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

Experte: Dr. Markus Bestehorn

**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 Imager oder zu Deutsch Wolken-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 Wolken-Kamera 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

# 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 11

2.3 Zeitliche Auflösung zur Erfassung der Intermittenz 12

3 Solare Strahlung 13

3.1 Einfluss der Erdatmosphäre 14

3.2 Globale, direkte und diffuse Strahlung 15

3.2.1 Messung der direktnormalen Sonnenstrahlung 16

3.2.2 Messung der globalen Sonnenstrahlung 17

3.2.3 Messung der diffusen Sonnenstrahlung 17

3.2.4 DNI und zirkumsolare Sonnenstrahlung 17

3.3 Solarmessgeräte 17

3.3.1 Pyranometer 17

3.3.2 Pyrheliometer 18

3.4 Dreidimensionale Effekte in der Kurzeit Vorhersage 19

3.5 Auflösung 19

3.5.1 Für die Auswahl der Optik bestimmende Faktoren 19

3.5.2 Bildwinkel 19

3.5.3 Optische Verzerrung 19

3.5.4 Die Verwendung eines Fischaugenobjektivs 19

3.6 Bildverarbeitung 20

3.6.1 Eigenschaften einer Weitwinkelaufnahme 20

3.6.2 CCD 20

3.6.3 HDR imaging 21

4 Übersicht solarer Vorhersage Methoden 22

4.1.1 Klassifikation solarer Vorhersage Methoden 22

5 Risikoanalyse 24

6 Himmels-Kameras - Stand der Technik 25

7 Anforderungen an die Wolken-Kamera 27

7.1 Evaluation 27

8 ProSekKa Wolken-Kamera 28

8.1 Allgemeiner Aufbau der ProSekKa Wolken-Kamera 28

8.2 Hardware und Aufbau der ProSekKa Wolken-Kamera 29

8.3 Ground Truth 30

8.4 Messkonzept 31

9 Schlussfolgerungen 32

Anhang A: Beispiele für die Gliederung von Abschlussarbeiten 33

A.1 Literaturarbeiten 33

A.2 Systementwicklungen 33

Anhang B: Formatvorlagen 34

Glossar 35

Quellenverzeichnis 36

Stichwortverzeichnis 37

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Intensität der Sonnenstrahlung, im Vergleich zur Emission eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 5900 K [3]. 13

Abbildung 2: Komponenten der Solaren Strahlung 14

Abbildung 3: Strahlungsbilanz der Erde Abb. 3.8 [4, S. 75] 14

Abbildung 4: Sonnenzenitwinkel, Elevation und Azimut 15

Abbildung 5: Globale, direkte und diffuse Strahlung an einem wolkenfreien Tag. 16

Abbildung 6: Um16:00 blockiert eine Wolke den direkten Anteil. GHI entspricht nun der DHI. 16

Abbildung 7: Links: Pyranometer mit thermischen Sensor, rechts: Pyranometer mit Silizium-Halbleitersensor Abb. 2.29 [6, S. 84]. 18

Abbildung 8: Pyrheliometer, links schematische Darstellung. 19

Abbildung 9: Lageplan Hochschule Luzern für Technik und Architektur 29

Abbildung 10: Links Messung der diffusen und rechts der globalen Strahlung. 29

Abbildung 11: Messstation und Datenerfassung 30

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterschiede zwischen Abbildungen und Tabellen 27

Tabelle 2: Beispiele für Überschriftebenen 32

Tabelle 3: Aufstellung der wichtigsten Formatvorlagen der Dokumentvorlage 43

# 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

C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Meteorologie insbesondere Wolken\ Variabilität der Bewölkung und Auswirkungen auf die Solarstrahlung in Wien.pdf 🡪 Kapitel 3.6 Wolken in der Troposphre und Kapitel 3.61 Entstehung von Wolken (Seite 35)

Der Bewölkungsgrad bestimmt den Anteil der Sonnenstrahlung, der bis zur Erdoberfläche durchdringt. Die Durchlässigkeit wird dabei durch mehrere Faktoren bestimmt, wie Art der Wolke, Höhe der Wolke oder ihre relativen 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] .

## 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 [2].

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 [3].

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 [4, 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 Wolken-Kameras sehr gut. Aus ihren Bildern lassen sich sehr detaillierte Informationen über die Ausdehnung, Struktur und Bewegung zum Zeitpunkt der Aufnahme ableiten. Zudem können Wolken-Kameras 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. [5]), 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 5778 K strahlt. Das Spektrum der Sonnenstrahlung liegt zwischen rund 250 nm und   
2500 nm. Ihr Maximum liegt bei etwa 500 nm, am selben Ort, an dem sich auch die maximale Empfindlichkeit des Auges befindet.



Abbildung 1: Intensität der Sonnenstrahlung, im Vergleich zur Emission eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 5900 K [6].

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.

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

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 [7, 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.



Abbildung 4: Sonnenzenitwinkel, Elevation und Azimut

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.

Wolken zwischen Sonne und Messgerät können den direkten Anteil vollständig reflektieren, womit dieser gegen null geht. In der folgenden Abbildung 5, 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.

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.

### 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.

### 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.

### DNI und zirkumsolare Sonnenstrahlung

Wäre noch interessant wegen den 5° 🡪 Kapitel 2.4.1 ‚DNI circumsolar Irradiance‘ Seite 10

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 [8].

## 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 [9].

### 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 6, 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 [9, 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.

### Pyrheliometer

*Quasching\_Regenerative\_Energiesysteme S85 Kap 2.8.2 Messung der direkten und diffusen Bestrahlstärke*

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.

## 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.

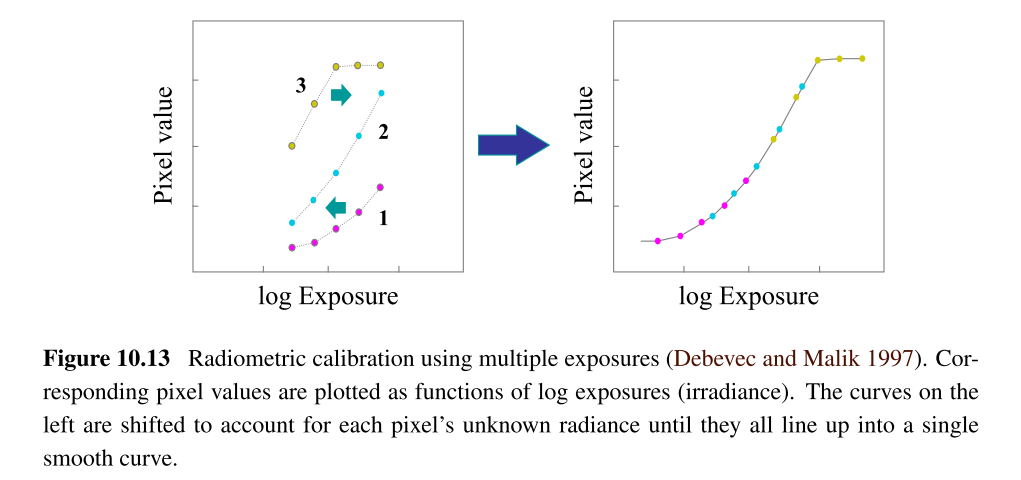
### CCD

*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).

### HDR imaging

Algorithmus von Malik und Debecev Seite 484 (XChange-Viewer: 506)

C:\Users\tahorvat\Documents\MSE\MSE\_Thesis\Bildverarbeitung\Books\_Bildverarbeitung\SzeliskiBook\_.pdf  




*Short-term irradiance forecasting using skycams: Motivation and developement (Samuel R. West) S 5*

The time horizon over which this information can be provided depends on a number of factors including the imager ﬁeld of view, wind speed and computation time. A typical maximum horizon for sky imager forecasts is on the order of 20 min, with update frequencies of between 10 and 30 s. The upper forecast horizon limit is mainly dependent on the amount of time taken for a cloud to move from the edge of the camera’s ﬁeld of view to the ‘danger zone’. This zone describes the region in which a cloud may intercept the sun and shade the target area. It is desirable for the camera to have a wide and unobstructed ﬁeld of view, however it is possible to use multiple cameras and for their images to be ‘stitched’ together in order to extend the forecast horizon.

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

The actual look‐ahead time for which this method has significant skill will depend, among other things, upon the cloud velocity and the height of the clouds (the ratio of the cloud velocity to the cloud height defines an angular velocity about the WSI which determines the time duration of the cloud being in the field‐of‐view). For low and fast clouds the forecast horizon may only be 3 minuets while for high and slow clouds it may be over 30 minutes, but generally horizons between 5 to 20 minutes are typical. Even if cloud size and velocity could be determined accurately, the forecast accuracy depends on the rate at which the cloud field is departing from the evolution defined by the cloud motion vectors (i.e. development, dissipation, etc.).

# Himmels-Kameras - Stand der Technik

*Es ist eine Analyse zum Stand der Technik durchzuführen. Es soll aufgezeigt werden, welche Produkte bereits am Markt erhältlich sind und welche Eigenschaften diese haben.*

Himmel-Kameras gewinnen an Bedeutung, nicht nur in wissenschaftlich Kreisen. Ihr Anwendungsbereich ist breit gefächert. Fluglotsen zum Beispiel benutzen sie, um lokale Wetterbedingungen über dem Flughafen, besser einschätzen zu können. Astronomen setzen sie ein, um den Bedeckungsgrad durch Wolken, über dem Observatorium zu bestimmen. Doch am Häufigsten werden sie zur Prognose von Wetter und Sonnenenergie verwendet. Ihre Bilder haben eine höhere Auflösung als Satellitenbilder. Zudem sind sie in der Lage auch Wolken in geringer Tiefe zu erfassen.

**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





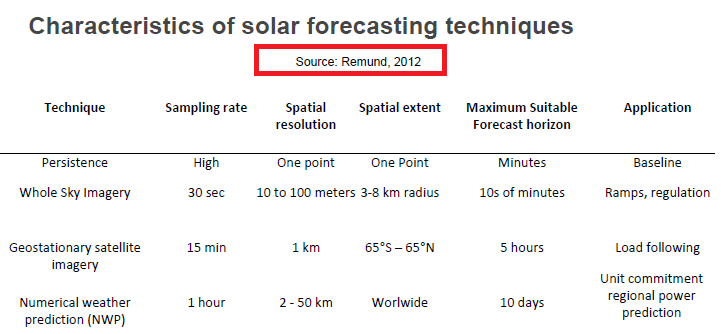
# Übersicht solarer Vorhersage Methoden

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 inlusive 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 Wolken-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.

## 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 1: Typische Werte der Leuchtdichte, natürlicher Quellen [10].

## Dynamikbereich

Der Dynamikbereich beschreibt das Verhältnis zwischen maximalem und minimalem Wert der Leuchtdichte, in einem Bild oder Szene. Das menschliche Auge ist in der Lage einen Dynamik-Bereich   
von , gleichzeitig wahrzunehmen, was ungefähr 24 f-stops (Blendenschritten) entspricht [11].

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. 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 [12].

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 eins 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.

## HDR – High Dynamic Range Fotografie

Herkömmliche Kameras sind nicht in der Lage grosse Helligkeitsbereiche abzubilden. Besonders an klaren sonnigen Tagen, ist es schwer, den gesamten Helligkeitsbereich des Himmels abzubilden. Dabei liegt die Leuchtdichte im Bereich um die Sonne um mehrere Zehnerpotenzen höher als jene in den Dunklen Bereichen.

überspannt der Dynamikbereich Deshalb sind sie

Kurz erklären was es ist und wieso es hier eingesetzt werden kann 🡪 insbesondere um die Übersättigung der Aufnahemn zu verhindern indem der Dynamikbereich durch Fusionoieren von Bildreihen vergrössert wird.

Sehr gute s FAQ zu HDR + Dynamic Range: [https://www.hdrsoft.com/resources/dri.html<](https://www.hdrsoft.com/resources/dri.html%3c)

HDR – which algorithm to chooes Kap. 4.3.1.3.5? 🡪 C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Theorie\allgemein sky imaging\Machine-learning-based forecasting of distributed solar energy production.pdf

## Raw vs. JPEG

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

Siehe auch:

C:\Users\ati\Desktop\MSE\MSE\_Thesis\Bildverarbeitung\HDR images\ Processing RAW images in Python.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.

# ProSekKa Wolken-Kamera

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

Es zeigt sich, dass insbesondere die Beschaffung eines geeigneten Fischaugen-Objektives in diesem Segment eine besondere Herausforderung darstellt.

## Allgemeiner Aufbau der ProSekKa Wolken-Kamera

Die ProSekKa Wolken-Kamera, 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 Wolken-Kamera über eine Heizung und eine Entfeuchtungsanlage, um Beschlagen des Acryldoms zu verhindern.

Es wurden drei identische Kameras aufgebaut. Die dritte Kamera dient als Ersatz. 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 ein 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.

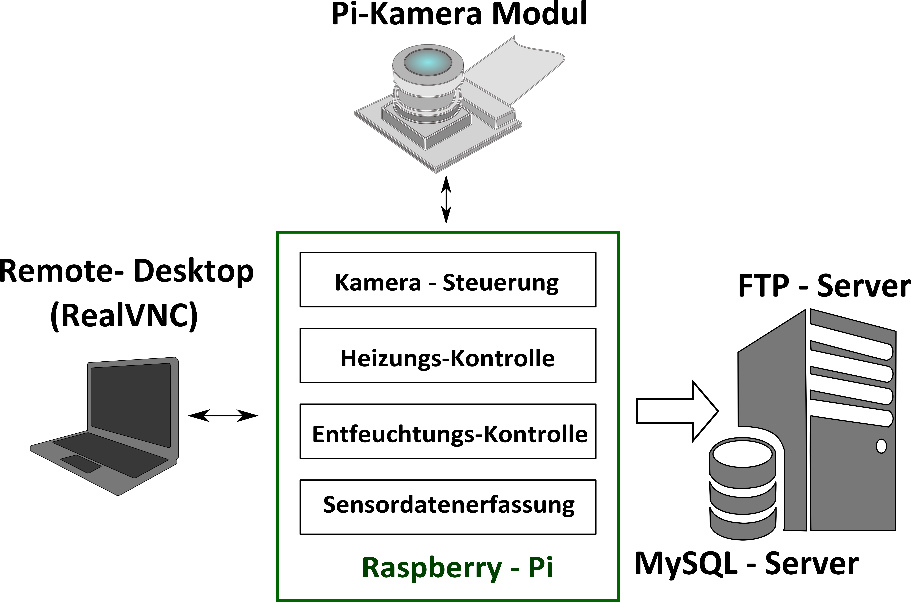


Abbildung 9 : Schematischer Aufbau der ProSekKa Wolken-Kamera.

Als Betriebssystem, wird Raspbian Stretch[[3]](#footnote-3) eingesetzt, ein von Debian, für Einplatinencomputer, abgeleitetes Betriebssystem, dass eine komfortable Desktop-Umgebung bietet, und bereits über vorinstallierte Entwicklungswerkzeuge verfügt. Dank RealVNC[[4]](#footnote-4) 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.

## Hardware und Aufbau der ProSekKa Wolken-Kamera

Anforderungen

Auflösung Dynamikbereich

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

## Ground Truth

Zur Interpretation der Bilder und Kalibrierung der Wolken-Kameras, werden lokale Messdaten benötigt. Hierzu wird die Wolken-Kamera 2, unmittelbar neben der Messstation platziert. So kann sichergestellt werden, dass das geeichte Pyranometer und die Wolken-Kamera, den gleichen Bedingungen ausgesetzt sind.

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, siehe Abbildung 9. Die Messstation entspricht den Vorgaben der NREL, der National Renewable Energy Laboratory in the USA [13].

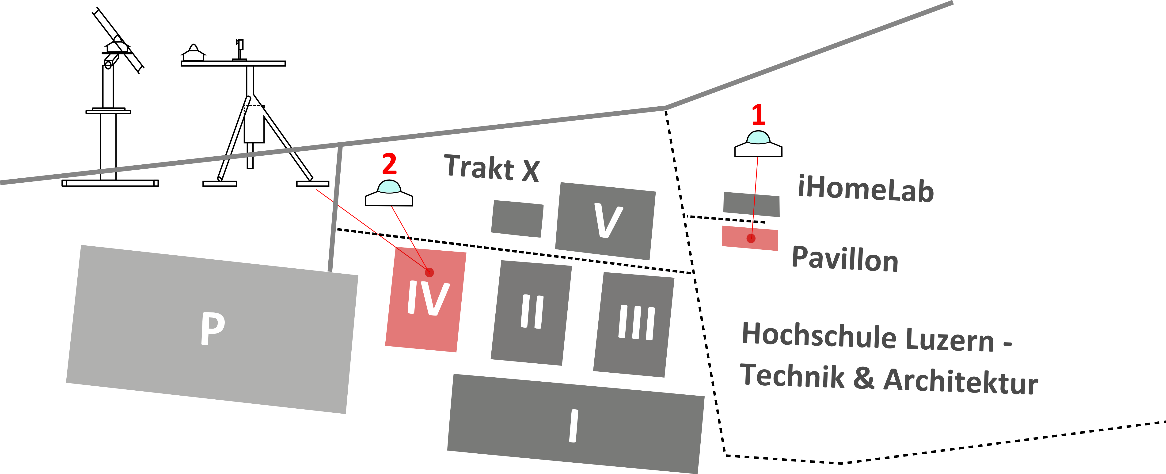


Abbildung 10: Lageplan Hochschule Luzern für Technik und Architektur

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 10, links. Der horizontale, normaldirekte Anteil der Sonnenstrahlung (DNI), wird aus den beiden Messgrössen berechnet.

(7.1)



Abbildung 11: 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 [14].

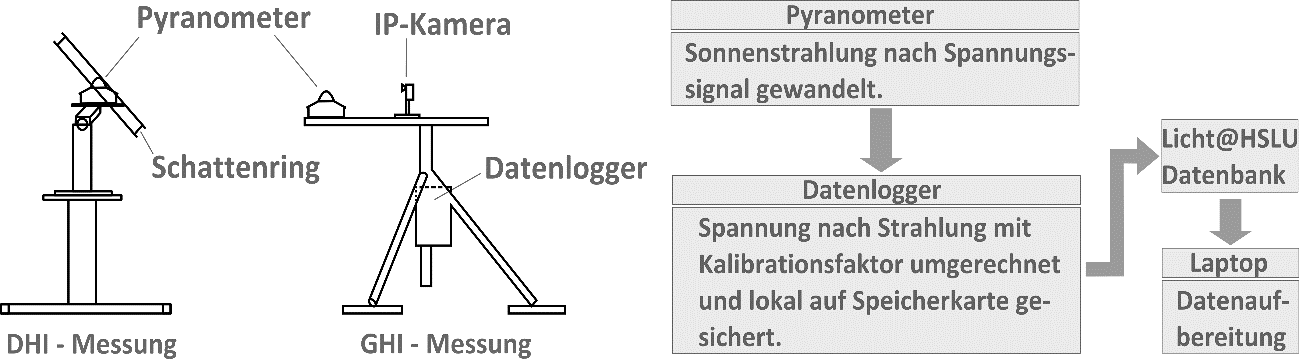


Abbildung 12: Messstation und Datenerfassung

|  |  |
| --- | --- |
| **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 2: Spezifikationen des CMP11 Pyranometers von Kipp and Zonen

## Messkonzept

Zwei identische Wolken - Kameras 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. Die Kameras stehen in einer Entfernung[[5]](#footnote-5) von etwa 180 m Luftlinie auseinander.

Dach des Trakt IV neben der Messstation der HSLU und eine weitere Kamera auf dem Dach des iHomeLab siehe Gebäudelageplan Abbildung 9.

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

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

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

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

[5] 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.

[6] „Sonnenstrahlung“, *Wikipedia*. 25-Aug-2018.

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

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

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

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

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

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

[13] „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].

[14] 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.

# Stichwortverzeichnis

Abbildung 25

Abbildungsverzeichnis 18

Abkürzungsverzeichnis 18

Absatz 35, 44

Absatzmarken 39

Abstand zwischen Absätzen 35

Abstract 18

Angebotsorientiertheit 12

Anhänge 19

Anleitungen 13

Ansicht 37

Arbeitserleichterung 12

Aufzählungen 30

Auto-Wiederherstellen 38

Beschriftung 25

Bildschirmabzüge 25

Bindestrich 36

Computerprogramm 29

Datei-Info 39

Dokumentvorlage 13, 44

Ebenen 31

Eidesstattliche Versicherung 18

Einrückungen 30

Fehler 37

Fließtext 24

Formatvorlage 14, 22, 44

Formatvorlagen-Katalog 33

Funktionalitäten 22

Fußnoten 25

Glossar 20

Index 20

Inhalt der Arbeit 19

Inhaltsverzeichnis 18

Keywords 18

Kopfzeile 23

Kurzfassung 18

Leerzeichen 39

Literaturverzeichnis 33

Muster 14, 16

nicht druckbare Zeichen 20, 36

Nummerierungen 30

Qualitätssicherung 12

Quellenangabe 29

Rechtschreibprüfung 25

Rechtschreibung 16, 35, 39

Schlagwörter 18

Schnellspeicheroption 38

Schriftart 24

Seiteneinrichtung 23

Serifenschrift 24

Sicherungen 37

Sichtbarkeit 36

Silbentrennung 25, 36, 39

Speichern 37

Standard (Formatvorlage) 24

Stichwortverzeichnis 20

Tabellen 27

Tabellenüberschrift 28

Tabellenverzeichnis 18

Titelblatt 17

Trennstriche 36

Überschriften 31

Untertitel 17

Vorgaben 13

Vorwort 19

Word-Dokument 14

Word-Dokumentvorlage 14, 33

Zitat 28

1. <http://www.fulcrum3d.com/index.php/cloudcam/technology> [↑](#footnote-ref-1)
2. Siehe Kapitel 2.6.2 Pyrheliometer. [↑](#footnote-ref-2)
3. Raspbian: <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/> [↑](#footnote-ref-3)
4. RealVNC: <https://www.realvnc.com/de/> [↑](#footnote-ref-4)
5. Gemessen mittels Distanzfunktion von Google Maps. [↑](#footnote-ref-5)