved, which can vary from horizons of a few seconds or minutes (intra-hour), a few hours (intraday), or a few days ahead (intraweek). Different time horizons are relevant according to the forecast application.

**Anforderungen an die Kamera**

Basierend auf den obgenannten Vorgaben sind die Anforderungen an das Gerät zu definieren. Für die Anforderungen soll auch definiert werden, welche Kriterien erfüllt sein müssen resp. gewünscht sind. Z.B. ist wünschenswert, dass der Vorhersagezeitraum 60’ beträgt. Aber welcher Zeitraum muss mindestens erfüllt sein? Weiter sind Algorithmen zu evaluieren, welche die Aufgabe lösen können. Eine Möglichkeit besteht auch darin, Algorithmen von frei verfügbaren Bibliotheken zu analysieren (z.B. OpenCV). Für die Algorithmen ist zu evaluieren, welche Daten diese benötigen und welche Rechenleistung erforderlich ist.

Die Analyse der Algorithmen hat u.U. auch einen Einfluss auf die Anforderungen. Mögliche Einschränkungen durch die Algorithmen sind in den Anforderungen zu berücksichtigen.

-Dynamikbereich Menschliches Auge viel grösser als die Meisten Bildsensoren  
-Auflösung Wolken müssen erkannt werden, schwierig da Wolken teils sehr diffuse Konturen haben.  
- HDR wegen Sättigung oder da andere Kameras Schattenbälle verwenden.

# Anforderungen an die Sky Camera

Pyranometer messen in erster Line die unmittelbare Bestrahlstärke. Für die Kurzfirstprognose notwendige Grössen, wie der Bedeckungsgrad oder die Position der Wolke, sowie deren Bewegungsrichtung, können nicht durch das Pyranometer erfasst werden. Zustand und Änderung der Wolken, müssen mit einem bildgebenden Verfahren erfasst werden, da nur ein solches in der Lage ist, umfänglich, alle relevanten Informationen gleichzeitig abzubilden.

Dabei ist die Detektion von Wolken eine grosse Herausforderung. In einem bildgebenden Verfahren müssen diese zuverlässig vom Rest des Himmels unterschieden werden können. Wolken entstehen und lösen sich auf, sie sind nicht statisch und ändern ständig Form und Aussehen. Damit die teilweise äusserst diffusen Konturen der Wolken, zuverlässig erkannt werden können, benötigt der verwendete Bildsensor eine hohe Auflösung.

Der hohe Dynamikbereich des Himmels, bedingt durch die Sonne und schnell wechselnden Lichtverhältnissen, stell eine weitere Herausforderung dar. Denn wenn Bereiche des Bildsensors in Sättigung geraten, gehen diese Informationen unwiederbringlich verloren. Diesem Umstand muss Rechnung getragen werden, durch Techniken die eine Sättigung verhindern.

Neben anspruchsvollen mechanischen Vorrichtungen zur Abschattung der Sonne, hat sich die HDR Fotographie durchgesetzt. Sie ermöglicht die Erweiterung des Dynamikbereiches, wodurch dunkle und sehr helle Bereiche des Himmels, gemeinsam abgebildet werden können.

## Leuchtdichte

Leuchtdichte, im Englischen luminance, beschreibt die Menge an sichtbaren Licht, die in eine bestimmte Richtung, von einem Gegenstand ausgestrahlt oder reflektiert wird. Sie ist deshalb ein Anhaltspunkt dafür, wie hell die Oberfläche eines Gegenstandes, strahlt oder reflektiert. Gemessen wird die Leuchtdichte in Candela pro Quadratmeter . Typische Werte der Leuchtdichte, natürlicher Quellen sind:

|  |  |
| --- | --- |
| **Lichtquelle** | Leuchtdichte |
| **Sonnenscheibe zur Mittagszeit**: |  |
| Sonnenscheibe direkt über dem Horizont: |  |
| Durchschnittlicher wolkenloser Himmel: |  |
| Mondoberfläche: |  |
| Durchschnittlich bewölkter Tag: |  |
| Mondlose Nacht: |  |

Tabelle 2: Typische Werte der Leuchtdichte, natürlicher Quellen [15].

## Dynamikbereich

Der Dynamikbereich beschreibt das Verhältnis zwischen maximalem und minimalem Wert der Leuchtdichte, in einem Bild oder Szene. Das menschliche Auge reagiert logarithmisch[[3]](#footnote-3) auf Intensitätsänderungen und ist deshalb bestens, auf die in Natur auftretenden Dynamikumfänge, angepasst. Es ist in der Lage einen Dynamik-Bereich von , gleichzeitig wahrzunehmen, was ungefähr 24 F-Stops (Blendenschritten) entspricht [16].

Ein Bildsensor hingegen, ist nicht in der Lage denselben Dynamikbereich abzubilden. Ein Bildsensor besteht aus Millionen von winzigen lichtempfindlichen Zellen, den Fotozellen. Sie entsprechen den Pixeln, in einem digitalen Bild. Wird der Auslöser der Kamera betätigt, dann werden die Fotozellen für die Zeitspanne der eingestellten Verschlusszeit belichtet. Trift ein Photon auf eine Photozelle, wird ein winziges elektrisches Signal erzeugt. Der Bildsensor wertet nun die Signalstärke aus, um die Anzahl der eingefangenen Photonen zu ermitteln. Die Signale werden anschliessend zu digitale Signalen quantisiert und zwar mit einer Genauigkeit, die der Bittiefe entspricht. Die resultierende Genauigkeit, kann dabei weiter abnehmen, je nach verwendetem Dateiformat. Ein 8 Bit JPEG Format, beschränkt sich somit auf den   
Wertebereich 0 - 255.

Fotozellen können nur den Helligkeitswert, abbilden. Damit auch die Farbinformation erfasst werden kann, wird vor jede Fotozelle ein Farbfilter, in einer der drei Grundfarben, Rot, Grün oder Blau aufgebracht. Das sich daraus ergebende schachbrettartige Muster wird, als Bayer-Matrix bezeichnet. Das menschliche Auge, nimmt den grünen Anteil des Lichtes am besten wahr, weshalb auch in der Regel, die Hälfte aller Fotozellen mit grünen Filter bedeckt sind. Die restlichen Fotozellen werden zu gleichen Teilen mit roten und blauen Filtern versehen [17].

Durch einen Prozess der als “bayer demosaicing” oder kurz “debayering” bezeichnet wird, kann durch Interpolation von benachbarten Feldern der Bayer-Matrix, der Farbwert für jedes Pixel eines Bildes berechnet werden.

Die Abmessung der Fotozelle bestimmen den Dynamikbereich der Kamera. Falls eine Fotozelle mehr Photonen erhält, als sie aufnehmen kann, dann geht sie in die Sättigung, sodass die zusätzlich einfallenden Photonen nicht mehr wahrgenommen werden. Selbst wenn eine Kamera einen grossen Dynamikbereich erfassen könnte, wäre der tatsächlich nutzbare Dynamikbereich, immer durch die Quantisierungsgenauigkeit, also der verwendeten Bittiefe, vorgegeben.

Tatsächlich beschreibt der Dynamikbereich eines Bildsensors das Verhältnis, zwischen dem hellsten messbaren Wert (Sättigung) und dem kleinsten noch messbaren Wert, der über dem Grundrauschen des Bildsensors liegt.

Das bedeutet, bedingt durch das Grundrauschen des Bildsensors und des A/D-Wandlers, wird der tatsächliche Dynamikbereich immer unter dem theoretisch möglichen Dynamikbereich bleiben. So reduziert sich zum Beispiel, der Dynamikbereich eines 16 Bit auflösenden Bildsensors, auf ungefähr 12 Bit, wodurch der theoretisch mögliche Wertebereich auf reduziert wird, also um den Faktor 16 abnimmt.



Abbildung 10: Tatsächlicher Dynamikbereich, bestimmt durch das Grundrauschen [18, S. 34]

## HDR – High Dynamic Range Fotografie

Herkömmliche Bildsensoren verfügen nicht über den Dynamikbereich der benötigten wird um den gesamten Helligkeitsbereich des Himmels, an einem klaren sonnigen Tage abzubilden. An solchen Tagen können die Unterschiede zwischen dem hellsten Bereich um die Sonnen und dem dunkelsten, wie zum Beispiel die Unterseite einer massiven Wolke, im Bereich von mehreren Zehnerpotenzen liegen.

Überschreitet die Szenen[[4]](#footnote-4)-Helligkeit den maximalen Wert, den der Bildsensor erfassen kann, dann gehen die entsprechenden Bereiche (Pixel) des Bildsensors in Sättigung.

Die vollständige Sättigung des Bildsensors, lässt sich auch als jener Helligkeitswert definieren, bei der die Varianz der Bildpixel ihr Maximum erreicht hat. Erhöht man die Helligkeit weiter, dann fällt die Varianz rasch bis auf null zurück, da praktisch alle Pixeln gesättigt sind (Messwert und Mittelwert sind identisch) [18, S. 41].



Abbildung 11 : Varianz der Bildpixel gegen die Belichtungszeit [18, S. 27]

Diese Definition kann auch zur Charakterisierung von Bildsensoren herangezogen werden, da der Plot der Varianz gegen die Belichtungszeit, bis zur Sättigung, linear für lineare Bildsensoren verläuft. Zur Charakterisierung des Verhaltens eines Bildsensors, verwendet man jedoch in der Regel, die sogenannte   
„Charactersitic Response Curve“, respektive die charakteristische Ansprechkurve. Dabei wird das digitalisierte Ausgangssignal (Mittelwert aller Pixel) gegen den gemittelten Wert der Bestrahlungsstärke gemessen. Die Form der Ansprechkurve definiert das Verhalten des Bildsensors. Diese kann linear, logarithmisch, S-förmig oder stückweise linear verlaufen, um nur einige Varianten zu nennen.

HDR Bilder können auf unterschiedliche Arten erzeugt werden. Dabei können Hardware- und Software- methoden unterschieden werden. Zu den Hardwaremethoden zählen, ein besonderes Pixeldesign (auch bekannt als HDR-Pixel), oder eine speziell zum Erzeugen von HDR Bildern entworfene Ansteuerung der Pixel. HDR-Pixel können zum Beispiel, Pixel mit logarithmischer Empfindlichkeit sein. Ein Bildsensor mit besonderer Ansteuerung, zur Aufnahme von HDR Bildern, ist der „Rolling-Shutter“-Bildsensor [18, S. 39]. Bei diesem Verfahren, werden nicht alle Pixel gleich lang belichtet.

Softwarebasierte Methoden, werden vor allem in der Photographie, Computergraphik und in wissenschaftlichen Anwendung häufig eingesetzt. Sie eigenen sich besonders für statische Szenen und ermöglichen extreme Dynamikbereiche. Nachteile von softwarebasierten Methoden sind, dass eine Bildserie der gleichen Szene aufgenommen werden muss, was nicht möglich ist bei bewegten Objekten oder sich ändernden Lichtverhältnissen. Ausserdem ist die Verarbeitungszeit, selbst bei moderater Auflösung und trotz eines leistungsstarken Rechners, immer noch lang. Es gibt jedoch optimierte Varianten der Softwarelösung, die bereits mit zwei Aufnahmen, ein HDR Bild, auch auf einem leistungsfähigen Einplatinencomputer berechnen können. Grundsätzlich sind die hardwarebasierten Methoden, akkurater und zuverlässiger im Vergleich zu den Softwaremethoden jedoch auch mit höheren Kosten verbunden.

Das Erstellen eines HDR Bildes, mittels eines Softwareverfahrens, beinhaltet grundsätzlich die folgenden Schritte. Zuerst wird eine Bildserie mit unterschiedlichen Belichtungszeiten, derselben Szene aufgenommen. Die Belichtungszeiten, wählt man so, dass 1 EV zwischen aufeinanderfolgenden Bildern liegt. Dabei bedeutet 1 EV, eine Verdopplung der Belichtungszeit. Jedes Bild deckt einen Teil des gesamten Dynamikbereichs ab. Bilder mit langen Belichtungszeiten, erfassen mehr Informationen in dunklen Bereichen, sind jedoch grösstenteils gesättigt. Kurze Belichtungszeiten, führen zu Bildern mit mehr Details in hellen Bereichen und starkem Rauschen in dunklen Bereichen. Danach, werden die einzelnen Bilder der Belichtungsreihe, zu einem HDR Bild zusammengefügt. Hierzu verwendet man die Funktion der Characteristic Response Curve (CRF), genauer deren Umkehrfunktion, die den Zusammenhang zwischen Pixelwerten der Belichtungsreihe und den entsprechenden Punkten der Szene herstellt. Die CRF muss jedoch zuerst berechnet werden. Unterschiedliche Verfahren, wie zum Beispiel das von Debevec und Malik erlauben, die Rekonstruktion der CRF aus der Belichtungsreihe. Nachfolgend werden die wesentlichen Schritte des Verfahrens von Debevec und Malik [19], zum besseren Verständnis des Entstehens eines HDR-Bildes, erläutert.

Den Helligkeitswert eines beliebigen Bildpixels erhält man indem man die CRF auf die Bestrahlstärke des korrespondierenden Bildpunktes der Szene, skaliert mit der Dauer der Belichtung , anwendet:

(6.1)

Da die CRF streng monoton wächst, kann die Umkehrfunktion gebildet werden. Durch neu anordnen der Terme und beidseitiges Logarithmieren erhält man:

(6.2)

Läuft über alle Pixel und über alle Belichtungszeiten , dann gibt es insgesamt Gleichungen, mit und als Unbekannte. Durch minimieren der Summe der Fehlerquadrate der Gleichung 6.2, können und berechnet werden:

(6.3)

Wobei die Umkehrfunktion der CRF ist und und für die maximale respektive minimale Anzahl aller Pixeln in den Bildern stehen. Der zweite Term der Gleichung 6.4, ist eine Glättungsfunktion zur Reduktion des Bildrauschens. ist eine Gewichtungsfunktion, zur unterschiedlichen Gewichtung einzelner Pixel. Gewichtet man Pixel deren Koordinaten in der Mitte der CRF liegen höher, dann nimmt insgesamt die Genauigkeit zu. In der Praxis wird das System nicht für alle Pixel gelöst, sondern lediglich für einen ausgewählten Teil. Die Pixel sollten dabei gleichmässig möglichst aus allen Bereichen des Bildes ausgewählt werden.



Abbildung 12: Aus den Bilder 1,2,3, aufgenommen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten,   
wird eine charakteristische Ansprechkurve (CRF) berechnet. Dabei verschiebt man die   
einzelnen Teile der Kurve solange, bis diese in eine glatte Kurve übergehen [20, S. 484].

Kennt man die Umkehrfunktion der CRF, dann lässt sich mit , die Radiance Map berechnen, die jedem Pixelwert des Bildes, eine zur ursprünglichen Szene korrespondierende, relative Bestrahlstärke zuordnet.

Die bisher beschriebenen Schritte, gelten lediglich für ein Graustufenbild. Für Farbbilder müssen die Schritte für jeden Farbkanal wiederholt werden und jeweils eine eigne CRF berechnet werden.

Ist ein HDR-Bild erstellt, erfolgt häufig aber nicht zwingend ein Tone Mapping. Abgesehen von teuren, speziell zur Darstellung von HDR Bildern entworfenen Bildschirmen, verfügen gewöhnliche Bildschirme nicht über den benötigten Dynamikumfang um ein HDR Bild darzustellen. Deshalb wird mit Tone Mapping der Dynamikumfang des HDR Bildes soweit komprimiert, bis es auf einem gewöhnlichen Bildschirm dargestellt werden kann. Das Tone Mapping benutzt eine nicht lineare Funktion, um den Farbraum des HDR Bildes, in einen anderen Farbraum, tieferen Dynamikumfangs abzubilden.



Abbildung 13: Kombination einzelner LDR Bilder zu einem HDR Bild [21, S. 3].   
Sowie Kompression des Dynamikumfangs, zur Darstellung auf einem Bildschirm.

## RAW vs. JPEG

Eine RAW-Datei enthält, wie der Name vermuten lässt, rohe unbearbeitete Informationen die direkt vom Bildsensor stammen. Die RAW-Datei wurde noch nicht dem Demosaicing unterzogen. Digital Kameras verarbeiten in der Regel die Rohformate zu JPEG oder TIFF Bildern, die anschliessend auf der Speicherkarte abgelegt werden. Die Konvertierung der Rohdaten in das JPEG Format ist im Wesentlichen eine Kompression, bei der grosse Teile der ursprünglichen Bildinformation verloren gehen. Das Erstellen eines JPEG Bildes beinhaltet mehrere Teilschritte wie das Demosaicing, Weissabgleich, Schärfen, Korrektur der Sättigung um einige zu nennen [22]. Zudem ist ein JPEG Bild auch eine Gamma[[5]](#footnote-5) korrigierte Reproduktion des ursprünglichen Rohformats, bei der die Helligkeit des Bildes, dem menschlichen Empfinden angeglichen wird. Ein RAW-Bild hingegen, bleibt trotz des Demosaicing linear in Bezug auf die enthaltenen   
Helligkeitsinformationen. Wurde das JPEG Bild erstellt, lässt es sich nicht mehr zurückkonvertieren, da einige der Teilschritte zu Informationsverlusten führen. Insgesamt verliert das JPEG Bild an Genauigkeit gegenüber dem RAW Bild [23]. Wie bereits erwähnt, werden die Rohdaten mit einer Bittiefe von 16 Bit hinterlegt. Bei der Kompression zu einem JPEG Bild geht jedoch die ursprüngliche Bittiefe verloren, da für JPEG Bilder lediglich 8 Bits pro Farbkanal verwendet werden.

Seite 16 Kapitel 2.2.4 in C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\diverse arbeiten \Varghese-2014-ColorCalibratedHighDynamicRangedTimelapseVideousingRemoteCaptur.pdf

## Evaluation

Anhand der Anforderungen und der Analyse der Algorithmen ist die Sensorik zu evaluieren. Auch eine geeignete Controller-Plattform ist zu bestimmen.

Es sind geeignete Verfahren zu bestimmen, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse der Algorithmen zu überprüfen.

-Evaluatin der EinplatinenComputer  
-Evaluatin der Camera Module

- Habe die charakteristischen Kureven des sony imx Bildsensors aufgenommen um zu zeigen dass sies wie im Paper ‘Laying foundation …’ linear sind.



Abbildung 14: CRF aufgezeichnet für den Sony IMX219 Bildsensor.

**Evaluation des Fischaugenobjektives**

C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\allgemein sky imaging\ Development of a sky imaging system for short-term solar power forecasting.pdf (Uerquhard)

For a given sensor size, the selected projection places a limit on the maximum allowable focal length of a lens while still being able to capture the complete sky dome (or conversely, the minimum sensor size given a focal length).

**Acryldome Uerquhard S 6**

ent, a 1/16th inch thick, neutral density acrylic dome was used on the USI. The dome has a UV hard-

coat applied to minimize transmission of high energy solar radiation which helps reduce component degradation. Amorphous silicate glass has superior transmissivity and scratch resistance than acrylic, but is more difﬁcult to machine and handle, and designing proper sealing for a glass dome is more complicated (and thus more expensive). Polycarbonate, while having similar transparency and machining character-

istics to acrylic, becomes opaque due to oxidation, making it a poor choice as a dome material (stabilizer additives can dramatically improve the lifetime). A drawback of acrylic is that it is susceptible to scratching from wind-blown particulates (common in the desert), improper cleaning, and birds which occasionally land on the dome and scratch it with their talons or beak. The use of a

Es zeigt sich, dass die Beschaffung eines geeigneten Fischaugen-Objektives in diesem Segment besonders schwierig ist.

# Konzept der Vorhersage

Zwei identische Sky Cameras an unterschiedlichen Standorten, beobachten den Himmel. Kamera 1 befindet sich auf dem Dach des iHomeLab. Kamera 2 befindet sich auf dem Dach des Trakt IV, siehe hierzu den Lageplan in der Abbildung 16. Die Entfernung[[6]](#footnote-6) zwischen den Kameras beträgt etwa 180 m Luftlinie. Beide Sky Cameras sind jeweils mit derselben Software ausgestattet.

- raw Bilder 🡪 Aufbereitung 🡪 debayering (BGGR)  
 (siehe: Processing RAW images in Python in : \Bildverarbeitung\HDR images\Processing RAW images in Python.pdf )  
-Segmentierung Wolkendetektion  
- Paper von Miguel Lopez  
- Berechnung der DNI Solarstrahlung -> nach Soumyabrata 🡪 square cropped Luminance  
 Möglichkeit der Interpolation der fehlenden Sonennpositionen erwähnen  
- Schematischen Ablauf «Flussdiagramm» zeichnen zeigen

# ProSekKa Sky Camera

Die Entwicklung der ProSekKa Sky Camera, soll in erster Linie aufzeigen, wo die technisch realisierbare Grenze liegt, wenn ausschliesslich Standardkomponenten verwendet werden. Preise von Handelsübliche Sky Camera bewegen sich schnell im vierstelligen Bereich. Dagegen sollen die Gesamtkosten dieser kostengünstigen Variante, den zwei bis untern dreistelligen Bereich nicht überschreiten.

## Allgemeiner Aufbau der ProSekKa Sky Camera

Die ProSekKa Sky Camera, setzt sich zusammen aus einem Spritzwasser geschütztem Gehäuse, einem Raspberry Pi 3 Model B und einem Raspberry Pi Kamera Modul, Version 2. Zusätzlich verfügt die Sky Camera über eine Heizung und eine Entfeuchtungsanlage, um Beschlagen des Acryldoms zu verhindern.

Es wurden drei identische Kameras aufgebaut. Die dritte Kamera dient als Test- und Entwicklungsplattform für Neuerungen und Erweiterungen der Software. Beide Kameras sind über das Hochschulnetzwerk mit dem FTP-Server des IHomeLab verbunden. In regelmässigen Abständen nehmen die Kameras Bilder auf. Dabei entstehen sehr grosse Datenmengen, die effizient abgelegt werden müssen. Jeweils um Mitternacht, laden die Kameras ihre Bilder als ZIP-Datei auf den FTP-Server. Der FTP-Server dient dabei lediglich als Zwischenablage. Die Bilder werden schlussendlich auf ein dediziertes NAS-Laufwerk verschoben, wo sie bis zur Weiterverarbeitung bleiben. Wurden die Bilder Nachbearbeitet, dann werden diese, inklusive relevanter Bilddaten, in einer MySQL Datenbank, auf dem NAS-Laufwerk, abgelegt. Das NAS-Laufwerk verfügt über einen MySQL-Server, womit effizient auf die Bilder zugegriffen werden kann, auch von mehreren Rechnern gleichzeitig.

Die Kameras verfügen über zusätzliche Sensoren. Gemessen werden innen und Aussentemperatur sowie die Helligkeit. Diese Daten werden lokal in einer SQL Datenbank in der Kamera aufgezeichnet.



Abbildung 15 : Schematischer Aufbau der ProSekKa Sky Camera.

Als Betriebssystem, wird Raspbian Stretch[[7]](#footnote-7) eingesetzt, ein von Debian, für Einplatinencomputer, abgeleitetes Betriebssystem, dass eine komfortable Desktop-Umgebung bietet, und bereits über vorinstallierte Entwicklungswerkzeuge verfügt. Dank RealVNC[[8]](#footnote-8) einer vorinstalliert Remote-Desktop Anwendung, kann über eine Cloud-Verbindung, auch dann auf ein Raspberry Pi zugegriffen werden, wenn dieses in einem privaten Netzwerk eingebunden ist, sofern das Netzwerk über einen Internetzugang verfügt. Zusätzlich bietet RealVNC auch eine komfortable App für IPhone an. Damit wird der Zugriff auf die beiden Wolken-Kameras noch einfacher und unabhängiger.

## Ground Truth

Die Hochschule Luzern für Technik und Architektur, in Horw, verfügt über eine wissenschaftliche Messstation zur Messung der Sonneneinstrahlung. Die Anlage befindet sich auf dem Dach des Trakt IV. Die Messstation entspricht den Vorgaben der NREL, der National Renewable Energy Laboratory in the USA [24].

Zur Interpretation der Bilder und Kalibrierung der Sky Cameras, werden lokale Messdaten benötigt. Hierzu wird die Sky Camera 2, unmittelbar neben der Messstation platziert. So kann sichergestellt werden, dass das geeichte Pyranometer und die Sky Camera, unter gleichen Bedingungen messen.



Abbildung 16: Lageplan Hochschule Luzern für Technik und Architektur

Die Messstation besteht aus zwei CMP11 Kipp and Zonen Pyranometern, zur Messung der horizontalen globalen (GHI) und diffusen Sonneneinstrahlung (DHI). Zur Messung des diffusen Anteils wird ein Schattenring verwendet, Abbildung 17, links. Der horizontale, normaldirekte Anteil der Sonnenstrahlung (DNI), wird aus den beiden Messgrössen berechnet.

(7.1)



Abbildung 17: Links Messung der diffusen und rechts der globalen Strahlung.

Die Abtastrate des Pyranometers beträgt 1 Hz. Gemessen wird in Abständen von einer Minute, dabei werden 60 Messwerte pro Minute, gemittelt. Ein Datenlogger übermittelt die Messwerte an die Licht@HSLU Datenbank. Über den Online-Dienst Zenodo, können Datensätze heruntergeladen werden [25].



Abbildung 18: Messstation und Datenerfassung

Nachfolgende Tabelle fast die Spezifikationen des Kipp and Zonen CMP11 Pyranometers zusammen.

|  |  |
| --- | --- |
| **Spectral range (50% points)** | 285 to 2800 nm |
| **Sensitivity** | 7 to 14 µV/W/m² |
| **Response time** | < 5s |
| **Zero offset A** | < 7 W/m² |
| **Zero offset B** | < 2 W/m² |
| **Directional response (up to 80° with 1000 W/m² beam)** | |  |  | | --- | --- | |  | < 10 W/m² | |
| **Temperature dependence of sensitivity (-10 ºC to +40 ºC)** | < 1 % |
| **Operational temperature range** | -40 °C to +80 °C |
| **Maximum solar irradiance** | 4000 W/m² |
| **Classification to ISO 9060:2018** | Spectrally Flat Class A |

Tabelle 3: Spezifikationen des CMP11 Pyranometers von Kipp and Zonen

## Datensätze

Sky Camera 1 wurde am 11. November 2017 in Betrieb genommen und kurz darauf Sky Camera 2 am 9. Januar 2018. Beide Kameras waren bis am 12. November 2018 in Betrieb. Es wurden entsprechend der verwendeten Kamerasoftware (siehe Kapitel 8.5.1), anfänglich zehn Belichtungsreihen sowohl in RAW als auch in JPG Format aufgenommen. Spätere Versionen der Kamerasoftware benötigten nur noch drei Belichtungsreihen. So entstand während der gesamten Betriebszeit der Kameras, 11 Terabyte an Bilddaten.

Es kam zeitweise zu Unterbrechungen, aus Gründen der Wartung und Reinigung der Kameras. Die Acrylkuppel musste regelmässig gereinigt und wegen Verwitterung mehrfach ersetzt werden. Die Sky Camera 2 erlitt einen 3 Monate dauernden Unterbruch, von Anfangs Juli bis Ende September 2018, da die Steckkontakte des Ethernetkabels, sowie die Steckbuchse im Kameragehäuse, korrodierten und deshalb ersetzt werden mussten.

Mitte Januar 2018, beschädigte ein heftiges Unwetter Teile der Messstation an der Hochschule. Starke Böen lösten die Befestigung der Pyranometer, wodurch sich diese im Lauf der Zeit verschoben. Lediglich die Daten des ersten Quartals 2018, sind zuverlässig und können verwendet werden. Für die restliche Zeitspanne, musste auf die Daten der MeteoSchweiz [26] ausgewichen werden. MeteoSchweiz betreibt ein automatisches Netzwerk von Messstationen in der Schweiz, auf deren Daten online zugegriffen werden kann. Die Bodenmessstation Allmend, befindet sich ausserhalb der Stadt Luzern und liegt etwa 3.7 Km von der Hochschule entfernt. Sie wurde als nächstgelegener Ersatz ausgewählt. Die Messfrequenz der Allmend beträgt 10 Minuten, entgegen der im Minutentakt aufgelösten Messdaten der Hochschule. Nachfolgende tabellarische Zusammenfassung, beschreibt die Bodenmessstation Allmend:

|  |  |
| --- | --- |
| **Station** | Luzern |
| **Stationskürzel** | LUZ |
| **Stationshöhe** | 454 m über Meer |
| **Breiten-/Längengrad** | 47.036442 / 8.301014 |
| **Daten seit** | 01.01.1864 |
| **Parameter** | Lufttemperatur  Relative Luftfeuchte  Luftdruck  Sonnenscheindauer  Globalstrahlung  Niederschlag  Windgeschwindigkeit |

Abbildung 19: Zusammenfassung der Bodenmessstation Luzern in der Allmend.

Der Umstand, dass die Referenzmessung, mit dem Ausweichen auf die alternative Messstation, nicht mehr am selben Ort wie die Aufnahmen des Himmels stattfindet, erschwert massgeblich die Interpretation der Bilddaten und die Kalibrierung der Sky Cameras. Durch die örtliche Trennung der Bildaufnahme von der korrespondierenden Strahlungsmessung, geht der direkte Zusammenhang zwischen diesen verloren. Mit anderen Worten, eine Ground Truth fehlt, denn das Pyranometer „sieht“ nicht dieselbe Wolke wie die Sky Camera, da sich diese auf dem Weg zwischen Pyranometer und Kamera, in Form und Beschaffenheit, verändert hat.

Da der Fehler in den Messdaten der Hochschule erst spät erkannt wurde, blieb keine andere Wahl, als die Messdaten der alternativen Messstation zu verwenden und mit der damit verbunden Unschärfe der Messdaten umzugehen.

## Hardware und Aufbau der ProSekKa Sky Camera

Als Prototypen Gehäuse bietet sich ein kleiner Kunstkoffer an, der sehr gut zugänglich ist und dank Gummidichtungen gegen Regen und eindringende Feuchtigkeit, sehr gut geschützt ist.



Abbildung 20: Kunststoffkoffer KK-S1 von Fireking, als Kamera Gehäuse.

Der Koffer wurde mit entsprechenden Aussparungen für das Fischaugenobjektiv und Anschlüsse versehen. Alle Anschlüsse sind gemäss IP67, spritzwassergeschützt und können bei Bedarf verschlossen werden. Insgesamt wurden drei Anschlüsse vorgesehen, für Netzwerk und USB sowie Stromversorgung. Erwähnenswert ist der direkte USB Zugang zum Raspberry-Pi, der sich als sehr nützlich erwiesen hat. Er ermöglicht das Anschliessen von Tastatur und Mouse, mittels eines Wireless Adapters, ohne das die Kamera im laufenden Betrieb geöffnet werden muss, wodurch Wartungsarbeiten auch Vorort möglich sind.

Das Fischaugenobjektiv befindet sich unter der Acrylkuppel, versenkt im Kofferdeckel. Auf der Rückseite des Kofferdeckels, hält ein starker Magnetring auf dem Raspberry-Pi Kamera-Modul, das Fischaugenobjektiv fest.

Als Witterungsschutz dient ein Acryldom, der auf einer dünnen Gummimatte aufliegt und mit Schrauben, fest mit dem Kofferdeckel verbunden ist. Eine Silikonpaste zwischen Gummimatte und Acrylglas, bietet noch besseren Schutz gegen das Eindringen von Wasser.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Abbildung 21: Sky Camera geschlossen und geöffnet, mit eingebauter Hardware im Inneren der Kamera.

### Bestandteile der Sky Camera

Da an beiden Standorten Strom zur Verfügung steht, ist der Prototyp der Sky Camera für Netzbetrieb ausgelegt. Abgesehen von der Kuppelheizung, die über ein eigenes Netzteil gespeist wird, werden die restlichen Baugruppen über das Raspberry Pi mit Strom versorgt. Das Raspberry Pi bietet sowohl 5V, wie auch 3V Spannungsversorgung an. Dies erlaubt es neben den 3V gespiesen Sensoren, auch den Lüfter der Entfeuchtungsanlage über das Raspberry Pi zu versorgen. Die nachfolgende schematische Darstellung der einzelnen Baugruppen, fasst das beschriebe nochmals zusammen.



Abbildung 22: Bestandteile der Sky Camera

### Kameradom Heizung

Erste Aufnahmen mit der Sky Camera haben gezeigt, dass die Acrylkuppel bei niedriger Lufttemperatur und hoher Luftfeuchtigkeit häufig von innen und aussen beschlagen ist. Die Kuppel beschlägt von aussen, wenn dessen Temperatur, der Taupunkttemperatur entspricht oder tiefer als diese liegt.

Um das Beschlagen der Acrylkuppel von aussen zu verhindern, muss das Äussere der Acrylkuppel über den Taupunkt erwärmt werden. Hierzu kann im Innern der Kuppel eine Heizung installiert werden. Die naheliegendste Variante, besteht aus mehreren in Serie geschalteten Leistungswiderständen. Hierfür wurden zwölf 1 Watt Leistungswiderstände in Serie geschaltet, und am Boden der Kuppel angebracht. Die Widerstandsheizung wird durch ein verstellbares 220AC/12DV - Steckernetzteil gespiesen. Die Ausgangsspannung des Netzteils, lässt sich von 4 Volt bis 12 Volt, in Schritten von 1 Volt einstellen.

Um das Beschlagen von innen zu verhindern, muss die Luftfeuchtigkeit innerhalb der Kuppel reguliert werden. Dies wird mittels einer eingebauten Entfeuchtungsanlage erreicht, die im Kapitel 7.5.4 näher beschrieben wird.

### Sensoren

Um optimale Betriebsbedingungen gewährleistet zu können, wurden an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Kamera Sensoren angebracht. Unterhalb der Acrylkuppel befindet sich ein DS18B20 digital Thermometer, das die Temperatur innerhalb der Kuppel misst. Zusätzlich, um das Fischaugenobjektiv angeordnet, befindet sich links, ein Helligkeitssensor, TSL2561 und rechts ein RGB-Farbsensor, TCS34725.

Im Innern der Entfeuchtungsanlage, die im folgenden Kapitel 7.5.3 näher beschrieben wird, ist ein digitaler Feuchtigkeitssensor DHT22, eingebaut. Ausserhalb der Kamera am Gehäuse, ist ein Infrarotthermometer, MLX90614 befestigt. Damit sollen Wolken direkt über der Kamera detektiert werden.



Abbildung 23: Links: Detailaufnahme Objektiv, Sensoren und Widerstandsheizung unter der Acrylkuppel. Rechts: Infrarot Aussenthermometer MLX90614 zur Detektion von Wolken.

### Kontaktloses Infrarotthermometer MLX90614

Das Melexis MLX90614ESF-BCI ist ein digitales Infrarotthermometer zur kontaktlosen Temperatur Messung. Gemessen werden sowohl Umgebungstemperatur wie auch Objekttemperaturen, die sich im Sichtfeld des Sensors befinden. Das MLX90614 verfügt über einen integrierten 17-Bit AD-Wandler inklusive Arbeitsspeicher, wodurch die Temperaturberechnung im Sensor erfolgen kann. Der Sensor wird kalibriert ausgeliefert. Er verfügt über eine 10-Bit Auflösung und misst Temperaturen im Bereich von -40 °C bis   
85 °C, mit einer Auflösung von 0.14 °C. Es sind verschiedene Varianten erhältlich, mit unterschiedlichem Sichtfeld. Das Gehäuse ist witterungsbeständig und kann ohne weiteren Schutz, für Aussenanwendungen eingesetzt werden.

|  |  |
| --- | --- |
| **Temperaturbereich** | -40 °C … 85 °C |
| **Auflösung** | 10 Bit resp. 0.14 °C |
| **Genauigkeit** | 0.5 °C |
| **Sichtfeld (FOV)** | 5° |
| **Speisespannung** | 3V |

Tabelle 4: Spezifikationen Melexis MLX90614ESF-BCI.

#### Detektion von Wolken mittels Infrarotthermometer

Sloan, Shaw und Williams [27] haben in ihrer Arbeit gezeigt, dass Infrarotmessungen des Himmels zwischen Wellenlängen über 5 m (insbesondere zwischen 8 m und 14 m ) besonders empfindlich, auf das Vorhandensein von Wolken reagieren. Sowohl Wolken als auch Wasserdampf absorbieren und emittieren Strahlung in diskreten Bändern über das gesamte Infrarotspektrum. Deshalb ist ein infrarotempfindliches Messgerät, wie zum Beispiel ein Infrarotthermometer, in der Lage Wolken und Wasserdampf, die wärmer sind als der klare Himmel, zu erkennen.

Richtet man das MLX90614 Infrarotthermometer gegen den Zenit aus, eignet es sich als Detektor für Wolken, die sich direkt über der Kamera befinden.

Ohne Wolken, die die Wärmestrahlung zurückreflektieren, ist die Lufttemperatur für einen klaren Himmel sehr niedrig, typischerweise kleiner als 10 °C. Dies führt zu einem großen Unterschied (> 20°C) zwischen Umgebungs- und Himmelstemperatur.

Sind Wolken vorhanden, dann geht ein Grossteil der Wärmestrahlung nicht verloren, sondern wird zur Erde und damit zum Sensor zurückreflektiert. Der Unterschied zwischen Himmels- und Umgebungstemperatur bleibt dabei gering.

#### Taupunkt und Wolkenbildung

Unter Taupunkt versteht man die Temperatur, bis zu der eine Luftmasse abkühlen muss, damit das darin enthaltene Wasser zu kondensieren beginnt. Kühlt man Luft ab, dann nimmt die relative Luftfeuchtigkeit ständig zu, bis die Luft gesättigt ist, also100% relative Luftfeuchtigkeit erreicht hat. Senkt man die Temperatur weiter, dann kondensiert der Wasserdampf und es bilden sich feine Wassertröpfchen. Dasselbe geschieht in der Atmosphäre, in entsprechender Höhe. Dort nimmt die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe ab und die relative Luftfeuchtigkeit steigt, bis die Luft gesättigt ist. Oberhalb dieser Höhe kondensiert das Wasser und es bilden sich Wolken. Aufsteigende Luft kühlt sich mit etwa 1 °C pro 100 Metern ab. Angenommen die Luft am Boden hat am Morgen eine Temperatur von 16 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 50%, dann liegt der Taupunkt[[9]](#footnote-9) bei 5.6 °C. Steigt nun die Luft im Verlauf des Tages auf und erreicht eine Höhe von 1‘040[[10]](#footnote-10) Metern, dann wird sie auf 5.6 °C abgekühlt sein. Damit hat sie ihren Taupunkt erreicht, sodass bei weiterem Aufstieg, der enthaltene Wasserdampf kondensiert. Es entsteht eine Wolke. Auf diese Weise lässt sich abschätzen, in welcher Höhe die Wolkenbildung einsetzt [28].

Aus der aktuellen Differenz von Lufttemperatur und Taupunkt am Boden, lässt sich mit der Faustformel nach Henning die Höhe der Quellwolken, näherungsweise bestimmen.

(7.2)

### Entfeuchtungsanlage

Die Widerstandsheizung allein reicht nicht aus um das Beschlagen des Acryldomes, im Innern, zu verhindern. Um das Beschlagen im Innern der Kuppel zu verhindern, muss die Luftfeuchtigkeit innerhalb der Kamera reguliert werden. Um dies zu erreichen, wurde eine Entfeuchtungsanlage in die Kamera eingebaut. Dabei handelt es sich um einen luftdicht verschlossenen Behälter, der mit einem Trocknungsmittel gefüllt ist. Ein Computerlüfter im Innere des Behälters, saugt die feuchte Luft aus der Kuppel, leitet diese über das Trocknungsmittel, um es anschliessend wieder in die Kuppel hinein zu blasen. Zwei Rohrstutzen am Behälter, ermöglichen das einfache Entfernen der gesamten Anlage, sodass diese gegen eine neu aufbereitete, ausgetauscht werden kann. Diese Vorgehensweise ermöglicht ein schnelles Austauchen des Trocknungsmittels, dass sobald es mit Feuchtigkeit gesättigt ist, ersetzt werden muss. Dadurch kann der Betriebsunterbruch der Kamera, so kurz wie möglich gehalten werden. Die nachfolgende schematische Darstellung,   
illustriert nochmals die Funktionsweise der Entfeuchtungsanlage.



Abbildung 24: Links Aufsicht und rechts Seitenansicht der Entfeuchtungsanlage.



Abbildung 25: Links: geöffnete Entfeuchtungsanlage. Rechts: Entfeuchtungsanlage von vorne.

Im Innern der Entfeuchtungsanlage befindet sich zusätzlich ein Feuchtigkeitssensor, der die Luftfeuchtigkeit misst. Steigt die Luftfeuchtigkeit über einen festgelegten Wert, dann schaltet das Raspberry Pi, mittels eines NPN-Transistors in Emitterschaltung, den Lüfter ein.



Abbildung 26: NPN Transistor in Emitterschaltung zum Ein- und Ausschalten des Lüfters.

Beim Trocknungsmittel handelt es sich um ein sogenanntes Molekularsieb [29], dass aus synthetisiertem Zeolithe[[11]](#footnote-11) hergestellt wird. Das Molekularsieb verfügt über ein starkes Adsorptionsvermögen für Gase, Dämpfe und gelöste Stoffe mit bestimmten Molekülgrössen. Es eignet sich zur sogenannten scharfen Trocknung, bei der jegliche Feuchtigkeit dem Gas entzogen wird und im Trocknungsmittel eingelagert wird. Durch Erhitzen bei 250 – 350° C, kann das Trocknungsmittel für den Wiedergebrauch, regeneriert werden.



Abbildung 27: Molekularsieb Perlen, zur scharfen Trocknung feuchter Luft.

## Software und Algorithmen

Als Programmiersprache wurde Python verwendet. Es ist einfach handzuhaben und lässt sich ohne weitern Aufwand, auf einem Raspberry Pi ausführen. Ein weiterer Vorteil von Python ist, dass es eine Vielzahl von problemspezifischen Bibliotheken anbietet, wie zum Beispiel OpenCV, das speziell für die Bildbearbeitung entwickelt wurde. Jupyter Notebook, eine webbasierte Client Anwendung für Python, eignet sich ausserdem, hervorragend zur Auswertung, Dokumentation und Darstellung der Daten. Ausserdem lassen sich Python-Programme leicht zwischen verschiedenen Plattformen portieren. So besteht kaum bis kein Aufwand um ein Python Programm, das für ein Linux Betriebssystem geschrieben wurde, auf ein Windowssystem zu übertragen.

Um die Konsistenz der Software zwischen den beiden Kameras zu gewährleisten, wurde GitHub[[12]](#footnote-12) zur Versionsverwaltung eingesetzt. So konnte sichergestellt werden, dass stets dieselbe Version auf beiden Kameras installiert ist und deshalb ähnliche Resultate zu erwarten sind. Jedem Teilproblem wurde ein eigenes Repository zugewiesen, um die [Überschaubarkeit](https://synonyme.woxikon.de/synonyme/%C3%BCberschaubarkeit.php) zu wahren. So sind die vier Haupttehmen, die Kamerasteuerung inklusive der Sensordatenerfassung, das Postprocessing des Bildmaterials, die Detektion der Wolken sowie das Tracking der Wolken.

Tracking und Detektion der Wolken, sind Programme mit Benutzeroberflächen. Dagegen besteht die Kamerasoftware inklusive der Sensordatenerfassung aus einzelnen Skripten, die ihrer Aufgabe entsprechend, geordnet, in einer Verzeichnisstruktur abgelegt sind. Einige der Skripte zur Kamerasteuerung werden als Cronjob[[13]](#footnote-13), periodisch durch das Betriebssystem aufgerufen. Andere hingegen werden mit dem Neustart der Kamera ausgeführt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Programme beschrieben, die sowohl für die Steuerung der Kamera inklusive der Sensordatenerfassung, wie auch für die anschliessende Bildverarbeitung und Auswertung der Daten, verwendet wurden. Abgesehen von der Kamerasoftware die für das Raspberry Pi entwickelt wurde, sind die Programme zur Bildverarbeitung und Auswertung der Daten, zur Ausführung auf einem Desktop-Computer vorgesehen.

Diese Massnahme soll in einem ersten Entwicklungsschritt sicherstellen, dass Algorithmen zur Bildverarbeitung entwickelt werde können, ohne dass eine zu geringe Rechenleistung des Raspberry Pi, eine Einschränkung bedeutet. In der nächsten Iteration, wäre die Optimierung der Algorithmen für deren Betrieb auf dem Raspberry Pi erfolgt. Aus Mangel an Zeit, kam es jedoch nicht mehr dazu.

### Kamerasteuerung mittels Cronjobs

Wie bereits eingangs erklärt, besteht die Steuerung der Kamera im Wesentlichen aus wiederkehrenden täglichen Aufgaben. Wie zum Beispiel das Starten und Beenden der Aufnahmen oder das Zippen der Bilder und weiterleiten an den externen FTP – Server. Für solche zu bestimmten Zeiten wiederkehrende Aufgaben, bieten UNIX Systeme sogenannte Cron-Dienste an, die automatisch Skripte und Programme zu vorgegebenen Zeiten starten können. Die auszuführenden Skripte (Cronjobs), werden in einer Tabelle, der „crontab“ gespeichert. Ein Eintrag in der Tabelle besteht aus sechs Spalten, wobei in den ersten fünf die Zeitangabe[[14]](#footnote-14) steht, wann der Cronjob ausgeführt werden soll und in der Letzten, das auszuführende Skript. Die nachfolgende Tabelle listet die sieben Cronjobs, die zur Steuerung der Kamera eingesetzt werden.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 | @reboot | /usr/bin/python3 /home/pi/python\_scripts/sensors/check\_humidity.py |
| 2 | \*/1 \* \* \* \* | /usr/bin/python3 /home/pi/python\_scripts/sensors/write\_sensors\_DB.py |
| 3 | 30  7 \* \* \* | /usr/bin/python3 /home/pi/python\_scripts/helpers/takeTestPic.py |
| 4 | 00 17 \* \* \* | /usr/bin/python3 /home/pi/python\_scripts/helpers/takeTestPic.py |
| 5 | 30 16 \* \* \* | /usr/bin/python3 /home/pi/python\_scripts/helpers/zipitall.py |
| 6 | \*/10 9-15 \* \* \* | /usr/bin/python3 /home/pi/python\_scripts/picam/picam.py |
| 7 | 15 0 \* \* \* | /usr/bin/python3 /home/pi/python\_scripts/helpers/ftpexporter.py |

Tabelle 5: Liste der Cronjobs, die zur Steuerung der Kamera verwendet werden.

Mit dem Neustart der Kamera beginnt auch die

In der ersten Zeile wird die Überwachung der Luftfeuchtigkeit mit jedem Neustart der Kamera aktiviert.

Mit einem kurzen Luftstoss

Gleich zu Beginn, Überschreitet die Luftfeuchtigkeit, einen vorgegebener Schwellenwert, dann schaltet das Programm den Lüfter ein und lässt ihn solange laufen bis die Luftfeuchtigkeit Wert Entfeuchtungsanlage wird

### Sensordatenerfassung

Im Repository „camera\_scripts“, im Verzeichnis „sensors“, befinden sich alle Programme die für den Betrieb der Sensoren und das Erfassen der Messdaten benötigt werden.



Abbildung 28: Links: das Repository „camera\_scripts“, das zum Betrieb der Kamera, alle notwendigen Skripts enthält. Rechts: Das Verzeichnis „sensors“, mit den Skripts zum Betrieb der Sensoren.

### Software für Bildaufnahmen

Im Verlauf der Entwicklung der Kamerasteuerung entstanden insgesamt drei Softwareversionen. Sie wiederspiegeln den Entwicklungsgang der Kamerasteuerung, die mit jeder weiteren wichtigen Erkenntnis in einer verbesserten Version mündete. Die bedeutendsten Entwicklungsstufen beinhalteten, die Reduktion der Anzahl benötigten Bilder für die Belichtungsserie, sowie eine automatische Belichtungssteuerung, in der finalen Version.

Die erste Version ist sehr einfach aufgebaut und besteht aus drei einzelnen Klassen. Die Helper Klasse beinhaltet alle untergeordneten Hilfsmethoden. Die Klasse Logger übernimmt das Protokollieren von Kameraeinstellungen und Fehlern. Fehler werden fortlaufend Kameraeinstellungen

Die Kameraeinstellungen, werden jeweils mit den Bildern Fehler als auch Einstellungen, werden jeweils in eigene Dateien abgelegt.

Methoden, die Bei den Klasen Handelt es sich um eine aufgebaut und besteht im Wesentlichen aus

Diese unterscheiden sich wurden drei unterschiedliche Softwareversionen zur Steuerung der Kameras verwendet.

* Tabelle von wann bis wann welche Software eingesetz wurde welche unterschiede. Wieso

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Software Version | Eingesetzt von – bis | Anzahl einzelner Belichtungen | Besonderheiten |
| Version 1 | 2017 02.11 – 2018 11.13 | 10 | keine |
| Version 2 | 2018 04.03 – 2018 10.08 | 3 | keine |
| Version 3 | 2018 11.12 – 2018 11.13 | 3 | mit automatischer Belichtungssteuerung |

Unbedingt erwähnen wo sich diese Software befindet!

Beschreibung des Raw Bayer data captures mittels picamera:  
<https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.12/recipes2.html> (vorallem hier !)

<https://picamera.readthedocs.io/en/release-1.13/recipes2.html>

### Software zur Wolkendetektion

Die zwei wesentlichen Schritte in der Bildverarbeitung mittels derer schlussendlich die aktuelle und zukünftige Sonneneinstrahlung bestimmt werden kann, sind das Segmentieren des Himmels, also das unterteilen des Himmels in bewölkt und unbewölkt sowie das Tracking der Wolken. Hat man die Wolken im Bild bestimmt und kennt zudem die Position der Sonnen, kann mittels Projektion, der Schattenwurf der Wolken bestimmen werden. Durch das Tracking der Wolken lässt sich ihre Geschwindigkeit und Richtung bestimmen. Damit werden Prognosen über ihre zukünftige Position möglich.

Für das Tracking wird der Optische Fluss nach Gunnar-Farnbeck eingesetzt. Es handelt sich hierbei um den sogenannten dichten Fluss. Dicht deshalb, weil der Algorithmus für jeden Punkt im Bild den optischen Fluss berechnet.

Der Algorithmus zur Segmentierung des Himmels besteht aus zwei Teilschritten.   
Der erste Schritt beinhaltet die Transformation des Bilds in den YCbCr Raum. Anschliessend wird ein Blauton vorgegeben und eine zusätzliche obere Grenze, sodass alle Pixel ausgewählt werden die noch innerhalb der Limite liegen.

Der zweite Schritt besteht darin die Contourline der soeben gefundenen Bereiche zu bestimmen.

### YCbCr-Farbraum

Ursprünglich für das PAL Fernsehen entwickelt. Besitzt drei Farbkanäle:

y-Helligkeit  
Cb (Blue/Yellow-Chrominance)  
Cr (Red/Green-Chrominance)

Entscheidend für die Segmentierung des Himmels ist die Wahl eines geeigneten Farbmodells. Da im Wesentlich zwischen zwei unterschiedlichen Pixelklassen nämlich Himmel und Wolken unterschieden werden soll liegt die Annahme nahe das sich vor allem Farbmodelle mit einer sogenannten bimodalen Verteilung am besten eignen. Bimodal bedeutet hier, dass der Farbraum im Wesentlichen durch zwei Farbcharakteristiken beschrieben wird. Ein Vertreter dieser Klasse ist das YCbCr Farbmodell. Es wurde ursprünglich für das digitale Fernsehen entwickelt und wird auch beim JPEG Verfahren eingesetzt.   
Das YCbCr Farbmodell wird durch drei Kanäle beschrieben wobei der Y – Kanal den Helligkeitswert eines Pixels angibt und die beiden Farbkanäle jeweils eine Abweichung von einem mittleren Grauwert entlang der beiden Achsen Cb und Cr angeben. Man kann sich das so vorstellen wie einen Schieberegler der entlang einer Achse angibt wie sehr man vom mittleren Grauwert zwischen den entgegengesetzten Farbpaaren z.B. Blau und Gelb abweicht.

Das YCbCr-Model eignet sich besonders gut zur Detektion des blauen Himmels, da blaue Bereiche im Bild in der Cb Komponente stark hervortreten.



Messen der Helligkeit mittels Raspberry pi  
C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Bildverarbeitung\Brightness Calculations\A practical device for measuring the luminance distribution.pdf

### Postprocessing



Abbildung 29: Wolken-Kamera auf dem Dach des IHomeLab.

Aufbau der Kamera

Infrastruktur

**Automatic Exposure**

Interessante Arbeit um eine Idee zu Formulieren: Seite 36 Kapitel 4.3.1.2 Computing a bracketting set of Exposures  
C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\allgemein sky imaging\Machine-learning-based forecasting of distributed solar energy production.pdf



# Schlussfolgerungen und Ausblick

Was misst die Kamera und was misst das Pyranometer? Diskutierten wir im Zusammenhang mit der Sättigung der Bilder (Dynamikbereich) – Welchen Dynamikbereich braucht eine Kamera? – Welchen Dynamikbereich hat das menschliche Auge?

Die eigentliche Schlussfolgerung ist, dass eine Low-coast Kamera nicht unbedingt für diese Art der Messung (Solare Strahlung) geeignet ist. Aber jedoch recht gut einsetzbar für eine einfache Vorhersage der Wolkenbewegung. Das wäre ja eigentlich auch schon recht hilfreich wenn man wüsste wann die nächste Wolke über die Solaranlage hinwegziehen respektive weil lange es dauert bis das nächste Ramp-event ansteht.

In diesem Paper wird auf die Qualität der HDR Bilder eingegange. Die Probleme sind ähnlich wie bei meiner Low-Coast version, auch sie verwenden eine Low-Cost version:  
C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\allgemein sky imaging\Machine-learning-based forecasting of distributed solar energy production.pdf

# Risikoanalyse

**Mit einem Verweis in den Anhang ablegen.**

Jan Kleissel Solar Energy Forecasting S79 Kap 4 Eval of Risk in solar-project financing

Jan Kleissel Solar Energy Forecasting S79 Kap 4.5 Techniques for quantifying and managing resource risks

# Anhang A: Beispiele für die Gliederung von Abschlussarbeiten

Die nachfolgenden Gliederungen stellen lediglich Vorschläge dar, die stets am konkreten Fall überprüft und in der Regel angepasst werden müssen.

## A.1 Literaturarbeiten

1. Überblick (oder: Zusammenfassung, „Executive Summary“, alles Wichtige für den „Manager“ oder Schnellleser)
2. Fragestellung (oder: Ziele, Ausgangspunkt, Motivation)
3. Übersicht über den Stand der Wissenschaft und Technik (Beschreibung der Lösungsansätze, Beispiele etc. in einzelnen Abschnitten)
4. Bewertung der einzelnen untersuchten Ansätze, Beispiele etc., Identifikation von Defiziten
5. Synthese: Erstellung einer Gesamtschau, allgemeine Prinzipien, Beschreibung einer eigenen Sicht auf das Problem, evtl. auch eigene Vorschläge
6. Zusammenfassung (Erklärung des Nutzens), Ausblick

Anhang: eventuell recherchierte Texte, Produktbeschreibungen, etc.

## A.2 Systementwicklungen

1. Überblick (oder: Zusammenfassung, „Executive Summary“, alles Wichtige für den „Manager“ oder Schnellleser)
2. Problemstellung (oder: Ziele, Ausgangspunkt), Vorgesehener Benutzerkreis, Bedürfnisse der Benutzer
3. Stand der Technik (Wie wird das Problem bisher gelöst, wo sind die Defizite)
4. Gewählter Lösungsansatz (allgemeines Prinzip, welche Werkzeuge, z.B. Programmiersprachen werden verwendet)
5. Beschreibung der durchgeführten Arbeiten
6. Ergebnis (z.B. Screenshots mit Erläuterungen)
7. Zusammenfassung (Erklärung des Nutzens), Ausblick

Anhang: evtl. (ausgewählte) Programmbeispiele

Evtl. CD-ROM als Beilage

# Anhang B: Formatvorlagen

Nachfolgend sind die für die Benutzer der Dokumentvorlage wichtigsten Formatvorlagen aufgelistet. Vermerkt ist jeweils auch der Zweck der Formatvorlage und ob es sich um eine neue oder eine modifizierte Formatvorlage handelt.

Tabelle 6: Aufstellung der wichtigsten Formatvorlagen der Dokumentvorlage

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Formatvorlage** | **Zweck** | **neu oder modifiziert** |
| Abbildung | Abbildungen | neu definiert |
| Beschriftung | Beschriftung von Abbildungen | modifiziert |
| Computerprogramm | Texte von Computerprogrammen u.ä. | neu definiert |
| Fußnotentext | Fußnoten | modifiziert |
| Fußnotenzeichen | Fußnotenzeichen | modifiziert |
| Fußzeile | Fußzeile (normalerweise ausgeschaltet) | modifiziert |
| Kopfzeile | Kopfzeile (wird automatisch erstellt) | modifiziert |
| Literaturverzeichnis | Literaturangaben im Literaturverzeichnis | neu definiert |
| Standard | normaler Fließtext | modifiziert |
| Tabellenüberschrift | Beschriftung von Tabellen | neu definiert |
| Titel | Titel auf der Titelseite | modifiziert |
| Überschrift 1 | Überschrift der Ebene 1 | modifiziert |
| Überschrift 2 usw. bis ... | Überschrift der Ebene 2 | modifiziert |
| Überschrift 9 | Überschrift der Ebene 9 | modifiziert |
| Untertitel | Text auf der Titelseite | modifiziert |
| Zitat | Hervorgehobenes Zitat | neu definiert |

# Glossar

**Absatz (engl. paragraph):** Absätze gliedern den Fließtext. In dieser Formatvorlage sind Absätze untereinander stets durch einen zusätzlichen Zeilenabstand voneinander getrennt, möglich wären aber auch andere Absatztrennmarkierungen wie z.B. Einrückungen. In Word werden Absatzgrenzen durch sogenannte Absatzmarken festgelegt, die durch einmaliges Betätigen der Enter-Taste eingegeben werden. Mit der Menüfunktion Extras – Optionen – Ansicht können Absatzmarken sichtbar gemacht werden.

**Formatvorlage (engl. style):** Formatvorlagen dienen zur Formatierung eines Textstückes, meist eines Absatzes. In Formatvorlagen können Texteigenschaften wie Zeicheneigenschaften, Absatzeigenschaften, Tabulatoren, Rahmen, Sprache und Nummerierungen festgelegt werden und in dieser Kombination einem Textstück zugewiesen werden

**Dokumentvorlage (engl. style sheet):** Dokumentvorlagen sind Gesamtheiten von Formatvorlagen, die erforderlich sind, um einen bestimmten Dokumenttyp (z.B. Diplomarbeit) zu formatieren. Im Textsystem Microsoft Word stellen Dokumentvorlagen einen eigenen Dateityp mit der Dateiendung .dotx dar. Im Kontext dieser Arbeit wird der Be­griff Dokumentvorlage etwas weiter gefasst und umfasst auch ein Word-Dokument, das neben einer Definition von Formatvorlagen auch musterhafte Textteile enthält.

# Quellenverzeichnis

[1] D. Matuszko, „Influence of the extent and genera of cloud cover on solar radiation intensity“, *Int. J. Climatol.*, Bd. 32, Nr. 15, S. 2403–2414, 2012.

[2] V. de B. / Coton, *Wikipedia, English: Cloud classification; übernommen und angepasst. Deutsche Nomenklatur.* 2012.

[3] University of Illinois, „Cloud Types: common cloud classifications“. [Online]. Verfügbar unter: http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/cld/cldtyp/home.rxml. [Zugegriffen: 27-Dez-2018].

[4] „Wolken“. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Wolke. [Zugegriffen: 27-Dez-2018].

[5] J. Remund, C. Calhau, L. Perret, und D. Marcel, *Characterization of the spatio-temporal variations and ramp rates of solar radiation and PV*. 2015.

[6] „http://www.entsoe.eu/fileadmin/user\_upload/\_library/publications/entsoe/Operation\_Handbook/Policy\_1\_final.pdf“. .

[7] T. McCandless, „Artificial Intelligence Techniques for Short-range Solar Irradiance Prediction“, Aug. 2015.

[8] A. Woyte, R. Belmans, und J. Nijs, „Power flow fluctuations in distribution grids with high PV penetration“, in *Proceedings of Seventeeth European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 20010101, S. 2414–2417.

[9] F. Vignola, J. Michalsky, T. Stoffel, und A. Ghassemi, *Solar and infrared radiation measurements*. 2017.

[10] „Sonnenstrahlung“, *Wikipedia*, 25-Aug-2018. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenstrahlung#/media/File:Sonne\_Strahlungsintensitaet.svg. [Zugegriffen: 08-Dez-2018].

[11] V. Quaschning, *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*, 9., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2015.

[12] V. Wesselak, T. Schabbach, J. Fischer, und T. Link, *Handbuch Regenerative Energietechnik*, 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017.

[13] „(WMO 2008) Guide To Meteorological Instruments And Methods Of Observation“. .

[14] S. R. West, D. Rowe, S. Sayeef, und A. Berry, „Short-term irradiance forecasting using skycams: Motivation and development“, *Sol. Energy*, Bd. 110, S. 188–207, Dez. 2014.

[15] „Leuchtdichte“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.schorsch.com/de/wissen/glossar/leuchtdichte.html. [Zugegriffen: 18-Dez-2018].

[16] „Understanding Dynamic Range in Digital Photography“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/dynamic-range.htm. [Zugegriffen: 18-Dez-2018].

[17] „Understanding Digital Camera Sensors“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm. [Zugegriffen: 18-Dez-2018].

[18] A. Darmont, *High dynamic range imaging: sensors and architectures*. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2012.

[19] P. E. Debevec und J. Malik, „Recovering high dynamic range radiance maps from photographs“, in *ACM SIGGRAPH 2008 classes on - SIGGRAPH ’08*, Los Angeles, California, 2008, S. 1.

[20] R. Szeliski, *Computer vision: algorithms and applications*. London ; New York: Springer, 2011.

[21] A. Jacobs, „High Dynamic Range Imaging and its Application in Building Research“, *Adv. Build. Energy Res.*, Bd. 1, S. 177–202, Jan. 2007.

[22] „Image Types: JPEG & TIFF File Formats“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/imagetypes.htm. [Zugegriffen: 19-Dez-2018].

[23] „RAW vs JPEG“. [Online]. Verfügbar unter: https://digital-photography-school.com/raw-vs-jpeg/. [Zugegriffen: 19-Dez-2018].

[24] „NREL Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/68886.pdf. [Zugegriffen: 15-Dez-2018].

[25] L. O. Grobe, M. Krehel, S. Wittkopf, und X. Yang, „Monitoring of solar irradiation at Lucerne University of Applied Sciences and Arts“. DOI: 10.5281/zenodo.1182433, 01-Jan-2017.

[26] „Automatisches Messnetz - MeteoSchweiz“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/mess-und-prognosesysteme/bodenstationen/automatisches-messnetz.html?station=luz. [Zugegriffen: 03-Jan-2019].

[27] R. Sloan, J. H. Shaw, und D. Williams, „Thermal Radiation from the Atmosphere\*“, *J. Opt. Soc. Am.*, Bd. 46, Nr. 7, S. 543, Juli 1956.

[28] „Feuchtemaße“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.gerd-pfeffer.de/atm\_feuchte2.html#Wolkenuntergrenze. [Zugegriffen: 04-Jan-2019].

[29] „Molekularsieb – Dry & Safe“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.trockenmittel.ch/trockenmittel/molekularsieb.html. [Zugegriffen: 05-Jan-2019].

[30] „Zeolithe – Wikipedia“. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Zeolithe\_(Stoffgruppe). [Zugegriffen: 05-Jan-2019].

# Stichwortverzeichnis

Absatz 48

Dokumentvorlage 48

Formatvorlage 48

1. <http://www.fulcrum3d.com/index.php/cloudcam/technology> [↑](#footnote-ref-1)
2. Siehe Kapitel 2.6.2 Pyrheliometer. [↑](#footnote-ref-2)
3. Siehe hierzu das Weber-Fechner-Gesetz. [↑](#footnote-ref-3)
4. Szene: Ausschnitt der realen Welt, im Sichtfeld des Bildsensors. [↑](#footnote-ref-4)
5. Die Gammafunktion beschreibt eine Überführung einer linear wachsenden Grösse, in eine nicht linear wachsende. [↑](#footnote-ref-5)
6. Gemessen mittels Distanzfunktion von Google Maps. [↑](#footnote-ref-6)
7. Raspbian: <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/> [↑](#footnote-ref-7)
8. RealVNC: <https://www.realvnc.com/de/> [↑](#footnote-ref-8)
9. Die Taupunkttemperatur kann bei Kenntnis der relativen Luftfeuchtigkeit, aus einer Taupunkttabelle entnommen werden. [↑](#footnote-ref-9)
10. 16 °C – 5.6 °C = 10.4 °C ist die Temperaturdifferenz, um die die Luft abkühlen muss, damit sie gesättigt ist. [↑](#footnote-ref-10)
11. Zeolithe sind kristalline [Alumosilikate](https://de.wikipedia.org/wiki/Alumosilikate), die in zahlreichen [Modifikationen](https://de.wikipedia.org/wiki/Polymorphie_(Materialwissenschaft)) in der Natur vorkommen, aber auch [synthetisch](https://de.wikipedia.org/wiki/Synthese_(Chemie)) hergestellt werden können [30]. [↑](#footnote-ref-11)
12. <https://github.com/ahorv> [↑](#footnote-ref-12)
13. Mittels Cronjobs können Programme, in unixartigen Betriebssystemen, zeitbasiert ausgeführt werden. [↑](#footnote-ref-13)
14. Die Zeitangabe erfolgt in der Reihenfolge: Minute, Stunde, Tag, Monat und Woche. [↑](#footnote-ref-14)