Diese Arbeit wurde vorgelegt am
DLR - Institut für Solarforschung, Lehrstuhl für Solartechnik

Entwicklung und Validierung einer Kalibrationsmethode für bildbasierte Verschmutzungsmessungen an Parabolrinnenkraftwerken

Development and Validation of a Calibration Method for Image-based Soiling Measurements at Parabolic Trough Power Plants

Masterarbeit

vorgelegt von
Uwe Schmitz
393818

Erstprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Pitz-Paal

Betreuender wiss. Mitarbeiter: Rone Yousif, M.Eng.

Aachen, 11. Juli 2024

Kurzdarstellung

Thermische Solarkraftwerke (*engl. concentrated solar power, CSP*) werden aufgrund der relativ hohen Einstrahlung häufig in ariden bis semiariden Regionen gebaut, wobei die Effizienz dieser Kraftwerke durch die Verschmutzung der Spiegel stark beeinflusst werden kann. Zur Optimierung der erforderlichen Reinigungsvorgänge und Reduzierung von eigesetzten Ressourcen werden Kenntnisse über die Verschmutzung der Spiegel benötigt. Konventionelle Messungen können nur einen örtlich geringen Bereich abdecken oder erfordern erheblichen Aufwand. Bildbasierte Verschmutzungsmessungen bieten hingegen das Potential für eine hohe räumliche Auflösung und in Kombination mit UAVs (*engl. unmanned aerial vehicle*) einen geringen Arbeitsaufwand. In dieser Arbeit wurde eine solche bildbasierte Methode weiterentwickelt und auf Parabolrinnenkollektoren angewendet. Hierzu wurde vor allem die Flugroute und die Kalibrierung der Methode zur Verschmutzungsbestimmung betrachtet. Es konnte eine verbesserte Kalibrationsmethode durch Methodenweiterentwicklung und Planung der Flugrouten erreicht werden. Tests an einem Eurotrough-Kollektor auf der PSA (Plataforma Solar de Almería, Eigentümer: Forschungszentrum CIEMAT/Spanien) konnten zeigen, dass mit der angepassten Methode Verschmutzungswerte mit einem $RMSD$ von unter $3,5\%$ erreicht werden.

Abstract

Concentrated solar power (*CSP*) plants are often built in arid to semi-arid regions due to the relatively high irradiation, whereby the efficiency of these power plants can be strongly influenced by the soiling of the mirrors. In order to optimise the necessary cleaning processes and reduce the resources used, knowledge of the soiling of the mirrors is required. Conventional measurements can only cover a small localised area or require considerable effort. Image-based soiling measurements, on the other hand, offer the potential for high spatial resolution and, in combination with UAVs (unmanned aerial vehicles), a low workload. In this work, such an image-based method was further developed and applied to parabolic trough collectors. The main focus was on the flight route and the calibration of the method for determining soiling. An improved calibration method was achieved by further developing the method and planning the flight routes. Tests on a Eurotrough collector on the PSA (Plataforma Solar de Almería, owned by the Spanish research centre CIEMAT) were able to show that for the adapted method of the soiling measurement an $RMSD$ of less than 3.5% can be achieved.

Inhaltsverzeichnis

Kurzdarstellung **III**

Abbildungsverzeichnis **VII**

Tabellenverzeichnis **IX**

Formelzeichen **X**

Indizes **XI**

Abkürzungen **XII**

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen **3**
2.1 Konzentrierende Solarstrahlung 3
2.2 Verschmutzung in *CSP* Kraftwerken 6
2.2.1 Einfluss und Art der Verschmutzung 6
2.2.2 Verschmutzungsmessung in *CSP* Kraftwerken 8
2.3 Grundlagen bildbasierter Verschmutzungsmessung 10
2.3.1 Mie-Streuung 10
2.3.2 Kamerabilder 12
2.3.3 Theorie der zu Grunde liegenden Messmethode 13
2.4 Anwendung der Theorie der zu Grunde liegenden Messmethode 19

3 Methodenweiterentwicklung **25**
3.1 Anpassungen der Verschmutzungsbestimmung zur Anwendung an Parabolrinnenspiegeln 25
3.1.1 Übertragung auf die Geometrie eines Parabolrinnenspiegels . . 25
3.1.2 Implementierung und Parametrisierung eines Modells zur Bestimmung der Mie-Streuung 27
3.2 Datenaufnahme 30
3.2.1 Flugplanung 30
3.2.2 Datenaufnahme und Flugdurchführung 34
3.3 Daten- und Bildverarbeitung 36
3.4 Kalibrierfaktor c_{scat} 38
3.4.1 Anpassungen der bestehenden Theorie zur Verschmutzungsbestimmung und deren Anwendung 38

3.4.2 Kalibrierung von c_{scat} 39

4 Ergebnisse **45**

4.1 Erkenntnisse zur Durchführung der Kalibrierung 45

4.1.1 Auswahl der Kalibrationsspots 46

4.1.2 Gültigkeitsdauer der Kalibration 53

4.2 Analyse der Kalibrationsmethode 58

5 Fazit und Ausblick **63**

Literaturverzeichnis **65**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Exemplarische Darstellung der Direkt- und Diffusstrahlung 4
2.2 Parabolrinnenkollektor 5
2.3 Aufbau eines Rückflächenspiegels 5
2.4 Streuung und Absorption an der Verschmutzungsschicht auf einem Spiegel 6
2.5 Partikelgrößenverteilungen 7
2.6 Charakterisierung der Rayleigh- und Mie-Streuung 10
2.7 Exemplarischer winkelabhängiger Streuanteil der Mie-Streuung über den Streuwinkel 11
2.8 Farbfilter für rot R, grün G und blau B in einer Bayer-Matrix 12
2.9 Spektrale Sensitivität eines beispielhaften Sensors 13
2.10 Schematische Darstellung der Vignettierung eines Bildes 14
2.11 Definition der Inzidenzwinkel α_{cam} und α_{sun} zur Spiegelnormalen $\vec{n}$ . . 15
2.12 Pfade für die Streuung des Sonnenlichts zur Kamera 16
2.13 Ablauf der Verschmutzungsbestimmung von Spiegeln per Kamerabilder 20
2.14 Orthogonalisierung des Kamerabildes 21
2.15 Bereiche zur Bestimmung von R_{clean} und R_{soiled} auf dem RGB-Bild eines flachen Spiegels 22
2.16 Auswertung für unterschiedliche Mie-Verhältnisse 22

3.1 Bereiche zur Bestimmung von R_{clean} und R_{soiled} auf dem Ausschnitt eines RGB-Bildes eines Parabolrinnenspiegels 26
3.2 R_{clean} in Abhängigkeit des Elevationswinkels und Azimutwinkel des Reflexionsvektors 27
3.3 Verteilung der relativen Häufigkeit von Staubpartikeln in Abhängigkeit des Durchmessers d 28
3.4 Relative Streuverteilung in Abhängigkeit des Streuwinkels 29
3.5 Simulation einer sphärischen Flugroute mit eingefärbter Flughöhe . . . 31
3.6 Prozent der auswertbaren Spiegeloberfläche pro Kameraposition für die das Mie-Verhältnis χ_{Mie} überschritten wird 32
3.7 Simulierte Flugroute für den Kalibrierflug an einem Parabolrinnenspiegel 33
3.8 Kamerapositionen des Spiralflugs 34
3.9 Positionen der Referenzreflektanzmessungen und gesäuberten Bereiche auf dem Spiegel 35
3.10 Anwendung verschiedener Filter auf ein Orthobild 36
3.11 Auf dem Spiegel betrachteter Spot neben einer gefilterten Struktur . . 37
3.12 Ausschnitte des Spiegels mit angewendeten Masken 37

3.13 Aus der Kalibriergleichung bestimmten Werte für c_{scat} über den Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ bzw. $\Theta_{II,I}$ 39
3.14 Bestimmung von R_{clean} durch Inter- bzw. Extrapolation 40
3.15 Darstellung des Verlaufs des Streuanteils P und c_{scat} über den Streuwinkel Θ 41
3.16 Durch Kurvenanpassung bestimmter Verlauf für c_{scat} 42
3.17 Werte des theoretisch optimalen c_{scat} eingefärbt mit der jeweiligen Referenzsauberkeit 43
3.18 Auswertung nicht gemittelter Wert eingefärbt für die Abweichung zwischen dem theoretisch optimalen $c_{scat,opt}$ und dem kalibrierten c_{scat} . . 44
3.19 Nicht erkannte Strukturen durch den Farbfilter 44

4.1 Lage der gewählten Kalibrierspots auf Grundlage der höchsten Variation im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$ 45
4.2 Auswertung der Verschmutzungbestimmung mit einer Kalibration auf Grundlage der höchsten Variation im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$ 46
4.3 Lage der gewählten Kalibrierspots auf Grundlage der niedrigsten Variation im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$ 47
4.4 Auswertung der Verschmutzungbestimmung mit einer Kalibration auf Grundlage der niedrigsten Variation im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$ 48
4.5 Auswertung der Verschmutzungbestimmung mit einer Kalibration auf Grundlage der niedrigsten mittleren Sauberkeit $\overline{\xi}$ 49
4.6 Auswertung der Verschmutzungbestimmung mit einer Kalibration auf Grundlage der höchsten mittleren Sauberkeit $\overline{\xi}$ 50
4.7 Auswertung für verschiedene Anzahlen von Kalibrierspots 51
4.8 Verteilung der Spots auf dem Spiegel und nutzbare Flächen auf dem Spiegel 53
4.9 Ergebnis der Verschmutzungbestimmung für den Messflug zwei und den Kalibrierflug eins 54
4.10 Ergebnis der Verschmutzungbestimmung für den Messflug eins und den Kalibrierflug zwei 55
4.11 Vergleich der Kalibrierung der Funktion für c_{scat} zwischen dem ersten und zweiten Flug 56
4.12 Simulation des Bereiches, welcher durch den Reflexvektor für die Interpolation von R_{clean} aufgespannt wird 57
4.13 Simulation des Bereiches, welcher durch den Reflexvektor für die Interpolation von R_{clean} aufgespannt wird 58
4.14 Auswertung der Kalibrationsmethode, welche in dieser Arbeit entwickelt wurde mit dem in dieser Arbeit geplanten Kalibrationsflug 59
4.15 Auswertung der Kalibrationsmethode, welche vor dieser Arbeit genutzt wurde 60
4.16 Auswertung der Kalibrationsmethode, welche vor dieser Arbeit genutzt wurde mit dem in dieser Arbeit geplanten Kalibrationsflug 61

Tabellenverzeichnis

4.1 Statistische Auswertung der Auswahl von Kalibrierspots nach der Varianz im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$ 48
4.2 Statistische Auswertung der Auswahl von Kalibrierspots nach dem mittleren Sauberkeitswert $\overline{\xi}$ 50
4.3 Statistische Auswertung für Kalibrationen mit unterschiedlicher Anzahl an Kalibrationsspots 52
4.4 Statistische Auswertung der Kalibrationsmethoden 62

Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit
c	Kalibrierfaktor	[-]
C	Konstante	[-]
d	Durchmesser der Staubpartikel	m
E	Bestrahlungsstärke	W/m^2
f_P	Phasenfunktion	[-]
f_T	Transferfunkton	[-]
m	komplexer Brechungsindex	[-]
$\vec{n}$	Spiegelnormale	[-]
P	Streuanteil	[-]
r	Reflexionsvekor	[-]
R	Rotkanalwert des RGB-Kamerabildes	[-]
V_{sky}	Himmelshelligkeitsverhältnis	[-]
α	Inzidenzwinkel zur Spiegelnormalen	grad
Θ	Streuwinkel	grad
λ	Wellenlänge	m
ξ	Sauberkeitswert	[-]
ρ	Reflexionsgrad	[-]
τ	Transmissionskoeffizient der Staubschicht	[-]
Φ	Strahlungsfluss	W
χ_{Mie}	Mie-Verhältnis	[-]
ω	Albedo	[-]

Indizes

Az	Azimut
cam	Kamera
cal	Kalibration
clean	saubere Spiegeloberfläche
dust	Staubschicht
El	Elevation
refl	reflektierte Strahlung
scat	gestreute Strahlung
sky	Himmel
soiled	verschmutzte Spiegeloberfläche
sun	Sonne
theo	Theorie

Abkürzungen

CSP	konzentrierende Solarthermie (*engl. concentrated solar power*)
DHI	Diffusstrahlung (*engl. diffuse horizontal irradiance*)
DLR	Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DNI	Direktnormalstrahlung (*engl. direct normal irradiance*)
GHI	Globalstrahlung (*engl. global horizontal irradiance*)

1 Einleitung

Zur Bekämpfung des fortschreitenden Klimawandels und der Einhaltung des Pariser Klimaabkommens sind weitreichende Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgase notwendig. Die größte Menge an Treibhausgasen gemessen in CO_2-Äquivalenten wird dabei durch den Energiesektor emittiert [1]. Teil dieses Sektors sind sowohl die Bereitstellung elektrischer Energie als auch von Wärmeenergie. Die Möglichkeit zur Versorgung mit diesen beiden Energieformen bieten thermische Solarkraftwerke [2]. Neben der Nutzung von Solarenergie als eine der vielversprechendsten erneuerbaren Energien [3], sind thermische Solarkraftwerke eine Technologie, welche die Erzeugung von Strom in Kraftwerksmaßstäben ermöglicht und diese von der momentanen Solarstrahlung durch den Einsatz thermischer Speicher zeitlich entkoppeln kann [3]. Es wird angenommen, dass unter optimalen Umständen 6% des globalen Energiebedarfs bis 2030 durch solche Kraftwerke bereitgestellt werden kann und dies auf 12% erhöht werden kann bis 2050 [4].

Präferierte Standorte von thermischen Solarkraftwerken befinden sich in ariden bis semiariden Regionen, da diese Regionen oft eine relativ hohe Direktnormalstrahlung aufweisen [5]. Allerdings gibt es an diesen Standorten eine erhöhte Staubbelastung und häufig begrenzte Verfügbarkeit von Wasser [5]. Es kommt zu Verlusten, welche durch die Ablagerung von Schmutz auf den Spiegeln des thermischen Solarkraftwerks entstehen [6, 7]. Die Reinigung der Spiegel nimmt bei dem optimalen Betrieb des Kraftwerks eine relevante Rolle ein [8]. Da die Reinigung aufwendig und kostenintensiv ist, kann hier angesetzt werden, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern [9, 10]. Die Optimierung setzt die Kenntnis des Verschmutzungszustands der Spiegel des Kraftwerks voraus [11–13]. Zur möglichen Bestimmung des Verschmutzungsgrades können derzeit erforschte Methoden der bildbasierten Bestimmung herangezogen werden. Diese bieten den Vorteil einer großflächigen räumlichen Auflösung unter potentiell geringen Betriebskosten [14].

In dieser Arbeit wird ein solches System zur bildbasierten Verschmutzungsbestimmung an Parabolrinnenkollektoren behandelt. Diese Methode wurde am Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. entwickelt. Das grundlegende Funktionsprinzip wurde an flachen Spiegeln erarbeitet und nachgewiesen. Im Zuge dieser Arbeit werden Kalibriermethoden weiterentwickelt, um diese für Parabolrinnenkollektoren und den Einsatz in Kraftwerken nutzbar zu machen. Die Methode funktioniert durch die Auswertung von RGB-Bildern, welche von einer Drohne aufgenommen werden. Die Werte des Bildes stehen dabei im Zusammenhang mit der Bestrahlungssträke, welche auf die Kameralinse fällt und bilden die Grundlage

der Verschmutzungsbestimmung. Streueigenschaften der Spiegelverschmutzung sowie die Referenz an einem gesäuberten Spiegelabschnitt werden durch eine Kalibration bestimmt. Diese Kalibration wird im Zuge dieser Arbeit auf Parabolrinnenkollektoren übertragen und weiterentwickelt, um die aus den Bildern erfassten Informationen besser abbilden zu können. Diese Weiterentwicklung der Methode geht einher mit einer Anpassung der bestehenden Theorie. Im Zusammenhang mit dem gestreuten Anteil der Bestrahlungsstärke wird ein Modell zur Mie-Streuung implementiert und parametrisiert.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die Grundlagen, welche zum Verständnis dieser Arbeit dienen, eingegangen. Dabei wird zuerst der Fokus auf die Technik im Zusammenhang mit Energieumwandlung konzentrierender Solarthermie (*engl. concentrated solar power, CSP*) gelegt. Hiernach werden die Verschmutzung und die Messung dieser Verschmutzung in konzentrierenden solarthermischen Kraftwerken betrachtet. Zuletzt wird die Theorie erläutert, welche zur bildbasierten Verschmutzungsmessung am Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) entwickelt wurde. Im Zuge dessen wird kurz auf die Grundlage von Kamerabildern und die Streuung von Solarstrahlung an Partikeln wie Staub eingegangen.

2.1 Konzentrierende Solarstrahlung

Die konzentrierende Solarstrahlung, im Weiteren als *CSP* bezeichnet, nutzt die Energie der Sonne und wandelt diese in einem mehrstufigen Prozess in andere Energieformen. Die Solarstrahlung wird bei dieser Technologie durch Linsen oder Spiegel auf einen Absorber fokussiert. In diesem wird die Energie der Strahlung als Wärmeenergie absorbiert und kann zum Beispiel zur Stromerzeugung verwendet werden. Hierbei stellen Dampfturbinen eine Möglichkeit dar, diesen Umwandlungsschritt zu realisieren. Neben der Bereitstellung von Strom kann auch direkt die Wärmeenergie genutzt werden. Für die Fokussierung eignete sich dabei ausschließlich die direkte und nicht gestreute Strahlung von der Sonne. Diese wird als direktnormale Irradianz oder Direktnormalstrahlung (*engl. direct normal irradiance, DNI*) bezeichnet. Die *DNI* steht im direkten Zusammenhang mit dem Ertrag der Stromerzeugung. Aus diesem Grund ist eine genau und standortnahe Messung der Strahlung von hohem Interesse. Hierfür stehen eine Reihe an Messsystemen zur Verfügung. Neben der *DNI* werden auch die diffuse horizontale Irradianz oder Diffusstrahlung(*engl. diffuse horizontal irradiance, DHI*) und globale horizontale Irradianz oder Globalstrahlung (*engl. global horizontal irradiance, GHI*) bestimmt. Die *DHI* ist Strahlung welche in der Atmosphäre an Partikeln oder Molekülen gestreut bzw. reflektiert wird. Die Summe aus der direkten und diffusen Strahlung beschreibt die *GHI*. In Abbildung 2.1 sind die verschiedenen Strahlungsarten exemplarisch dargestellt.[2, 5, 15]

CSP lässt sich in linien- und punktfokussierende Systeme unterteilen. Alle diese Systeme erfordern eine Nachführung mit dem Stand der Sonne. Turmkraftwerke und Paraboloidkraftwerke stellen Vertreter der punktfokussierenden Systeme dar. Parabolrinnenkollektoren und lineare Frensel-Kollektoren sind linienfokussierende Syste-

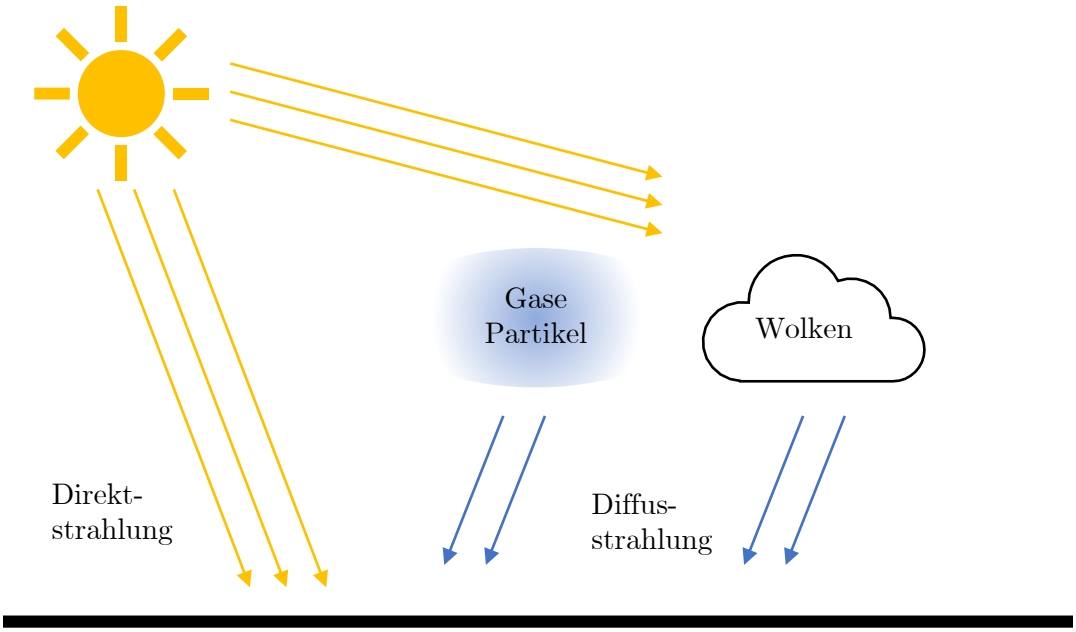


Abbildung 2.1: Exemplarische Darstellung der Direkt- und Diffusstrahlung angelehnt an [2]

me. Im Weiteren wird nur auf die Parabolrinnenkollektoren eingegangen, da sich die Ausführungen in dieser Arbeit ausschließlich auf diesen Kollektortypen beziehen. Ein Bild einens solchen Kollektors ist in Abbildung 2.2 gezeigt.[2, 5]

Parabolrinnenkollektoren nutzen Spiegel, um die Strahlung der Sonne auf ein Absorber bzw. Absorberrohr, welches sich im Fokalpunkt der Parabel befindet, zu konzentrieren. Durch das Absorberrohr fließt ein Wärmeträgerfluid, welches die Wärme aufnimmt. Die Form der Parabel kann beschrieben werden durch [2]:

$$z = \frac{x^2}{4f} \tag{2.1}$$

Dabei beschreibt f die Brennweite der Parabel. Der tangentiale Abstand zum Scheitelpunkt wird durch x angegeben und z ist die resultierende Höhe. Die Spiegeloberfläche setzt sich aus einzelnen Spiegelfacetten zusammen. Diese Spiegelfacetten sowie das Absorberrohr werden an eine Struktur, welche meistens aus Stahl besteht, montiert. Die gesamte Struktur lässt sich durch den Nachführantrieb an dem Stand der Sonne ausrichten und wird als Parabolrinnenkollektor bezeichnet. Normalerweise sind die Parabolrinnenkollektoren in nord-süd-Richtung ausgerichtet [5].

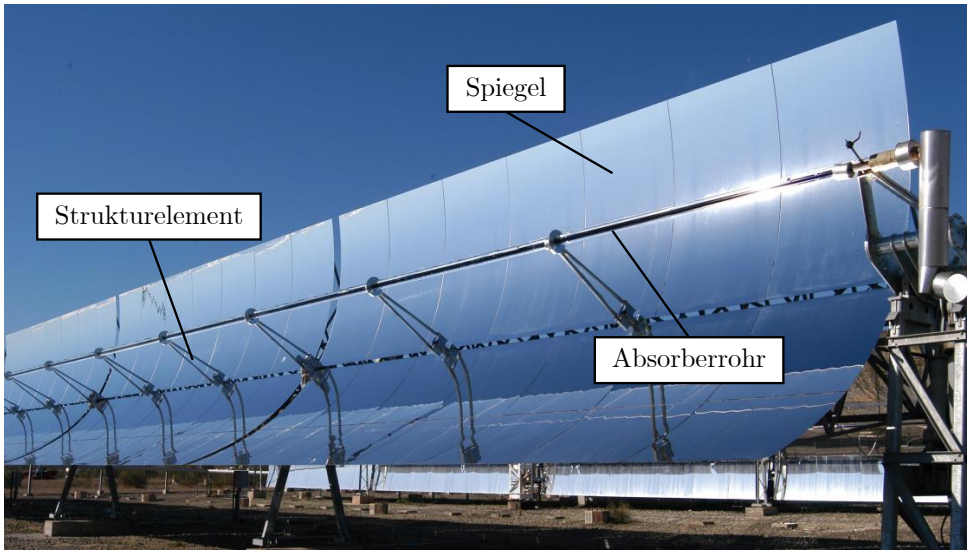


Abbildung 2.2: Parabolrinnenkollektor auf der Plataforma Solar de Almería (Eigentümer: Forschungszentrum CIEMAT/Spanien) Quelle: DLR (bearbeitet)

Eine zentrale Komponente der Parabolrinnenkollektoren sind die Spiegel. Ein charakteristischer Parameter für Spiegel ist die Reflektanz ρ. Diese setzt den reflektierten Strahlungsfluss Φ_r ins Verhältnis zum einfallenden Strahlungsfluss Φ_0.[2] Dies ist in Gleichung 2.2 gezeigt.

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_0} \tag{2.2}$$

Die am häufigsten verwendeten Spiegel für *CSP* Anwendungen sind Rückflächenspiegel. Bei diesen befindet sich die reflektierende Silberschicht hinter einem Glas.[2] Der Aufbau eines solchen Spiegels ist in Abbildung 2.3 gezeigt.



Abbildung 2.3: Aufbau eines Rückflächenspiegels mit Glasschicht, reflektierender Silberschicht und Schutzschicht

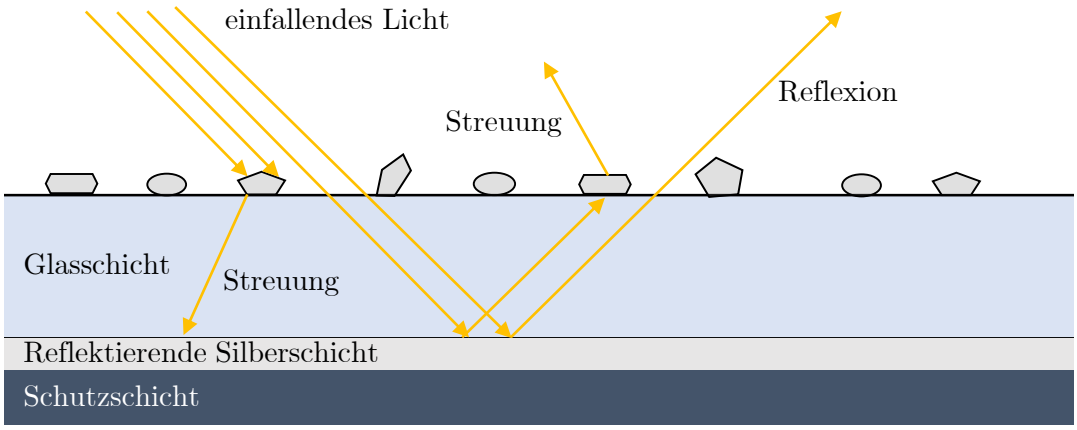


Abbildung 2.4: Streuung und Absorption an der Verschmutzungsschicht auf einem Spiegel angelehnt an [16]

Das Glas dient als Schutz für die empfindliche Silberschicht. Diese kann eine spektralen Reflektanz von bis zu 98 Prozent erreichen. Die Verschmutzung hat einen Einfluss auf die Reflektanz des Spiegels und damit den Ertrag von *CSP* Kraftwerken.[2] Dieser Einfluss wird im nächsten Abschnitt beleuchtet.

2.2 Verschmutzung in *CSP* Kraftwerken

Die Verschmutzung der Spiegel in *CSP* Kraftwerken beeinflusst die Effizienz [2]. In diesem Abschnitt wird auf die Art sowie den Einfluss der Verschmutzung in *CSP* Kraftwerken eingegangen. Zudem wird ein Überblick über die Möglichkeiten zur Verschmutzungsmessung gegeben.

2.2.1 Einfluss und Art der Verschmutzung

Die Verschmutzung entsteht unter anderem durch die Ablagerung von Aerosolen auf der Spiegeloberfläche [6]. Diese Verunreinigung führt zu Verlusten aufgrund von Streuung und Absorption [7, 16, 17]. Diese Verlustmechanismen durch Verschmutzung sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

Während die Verunreinigung von Photovoltaik im Gegensatz zu Verschmutzung bei *CSP* deutlich stärker untersucht wurde, zeigt sich dennoch, dass die Verluste bei *CSP* prozentual signifikanter sind [18–21]. Aride oder semiaride Klimazonen stellen empfehlenswerte Standorte für *CSP* Kraftwerke dar [5, 22]. Diese Standorte bieten den Vorteil einer vergleichsweise hohen *DNI*, bringen allerdings auch eine erhöhte Staubbelastung mit sich [5, 23]. In Regionen mit staubigen Umweltbedingungen kann die optische Effizienz der Spiegel von *CSP* um bis zu 40 % sinken [24]. Der tägliche Verlust beträgt zwischen $0,5$ und $1,5$ % [7]. Die Verschmutzung wird zum Beispiel

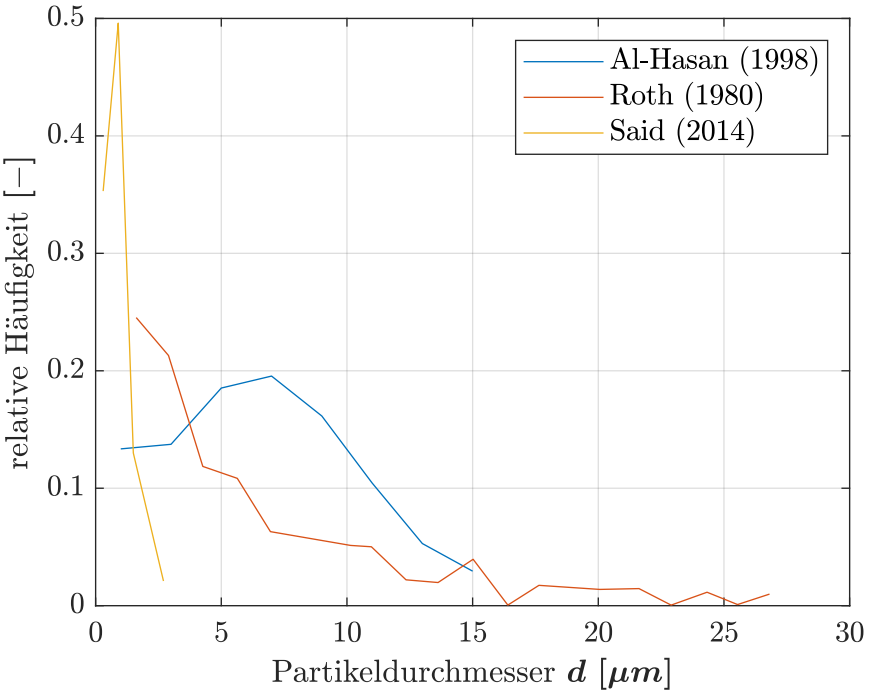


Abbildung 2.5: Auswahl an Partikelgrößenverteilungen mit Darstellung der relativen Häufigkeit über die Partikelgröße

beeinflusst durch verschiedene Umweltbedingungen wie die Luftfeuchtigkeit oder die Windgeschwindigkeit [17, 25, 26].

Die Art der Verschmutzung sowie die Größenverteilung ist abhängig vom betrachteten Standort [6, 18]. Die mineralische Zusammensetzung und die Größenverteilung der Staubablagerung wurden in verschiedenen Studien untersucht [17, 20, 27–33]. Eine Reihe von Größenverteilungen ist in Abbildung 2.5 abgebildet.

Für eine effizienten Betrieb eines *CSP* Kraftwerk ist die Reinigung notwendig [8]. In ariden Klimazonen spielt die Verfügbarkeit von Wasser zur Reinigung eine entscheidende Rolle [5, 34]. Zudem tragen die Reinigungskosten zu den Betriebskosten des Kraftwerks bei. Eine Optimierung der Reinigungspläne ist deshalb sinnvoll [9, 10]. Für diese Optimierung muss die Verschmutzung der Spiegel bekannt sein [11–13]. Hierfür stehen verschiedene Methoden zur Verschmutzungsmessung zur Verfügung. Einige von diesen werden im nächsten Abschnitt beleuchtet.

2.2.2 Verschmutzungsmessung in *CSP* Kraftwerken

Die Verschmutzung eines Spiegels kann mithilfe der Reflektanz ρ (vgl. Gleichung 2.2) durch den Sauberkeitswert ξ (*engl. cleanliness*) quantifiziert werden. Letzterer ist das Verhältnis der Reflektanz des verschmutzten Spiegels ρ_{soiled} zur Reflektanz des sauberen Spiegels ρ_{clean} [2].

$$\xi = \frac{\rho_{soiled}}{\rho_{clean}} \tag{2.3}$$

In diesem Abschnitt werden sowohl herkömmliche Messgeräte zur Bestimmung der Verschmutzung als auch bildbasierte Methoden vorgestellt.

Handreflektometer

Zur Messung der Reflektanz kann ein Handreflektometer wie das 15R von D&S (*Devices & Services*) verwendet werden [35]. Bei diesem Gerät wird Licht einer LED durch eine Linse kollimiert. Nach der Reflexion auf dem Spiegel wird das reflektierte Licht durch eine Sammellinse auf eine Fotodiode fokussiert [36]. Aus dem Verhältnis des emittierten zum reflektierten Licht kann die Reflektanz bestimmt werden. Durch die Punktmessungen ist die Verschmutzungsmessung für ein gesamtes Kraftwerk zeit- und kostenaufwendig [37, 38].

TraCS

Das TraCS (*engl. tracking cleanliness sensor*) Messgerät kann als stationäre Einheit in der Nähe des Solarfeldes, dessen Verschmutzung von Interesse ist, positioniert werden. Die Verschmutzung wird durch die Evaluierung einer separaten Spiegelprobe bestimmt. Das Messgerät besitzt hierzu zwei Pyrheliometer. Eines misst die *DNI* direkt und das zweite Pyrheliometer erfasst die *DNI*, welche von der Spiegelprobe reflektiert wird. Die Messungen werden dazu verwendet einen Sauberkeitswert für die Spiegelprobe zu bestimmen. Durch die zeitliche Auflösung lässt sich die Verschmutzungsrate bestimmen, welche die Abnahme des Sauberkeitswertes darstellt. Dieses Messgerät bringt einige Vorteile mit sich. Es zeichnet sich durch geringen Wartungsaufwand und niedrige Investitionskosten aus. Zudem wird das vorliegende Sonnenspektrum zum Messzeitpunkt verwendet. Weiterhin besitzt das Messgerät eine hohe zeitliche Auflösung und eine vergleichsweise große Referenzfläche des Spiegels mit $30cm^2$.[39]

AVUS

Das AVUS (*engl. automated in-situ measurement of soiling rates and spectra*) Messgeräte kann im Verbund mit einer meteorologischen Station oder selbständig aufgestellt werden und ermöglicht die Echtzeitmessung von Verschmutzungen. Hierzu wird eine Spiegelprobe natürlicher Verschmutzung unter einer einstellbaren Ausrichtung den

Umwelteinflüssen am installierten Standort ausgesetzt. In definierten Intervallen wird die Probe zu einem optischen Port verschoben und der Reflexionsgrad wird bestimmt. Hierzu wird Licht durch ein Linsensystem auf die Spiegelprobe gestrahlt. Das reflektierte Licht wird von einem Si-basierten Sensor detektiert. Eine Kalibrierung des Messgerätes mit einer Referenzspiegelprobe und einer Temperaturkorrekturroutine wird vor jeder Messung durchgeführt. Das Gerät zeichnet sich durch hohe Zuverlässigkeit und geringen Wartungsaufwand aus.[40]

Bildbasierte Verschmutzungsmessungen

Neben der Verschmutzungsmessungen durch Messgeräte besteht die Möglichkeit durch bildbasierte Verfahren die Verschmutzung zu bestimmen. Diese Methoden können auf einem physikalisch optischen Prinzip basieren oder künstliche Intelligenz nutzen. Auch eine Kombination aus beidem ist realisierbar. Die bildbasierten Methoden bieten eine sehr hohe örtliche Auflösung und besitzen das Potential für geringen Arbeitsaufwand. Allerdings ist keine dieser Methoden kommerziell erhältlich.[14] Einige dieser Methoden werden im Folgenden vorgestellt.

Eine dieser bildbasierten Methoden stellt das FREDA (*engl. field reflectance and degradation assessment*) System dar. Es wird eine Kamera an einer erhöhten Stelle montiert, wie zum Beispiel dem Turm eines Turmkraftwerkes. Zudem werden einige Referenzspiegel aufgestellt, die automatische Reflexionsgradmessungen ähnlich zum AVUS erlauben. Durch eine Lichtquelle werden die zu messenden Spiegel beleuchtet und die Position letzterer wird so eingestellt, dass das Licht in Richtung der Kamera reflektiert wird. Aus diesen relativen Verschmutzungsmessungen und den Reflexionsgradmessungen an den Referenzspiegeln lassen sich absolute Werte für die Reflektanz bzw. die Sauberkeit des Spiegels ableiten. Das System ermöglicht zum einen die Verschmutzungsmessung und zum anderen die zeitliche Degradation der Spiegel zu bestimmen.[38]

Eine weitere Möglichkeit zur bildbasierten Verschmutzungsmessung wurde von Coventry et al. (2020) vorgestellt. Hierbei werden hochauflösende Drohnenbilder analysiert. Die Bilder werden von den zu evaluierenden Spiegeln gemacht und mit Hilfe eines Himmelsmodells wird die erwartete Reflexion bestimmt. In Fällen von deutlicher Abweichung wird der betrachtete Pixel als verschmutzt oder korrodiert gewertet. Es wurde festgestellt, dass Verschmutzungen zu höherer Helligkeit führen als die erwartete Reflexion des Himmelsbereichs, während korrodierte Bereiche eine geringere Intensität aufweisen.[41]

Wolfertstetter et al. (2020) zeigen eine weitere Methode zur Verschmutzungsbestimmung auf Grundlage von Drohnenbilder. Bei dieser Methode wird die Reflexion des Absorberrohrs von Parabolrinnen betrachtet. Es wurde ein Zusammenhang zwischen dem Grauwert und dem Reflexionsgrad festgestellt. Für eine weitere Verbesserung der

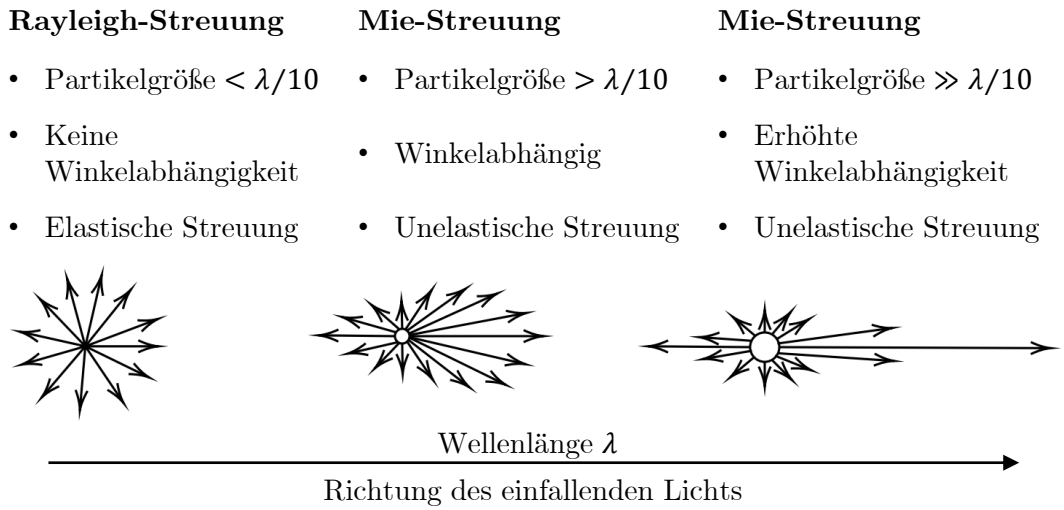


Abbildung 2.6: Charakterisierung der Rayleigh- und Mie-Streuung in Anlehnung an [43]

Verschmutzungsmessungen werden die Kameraeigenschaften, die Beleuchtungsbedingungen sowie die Absorption und Streuung der Staubschicht mit einbezogen.[42]

2.3 Grundlagen bildbasierter Verschmutzungsmessung

In diesem Abschnitt wird auf die der Arbeit vorliegenden Theorie zur Verschmutzungsmessung an Spiegeln eingegangen. Sie dient als Basis für die erfolgten Weiterentwicklungen. Zunächst wird dabei auf die Mie-Streuung und Kamerabilder eingegangen. Dann werden die physikalischen Grundlagen und die getroffenen Annahmen betrachtet.

2.3.1 Mie-Streuung

Trifft Licht auf einen Partikel kommt es unter anderem zur Streuung des Lichts. Bei diesen Partikeln kann es sich zum Beispiel um Aerosole handeln. Die Interaktion von elektromagnetischen Wellen und Partikeln kann durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben werden. Eine Lösung dieser Gleichungen wurde von Gustav Mie 1908 veröffentlicht. Diese beschreibt die Streuung von Licht an sphärischen Partikeln, welche einen Durchmesser in der Größenordnung der einfallenden Lichtwellenlänge λ oder darüber haben. Sind die Partikel im Verhältnis zur Wellenlänge klein, tritt Rayleigh-Streuung auf. Hier kommt es zu einer winkelunabhängigen elastischen Streuung. Die Rayleigh-Streuung ist zum Beispiel verantwortlich für die Blaufärbung des Himmels. Bei der Mie-Streuung hingegen wird das Licht winkelabhängig und inelastisch gestreut. Die Streuung ist dabei vor allem in die Vorwärtsrichtung gerichtet. Dieser Effekt wird weiter verstärkt, wenn die Partikelgröße im Verhältnis zur Wellenlänge

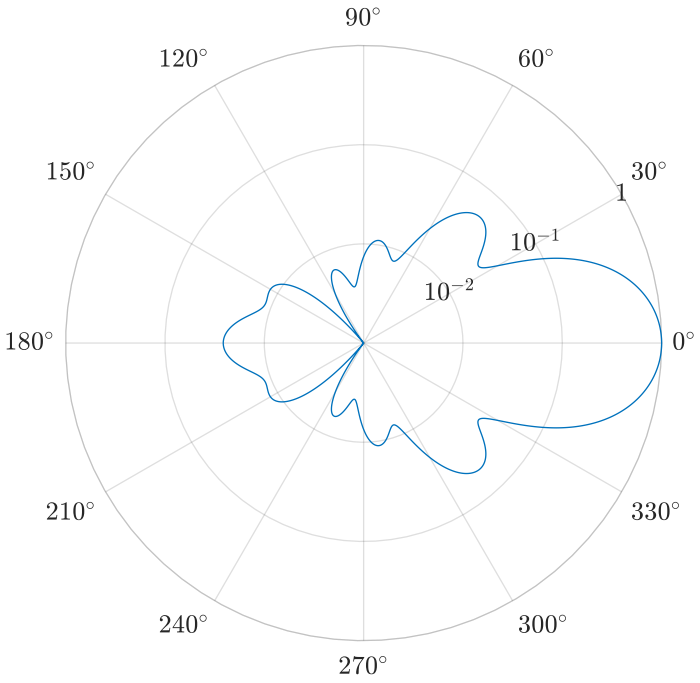


Abbildung 2.7: Exemplarischer winkelabhängiger Streuanteil $P(\Theta)$ der Mie-Streuung über den Streuwinkel Θ

zunimmt. Diese Streuungen sind exemplarisch in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Mie-Streuung ist unter anderem abhängig von der Größenverteilung der Partikel und der Wellenlänge sowie den chemischen Eigenschaften der Partikel wie zum Beispiel dem komplexen Brechungsindex.[43–46]

In Abbildung 2.7 ist eine exemplarische Phasenfunktion, welche den winkelabhängigen Streuanteil $P(\Theta)$ darstellt, über den Streuwinkel Θ aufgetragen. Die Phasenfunktion wurde auf den Betrag 1 normiert und wird auf einer logarithmischen radialen Achse aufgetragen. Das Licht, welches gestreut wird, fällt mit einem Inzidenzwinkel von 0° ein und wird an einem Partikel gemäß der Phasenfunktion anteilig in die Richtungen der Steruwinkel gestreut. Ein Streuwinkel von 0° bedeutet eine Streuung in dieselbe Richtung wie das einfallende Licht, während 180° einer Rückwärtsstreuung entspricht.

Neben der Mie-Streuung wird für das Verständnis der Theorie im nächsten Abschnitt auf Kamerabilder eingegangen.

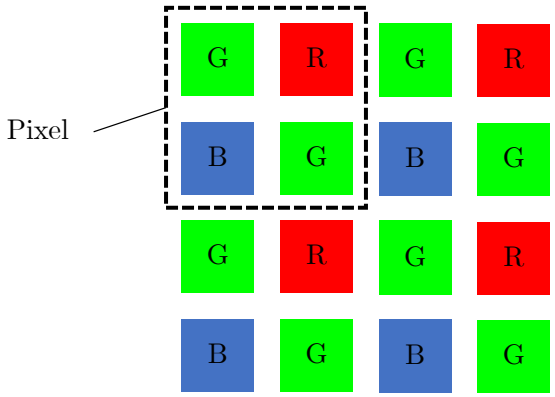


Abbildung 2.8: Farbfilter für rot R, grün G und blau B in einer Bayer-Matrix angelehnt an [47]

2.3.2 Kamerabilder

RGB-Bilder werden aus der Kombination der drei Primärfarben rot R, grün G und blau B erzeugt [47, 48]. Für die Aufnahme von digitalen *RGB*-Bildern werden vor allem zwei Sensorarten verwendet [48]. Dies wären *CCD* (*engl. charge-coupled device*) und *CMOS* (*engl. complementary metal-oxide-semiconductor*), welche sich in ihrem Aufbau unterscheiden [49]. Beide Sensoren verwenden ein Farbfiltermoasik (*engl. color filter array*). Dieses Farbfiltermoasik ist häufig als Bayer-Matrix aufgebaut. Diese ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Die einzelnen Pixel sind mit jeweils vier Farbfiltern bestückt ein roter Filter, ein blauer Filter und zwei grüne Filter [47, 48].

Die Pixelwerte des *RGB*-Bildes werden auf Grundlage der vom Sensor erfassten Spannungen bestimmt [47]. Die individuelle Farbdarstellung hängt neben der Lichtintensität und Wellenlänge des einfallenden Lichts auch von der spektralen Sensitivität der verwendeten Kamera ab [47, 50–52]. Eine exemplarische Darstellung der spektralen Sensitivität über die Wellenlänge ist in Abbildung 2.9 zu sehen. Zur Darstellung der Farben wird häufig der standardisierte Farbraum *sRGB* verwendet [47, 53].

Für die Verschmutzungsbestimmung wird ausgenutzt, dass die Werte eines *RGB*-Bildes proportional zur Bestrahlungsstärke E ist, die auf die Kamera trifft [51, 52]. Die für die Verschmutzungsbestimmung verwendeten *RGB*-Bilder müssen eine konstante Belichtungsdauer und eine gleichmäßige Beleuchtung aufweisen. Dies kann falls nötig durch eine Linearisierung oder eine Flat-Field-Korrektur erreicht werden. Letztere kommt zum Einsatz, da das Licht durch die Geometrie der Linse nicht gleichmäßig auf den Sensor trifft und es zu Verdunklungen am Rand des Bildes kommt, einer sogenannten Vignettierung.[54] Dies ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

Nachdem eine Einführung in die Mie-Streuung und Kamerabilder gegeben wurde, wird die eigentliche Theorie zur Verschmutzungsbestimmung betrachtet.

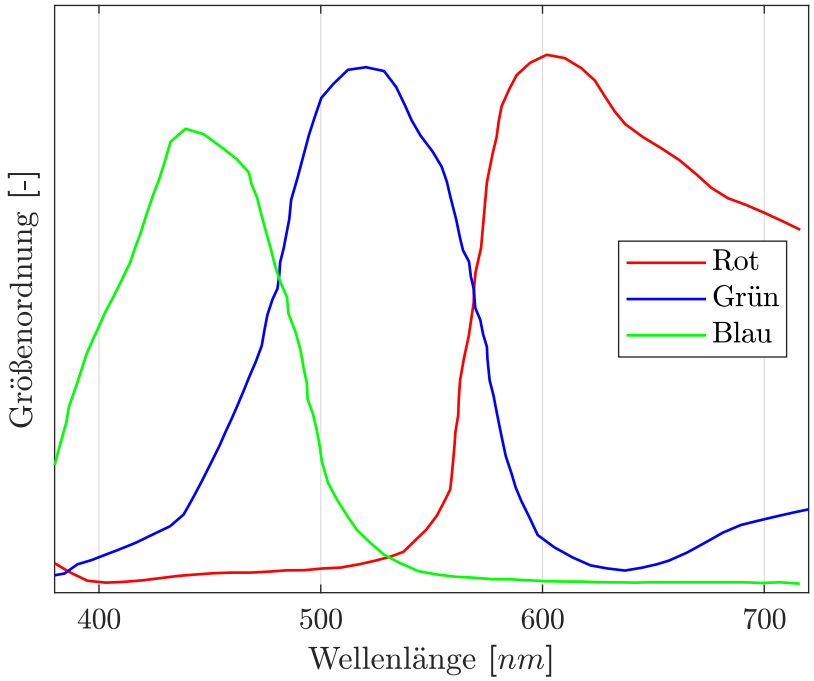
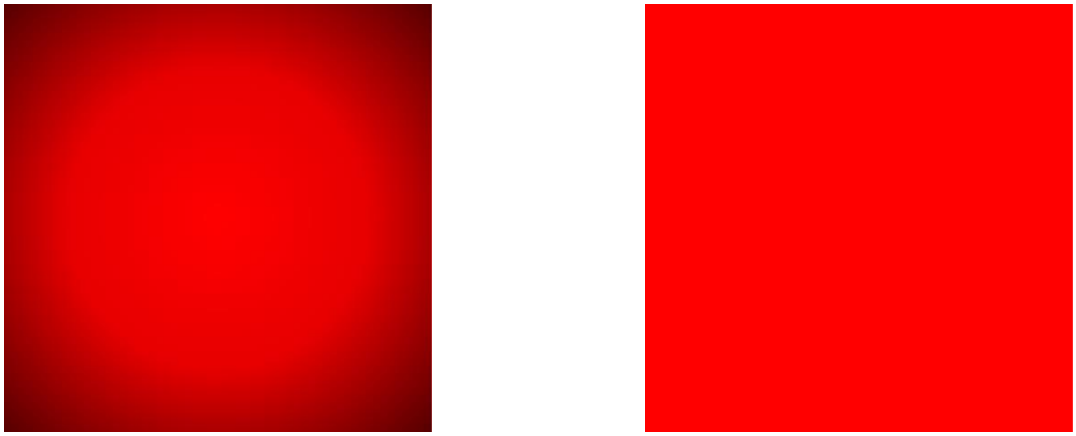


Abbildung 2.9: Spektrale Sensitivität eines beispielhaften Sensors angelehnt an [47]

2.3.3 Theorie der zu Grunde liegenden Messmethode

Das Grundprinzip der verwendeten bildbasierten Verschmutzungsmessung basiert vor allem auf einer am DLR Institut für Solarforschung entwickelten Methode [42]. Mit dieser Theorie soll es ermöglicht werden Verschmutzungen von Spiegeln in Parabolrinnenkraftwerken auf Grundlage von Kamerabildern zu bestimmen. Die Bilder der Kollektoren werden dabei bei überwiegend klaren Himmelsbedingungen aufgenommen und ausgewertet. Zur Bestimmung wie sauber ein Spiegel ist wird der Sauberkeitswert ξ (*engl. cleanliness*) verwendet. Dieser ist definiert als der Reflexionsgrad eines verschmutzten Spiegels im Verhältnis zum Reflexionsgrad eines sauberen Spiegels (vgl. Gleichung 2.3). Der Anteil des Lichts, welcher durch die Staubschicht auf der Spiegeloberfläche gelangt, kann durch den Transmissionskoeffizient τ beschrieben werden. Bei einer Reflexion wird diese Staubschicht zwei Mal passiert (vgl. Abbildung 2.4) und somit entspricht der Sauberkeitswert ξ gleichzeitig dem quadratischen Trasmissionkoeffizienten durch die Staubschicht τ^2.

$$\xi = \frac{\rho_{soiled}}{\rho_{clean}} = \tau^2 \tag{2.4}$$



(a) **(b)**

Abbildung 2.10: Schematische Darstellung der Vignettierung eines Bildes vor (a) und nach der Flat-Field-Korrektur (b)

Vor der näheren Erläuterung der Methode zur Verschmutzungsbestimmung an Spiegeln, werden im Folgenden einige Definitionen eingeführt. Einzelne Entwicklungsschritte werden an diskreten Bezugspunkten auf dem Spiegel ausgeführt. Diese werden im Verlauf dieser Arbeit als Spots bezeichnet. Der Sauberkeitswert dieser Spots wird durch Reflektanzmessungen bestimmt. Zum einen werden diese Spots für die Kalibrierung benötigt und zum anderen können die Ergebnisse mit den Referenzmessungen der Spots validiert werden. Nach der Entwicklung der Methode sind für das Betreiben der Messung lediglich eine Auswahl an Spots für die Kalibrierung erforderlich.

Weiterhin werden verwendete Winkel definiert. In der Methode werden die Inzidenzwinkel für die Kamera α_{cam} und für die Sonne α_{sun} verwendet. Diese bilden den Winkel zwischen der Normalen der Spiegeloberfläche $\vec{n}$ des Spots und dem Richtungsvektor zwischen dem Spot auf dem Spiegel und der Kamera bzw. der Sonne. In Abbildung 2.11 sind diese Winkelbeziehung dargestellt. Die Vektoren werden für einen Teil eines Parabolrinnenspiegels und einen einzelnen Spot gezeigt.

Nach diesen Definitionen wird auf die Methode zu Verschmutzungsbestimmung selbst eingegangen. Der Rotkanalwert R_{soiled} der betrachteten Stelle auf dem Spiegel wird als proportional zu Bestrahlungsstärke E_{cam}, welche auf die Kamera trifft, angenommen (vgl. Abschnitt 2.3.2):

$$R_{soiled} \propto E_{cam} \tag{2.5}$$

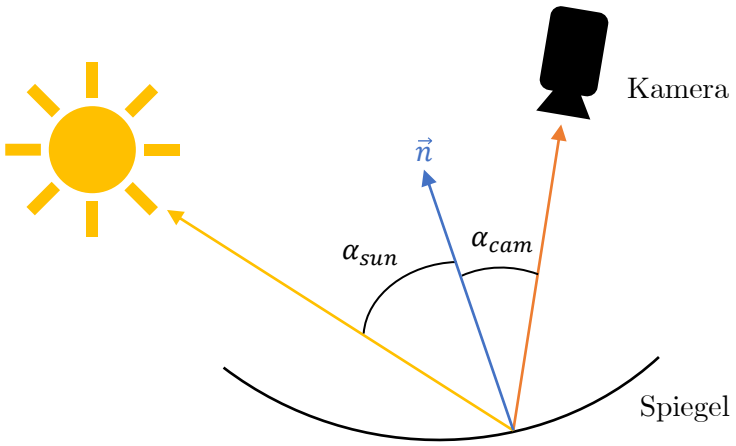


Abbildung 2.11: Definition der Inzidenzwinkel α_{cam} und α_{sun} zur Spiegelnormalen $\vec{n}$

Pixel, welche die Spiegeloberfläche erfassen, erreicht eine Bestrahlungsstärke E, die aus zwei Komponenten besteht. Sie unterscheiden sich dadurch, dass ein Anteil ohne Interaktion mit den Schmutzpartikeln reflektiert wird (E_{refl}), während der andere Anteil die an den Staubpartikeln gestreute Direktstrahlung darstellt (E_{scat}) [42]:

$$E_{cam} = E_{refl} + E_{scat} \tag{2.6}$$

Die reflektierte Strahlung des betrachteten Spiegelbereichs ist gleich der reflektierten Strahlung von einem nicht verschmutzen Spiegel $E_{refl,clean}$ reduziert um den quadratischen Transmissionskoeffizienten $\tau(\alpha_{cam})$ der Staubschicht, da die Staubschicht bei der Reflexion zweimal durchlaufen werden muss. Der Transmissionskoeffizient ist winkelabhängig [55]. Durch Einführung einer Proportionalitätskonstanten C_{cam}, kann die Bestrahlungsstärke E_{refl} in Zusammenhang mit dem von der Kamera aufgenommenen Rotkanalwert gebracht werden. Für einen sauberen Spot auf dem Spiegel wird dieser Rotkanalwert R_{clean} genannt. Zudem wird ein Faktor zur Skalierung des R_{clean}-Wertes eingeführt, um diesen von Kalibrierbedingungen auf Messbedingungen übertragen zu können. Hierzu wird ein Himmelshelligkeitsverhältnis V_{sky} auf Grundlage des Perez-Modell eingebunden, welches die Himmelshelligkeit zum Messzeitpunkt ins Verhältnis mit der Himmelshelligkeit zum Zeitpunkt der Kalibrierung setzt [56, 57].

$$E_{refl} = E_{refl,clean} \cdot \tau^2(\alpha_{cam}) = C_{cam} \cdot R_{clean} \cdot \tau^2(\alpha_{cam}) \cdot V_{sky} \tag{2.7}$$

Der einfach gestreute Anteil der Strahlung ist wiederum proportional zu der *Single Scattering* Albedo der Verschmutzungsschicht ω, der effektiven Phasenfunktion f_P

und der DNI. Die Albedo ist ein Maß für das Verhältnis von gestreuter und absorbierter Strahlung von nicht reflektierenden Medien [58]. Die effektive Phasenfunktion beschreibt den Anteil der Streuung über den Streuwinkel.

$$E_{scat} \propto (1 - \tau(\alpha_{sun})) \cdot \omega \cdot f_P \cdot DNI \tag{2.8}$$

Für die effektive Phasenfunktion f_P wurden vier mögliche Pfade identifiziert, wie das Sonnenlicht zur Kamera gestreut werden kann. Aus der Sonnenposition und der Kameraposition lassen sich für jeden Pfad die Streuwinkel $\Theta_{i,i}$ berechnen. Die jeweiligen Pfade und Streuwinkel sind in Abbildung 2.12 dargestellt.

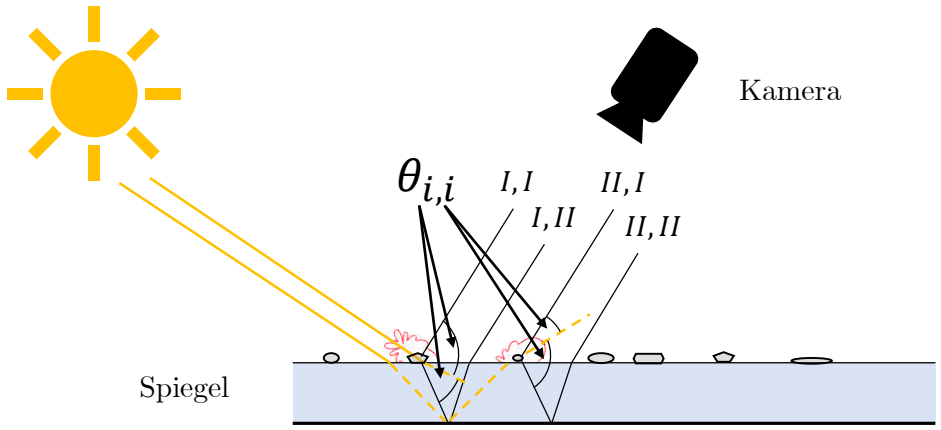


Abbildung 2.12: Pfade für die Streuung des Sonnenlichts zur Kamera. Der Lichtweg des Sonnenlichts ist in gelb dargestellt. Die Streuung des Lichts zur Kamera ist in schwarz angedeutet.

Es wird nur die Streuung an einem Partikel betrachtet. Der Streuwinkel ist der Winkel zwischen dem Richtungsvektor von der Sonne zum Spot und dem Richtungsvektor von diesem Spot zur Kamera bzw. den Reflexionen der Richtungsvektor auf dem Spiegel. Für die Winkel $\Theta_{I,I}$ und $\Theta_{I,II}$ trifft die Strahlung der Sonne direkt auf einen Partikel auf der Spiegeloberfläche und wird gestreut. Durch $\Theta_{I,I}$ wird die direkte Streuung zur Kamera beschrieben, wohingegen bei $\Theta_{I,II}$ das Licht erst auf dem Spiegel reflektiert wird und dann zur Kamera gelangt. Bei den Streuwinkeln $\Theta_{II,I}$ und $\Theta_{II,II}$ tritt das Sonnenlicht vorerst ungehindert durch die Verschmutzungsschicht und wird erst nach der Reflexion auf dem Spiegel an einem Partikel gestreut. $\Theta_{II,I}$ bildet hier erneut den direkten Weg zur Kamera ab und $\Theta_{II,II}$ beschreibt den Lichtweg mit einer Reflexion des gestreuten Lichts auf dem Spiegel gefolgt vom Weg zur Kamera. Auf Grundlage dieser Strahlengänge wurde eine Gleichung für die effektive Phasenfunktion f_P hergeleitet:

$$
\begin{aligned}
f_P = & P_{scat}(\Theta_{I,I}) \\
& + \rho_{clean} \cdot \tau(\alpha_{cam}) \cdot P_{scat}(\Theta_{I,II}) \\
& + \rho_{clean} \cdot \tau(\alpha_{sun}) \cdot P_{scat}(\Theta_{II,I}) \\
& + \rho_{clean}^2 \cdot \tau(\alpha_{cam}) \cdot \tau(\alpha_{cam}) \cdot P_{scat}(\Theta_{II,II})
\end{aligned}
\tag{2.9}
$$

Hierbei bezieht sich ρ_{clean} auf den Reflexionsgrad gemessen an einem sauberen Spiegels und $P_{scat}(\Theta_{i,i})$ gibt die Streuverteilung in die Richtung des Streuwinkels $\Theta_{i,i}$ an. Es lässt sich zeigen, dass $\Theta_{I,II} = \Theta_{II,I}$ sowie $\Theta_{I,I} = \Theta_{II,II}$ gilt. Zudem wird angenommen, dass die Streuwahrscheinlichkeit in Richtung der Winkel $\Theta_{I,II}$ bzw. $\Theta_{II,I}$ deutlich größer ist als die Streuung in Richtung der Winkel $\Theta_{I,I}$ bzw. $\Theta_{II,II}$, da die Vorwärtsstreuung der Mie-Streuung dominant ist (vgl. Abschnitt 2.3.1). Dabei liegen vor allem die Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ und $\Theta_{II,I}$ im Bereich der Vorwärtsstreuung. Damit lässt sich die Gleichung 2.9 der Phasenfunktion folgendermaßen vereinfachen:

$$
f_P = \rho_{clean} \cdot P_{scat}(\Theta_{I,II}) \cdot (\tau(\alpha_{cam}) + \tau(\alpha_{sun})) \tag{2.10}
$$

Ob die Annahme zur dargestellten Vereinfachung hinreichend zutrifft, wird dabei für jede Kombination aus Kamera- und Sonnenposition geprüft. Hierzu wird für jeden Messpunkt ein Mie-Verhältnis χ_{Mie} eingeführt, welches einen festgelegten Schwellenwert überschreiten muss, um bei den Berechnungen betrachtet zu werden. Das Mie-Verhältnis χ_{Mie} ist das Verhältnis des Streuanteils P in Richtung des Streuwinkels $\Theta_{I,II}$ zum Streuanteil P in Richtung des Streuwinkels $\Theta_{I,I}$.

$$
\chi_{Mie} = \frac{P(\Theta_{I,II})}{P(\Theta_{I,I})} \tag{2.11}
$$

Der Transmissionskoeffizient lässt sich mit einer Transferfunktion f_T vom Inzidenzwinkel der Kamera auf den Inzidenzwinkel der Sonne übertragen [59]:

$$
\tau(\alpha_{cam}) = \tau(\alpha_{sun}) \cdot f_T(\alpha_{sun}, \alpha_{cam}) \tag{2.12}
$$

Mit der Gleichung 2.12 und der zuvor vereinfachten effektiven Phasenfunktion aus Gleichung 2.10 ergibt sich dann:

$$
f_P = \rho_{clean} \cdot P_{scat}(\Theta_{I,II}) \cdot \tau(\alpha_{sun}) \cdot (1 + f_T(\alpha_{sun}, \alpha_{cam})) \tag{2.13}
$$

An dieser Stelle wird ein Kalibrierungsfaktor c_{dust} eingeführt, welcher dazu dienen soll die Streueigenschaften der Staubschicht zusammenzufassen. Dieser ist wie folgt definiert:

$$c_{dust} = \omega \cdot \rho_{clean} \cdot P_{scat}(\Theta_{I,II}) \cdot (1 + f_T(\alpha_{sun}, \alpha_{cam})) \cdot DNI_{cal} \tag{2.14}$$

Aus Gleichung 2.8, 2.13 und 2.14 ergibt sich damit:

$$\begin{aligned} E_{scat} =& (1 - \tau(\alpha_{sun})) \cdot \tau(\alpha_{sun}) \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}} \\ & \cdot \omega \cdot \rho_{clean} \cdot P_{scat}(\Theta_{I,II}) \cdot (1 + f_T(\alpha_{sun}, \alpha_{cam})) \cdot DNI_{cal} \\ =& (1 - \tau(\alpha_{sun})) \cdot \tau(\alpha_{sun}) \cdot c_{dust} \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}} \end{aligned} \tag{2.15}$$

Werden nun die Gleichungen 2.5 bis 2.7 sowie die Gleichung 2.15 zusammengefasst ergibt sich ein Ausdruck welcher als proportional zum Rotkanalwert des Kamerabildes angenommen wird. Der Transmissionskoeffizient aus Gleichung 2.7 wird wiederum auf den Inzidenzwinkel α_{sun} transponiert. Durch die Verwendung der Proportionalitätskonstanten C_{cam}, um den Rotkanalwert des Kamerabildes in Verbindung mit der auf die Kamera fallende Bestrahlungsstärke E_{cam} zu bringen, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} R_{soiled} \cdot C_{cam} =& C_{cam} \cdot R_{clean} \cdot \tau^2(\alpha_{sun}) \cdot f_T^2(\alpha_{sun}, \alpha_{cam}) \cdot V_{sky} \\ & + (1 - \tau(\alpha_{sun})) \cdot \tau(\alpha_{sun}) \cdot c_{dust} \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}} \end{aligned} \tag{2.16}$$

Ein neuer Kalibrierfaktor wird definiert zu $c_{scat,theo} = \frac{c_{dust}}{C_{cam}}$, um die Kameraeigenschaften in diesem zu berücksichtigen. Damit ist der Kalibrierfaktor gegeben durch:

$$c_{scat,theo} = \frac{1}{C_{cam}} \cdot \omega \cdot \rho_{clean} \cdot P_{scat}(\Theta_{I,II}) \cdot (1 + f_T(\alpha_{sun}, \alpha_{cam})) \cdot DNI_{cal} \tag{2.17}$$

Die Messgleichung wiederum lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$\begin{aligned} 0 =& R_{soiled} - \tau(\alpha_{sun}) \cdot \left(c_{scat,theo} \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}} \right) \\ & + \tau^2(\alpha_{sun}) \cdot \left(c_{scat,theo} \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}} - R_{clean} \cdot f_T^2(\alpha_{sun}, \alpha_{cam}) \cdot V_{sky} \right) \end{aligned} \tag{2.18}$$

Diese in τ quadratische Gleichung lässt sich nach einer zuvor durchgeführten Kalibrierung zur Bestimmung von $c_{scat,theo}$ und R_{clean} lösen. Man erhält den Sauberkeitswert des Spiegels ξ. Die Gleichung 2.17 lässt sich nicht ohne umfassendes Verständnis der Streuung für $c_{scat,theo}$ lösen. Deshalb wird $c_{scat,theo}$ in der Kalibrierung durch die Gleichung 2.19 bestimmt. Diese Gleichung ist neben den Einstrahlungsbedingungen zum Mess- und Kalibrierzeitpunkt auch abhängig von den Inzidenzwinkeln der Kamera und Sonne. Zur Auswertung der Gleichung werden neben den Kamerabildern Reflektanzmessungen benötigt, welche z.B. mit einem Handreflektometer aufgenommen werden können.

$$c_{scat,theo} = \frac{R_{soiled} - R_{clean} \cdot \tau^2(\alpha_{sun}) \cdot f_T^2(\alpha_{sun}, \alpha_{cam}) \cdot V_{sky}}{(1 - \tau(\alpha_{sun})) \cdot \tau(\alpha_{sun}) \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}}} \tag{2.19}$$

Nach den theoretischen Grundlagen wird die Anwendung der Methode zur Verschmutzungsbestimmung gezeigt.

2.4 Anwendung der Theorie der zu Grunde liegenden Messmethode

Soll die Theorie auf Drohnenbilder angewendet werden, um hieraus die Verschmutzung von Spiegeln zu bestimmen, müssen verschiedene bildverarbeitende Methoden berücksichtigt werden. An flachen Spiegeln wurde die Methode bereits angewendet. In diesem Abschnitt wird der wesentliche Ablauf des Programms erläutert. Der generelle Ablaufplan ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

Für die Auswertung der Verschmutzung des Spiegels werden zwei Flüge benötigt. Ein Messflug und ein Kalibrierflug. Die Flüge können dabei zeitlich direkt nacheinander oder auch zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt werden. Beide sollten allerdings am gleichen Standort erfolgen und die Bilder sollten von Spiegeln der gleichen Art gemacht werden. Für den Kalibrierflug muss ein Teil der Spiegeloberfläche präpariert werden. Um Referenzwerte für R_{clean} zu erhalten wird ein ausreichend großer gesäuberter Bereich des Spiegels benötigt. Zudem sind Referenzmessungen des Reflexionsgrades an verschiedenen Spots auf dem Spiegel erforderlich. Die Messungen der Reflektanz können z.B. mit einem Handreflektometer durchgeführt werden. Außerdem werden die DHI und DNI sowohl während des Kalibrierflugs als auch während des Messflugs aufgezeichnet. Nachdem verschiedene Kamerapositionen angeflogen und Bilder von dem Spiegel gemacht wurden, werden diese Bilder aufbereitet. Jedes Bild bedeutet hierbei eine neue Kameraposition. Durch die Aufnahme von RAW-Bildern bei konstanten Kameraeinstellungen ist eine Linearisierung der Bilder nicht notwendig. Es wird allerdings eine Flat-Field-Korrektur durchgeführt. Neben dieser Bildkorrektur werden die Bilder zudem orthogonalisiert, um auf diesem so-

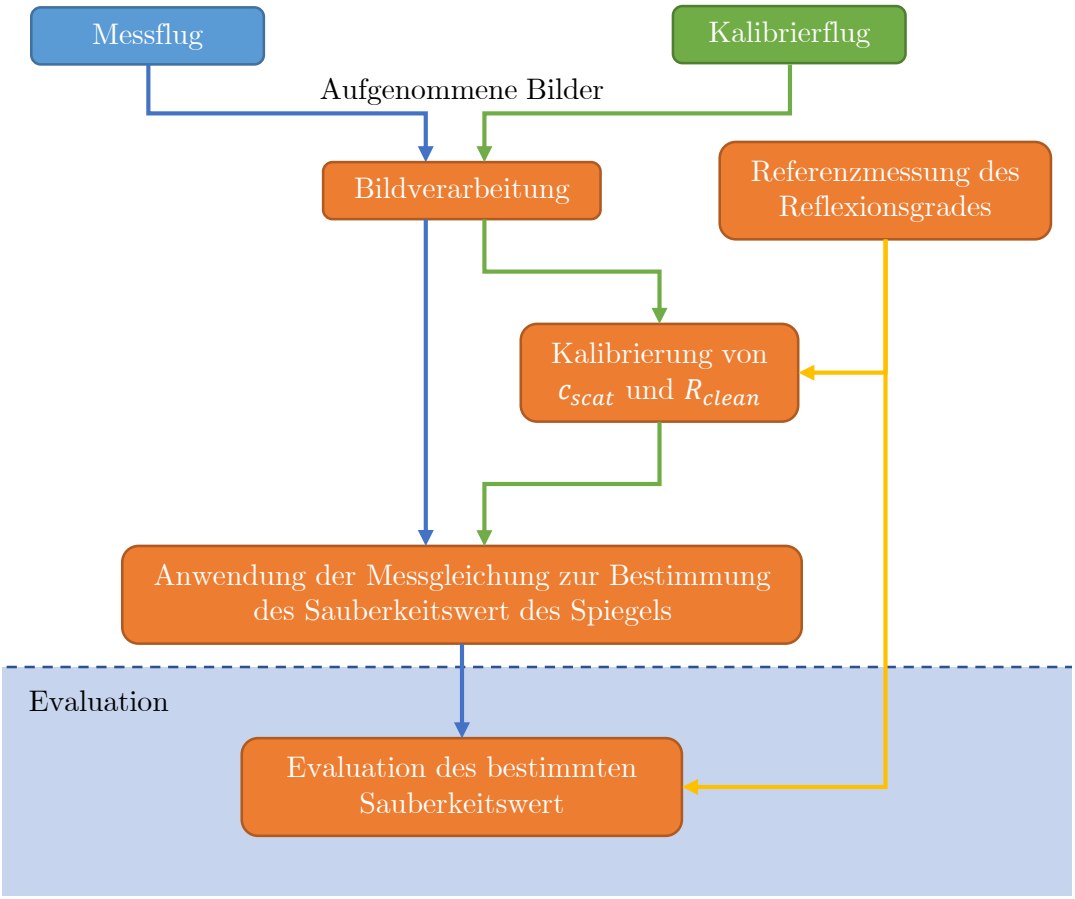


Abbildung 2.13: Ablauf der Verschmutzungsbestimmung von Spiegeln per Kamerabilder

genannten Orthobild nur den Spiegel zu sehen und zu gewährleisten, dass dieselbe Position in jedem Orthobild sich auf einen gleichbleibenden Spot auf dem Spiegel bezieht, unabhängig von der Position an der das Originalbild aufgenommen wurde. Der Spiegel wird somit in jedem Orthobild senkrecht von oben betrachtet. Diese Orthogonalisierung ist in Abbildung 2.14 für einen Parabolrinnenkollektor dargestellt.

Mit den Orthobildern des präparierten Spiegels und den Reflektanzmessungen kann die Kalibrierung durchgeführt werden. Um den Wert für R_{clean} zu bestimmen, werden die Rotkanalwerte des Orthobildes im gesäuberten Bereich des flachen Spiegels gemittelt. Somit ergibt sich für jede Kameraposition im Spiegelkoordinatensystem bzw. jedes aufgenommene Bild während des Kalibrierflugs ein Wert für R_{clean}. Diese werden abgelegt, um für die Auswertung des Messfluges verwendet zu werden. An den Spots, auf dem Spiegel an denen Reflektanzmessungen durchgeführt wurde, werden wiederum in einem Bereich von 3×3 Pixeln der Wert für R_{soiled} aus dem Mittelwert der Rotkanalwerte der Pixel bestimmt. In Abbildung 2.15 sind die Bereiche zur Er-

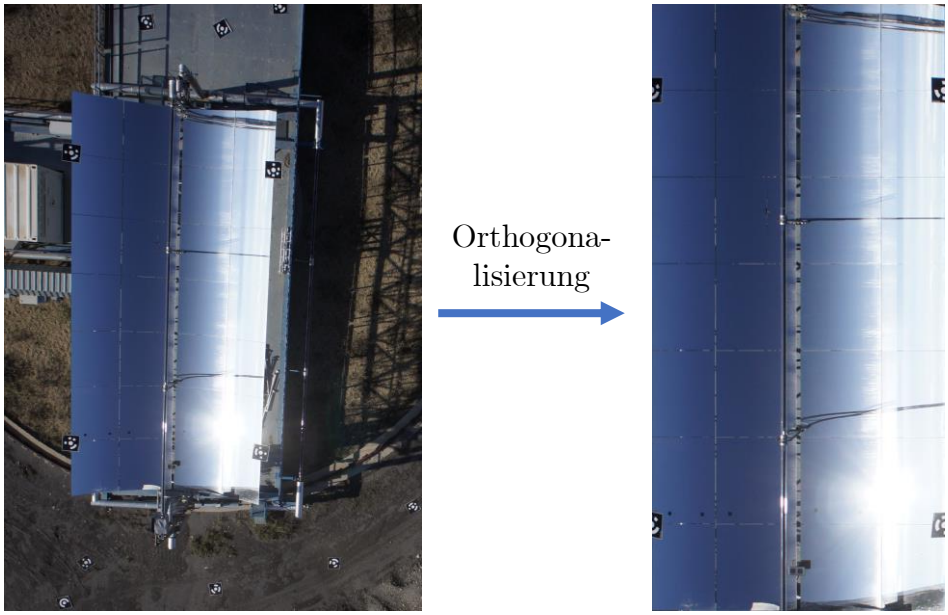


Abbildung 2.14: Orthogonalisierung des Kamerabildes am Beispiel eines Parabolrinnenkollektors auf der von CIEMAT betriebenen PSA. Links ist das Originalbild und rechts das Orthobild zu sehen.

mittlung der Rotkanalwerte auf einem flachen Spiegel eingezeichnet. Der gesäuberte Bereich zur Bestimmung von R_{clean} ist grün umrandet und die Bereiche für R_{soiled} in rot.

Mit diesem R_{soiled} und der Reflektanzmessung können unter Anwendung der Kalibriergleichung 2.19 die Werte für $c_{scat,theo}$ berechnet werden. Für den Messflug muss der Spiegel grundsätzlich nicht präpariert werden und es sind auch keine Reflektanzmessungen notwendig. Es werden allerdings auch hier Reflektanzmessungen für Spots auf dem Spiegel angefertigt, damit die Ergebnisse validiert werden können. In Bezug auf die Bildvorverarbeitung werden die Bilder aus dem Messflug in derselben Weise aufbereitet wie beim Kalibrierflug. R_{soiled} wird erneut in einem Bereich von 3×3 Pixeln an der Stelle des Reflektanzmessung durch Mittelung der Rotkanalwerte der Pixel bestimmt. Die Kameraposition wird verwendet, um einen R_{clean} aus den in der Kalibrierung hinterlegten Werten zu interpolieren. Dieser Wert wird mit dem Verhältnis der Himmelshelligkeiten V_{sky} skaliert. Mit den neuen Sonnen- und Kamerapositionen können zudem passende Werte für $c_{scat,theo}$ ermittelt werden. Mit diesen Informationen lässt sich die Messgleichung lösen und somit der jeweilige Sauberkeitswert ξ bzw. τ^2 für die Spots bestimmen. ξ wird dabei für jeden Spot in jedem Bild des Messflugs bestimmt. Dabei wird für jede auszuwertende Position erneut getestet, ob der Schwellenwert des Mie-Verhältnis überschritten wird (vgl. Gleichung 2.11) und somit die Annahmen erfüllt werden. Um einen Wert für die Sauberkeitswert ξ eines bestimmten Spots auf dem Spiegel zu erhalten, werden die nutzbaren Sauberkeits-

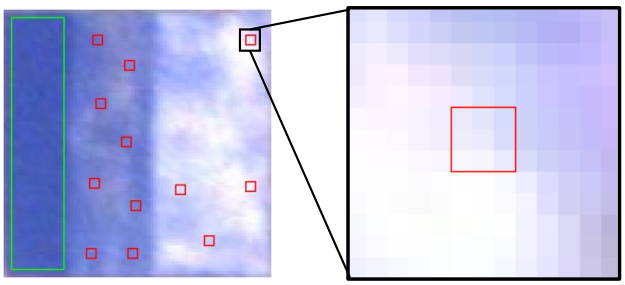


Abbildung 2.15: Bereiche zur Bestimmung von R_{clean} (grün) und R_{soiled} (rot) auf dem RGB-Bild eines flachen Spiegels

werte gleicher Spots bei unterschiedlichen Kamerapositionen gemittelt. Diese können anschließend mit den Reflektanzmessungen verglichen werden. In Abbildung 2.16 sind Ergebnisse für unterschiedliche Schwellenwerte des Mie-Verhältnis χ_{Mie} dargestellt. Auf der X-Achse sind die Referenzmessungen des Sauberkeitswerts dargestellt und die Y-Achse zeigt die durch die Methode bestimmten Sauberkeitswerte. Letztere wurden auf einen Inzidenzwinkel des Messgeräts von 15° für eine Vergleichbarkeit übertragen. Jeder Kreis entspricht jeweils einem Spot und sind dabei für diesen gemittelt.

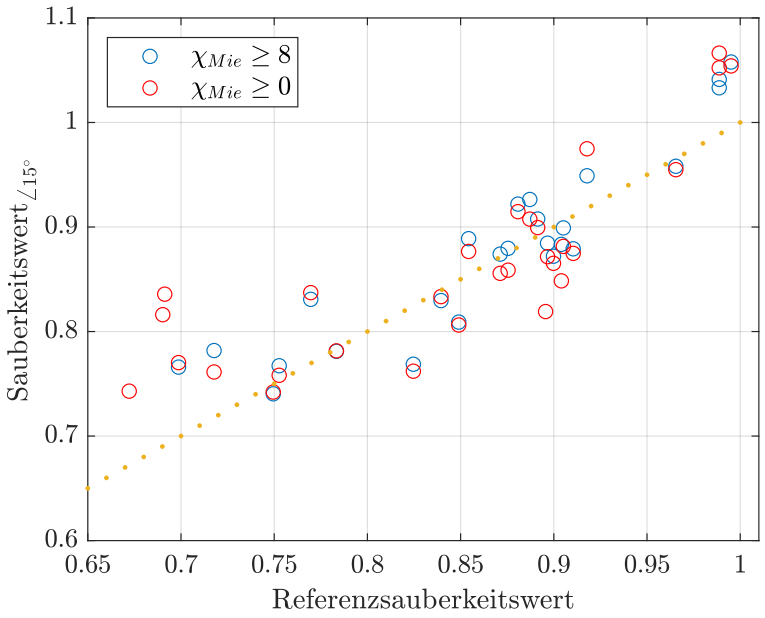


Abbildung 2.16: Auswertung für unterschiedliche Mie-Verhältnisse

Es lässt sich eine Verbesserung durch die Einführung des Mie-Verhältnis erkennen. Da allerdings durch die Filterung weniger Datenpunkte zur Verfügung stehen, muss ein Mie-Verhältnis gewählt werden, welches mit den Annahmen aus der Theorie übereinstimmt, aber die Datengrundlage nicht zu stark einschränkt.

3 Methodenweiterentwicklung

Nachdem die Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit gelegt wurden, wird auf die Vorgehensweise und die Verbesserung der Kalibrierung, welche in Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführt wurden, eingegangen. Zuerst werden Anpassungen vorgestellt, welche vorgenommen werden mussten, um das Programm für eine flache Spiegelgeometrie auf Parabolrinnenspiegel zu übertragen. Weiterhin wird das Vorgehen zur Planung von Drohnenflügen zur Bildaufnahme und Durchführung dieser Flüge inklusive Referenzmessungen beschrieben. Zudem beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Aufbereitung der Bilder der Parabolrinnenspiegel zur Verwendung in der Bestimmung der Verschmutzung des Spiegels. Zuletzt wird näher auf die Kalibrierung von c_{scat} eingegangen und in diesem Zusammenhang werden Anpassungen der bestehenden Theorie und die praktische Verwendung dieser Theorie beleuchtet.

3.1 Anpassungen der Verschmutzungsbestimmung zur Anwendung an Parabolrinnenspiegeln

In diesem Abschnitt wird auf die Änderungen zum bestehenden Programm eingegangen. Diese Änderungen beziehen sich vor allem auf die Geometrie. Zudem wird die Implementierung eines Modells zur Bestimmung der Mie-Streuung beschrieben.

3.1.1 Übertragung auf die Geometrie eines Parabolrinnenspiegels

Während sich die Entwicklung des Programms zur Verschmutzungsbestimmung vor allem auf flache Spiegel konzentrierte, soll im Zuge dieser Arbeit die Anwendung für Parabolrinnenspiegel erfolgen. Aufgrund der geänderten Geometrie ergeben sich hierbei notwendige Änderungen im Programm, welche in diesem Abschnitt näher betrachtet werden. Wenn angenommen wird, dass der R_{clean}-Wert abhängig von dem in der Reflexion betrachteten Himmelsbereich ist, ist eine Bestimmung von R_{clean} über die Kameraposition allein nicht ausreichend. Sondern es muss auch der betrachtete Spot auf dem Spiegel mit einbezogen werden. Dies wurde im bisherigen Programm für einen flachen Spiegel nicht berücksichtigt. Für einen Parabolrinnenspiegel würde dies eine noch größere Ungenauigkeit aufgrund der Geometrie und der Größe darstellen. Deshalb wurde die Kalibrierung von R_{clean} angepasst. Es wird weiterhin eine gereinigte Fläche auf dem Spiegel benötigt, diese wird allerdings nicht als eine zusammenhängende Fläche betrachtet, sondern in kleinere Abschnitte unterteilt. Dies ist in Abbildung 3.1 für einen Ausschnitt eines Parabolrinnenspiegels gezeigt.

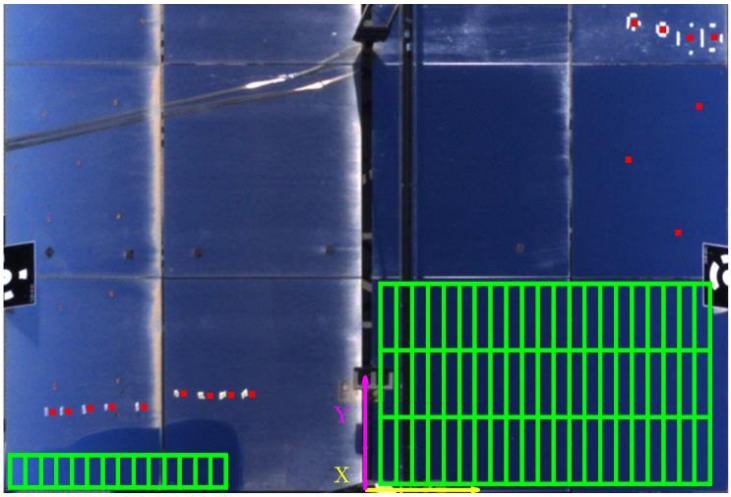


Abbildung 3.1: Bereiche zur Bestimmung von R_{clean} (grün) und R_{soiled} (rot) auf dem Ausschnitt eines RGB-Bildes eines Parabolrinnenspiegels

Es sind zwei getrennte, gesäuberte Flächen, die in grün dargestellt sind, auf dem Spiegel zu erkennen. Diese sind wiederum in kleinere Abschnitte unterteilt. Dem Ursprung des Spiegelkoordinatensystems entspringt die Y-Achse in magenta und X-Achse in gelb. In X-Richtung wurde ein Breite der Rechtecke von 20 Pixeln und in Y-Richtung eine Länge von 80 Pixeln gewählt. Für jeden eingezeichneten Bereich wird in der Kalibrierung R_{clean} durch Bildung des Mittelwerts der Rotkanalwerte der Pixel bestimmt. Zudem wird zu jedem Rechteck der Vektor zwischen der Kameraposition und dem Mittelpunkt des jeweiligen Rechtecks bestimmt. Aus diesem lässt sich mit dem Normalenvektor $\vec{n}$ des Mittelpunktes des Spiegelbereichs der Himmelsbereich bestimmen, welcher in der Reflexion des Spiegels zu sehen ist. Da die Position am Himmel nicht für jeden Pixel berechnet wird, sondern nur für den Mittelpunkt des Rechtecks, kommt es zu einer Abweichung zwischen dem auf dem Spiegel reflektierten Himmelsbereich und der berechneten Position am Himmel. Es lässt sich zeigen, dass der Fehler zwischen dem betrachteten und berechneten Himmelsbereich durch die gewählte Größe des Rechtecks, bei einer üblichen Flugroute mit einer Flughöhe von $30m$ über dem Spiegel und einer Auflösung von $6\frac{mm}{Pixel}$ maximal $1,5°$ beträgt. Zudem lässt sich in Abbildung 3.2 ein homogener Verlauf für R_{clean} erkennen. Es wird eine Methode zur Skalierung von R_{clean} verwendet, welche auf Grundlage des Perez-Modell in einer vorausgehenden Arbeit entwickelt wurde [56]. Mit dem Reflexionsvektor wird eine Fläche über den Elevationswinkel r_{El} und ein Azimutwinkel r_{Az} jeweils im globalen Koordinatensystem aufgespannt und der zugehörige R_{clean}-Wert für jede bestimmte Winkelkombination abgespeichert. Eine Kalibrierung für R_{clean} an einem Parabolrinnenspiegel ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Für den Messflug werden für jeden betrachteten Spot auf dem Spiegel ein Reflexionsvektor für den betrachteten Himmelsbereich bestimmt. Mit dem Elevationswinkel r_{El}

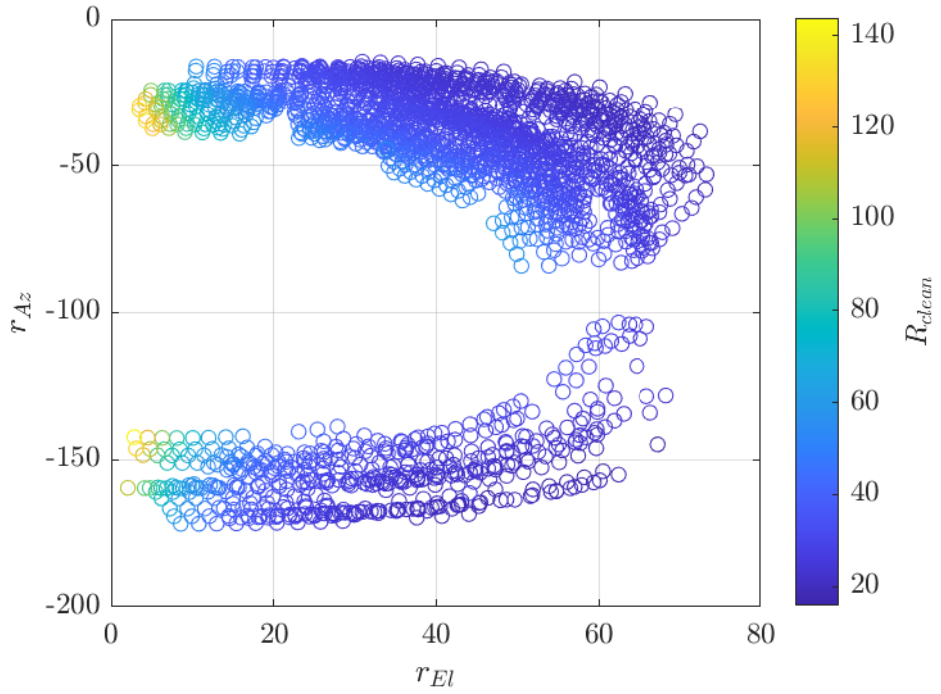


Abbildung 3.2: R_{clean} in Abhängigkeit des Elevationswinkels und Azimutwinkel des Reflexionsvektors

und Azimutwinkel r_{Az} dieses Reflexionsvektor wird ein R_{clean} für diesen Spiegelbereich zum Messzeitpunkt aus den Daten der Kalibrierung interpoliert. Zudem wird die Himmelshelligkeit zum Messzeitpunkt mit dem Perez-Modell bestimmt. R_{clean} wird mit dem Verhältnis von der Himmelshelligkeit am Messzeitpunkt zu der Himmelshelligkeit am Kalibrierzeitpunkt skaliert. Dieser Skalierfaktor entspricht dem Himmelhelligkeitsverhältnis V_{sky}. Dies sind die vorgenommenen Änderungen zur Nutzung des Programms, welche sich aufgrund der Geometrie eines Parabolrinnenspiegels ergeben. Weitere Anpassungen im Zusammenhang mit der Geometrie des Spiegels ergeben sich für die Bildverarbeitung. Dies wird zu einem späteren Zeitpunkt in Abschnitt 3.3 dargestellt. Weiterhin wurde ein Modell zur Bestimmung der Mie-Streuung eingebunden. Im nächsten Abschnitt wird auf die Implementierung dieses Modells eingegangen.

3.1.2 Implementierung und Parametrisierung eines Modells zur Bestimmung der Mie-Streuung

Um das Mie-Verhältnis χ_{Mie} zu bestimmen und damit die Annahme, dass die Streuung in die Richtung von $\Theta_{I,II}$ dominiert, zu prüfen, wird ein Modell zur Bestimmung der Mie-Streuung implementiert. Es wird ein Modell zur Bestimmung der Mie-

Streuung von Mätzler (2002) in MATLAB eingebunden [60]. Dieses Modell basiert auf den Arbeiten von Bohren und Huffman [58]. Mit dem Modell werden die Streuverteilung P für natürliches (unpolarisiertes) Licht in Abhängigkeit des Streuwinkels $\Theta_{i,i}$ berechnet. Für die Berechnung muss das Modell parametrisiert werden. Dabei werden die Wellenlänge des Lichts λ, der Durchmesser der Staubpartikel d, die Größenverteilung dieser Staubpartikel sowie der komplexe Brechungsindex m der Staubpartikel benötigt. Da das Mie-Verhältnis χ_{Mie} nur zur Filterung der Daten verwendet wird und der Schwellenwert empirisch ausgewählt wird, sind die Parameter nur Approximationen und es wurden keine spezialisierten Messungen durchgeführt. Zudem soll das Programm allgemeingültig gehalten werden, um unabhängig vom Standort und Equipment der Messung zu sein. Für die Bestimmung der Verschmutzung der Spiegel wird der Rotkanalwert der RGB-Bilder verwendet. Wie eine Kamera die Wellenlänge des Lichts detektiert, hängt von der spektralen Sensitivität der Kamera ab [50, 61]. Die spektrale Sensitivität der verwendeten Kamera ist nicht bekannt. Deshalb werden für die Auswahl der Wellenlänge λ spektrale Sensitivität verschiedener Kameras so wie die Definitionen verschiedener Farbräumen verwendet [50, 53, 61–65]. Auf dieser Grundlage wird der Wellenlängenbereich von 580 bis $650nm$ für das Modell gewählt, welches dem Sensitivitätsbereich für den Rotkanalwert von verschiedenen Kameras entspricht [50, 61, 65]. Es wird die Bestrahlungsstärke der Direktstrahlung über die Wellenlänge aus dem Sonnenspektrum ASTMG173 verwendet [66].

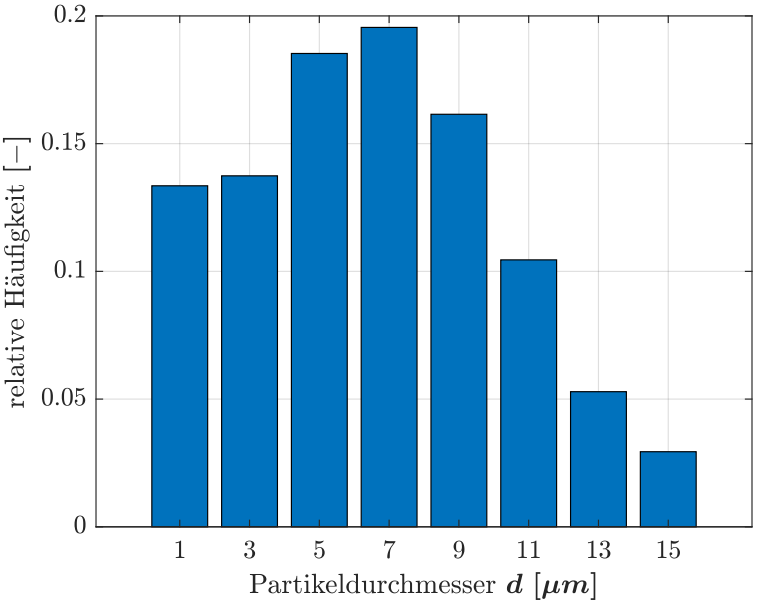


Abbildung 3.3: Verteilung der relativen Häufigkeit von Staubpartikeln in Abhängigkeit des Durchmessers d nach [67]

Die Größenverteilung und Art des auf dem Spiegel abgelagerten Staubes sind abhängig vom jeweiligen Standort [18, 33]. Die angenommene Partikelgrößenverteilung ist in Abbildung 3.3 dargestellt und bezieht sich auf die Untersuchungen, welche von Al-Hasan durchgeführt wurden [67]. Dabei sind die relativen Häufigkeiten der Partikel über den Partikeldurchmesser aufgetragen.

Es wurde sich für diese Verteilung entschieden, da Figgis et al. 2017 gezeigt haben, dass Staubablagerungen von einigen Mikrometern bis zu einigen zehn Mikrometern am relevantesten für die Verschmutzung sind [6]. Wiederum wurde von Ilse et al. 2018 beschrieben, dass die Partikelgröße sich zwischen 2 und $63\mu m$ bewegt [33]. Allerdings beziehen sich die beiden zuvor genannten Quellen auf Photovoltaik. Hachicha et al. fanden 2019 für CSP heraus, dass sich die abgelagerte Partikelgröße für einen Standort in den Vereinigten Arabischen Emirtaen zwischen $1,61$ und $38,4\mu m$ bewegt [20]. Die Daten für CSP sind dabei begrenzt [18].

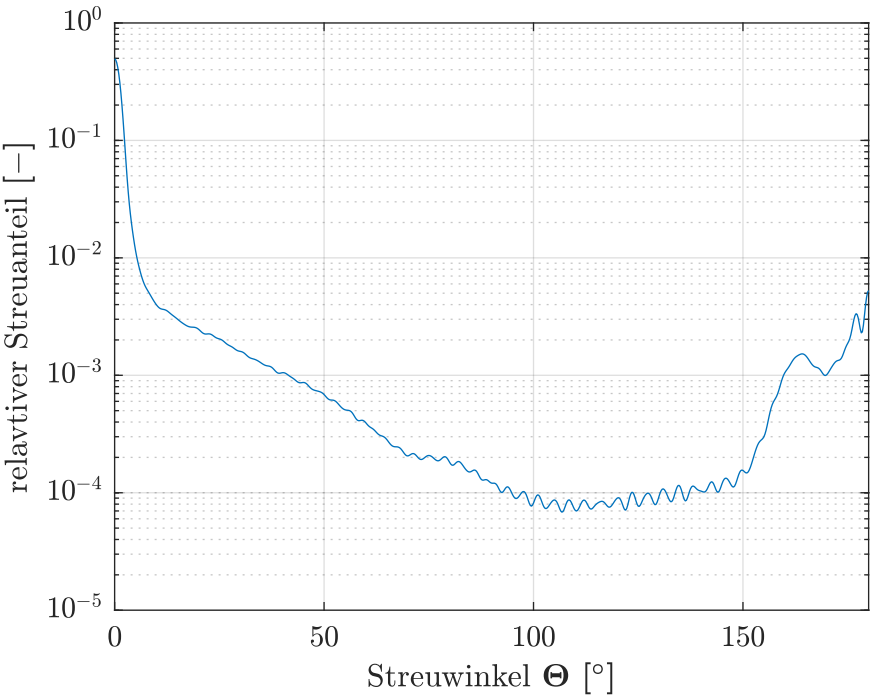


Abbildung 3.4: Relative Streuverteilung in Abhängigkeit des Streuwinkels

Der komplexe Brechungsindex m ist materialabhängig [68]. Für den Realteil des Brechungsindex kann laut Wagner et al. (2012) ein Wert von $1,53 \pm 0,06$ angenommen werden [69]. Ein ähnlicher Wert wird von Grams et al. (1974) angegeben [70]. Der

Imaginärteil des Brechungsindex ist abhängig von der Wellenlänge. Für eine Wellenlänage ab $600nm$ empfiehlt sich ein Wert zwischen $0,003$ und $0,005$ [69]. Durch empirische Versuche wurde der komplexe Brechungsindex auf $m = 1,53 - 0,004i$ festgelegt.

Aus diesen Werten kann nun der relative Streuanteil über den Streuwinkel aufgetragen werden. Dies ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Phasenfunktion der Streuung ist dabei relativ auf einer logarithmischen Achse dargestellt. Da der Verlauf zwischen 0 und 180 Grad symmetrische zu dem Verlauf zwischen 0 und -180 Grad ist, wird nur der positive Streuwinkel bis 180 Grad dargestellt. Auf Grundlage dieses Modells und empirischen Durchführungen hat sich eine Mie-Verhältnis χ_{Mie} von ca. 8 als sinnvoll erwiesen. Dieses Verhältnis dient zur Prüfung der getroffenen Annahmen in der Theorie (vgl. Abschnitt 2.3.3).

3.2 Datenaufnahme

Für die Analyse der Methode zur Verschmutzungsbestimmung an einem Parabolrinnenspiegel und zur Entwicklung einer Kalibriermethode werden Testbilder auf der Plataforma Solar de Almería (Eigentümer: Forschungszentrum CIEMAT/Spanien) aufgenommen. Hierzu werden Bildaufnahmen während Drohnenflügen an einem Parabolrinnenkollektor geplant und durchgeführt. So wie weitere benötigte Daten erhoben. Die Planung und Durchführung werden in diesem Abschnitt beleuchtet.

3.2.1 Flugplanung

Damit die Theorie zur Bestimmung der Verschmutzung anwendbar ist, muss das Mie-Verhältnis χ_{Mie} einen Schwellenwert für den betrachteten Spot auf dem Spiegel überschreiten. Das Mie-Verhältnis χ_{Mie} kann durch Anwendung des Modells zur Bestimmung der Mie-Streuung und den Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ sowie $\Theta_{I,I}$ ermittelt werden. Die Streuwinkel hängen dabei alleine von der relativen Positionierung der Kamera und damit der Drohne, der Sonne und des Spiegels zusammen. Somit lassen sich bereits im Vorfeld Routen für den Drohnenflug bestimmen, für welche das Mie-Verhältnis χ_{Mie} den Schwellenwert überschreitet. Dieser Schwellenwert wurde für die Simulation der Flugrouten auf 8 gesetzt. Da zur Anwendung der Theorie ein klarer Himmel benötigt wird, muss ein Tag mit passenden Bedingungen für den Flug ausgewählt werden. Für den Standort des Parabolrinnenspiegels wurde der 15. Dezember als ein Tag, welcher die Bedingung eines klaren Himmels erfüllt, identifiziert. Für den festgelegten Tag wurden stündliche Flüge von 11 bis einschließlich 13 Uhr geplant. Die Uhrzeit ist dabei in UTC angegeben. Mit den gewählten Uhrzeiten lassen sich die Sonnenstände zu den jeweiligen Zeitpunkten für den Standort des Parabolrinnenspiegels berechnen. Der Spiegel wurde nicht der Sonne nachgeführt, sondern befand sich dauerhaft in der Zenitstellung. Der Kalibrierflug über den Parabolrinnenspiegel soll als Teil einer Sphäre durchgeführt werden. Der Mittelpunkt der Sphäre liegt in der Mitte des Spiegels und die Sphäre hat einen Radius von $30m$. Bei diesem Abstand kann der

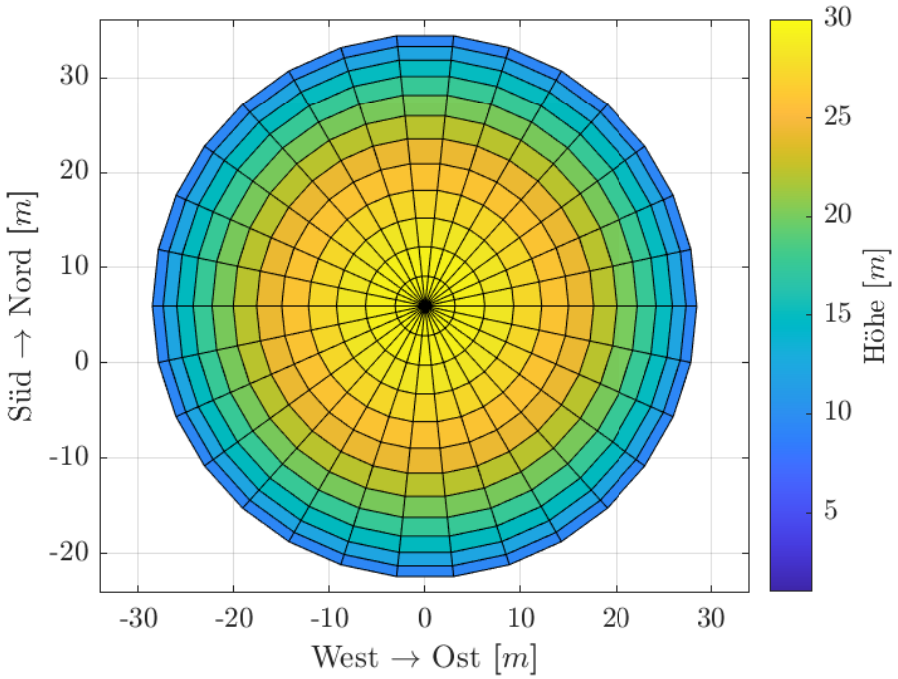


Abbildung 3.5: Simulation einer sphärischen Flugroute mit eingefärbter Flughöhe

ganze Parabolrinnenspiegel erfasst werden und die Auflösung des Spiegels auf dem Bild ist ausreichend. Zudem darf die Flugroute nicht zu flach über dem Spiegel sein, da sonst bei zu größeren Abständen zum Spiegel eine starke Verzerrung durch die Orthogonalisierung der Bilder erfolgt. Eine sphärische Flugroute über den Parabolrinnenspiegel ist beispielhaft in Abbildung 3.5 dargestellt. Die sphärische Flugroute von oben dargestellt und nach der Höhe eingefärbt. Die Achsen entsprechen dem *ENU*-Koordinatensystem (*engl. east north up*). Dieses Koordinatensystem folgt der rechten Handregel. Die X-Achse zeigt in Richtung Osten, die Y-Achse nach Norden und die Z-Achse senkrecht nach oben. Der Ursprung des Koordinatensystems ist im Nachführantrieb des Parabolrinnenspiegels.

Auf Grundlage dieser Kamerapositionen können mit Hilfe der Sonnenposition und der betrachteten Stellen auf dem Spiegel jeweils die Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ so wie $\Theta_{I,I}$ bestimmt werden. Aus diesen lässt sich mit dem Modell zur Mie-Streuung wiederum das Mie-Verhältnis χ_{Mie} bestimmen und prüfen ob diese Kombination aus Kameraposition und Spot auf dem Spiegel für den Sonnenstand zu diesem Zeitpunkt den Schwellenwert überschreitet. In Abbildung 3.6 ist die Sphäre eingefärbt für den Anteil der Spiegeloberfläche pro Kameraposition für die das Mie-Verhältnis χ_{Mie} über

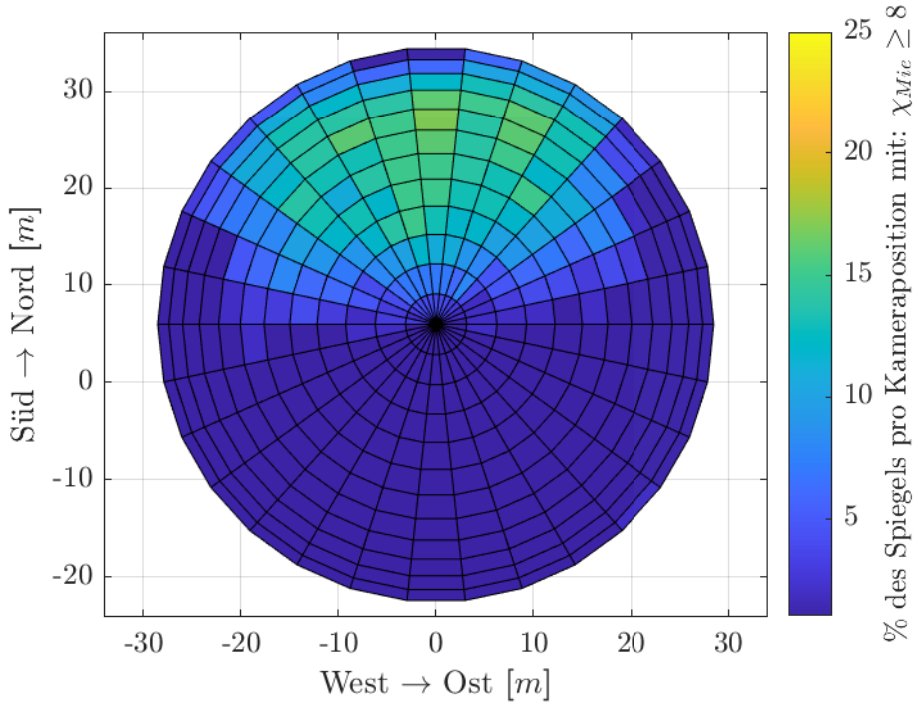


Abbildung 3.6: Prozent der Spiegeloberfläche pro Kameraposition für die das Mie-Verhältnis χ_{Mie} überschritten wird am 15. Dezember 2023 um 12 Uhr *UTC*

dem Schwellenwert von 8 liegt. Die Flugroute der Sphäre ist dabei dieselben wie in Abbildung 3.5. Die dargestellte Simulation wurde für den 15. Dezember 2023 um 12 Uhr *UTC* durchgeführt.

Aus diesen Erkenntnissen wird die Flugroute für den Kalibrierflug geplant. Für die Flugroute werden Kamerapositionen ausgewählt bei denen mindestens 20 Prozent der Spiegeloberfläche für die Verschmutzungsbestimmung genutzt werden können. Daraus ergibt sich die Flugroute für den Kalibrierflug in Abbildung 3.7. Die Flugbahn der Drohne ist in blau dargestellt. Die Blickrichtung der Kamera ist durch die roten Pfeile angedeutet. Diese zeigen auf die Mitte des Parabolrinnenspiegels. Die Höhe der Drohnenpositionen ist eingefärbt.

Nach dem gleichen Vorgehen lassen sich auch die Flugrouten für die übrigen Uhrzeiten erstellen. Zudem werden vor den geplanten Kalibrierflügen jeweils ein Spiralflug durchgeführt. Dieser Flug folgt einem Kugelabschnitt und ist in Abbildung 3.8 von oben mit eingefärbter Höhe dargestellt. Dieser Spiralflug entspricht der Vorgehensweise für einen Kalibrierflug wie sie bislang verwendet wurde.

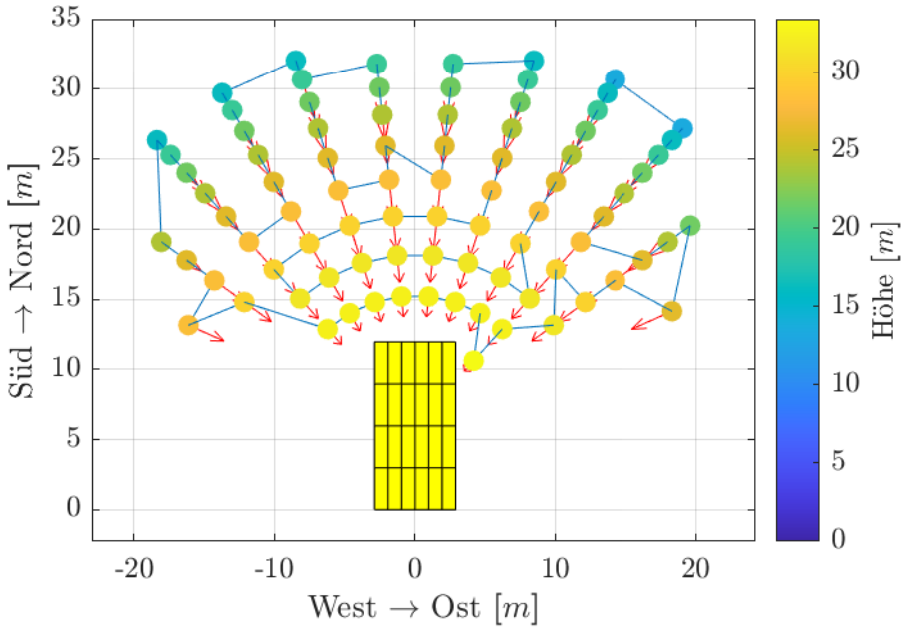


Abbildung 3.7: Simulierte Flugroute für den Kalibrierflug an einem Parabolrinnenspiegel mit eingefärbter Höhe. Die Ausrichtung der Kamera ist durch die roten Pfeile angedeutet.

Die Verschmutzungbestimmung von Parabolrinnenspiegeln durch Kamerabilder soll zu einem späteren Zeitpunkt in Parabolrinnenkraftwerken durchgeführt werden. Hier soll neben der Kalibrierung an einem Parabolrinnenspiegelelement das übrige Kraftwerk voraussichtlich mäanderförmig überflogen werden. Aus diesem Grund wird an die Kalibrierflüge jeweils eine mäanderförmige Flugroute für einen simulierten Messflug angehängt. Dieser wird in einer Höhe von $26m$ geflogen und ist um $30m$ nach Norden von der Mitte des Parabolrinnenkollektors verschoben. Der Gimbal der Kamera ist mit einem konstanten Winkel nach Süden gerichtet. Dies soll wiederum das Vorgehen im Kraftwerk nachahmen, da bei einem realen Messflug in einem Parabolrinnenkraftwerk mehrere Parabolrinnen gleichzeitig betrachtet werden und die Kamera nicht auf jede Parabolrinne einzeln gerichtet wird. Aufgrund von technischen Schwierigkeiten am Parabolrinnenkollektor, welcher für die Bildaufnahmen erwählt wurde, konnten nicht alle Flüge wie geplant ausgeführt werden. Es stehen deshalb nur Daten für eine Flüge um ca. 12 Uhr und 14 Uhr UTC zur Verfügung.

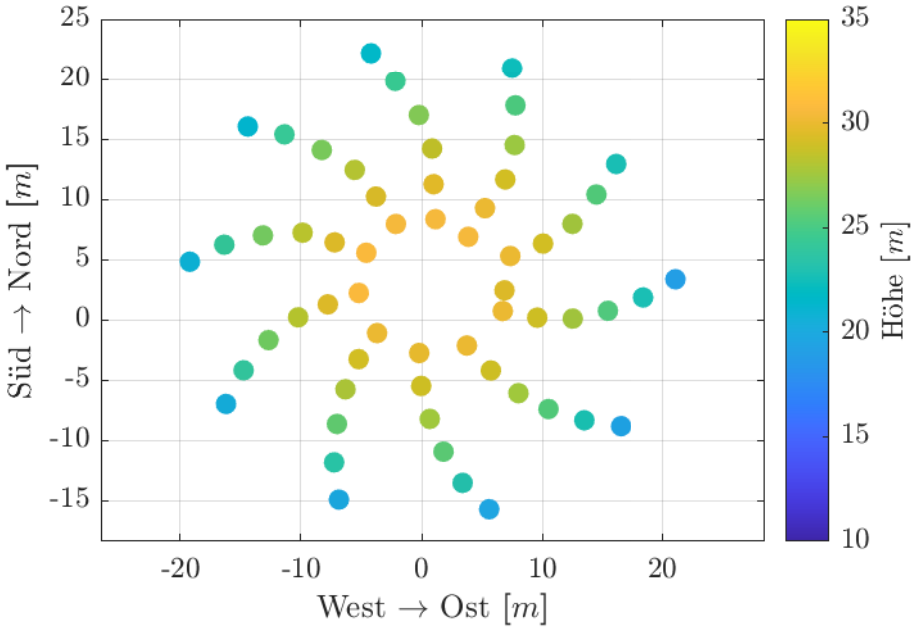


Abbildung 3.8: Kamerapositionen des Spiralflugs mit eingefärbter Höhe

3.2.2 Datenaufnahme und Flugdurchführung

Die technischen Probleme des Parabolrinnenkollektors führten zudem zu Änderungen in der Datenaufnahme mit sich. In diesem Abschnitt wird nur auf das Vorgehen eingegangen wie es praktisch durchgeführt wurde und nicht wie es theoretisch geplant war. An dem gewählten Tag für die Durchführung der Flüge werden zunächst Spiegelfacetten in Richtung der Parabel gereinigt und die Reflektanz an mehreren Stellen innerhalb des gesäuberten Bereichs gemessen. Diese werden zur Bestimmung von R_{clean} benötigt. Aufgrund der eingeschränkten Bewegung im Elevationswinkel des Parabolrinnenspiegels wurde vor Durchführung der Flüge an 35 Stellen auf dem Spiegel eine Reflektanzmessung vorgenommen und mit weißem Klebeband wurden die Stellen markiert. Die Messungen werden mit dem Reflektometer 15R-USB von *Devices & Services* durchgeführt [35]. Diese Markierung wird benötigt, da später die Positionsbestimmung der Referenzspots anhand von Orthobildern erfolgt. Es wurden Spots auf dem Spiegel mit unterschiedlichen Reflektanzwerten gewählt. Ein Teil dieser Messungen ist zur Kalibrierung von c_{scat} erforderlich, der restliche Teil wird zur Evaluation und Validierung der Messmethode verwendet. In Abbildung 3.9 sind Orthobilder gezeigt, welche die Position der Reflektanzmessungen und der gesäuberten Bereiche darstellen. Dabei sind die Spots welche für die Kalibrierung genutzt wurden

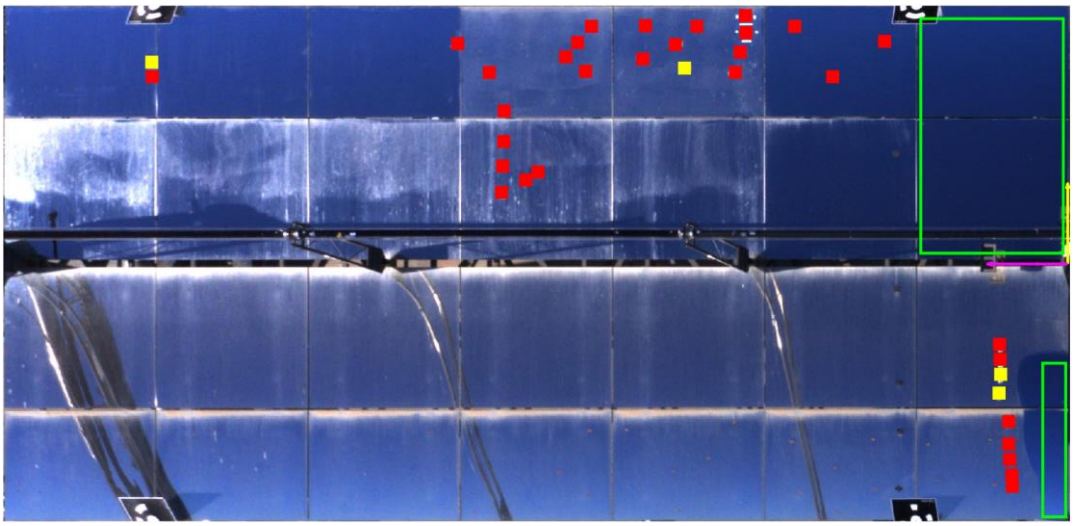
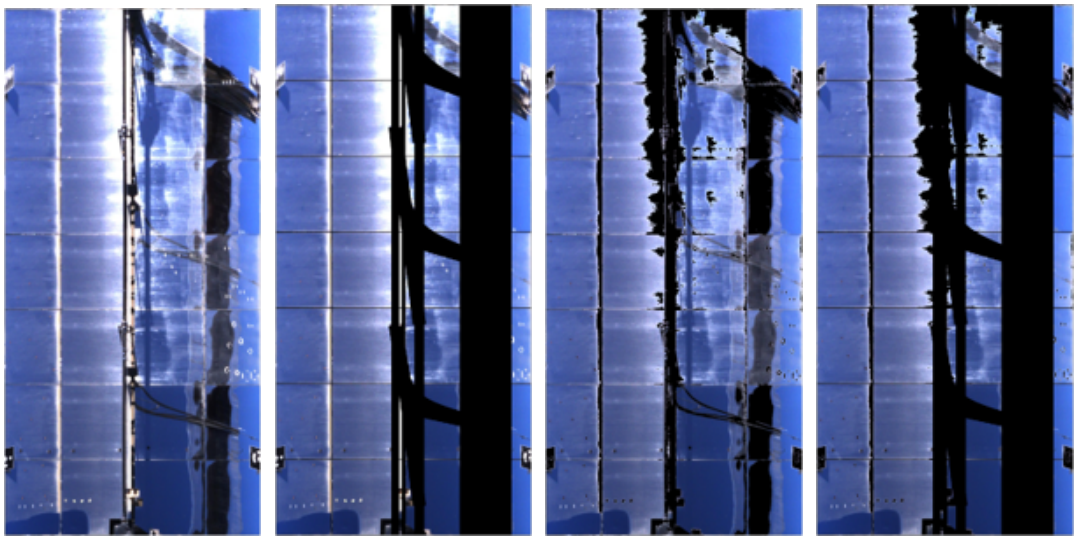


Abbildung 3.9: Positionen der Referenzreflektanzmessungen und gesäuberten Bereiche auf dem Spiegel. Die gesäuberten Bereiche sind in grün markiert. Positionen, welche für die Kalibrierung genutzt werden, sind in gelb dargestellt. Positionen für die Evaluierung sind in rot markiert.

in gelb und die Spots für die Evaluation in rot markiert. Die Verteilung der Spots zur Kalibrierung und Evaluation ist beispielhaft und es können auch andere Kombinationen gewählt werden. Das Orhtobild wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit rotiert. Die X-Achse ist weiterhin in gelb und Y-Achse in magenta angedeutet.

Nach der Reinigung einiger Facetten, der Reflektanzmessungen und der Markierung der Positionen werden die Flüge durchgeführt. Ein Flug umfasst dabei den Spiralflug, um eine Referenz Kalibrierung nach bisheriger Vorgehensweise zu erhalten, dem geplanten Kalibrierflug (vgl. Abschnitt 3.2.1) und dem mäanderförmigen Messflug. Die Flüge werden dabei für den jeweiligen Zeitpunkt zeitlich aufeinander folgend abgeflogen. Weiter benötigte meteorologische Daten wurden während den Flügen in unmittelbare Nähe des Parabolrinnenkollektors erhoben. Dies ist der Ablauf zur Erhebung der Daten im Zusammenhang dieser Arbeit. In diesem Zuge soll auch ein Ausblick auf die Messung unter realen Bedingungen in einem Parabolrinnenkraftwerk gegeben werden. Der Kalibrierflug findet weiterhin an einem präparierten Parabolrinnenspiegel statt. Dieser muss einen gesäuberten Bereich aufweisen und eine Reihe an Referenzmessungen der Reflektanz müssen durchgeführt werden. Der Messflug allerdings wird nicht für den Kalibrierflug verwendeten Parabolrinnenspigel durchgeführt, sondern es wird das gesamte Kraftwerk aller Voraussicht nach mäanderförmig überflogen. Dabei bleibt der Gimbal in einer festen Stellung und es werden keine Parabolrinnenspiegel gesondert betrachtet.



(a) (b) (c) (d)

Abbildung 3.10: Anwendung verschiedener Filter auf ein Orthobild: (a) ohne Filter, (b) Filter auf Grundlage der Geometrie (inkl. Filter für den Schatten), (c) Farbfilter und (d) Kombination der Filter

3.3 Daten- und Bildverarbeitung

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Aufbereitung der Bilder, bevor diese in der Methode zur Verschmutzungsbestimmung verwendet werden, dargestellt.
Im Vorfeld der Anwendung der Methode zu Verschmutzungsbestimmung müssen die Daten aufbereitet werden. Welche Schritte hierfür notwendig sind, wird im Folgenden beschrieben. Dabei geht es vor allem um die Verarbeitung der Bilder. Zuerst wird eine Flat-Field-Korrektur durchgeführt. Nach dieser Korrektur werden die Bilder orthogonalisiert (vgl. Abschnitt 2.4), während dieses Schrittes wird auch die Kameraposition relativ zum Parabolrinnenspiegel aus den Bilddaten extrahiert. Die folgenden Schritte werden für diese sogenannten Orthobilder ausgeführt. Dabei handelt es sich um Filter, um zum Beispiel Strukturelemente des Parabolrinnenkollektors wie Halterungen oder ähnlichen und deren Spiegelungen zu maskieren. Durch die Filter werden Masken erstellt, welche für jeden Pixel des Bildes angeben, ob dieser genutzt werden kann oder nicht. Da der Parabolrinnenkollektor eine eindeutige Geometrie hat, können eine Vielzahl dieser Strukturelemente durch analytische Berechnungen gefiltert werden. Für die Maskierung von dem Absorberrohr, den Spiegelungen der Halterungen des Absorberrohrs und den Spalten zwischen den Spiegelfacetten standen bereits Filter im Vorfeld dieser Arbeit zur Verfügung. Weiterhin wurden Filter für die Spiegelung des Absorberrohrs, der Halterungen des Absorberrohrs selbst und der Spiegelung von Teilen des Spiegels selbst implementiert. Die Filterung funktioniert dabei ausschließlich über die Geometrie des Parabolrinnenkollektors und der Kameraposition zu diesem. Da der Kollektor während der Flüge nicht der Sonne nachgeführt wurde, kommt es

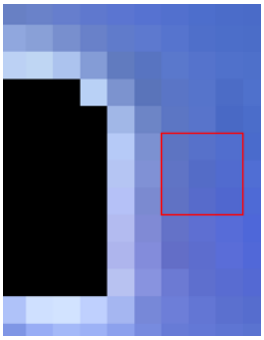
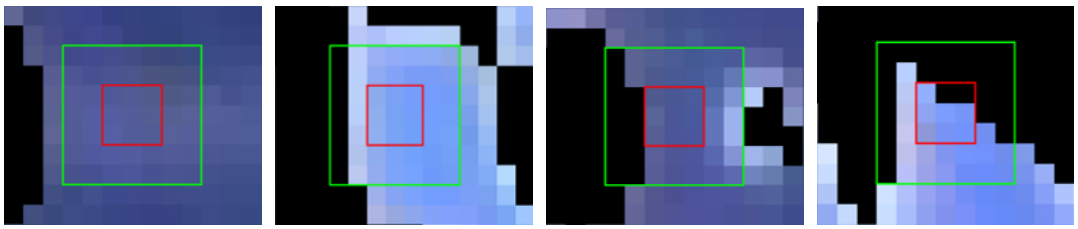


Abbildung 3.11: Auf dem Spiegel betrachteter Spot neben einer gefilterten Struktur. Es werden nicht alle ungewollten Pixel gefiltert.

zudem zu einem Schatten des Absorberrohrs auf dem Spiegel. Hierfür wurde ein weiterer Filter eingebunden, um diesen Schatten zu maskieren. In diesem Fall ist die Geometrie des Parabolrinnenkollektors und der Kameraposition zu diesem nicht ausreichend für die Berechnung des Filters, sondern es wird zudem die Sonnenposition benötigt. Neben den geometrischen Filtern wird auch ein Farbfilter angewendet. In Abbildung 3.10 sind die verschiedenen Filter dargestellt. Alle Filter werden zu einer Maske für jedes Bild zusammengefügt.

Wie in Abbildung 3.11 zu sehen ist, werden nicht alle ungewollten Pixel gefiltert. Deshalb werden betrachtete Spots auf dem Spiegel nicht verwendet, falls sich maskierte Pixel innerhalb des betrachteten Bereichs und 2 Pixel darüber hinaus befinden. Einige Beispiele sind in Abbildung 3.12 aufgeführt. Falls maskierte Pixel in den grünen Bereich fallen, wird der gesamte Spot für dieses Orthobild nicht verwendet und es wird kein R_{soiled} bestimmt. Ist dies nicht der Fall, wird R_{soiled} aus der Mittelung der Rotkanalwerte innerhalb des roten Bereichs berechnet.



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Abbildung 3.12: Ausschnitte des Spiegels mit angewendeten Masken. In rot ist der Bereich gezeigt, welcher zur Berechnung von R_{soiled} verwendet wird. Im grünen Bereich wird getestet, ob sich maskierte Pixel befinden. Nur Bild (a) würde zur Berechnung von R_{soiled} verwendet werden, die Bilder (b) bis (d) würden ausgeschlossen werden.

3.4 Kalibrierfaktor c_{scat}

In diesem Abschnitt wird sich vor allem auf den Kalibrierfaktor c_{scat} fokussiert. Zuerst wird dabei auf die Anpassung zur bestehenden Theorie aus Abschnitt 3.4.1 eingegangen. Des Weiteren wird die Kalibrierung dieses Faktors betrachtet.

3.4.1 Anpassungen der bestehenden Theorie zur Verschmutzungsbestimmung und deren Anwendung

Die Transferfunktion in Gleichung 2.17 ist unter anderem von den jeweiligen Inzidenzwinkeln abhängig und somit spiegelt sich diese Abhängigkeit auch im Kalibrierungsfaktor $c_{scat,theo}(\Theta_{I,II}, \alpha_{sun}, \alpha_{cam})$ wieder. Im Zusammenhang dieser Arbeit wird daher eine neue Definition verwendet welche die Transferfunktion ausklammert. Die Definition von c_{scat} ändert sich damit zu:

$$c_{scat} = \omega \cdot \rho_{clean} \cdot P_{scat}(\Theta_{I,II}) \cdot DNI_{cal} \tag{3.1}$$

Unter der Annahme, dass die restlichen Terme zur Beschreibung der Streueigenschaften nicht winkelabhängig sind, bleibt nur eine Abhängigkeit des Streuwinkels $c_{scat}(\Theta_{I,II})$ in der Streuverteilung. Die Messgleichung ändert sich zu:

$$\begin{aligned} 0 =& R_{soiled} - \tau(\alpha_{sun}) \cdot \left(c_{scat} \cdot (1 + f_T(\alpha_{sun}, \alpha_{cam})) \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}} \right) \\ &+ \tau^2(\alpha_{sun}) \cdot \Bigg(c_{scat} \cdot (1 + f_T(\alpha_{sun}, \alpha_{cam})) \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}} \\ &- R_{clean} \cdot f_T^2(\alpha_{sun}, \alpha_{cam}) \cdot V_{sky} \Bigg) \end{aligned} \tag{3.2}$$

Daraus ergibt sich wiederum eine neue Definition für die Kalibriergleichung:

$$c_{scat} = \frac{R_{soiled} - R_{clean} \cdot \tau^2(\alpha_{sun}) \cdot f_T^2(\alpha_{sun}, \alpha_{cam}) \cdot V_{sky}}{(1 - \tau(\alpha_{sun})) \cdot (1 + f_T(\alpha_{sun}, \alpha_{cam})) \cdot \tau(\alpha_{sun}) \cdot \frac{DNI}{DNI_{cal}}} \tag{3.3}$$

Diese Anpassungen der Theorie führen einige Änderungen im Programm mit sich. Während der grundlegende Ablauf (vgl. Abschnitt 2.4) unverändert bleibt, muss die Kalibrierung und Verwendung in der Messgleichung von c_{scat} angepasst werden. Im Gegensatz zur bestehenden Theorie ist das c_{scat} allein vom Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ bzw. $\Theta_{II,I}$ abhängig (vgl Gleichung 2.19). Diese Abhängigkeit wird in Abbildung 3.13 an realen Messdaten beispielhaft dargestellt. Es werden die durch die Kalibriergleichung bestimmten Werte für c_{scat} über den Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ bzw. $\Theta_{II,I}$ aufgetragen. Jeder

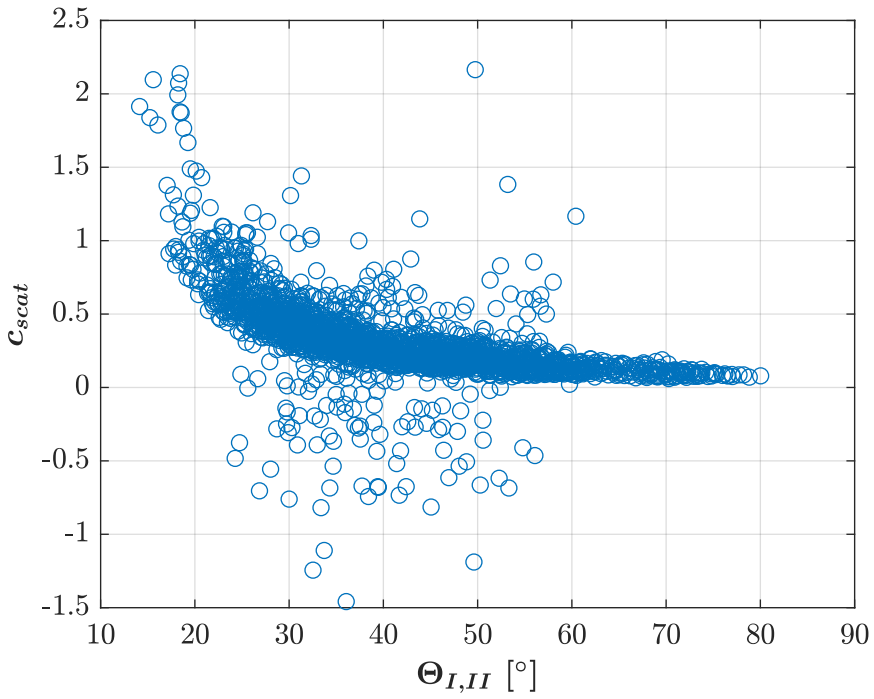


Abbildung 3.13: Aus der Kalibriergleichung bestimmten Werte für c_{scat} über den Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ bzw. $\Theta_{II,I}$

Kreis in der Abbildung stellt eine Kombination aus einem Spot und einer Kameraposition dar.

Da $c_{scat,theo}$ abhängig war von $\Theta_{I,II}$, α_{sun} und α_{cam}, wurde eine Interpolation zwischen diesen Winkeln benötigt, um Werte für $c_{scat,theo}$ für Messflüge aus den Daten der Kalibrierung zu bestimmen. Durch die Änderung von c_{scat} ist dieses nur winkelabhängig vom Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ und es wird durch eine Kurvenanpassung eine Funktion der Form $c_{scat}(\Theta_{I,II})$ während der Kalibrierung erzeugt. Diese kann später genutzt werden, um ein c_{scat} für jeden Messpunkt auszuwerten. Auf mehr Details zur Kalibrierung und Auswertung von c_{scat} wird im folgenden Abschnitt 3.4.2 eingegangen.

3.4.2 Kalibrierung von c_{scat}

Die Kalibrierung dient grundsätzlich dazu eine Funktion für c_{scat} zu bestimmen. In diesem Abschnitt wird auf die detaillierte Bestimmung dieser Funktion eingegangen, welche verwendet wird um den jeweiligen Kalibrierfaktor zu bestimmen. Die Gleichung 3.3 zur Berechnung von c_{scat} ist die Umstellung der Messgleichung 3.2. Das R_{soiled} wird jeweils an der Stelle des Spots aus den Bildern des Kalibrierflugs ex-

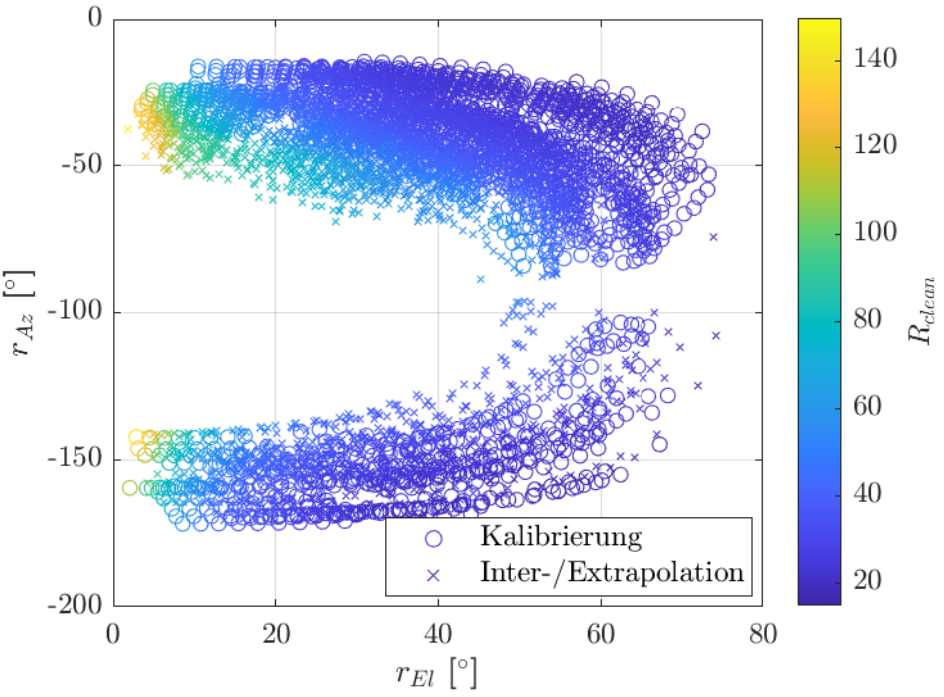


Abbildung 3.14: Bestimmung von R_{clean} durch Inter- bzw. Extrapolation. Werte der Kalibrierung werden als Kreise dargestellt und bestimmte Werte für R_{clean} als Kreuze

trahiert und R_{clean} wird auf Grundlage des gesäuberten Bereichs und der Kamera- und Sonnenposition interpoliert bzw. extrapoliert. Diese Inter- bzw. Extrapolation für R_{clean} ist in Abbildung 3.14 dargestellt. Die Werte aus der Kalibrierung von R_{clean} sind als Kreise dargestellt und die inter- bzw. extrapolierten Werte als Kreuze.

Die Transferfunktion f_T lässt sich durch die Kamera- und Sonnenposition berechnen. Die DHI und DNI werden während der Kalibrierung sowie des Messflugs aufgezeichnet. Der Sauberkeitswert $\tau^2(\alpha_{sun})$ lässt sich aus der Referenzmessung der Reflektanz an dem jeweiligen Spot auf dem Spiegel bestimmen. Physikalisch ist c_{scat} allerdings abhängig von der effektiven Phasenfunktion f_P, die wiederum abhängig ist vom Streuwinkel $\Theta_{I,II}$, der *Single Scattering* Albedo der Staubschicht ω und der DNI_{cal} zum Zeitpunkt der Kalibrierung. Da die Phasenfunktion die Reflektanz ρ des sauberen Spiegels und der Streuverteilung $P(\Theta_{I,II})$ beinhaltet, setzt c_{scat} sich aus Termen die als nicht winkelabhängig angenommen werden und der Streuverteilung $P(\Theta_{I,II})$ zusammen. Somit stellt der Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ die einzige unabhängige Variable dar. In Abbildung 3.13 zeigt sich ein exponentiell abfallender Verlauf für c_{scat} in Abhängigkeit des Streuwinkels $\Theta_{I,II}$. Wenn man die Funktion des Streuanteils $P(\Theta_{I,II})$ und

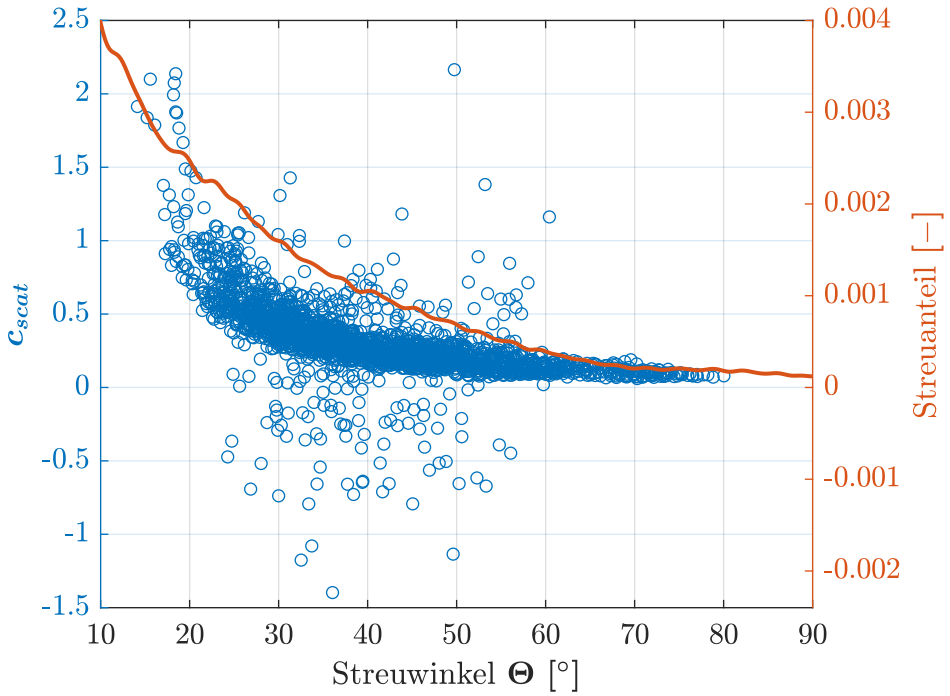


Abbildung 3.15: Darstellung des Verlaufs des Streuanteils P in orange und c_{scat} in blau über den Streuwinkel Θ

die Verteilung von c_{scat} nebeneinander für den gleichen Winkelbereich darstellt, zeigt sich der Zusammenhang. Dies ist in Abbildung 3.15 dargestellt.

Als Grundlage für die Kurvenanpassung hat sich eine Funktion folgender Form als am Vielversprechendsten herausgestellt:

$$c_{scat}(\Theta_{I,II}) = a \cdot e^{b \cdot \Theta_{I,II}} + c \cdot e^{d \cdot \Theta_{I,II}} \tag{3.4}$$

Dabei sind a, b, c und d die Parameter, welche angepasst werden. Die Parameter werden dabei auf Grundlage der Methode der nichtlinearen kleinsten Quadrate (*engl. Non-linear Least Squares*) ermittelt. Die Kurve wird nur aus einem Teil der Spots auf dem Spiegel bestimmt. Eine beispielhafte Kurvenanpassung für eine Auswahl von Spots zur Kalibrierung ist in Abbildung 3.16 dargestellt und besitzt folgende Form:

$$c_{scat}(\Theta_{I,II}) = -5,928 \cdot e^{-0,0914 \cdot \Theta_{I,II}} + 12,67 \cdot e^{-0.0914 \cdot \Theta_{I,II}} \tag{3.5}$$

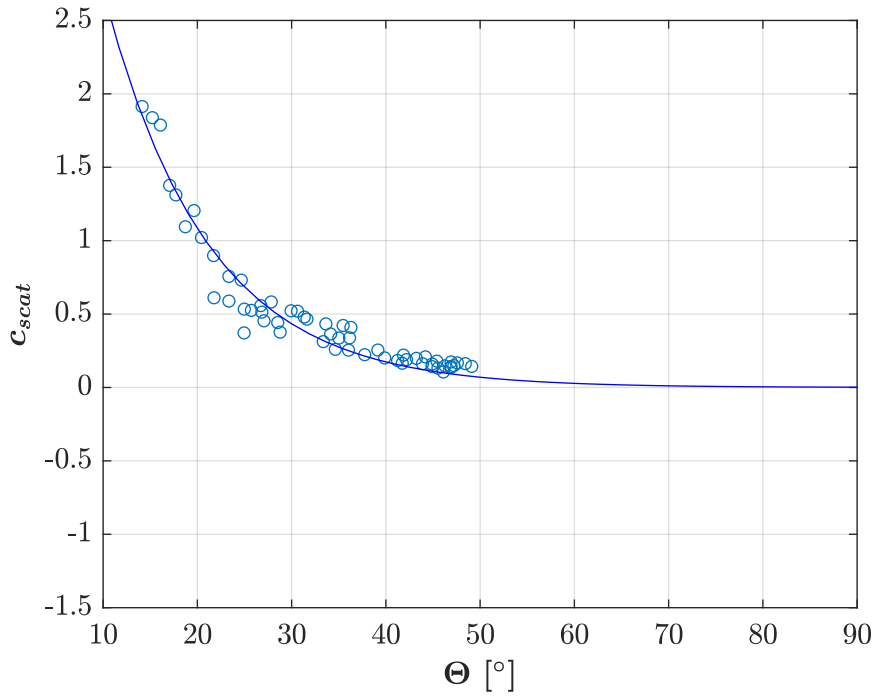


Abbildung 3.16: In der Kalibrierung durch Kurvenanpassung bestimmter Verlauf für c_{scat}

In Abbildung 3.17 wurde für jeden aufgenommenen Messpunkt das theoretisch optimale c_{scat} berechnet und für den Sauberkeitswert der Referenzmessung eingefärbt. Zudem wurde die Kurve aus der Kalibrierung eingezeichnet.

Es zeigt sich, dass vor allem ein hoher Wert für die Sauberkeit τ^2 (~ 1) zu einer Streuung von c_{scat} führt. Dies lässt sich unter Betrachtung der Kalibriergleichung 3.3 erläutern. Zum einen zeigen sich sowohl negative als auch positive Werte bei diesen Punkten für c_{scat}. Für Spots mit einem hohen Sauberkeitswert τ^2 hat R_{soiled} eine ähnliche Größe wie R_{clean}. Die restlichen Werte des Zählers der Gleichung 3.3 nehmen Werte um 1 an. Somit kann der Fall eintreten, dass der zweite Term des Zählers größer als R_{soiled} ist und es kommt zu einem berechneten Wert für c_{scat}, welcher negativ ist. Die hohe Streuung für hohe Sauberkeitswerte τ^2 (~ 1) lässt sich durch den ersten Term des Nenners begründen. Für $\tau^2 \sim 1$ gilt auch $\tau \sim 1$ und damit ist $1 - \tau \sim 0$. Dies führt dazu, dass c_{scat} divergieren kann.

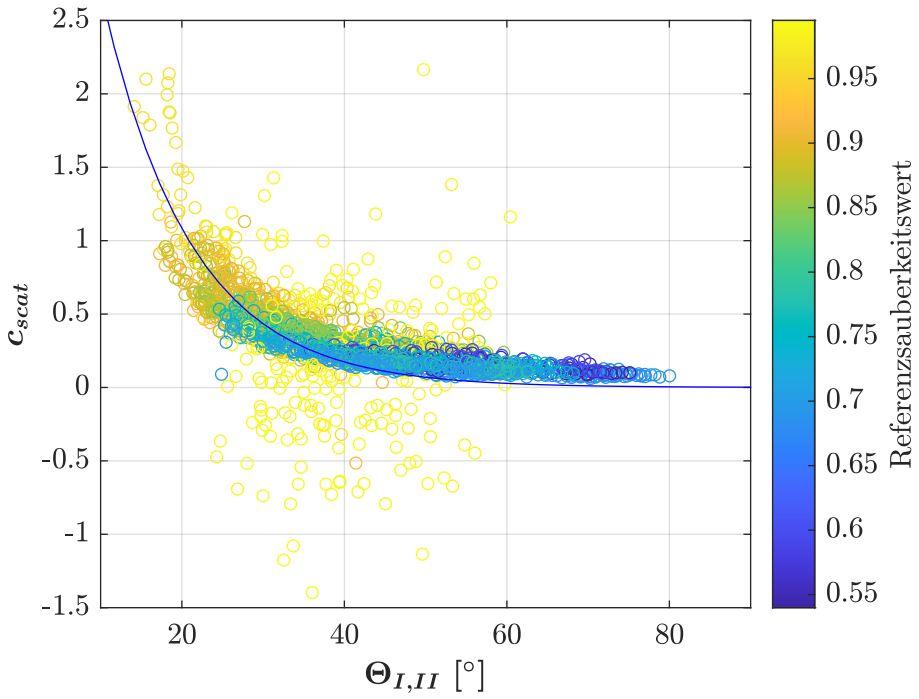


Abbildung 3.17: Werte des theoretisch optimalen c_{scat} eingefärbt mit der jeweiligen Referenzsauberkeit

Betrachtet man welche Auswirkungen die Abweichung zwischen dem theoretisch optimalen $c_{scat,opt}$ und dem mit Hilfe des Streuwinkels $\Theta_{I,II}$ und der Kurve aus der Kalibrierung bestimmten c_{scat} hat, zeigt sich, dass bei niedrigen Sauberkeitswerten die Abweichung in c_{scat} einen höheren Einfluss auf die Abweichung zwischen dem Referenzsauberkeitswert und dem berechneten Sauberkeitswert haben. Dies lässt sich mit der Messgleichung 3.2 erklären. Für hohe Sauberkeitswerte gilt $\tau^2 \sim \tau \sim 1$. Sowohl der quadratische als auch der nicht quadratische Term in τ enthalten c_{scat}, wenn jetzt $\tau^2 \sim \tau$, dann eliminieren sich die Terme, welche c_{scat} beinhalten größtenteils. Somit ist der Einfluss von c_{scat} bei hohen Sauberkeitswerten eher gering und auch eine Abweichung führt nicht zu größeren Problemen. Dies trifft allerdings nicht für niedrige Sauberkeitswerte zu. Hierbei spielt eine Abweichung in c_{scat} eine bedeutende Rolle für die Ergebnisse der Verschmutzungsbestimmung. Diese Abhängigkeit ist auch in Abbildung 3.18 dargestellt. Die Ergebnisse sind hierbei nicht gemittelt.

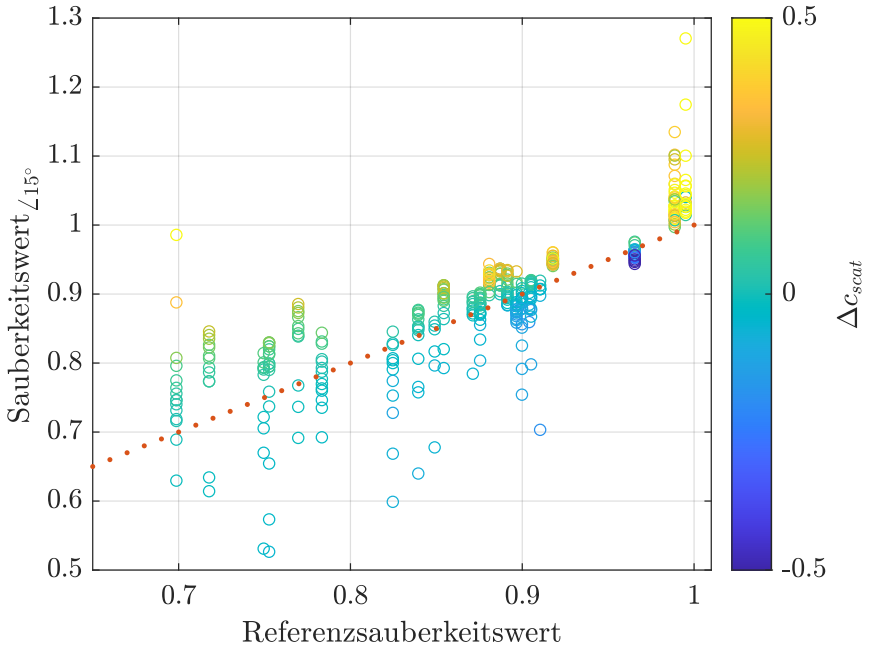


Abbildung 3.18: Auswertung nicht gemittelter Wert eingefärbt für die Abweichung zwischen dem theoretisch optimalen $c_{scat,opt}$ und dem kalibrierten c_{scat}

In der Abbildung 3.18 sind zudem einige Ausreißer zu erkennen. Nicht alle lassen sich dabei direkt erklären, allerdings sind einige auf eine Einschränkung des Farbfilters zurückzuführen. Hierzu sind zwei Beispiele in Abbildung 3.19 zu sehen. Es zeigt sich, dass Strukturelemente des Parabolrinnenspiegels nicht vom Farbfilter erkannt wurden und somit fälschlicherweise evaluiert werden.



(a) **(b)**

Abbildung 3.19: Nicht erkannte Strukturen durch den Farbfilter

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt. Zuerst werden Schlussfolgerungen für die Durchführung der Kalibrierung gezogen und es werden Empfehlungen für Wahl der Spots für die Kalibration und die Gültigkeitsdauer der Kalibration gegeben. Anschließend wird die Kalibrationsmethode analysiert und dafür unter anderem mit der bisherigen Methode zur Kalibrierung verglichen.

4.1 Erkenntnisse zur Durchführung der Kalibrierung

In diesem Abschnitt werden Erkenntnisse, die sich aus den Auswertungen der Testflüge für die Durchführung einer Kalibration ergeben, aufgezeigt. Dabei wird zunächst die Wahl der Kalibrationsspots auf Grundlage der Eigenschaften und Anzahl der Spots betrachtet und im Weiteren wird auf die Gültigkeitsdauer einer Kalibration geblickt.

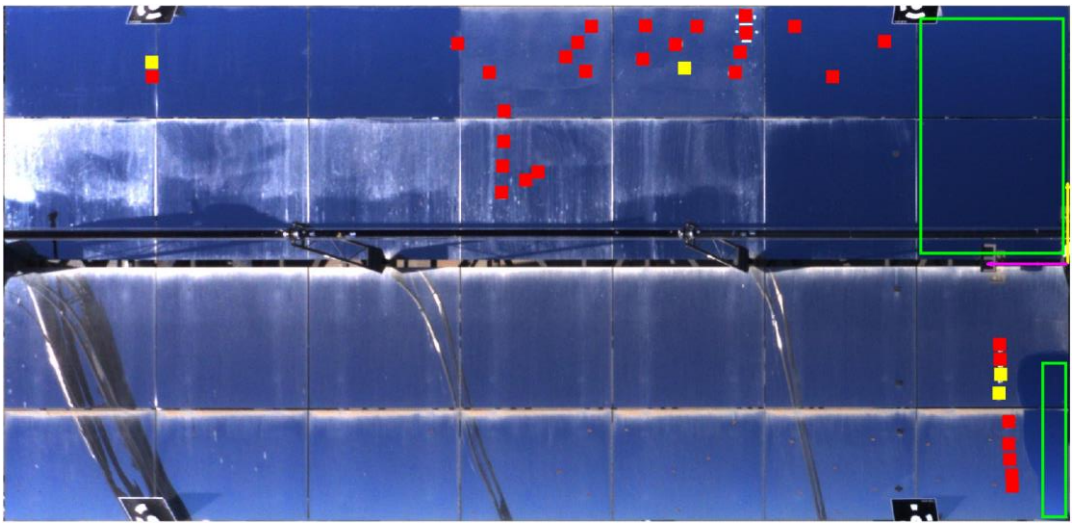


Abbildung 4.1: Lage der gewählten Kalibrierspots in gelb auf Grundlage der höchsten Variation im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$

4.1.1 Auswahl der Kalibrationsspots

Für die Kalibration der Methode zur Verschmutzungsbestimmung müssen eine Reihe von Kalibrierspots ausgewählt werden. An diese muss die Reflektanz bekannt sein. Diese Spots werden zur Kalibration der Funktion für $c_{scat}(\Theta_{I,II})$ verwendet. Die Kalibrierspots sollten dabei die Streueigenschaften des gesamten Spiegels abdecken, aber es sollte nicht die Notwendigkeit bestehen die Reflektanz des gesamten Spiegels zu erheben. In diesem Abschnitt wird deshalb die Auswahl dieser Spots untersucht. Die Auswahl muss dabei aus Parametern erfolgen, welche vor der Reflektanzmessung bekannt sind oder welche während dieser Messung in Erfahrung gebracht werden.

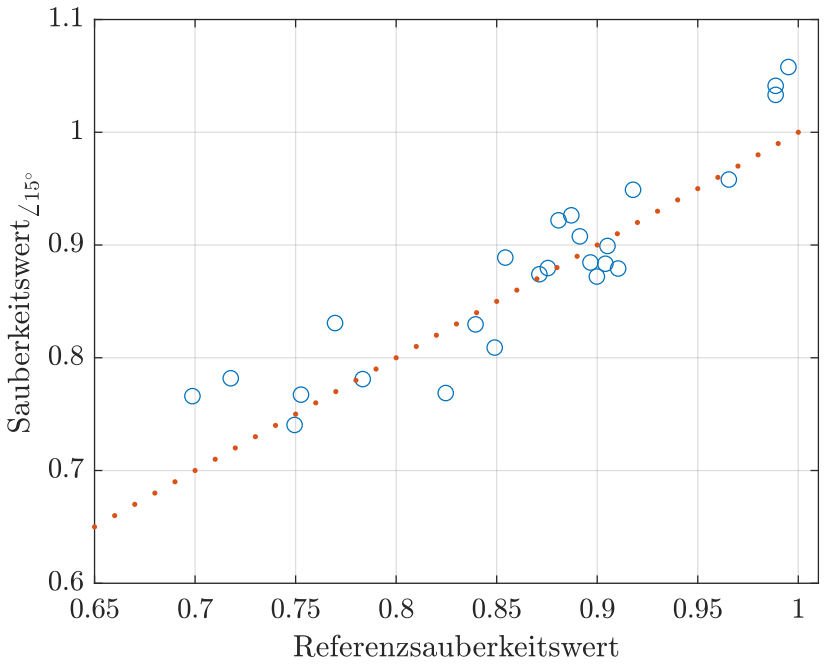


Abbildung 4.2: Auswertung der Verschmutzungbestimmung mit einer Kalibration auf Grundlage der höchsten Variation im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$

Da durch c_{scat} die Streueigenschaften der Staubschicht auf dem Spiegel beschrieben werden sollen, wird der Sauberkeitswert der Referenzmessung der Kalibrierspots als ein Auswahlkriterium für diese verwendet. Dieser Sauberkeitswert ist zwar nicht vor der Referenzmessung bekannt, wird allerdings während dieser in Erfahrung gebracht. Neben dem Sauberkeitswert wird die Varianz des Streuwinkels $\Theta_{I,II}$ in einem für das Mie-Verhältnis relevanten Bereich zur Auswahl der Kalibrierspots betrachtet. Für die Kurvenanpassung sollten diese aller Voraussicht nach über den relevanten Bereich des Streuwinkels verteilt sein. Um Regeln für die Auswahl der Kalibrierspots abzuleiten

werden unterschiedlichen Kalibrationen durchgeführt. Hierzu werden auf Grundlage des mittleren Sauberkeitswert $\overline{\xi}$ und der Varianz im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$ jeweils vier Kalibrierspots aus der Menge von 35 Spots ausgewählt. Diese vier Spots werden in Kombination mit dem Kalibrierflug zur Kalibration von c_{scat} verwendet. Die restlichen 31 Spots werden zusammen mit dem Messflug zur Evaluation genutzt. Das Mie-Verhältnis muss in allen Fällen 8 überschreiten. Die statistische Auswertung wird in diesem Kapitel für die Differenz zwischen dem berechneten und gemessenen Sauberkeitswert durchgeführt. Das Bestimmtheitsmaß wird jedoch für die berechneten Sauberkeitswerte ausgewertet. Nachdem auf die Auswahl der Kalibrierspots eingegangen wurde, wird die Anzahl der benötigten Spots zur Kalibration betrachtet.

Zuerst wird aus allen möglichen Variationen der Kalibrierspots die Variante mit der höchsten Varianz im Streuwinkel betrachtet. Diese beträgt $Var(\Theta_{I,II}) = 106,8^{\circ^2}$ und der mittlere Sauberkeitswert der vier Spots beträgt $\overline{\xi} = 0,817$. In Abbildung 4.1 ist zu sehen wo sich diese Kalibrierspots auf dem Spiegel befinden.

Die Spots zur Kalibrierung sind sowohl entlang der Parabel als auch orthogonal zu dieser über den Spiegel verteilt. Es handelt sich überwiegend um Spots mit einem geringeren Sauberkeitswert. Drei der vier Spots haben einen Sauberkeitswert von unter $0,82$. Nur der Spot oben links in der Abbildung 4.1 hat einen Sauberkeitswert von $0,908$. Der minimale Streuwinkel, welcher das Mie-Verhältnis erfüllt, liegt bei $14,14°$, während der maximale Streuwinkel einen Wert von $49,11°$ hat. Durch diese Auswahl der Kalibrationsspots ergibt sich das Ergebnis der Auswertung in Abbildung 4.2.

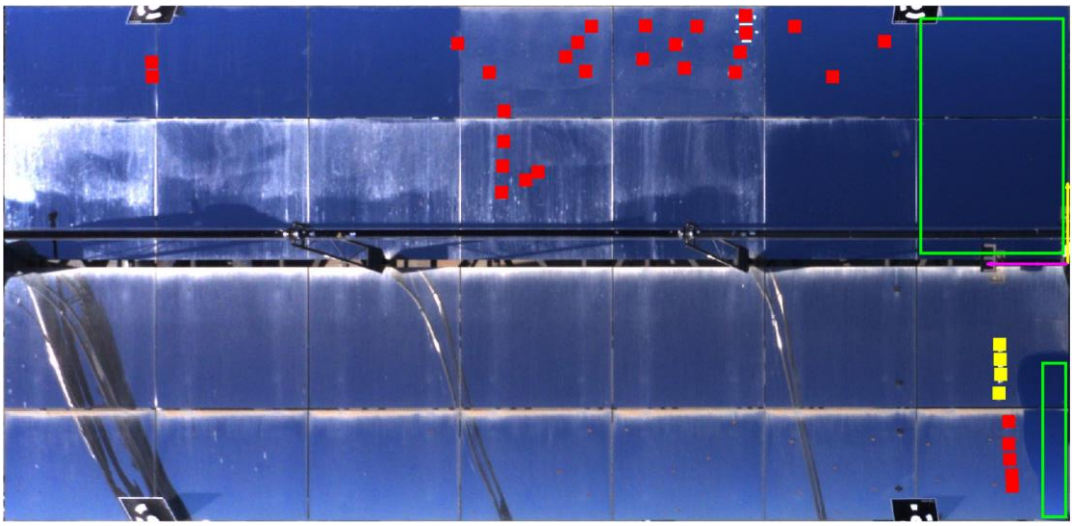


Abbildung 4.3: Lage der gewählten Kalibrierspots in gelb auf Grundlage der niedrigsten Variation im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$

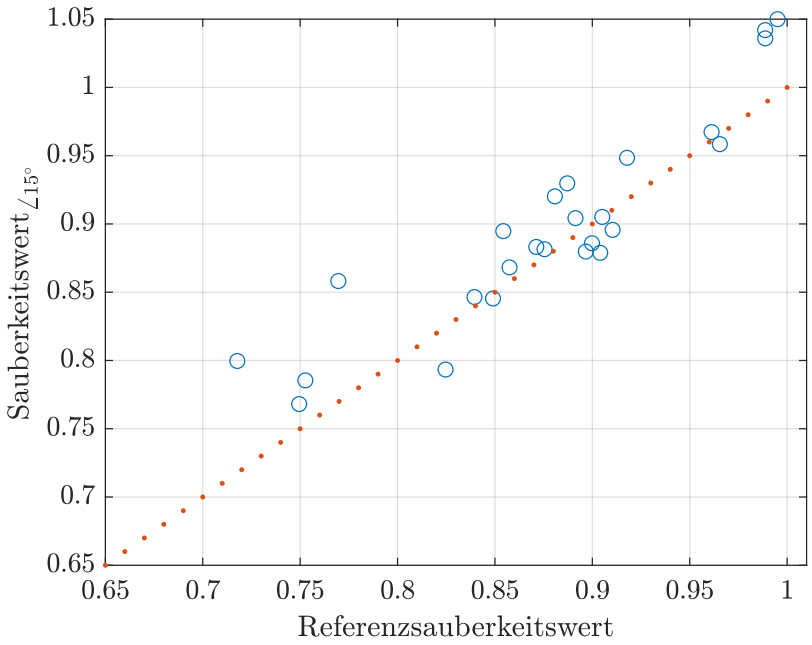


Abbildung 4.4: Auswertung der Verschmutzungbestimmung mit einer Kalibration auf Grundlage der niedrigsten Variation im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$

Über die gemessene Referenzsauberkeit wird der berechnete Sauberkeitswert aufgetragen. Der berechnete Wert ist auf den Inzidenzwinkel des Handreflektometers von 15° transformiert. Jeder Kreis entspricht einem Spot. Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0,914$. Für die Differenz zwischen berechneter und gemessener Sauberkeitswerte ist der $Bias$ $0,0126$ während der $RMSD$ $0,037$ beträgt. Durch Auswahl der Kalibrierspots auf Grundlage der höchsten Varianz im Streuwinkel zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Verschmutzungsbestimmung mit den Referenzmessungen.

Tabelle 4.1: Statistische Auswertung der Auswahl von Kalibrierspots nach der Varianz im Streuwinkel $Var(\Theta_{I,II})$

$Var(\Theta_{I,II})$ [°^{2}]	$\overline{\xi}$ [–]	R^2 [–]	$RMSD$ [–]	$Bias$ [–]
106,8	0,817	0,914	0,037	0,0126
106,7	0,79	0,891	0,0425	0,0238
105,6	0,815	0,913	0,0415	0,025
21,6	0,757	0,919	0,05	0,0397
20,2	0,887	0,92	0,0759	0,0589
17,8	0,733	0,911	0,0362	0,0189

Dem gegenübergestellt wird die Variante für die Auswahl der Kalibrierspots mit der geringsten Varianz in $\Theta_{I,II}$. Diese hat einen Wert von $Var(\Theta_{I,II}) = 17,8^{\circ^2}$ und die mittlere Sauberkeit ist $\overline{\xi} = 0,733$. Abbildung 4.3 zeigt, wo sich die Kalibrierspots auf dem Spiegel befinden.

Es zeigt sich, dass in diesem Fall die Spots für die Kalibrierung im Gegensatz zur Auswahl aus Abbildung 4.1 eine geringere räumliche Verteilung auf dem Spiegel haben. Der minimale Streuwinkel ist $31,83^{\circ}$ und der maximale Streuwinkel beträgt $49,11^{\circ}$. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abbildung 4.4 gezeigt. Auch in diesem Fall zeigt sich eine gute Übereinstimmung der ausgewerteten Sauberkeit mit den Referenzmessungen. Mit einer mittleren Sauberkeit von $0,733$ für die Kalibrierspots tritt auch hier eine relativ geringe mittlerer Sauberkeitswert auf.

Neben dieser Kalibrationen wurden noch jeweils die zwei Variationen der Kalibrierspots ausgewählt, welche die nächsthöheren bzw. -niedrigeren Varianzen im Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ besitzen. Die statistische Auswertung für alle diese Kalibrationen befinden sich in der Tabelle 4.1. Neben den Werten für die Kalibration $\overline{\xi}$ und $Var(\Theta_{I,II})$ wird die jeweilige statistische Auswertung der Evaluation aufgeführt.

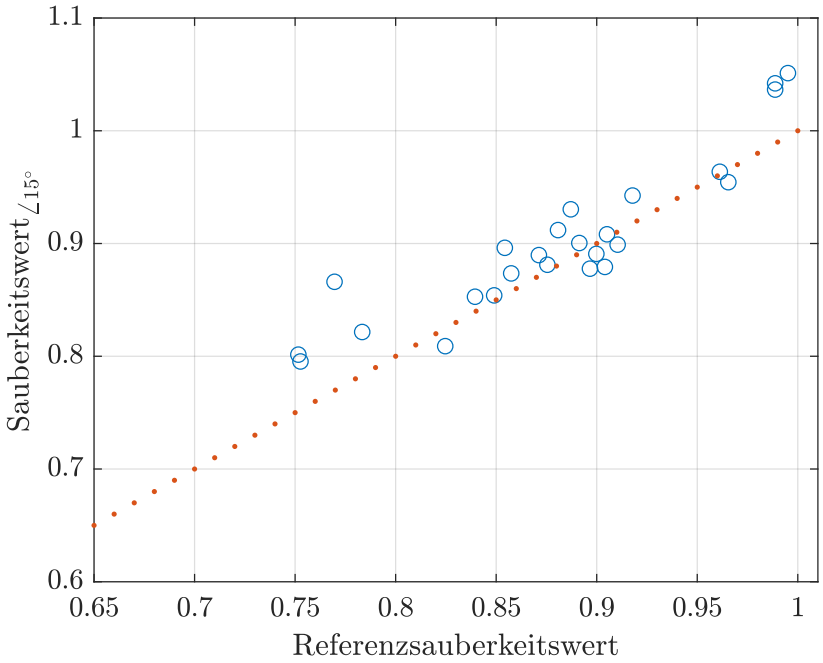


Abbildung 4.5: Auswertung der Verschmutzungbestimmung mit einer Kalibration auf Grundlage der niedrigsten mittleren Sauberkeit $\overline{\xi}$

Tabelle 4.2: Statistische Auswertung der Auswahl von Kalibrierspots nach dem mittleren Sauberkeitswert $\overline{\xi}$

$Var(\Theta_{I,II})$ [°²]	$\overline{\xi}$ [–]	R^2 [–]	$RMSD$ [–]	$Bias$ [–]
31,12	0,716	0,91	0,0352	0,0203
30,42	0,717	0,919	0,0321	0,0128
38,68	0,717	0,911	0,0343	0,0184
65,58	0,978	0,802	0,105	0,0872
80,75	0,983	0,844	0,0819	0,0618
60,74	0,985	0,882	0,0936	0,079

Gute Ergebnisse der Auswertung mit Werten des $RMSD$ von $0,05$ oder weniger und Werten für den $Bias$ von $0,025$ oder weniger, können sowohl bei hoher als auch niedriger Varianz im Streuwinkel erreicht werden (vgl. Tabelle 4.1). Ein ausschlaggebender Parameter scheint die mittlere Sauberkeit der Kalibrierspots zu sein. Dies wird näher im Folgenden betrachtet.

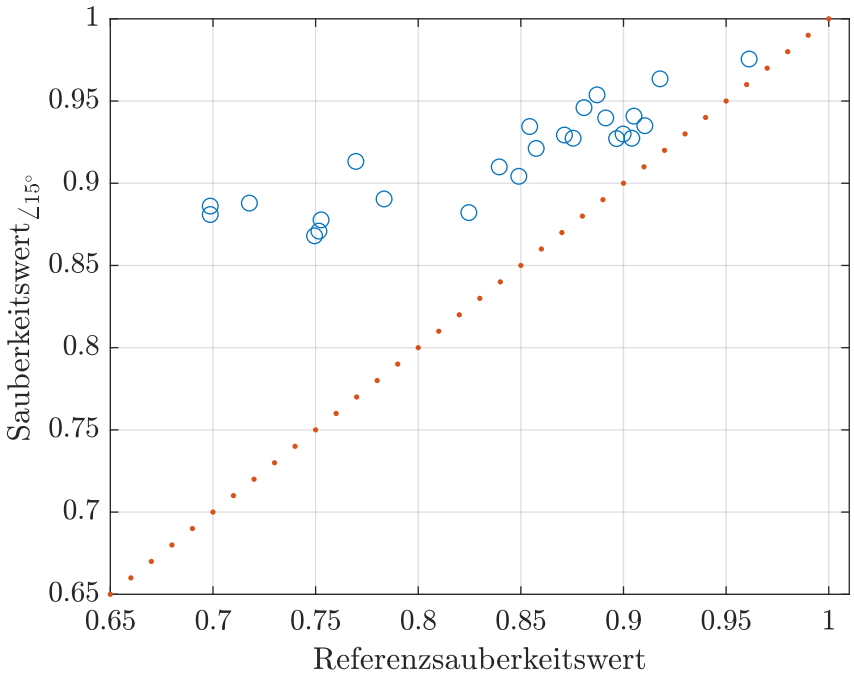


Abbildung 4.6: Auswertung der Verschmutzungbestimmung mit einer Kalibration auf Grundlage der höchsten mittleren Sauberkeit $\overline{\xi}$

Hierzu werden zuerst aus allen möglichen Kombinationen von vier Kalibrierspots die Spots mit der niedrigsten mittleren Sauberkeit ausgewählt. Diese beträgt $\overline{\xi} = 0,716$ und die Varianz im Streuwinkel ist $Var(\Theta_{I,II}) = 31,12^{\circ^2}$. Die Ergebnisse dieser Kalibration sind in Abbildung 4.5 dargestellt.

Trotz geringer Varianz im Streuwinkel zeichnet sich eine gute Vorhersage der Verschmutzung durch die Wahl dieser Kalibration aus. Das Bestimmtheitsmaßbeträgt $R^2 = 0,91$ bei einem $RMSD$ von $0,0353$ und einem $Bias$ von $0,0203$.

Für die vier Kalibrierspots mit der höchsten mittleren Sauberkeit ergibt sich diese zu $\overline{\xi} = 0,985$ und die Varianz im Streuwinkel beträgt $Var(\Theta_{I,II}) = 60,74^{\circ^2}$. Aus der Auswertung ergeben sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,882$, ein $RMSD$ von $0,0936$ und ein $Bias$ von $0,079$. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.6 zu sehen.

Vor allem bei geringeren Referenzsauberkeitswerten zeigt sich eine zunehmende Differenz zwischen der bildbasierten Verschmutzungsbestimmung und der Referenzmessungen und es kommt zu einer maximalen Abweichung von fast 20%-Punkten. Weitere Auswertungen für die nächsthöheren bzw. -niedrigeren mittleren Sauberkeitswerte lassen sich der Tabelle 4.2 entnehmen.

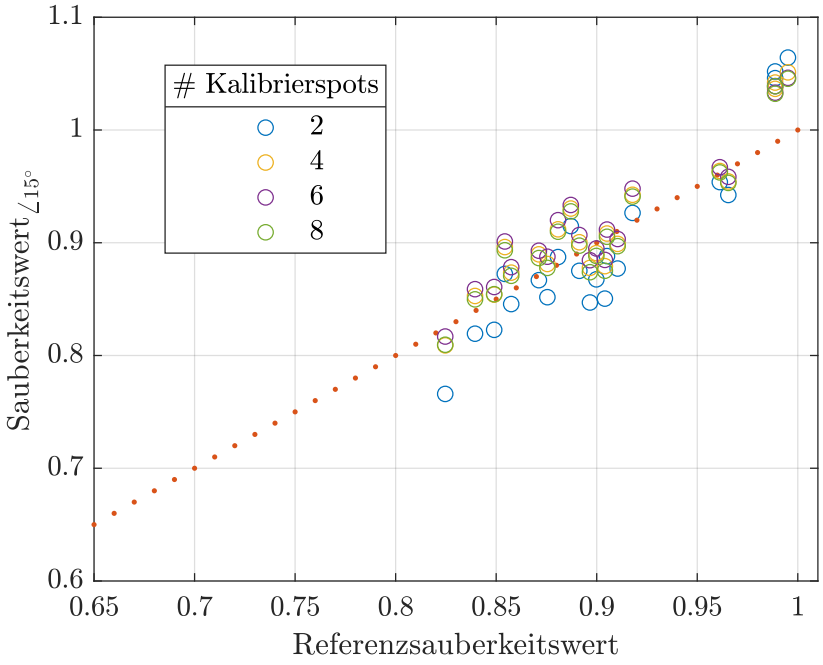


Abbildung 4.7: Auswertung für verschiedene Anzahlen von Kalibrierspots

Tabelle 4.3: Statistische Auswertung für Kalibrationen mit unterschiedlicher Anzahl an Kalibrationsspots

# Kalibrierspots	R^2 [–]	$RMSD$ [–]	$Bias$ [–]
2	0,93	0,036	-0,00605
4	0,931	0,0276	0,0133
6	0,933	0,028	0,0173
8	0,932	0,0259	0,0107

Besonders bei Kalibrationen mit sehr hohen Sauberkeitswerten zeigt sich eine große Abweichung der Ergebnisse zu den Referenzmessungen. Dies wird umso signifikanter, je geringer die Referenzsauberkeit ist. Dies liegt daran, dass in diesem Bereich die Methode zur Verschmutzungsbestimmung sensibler auf die Kalibration von c_{scat} reagiert. Zudem sollen durch c_{scat} die Eigenschaften der Streuung der Staubschicht widergespiegelt werden, bei Spots mit hoher Sauberkeit ist der Anteil der Streuung allerdings geringer.

Es empfiehlt sich somit vor allem die Auswahl der Kalibrierspots aufgrund einer geringen mittleren Sauberkeit. Wobei eine Varianz im Streuwinkel keinen direkten Einfluss zu haben scheint. Es muss allerdings erwähnt werden, dass die Datenmenge, der zur Verfügung stehenden Spots, begrenzt ist und sich vor allem Spots mit geringen Sauberkeitswerten in räumlicher Nähe zu einander befinden.

Außerdem wird untersucht, in welchem Bereich die Anzahl der Kalibreispots sich befinden sollte. Hierzu werden jeweils 2, 4, 6 und 8 Spots zur Kalibrierung ausgewählt. Diese werden dabei nach den bisherigen Erkenntnissen auf Grundlage der geringsten mittleren Sauberkeit ausgesucht. Allerdings werden in diesem Fall nicht alle restlichen Spots zur Evaluation genutzt, sondern es werden nur Spots ausgewertet, welche in keiner der Kalibrationen auftreten. Die Ergebnisse für die verschiedenen Anzahlen von Kalibrierspots sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

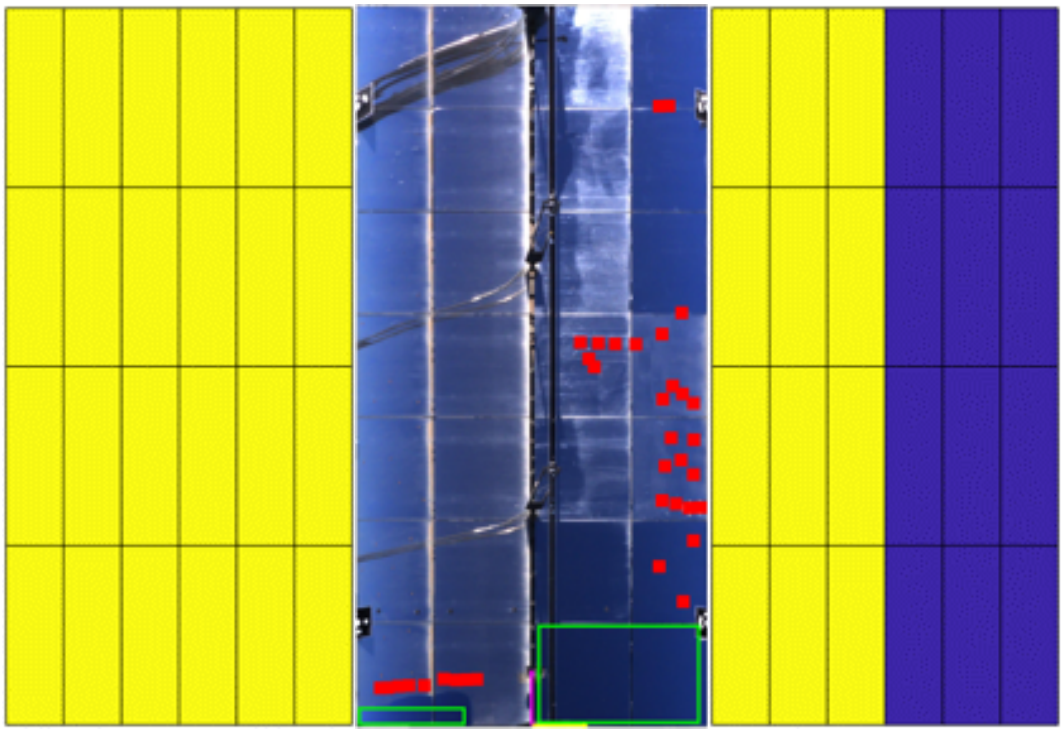
Die Ergebnisse für die Anzahl von Kalibrierspots von vier bis acht sind sehr ähnlich. Nur bei einer Anzahl von zwei Spots, welche zur Kalibrierung genutzt werden, zeigt sich eine deutlichere Abweichung. Die statistische Evaluation dieser Kalibrationen ist in Tabelle 4.3 gezeigt.

Auch die statistische Evaluation zeigt die Ähnlichkeit der Anzahl von vier bis acht. Zwar hat die Kalibrierung mit zwei Spots einen geringeren $Bias$ als die Anderen, allerdings sieht man durch die Streuung um die Winkelhalbierende in Abbildung 4.7, dass eine alleinige Betrachtung dieses Wertes zu einem falschen Schluss führen würden.

Allgemein lässt sich sagen, dass für die Kalibrierung Spots mit geringer Sauberkeit gewählt werden sollten und eine Anzahl von vier Spots ausreichen kann. Neben der Auswahl der Kalibrierspots ist die Gültigkeitsdauer der Kalibrierung von Bedeutung. Diese wird im nächsten Abschnitt analysiert.

4.1.2 Gültigkeitsdauer der Kalibration

Um Aussagen über die Gültigkeitsdauer einer Kalibration zu treffen werden zuerst die beiden durchgeführten Flüge miteinander vergleichen. Im Weiteren werden Simulationen durchgeführt um diese zu untersuchen.



(a) **(b)** **(c)**

Abbildung 4.8: Verteilung der Spots auf dem Spiegel und nutzbare Flächen auf dem Spiegel für (a) den ersten Flug und (c) den zweiten Flug in gelb

Die beiden Flüge setzen sich jeweils aus einem Kalibrierflug und einem Messflug zusammen. Der erste Flug wurde für den 15.12.2023 um 12 Uhr *UTC* geplant und durchgeführt. Wobei der zweite Flug für den 15.12.2023 um 13 Uhr *UTC* geplant, allerdings erst um 14 Uhr *UTC* durchgeführt wurde. Somit ist nicht die gesamte Flugroute des zweiten Fluges nutzbar aufgrund des fortgeschrittenen Sonnenstandes. Zudem gilt für die geplanten Flugrouten, dass zwar jede Kameraposition auswertbare Bereiche auf dem Spiegel für die jeweilige Uhrzeit mit sich bringt, es bedeutet aber nicht, dass die gesamte Spiegelfläche abgedeckt wird. In Abbildung 4.8 ist die Lage

der Spots auf dem Spiegel und der jeweils nutzbare Bereich auf dem Spiegel für den ersten und zweiten Flug gezeigt.

Es zeigt sich, dass zwischen den beiden Flügen unterschiedliche Bereiche des Spiegels nutzbar sind. Außerdem steht für den zweiten Flug aufgrund des nutzbaren Bereiches auf dem Spiegel und der Lage der Positionen der Referenzmessungen nur eine sehr geringe Anzahl an Spots zur Verfügung. Deshalb sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten.

Zur Auswertung wird jeweils der Kalibrierflugteil des einen Fluges mit vier Kalibrierspots für die Kalibrierung genutzt und der Messflugteil des anderen Fluges mit den restlichen Spots zur Evaluation verwendet. Die Kalibrierspots werden dabei auf Grundlage der in diesem Abschnitt erlangten Erkenntnisse (vgl. Abschnitt 4.1.1) nach der geringsten mittleren Sauberkeit ausgewählt.

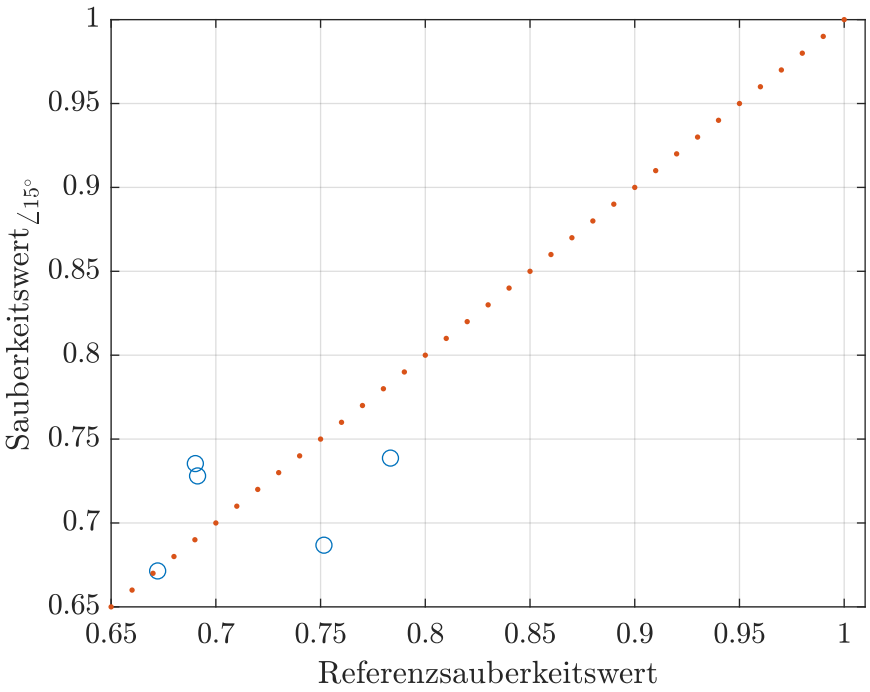


Abbildung 4.9: Ergebnis der Verschmutzungbestimmung für den Messflug zwei und den Kalibrierflug eins

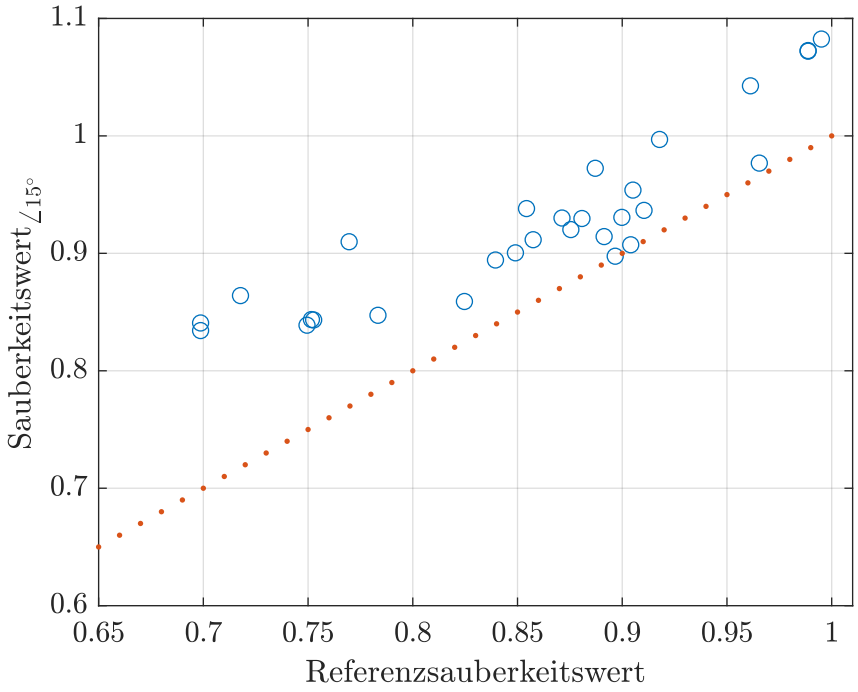


Abbildung 4.10: Ergebnis der Verschmutzungbestimmung für den Messflug eins und den Kalibrierflug zwei

In Abbildung 4.9 wurde der erste Flug zur Kalibrierung und der zweite Flug zur Evaluation verwendet. Der $RMSD$ liegt bei $0,043$ und der $Bias$ bei $-0,006$, allerdings hat das Bestimmtheitsmaß R^2 nur einen Wert von $0,287$. Letzteres ergibt sich allerdings aus der geringen Anzahl an auswertbaren Spots für den zweiten Flug und sollte nicht zu stark gewichtet werden.

Für das Ergebnis in Abbildung 4.10 wurde der zweite Flug zur Kalibrierung verwendet und der erste Flug zur Evaluierung. In diesem Fall ist R^2 deutlich größer mit $0,889$, aber sowohl der $RMSD$ steigt auf $0,079$ als auch der $Bias$, welcher in diesem Fall einen Wert von $0,07$ hat. Wenn man den Graphen betrachtet, zeigt sich dieser Anstieg im $Bias$ durch eine Verschiebung nach oben der Messpunkte im Verhältnis zur Winkelhalbierenden. Während die Messpunkte normalerweise um diese streuen, liegen in diesem Fall alle Punkte oberhalb.

Dies bedeutet, dass die Messpunkte im Mittel für jeden Spot ein überschätztes c_{scat} haben. Es werden die Funktionen der beiden Kalibrierungen in Abbildung 4.11 betrachtet. Es zeigt sich vor allem ab Streuwinkeln unter 20° eine Abweichung zwischen

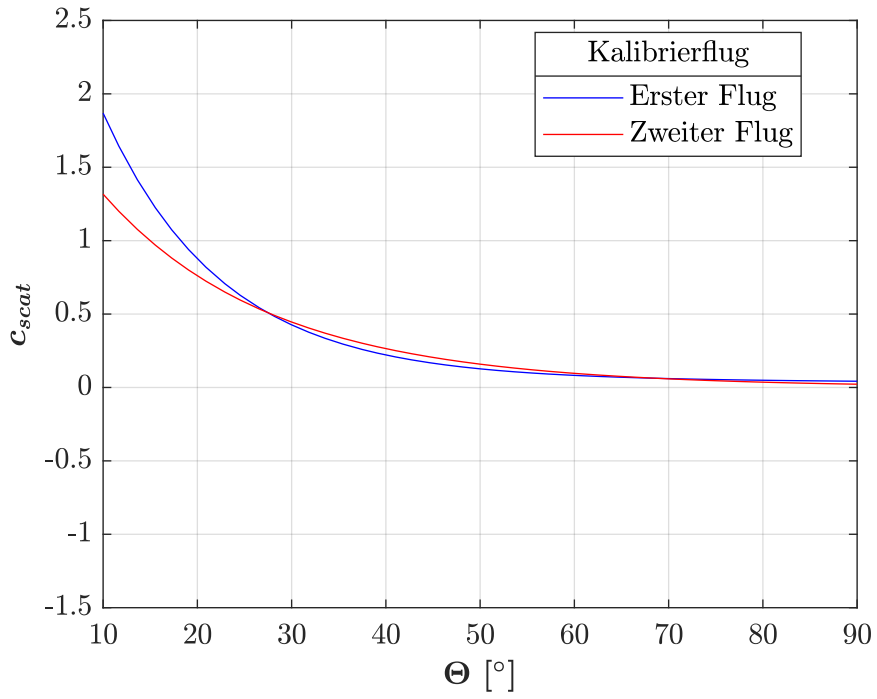


Abbildung 4.11: Vergleich der Kalibrierung der Funktion für c_{scat} zwischen dem ersten und zweiten Flug

den Funktionen für c_{scat} aus den jeweiligen Kalibrierungen. Der restliche Verlauf ist sehr ähnlich. Die Ergebnisse sollten allerdings aus den oben genannten Gründen mit Vorsicht betrachtet werden und es sind weitere Untersuchungen notwendig, um eine Aussage zur Gültigkeitsdauer der Kalibration zu treffen. Zudem wurden die Flüge an einem nicht getrackten Parabolrinnenspiegel durchgeführt, während für eine spätere Anwendung im Kraftwerk eine Nachführung der Spiegel wahrscheinlich ist.

Neben der Kalibrierung von c_{scat} stellt die Interpolation des Hintergrundsignals von R_{clean} einen limitierenden Faktor dar. Dies wird im Folgenden für nachgeführte Spiegel simuliert. Durch die Kameraposition und den betrachteten gesäuberten Bereich auf dem Spiegel ergibt sich ein Reflexvektor, welcher auf einen Himmelsbereich zeigt. Dieser Reflexvektor kann durch den Azimut- und Elevationswinkel dargestellt werden. Wenn man alle Kamerapositionen eines Fluges und die jeweiligen Reflexvektoren betrachtet, wird eine Ebene über den Azimut- und Elevationswinkel der Reflexvektoren aufgespannt. Innerhalb dieser aufgespannten Fläche lässt sich R_{clean} für die Auswertung der Sauberkeit der Spots interpolieren. Diese Flächen sind in Abbildung 4.12 für den 15. Dezember 2023 für verschiedene Uhrzeiten für einen nachgeführten Spiegel

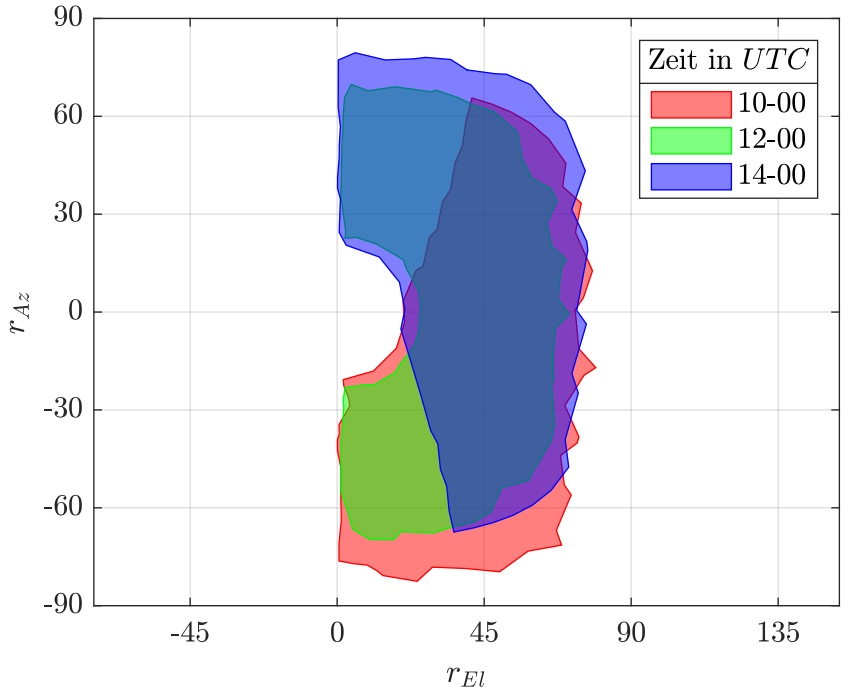


Abbildung 4.12: Simulation des Bereiches, welcher durch den Reflexvektor für die Interpolation von R_{clean} aufgespannt wird am 15. Dezember 2023 zu verschiedenen Tageszeiten

gezeigt. Ein Azimutwinkel von 0° bedeutet hierbei eine Reflexion in Richtung Norden und ein Winkel von 180° bzw. −180° dementsprechend eine Reflexion in Richtung Süden.

Es zeigt sich eine große Überlagerung der Bereiche. Allerdings hat eine Kalibration für das Hintergrundsignal um 12 Uhr UTC den größten gemeinsamen Bereich mit den Kalibrationen der jeweils anderen Uhrzeiten. Demnach scheint eine Kalibration um diese Zeit von Vorteil zu sein. Aus den Kalibrationen zu den anderen Uhrzeiten würde sich nämlich ein beschränkter Interpolationsbereich für R_{clean} ergeben. Die Form der Bereiche lässt sich mit der Ausrichtung und Form der Parabolrinnenkollektoren erklären. Das gewählte Datum befindet sich allerdings in zeitlicher Nähe zum kürzesten Tag des Jahres und bringt deshalb einen relativ flachen Sonnenstand mit sich. In Abbildung 4.13 ist die Simulation von oben für den 21. Juni 2023 zu verschiedenen Tageszeiten durchgeführt worden.

Hier zeigt sich eine vollständige Überlagerung der Bereiche und somit sollte der Zeitpunkt der Kalibration auf Grundlage der Interpolation von R_{clean} innerhalb der un-

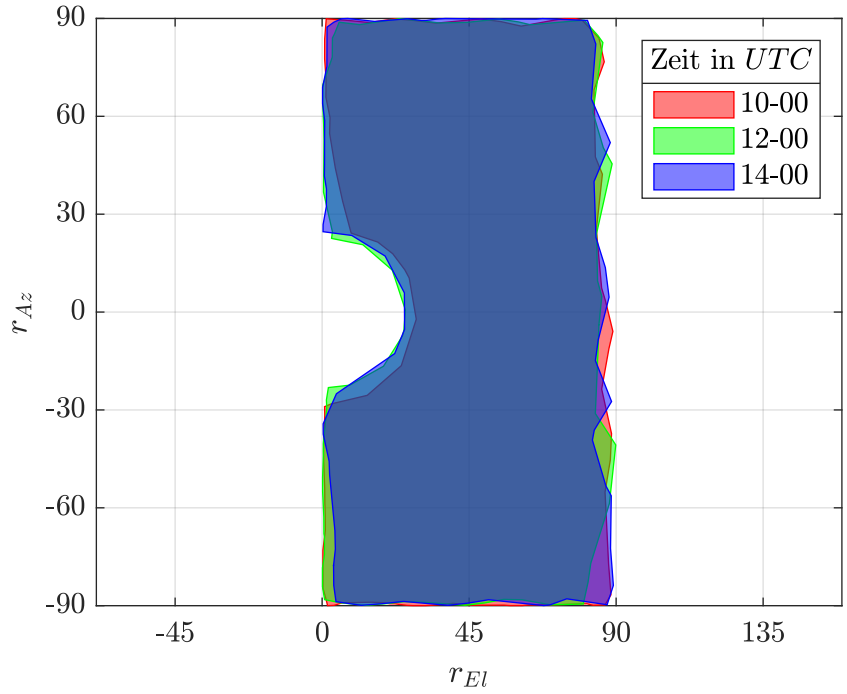


Abbildung 4.13: Simulation des Bereiches, welcher durch den Reflexvektor für die Interpolation von R_{clean} aufgespannt wird am 15. Dezember 2023 zu verschiedenen Tageszeiten

tersuchten Zeiträume frei wählbar sein. Längere Tage mit ein höheren relativen Sonnenstand scheinen bei dieser Betrachtung von Vorteil zu sein. Neben der Interpolation von R_{clean} sind weitere Einflussfaktoren für die Gültigkeitsdauer der Kalibration relevant. Deshalb lässt sich nicht allein mit diesen Simulationen eine Gültigkeitsdauer bestimmen, sondern es können nur Abschätzungen gemacht werden.

4.2 Analyse der Kalibrationsmethode

In diesem Abschnitt werden die implementierten Entwicklungsschritte in der Kalibration ausgewertet und mit der bestehenden Kalibrationsmethode verglichen. Die Methoden unterscheiden sich hierbei vor allem in der Bestimmung des Hintergrundsignals R_{clean} und der Kalibration von c_{scat}. Die Kalibration wird jeweils durch eine Auswahl von Referenzspots in Kombination mit dem Kalibrierflug vorgenommen, während der Messflug und die nicht in der Kalibration genutzten Spots für die Evaluation genutzt werden. Es wird der Flug, welcher am 15.12.2023 um 12 Uhr UTC durchgeführt wurde ausgewertet.

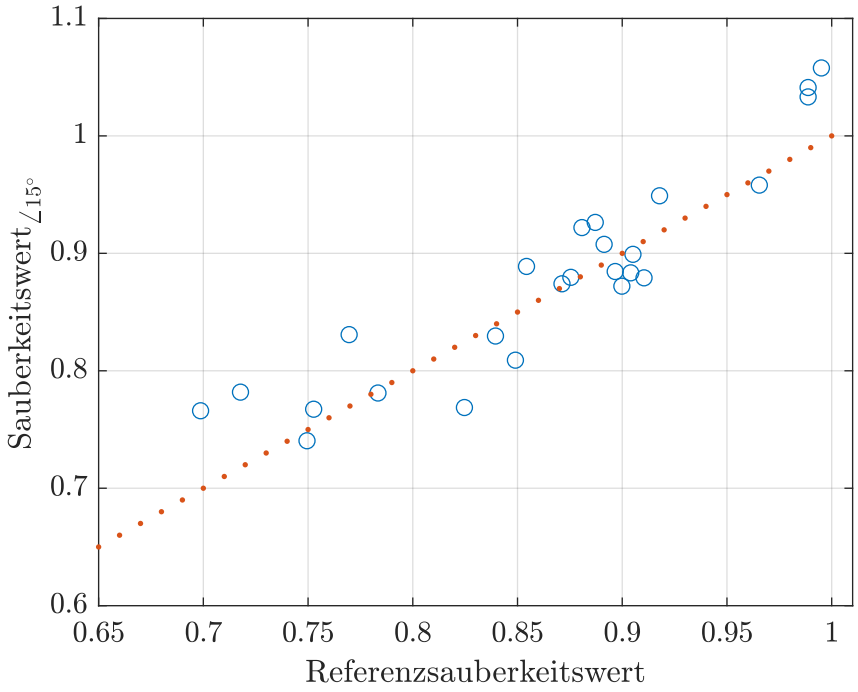


Abbildung 4.14: Auswertung der Kalibrationsmethode, welche in dieser Arbeit entwickelt wurde mit dem in dieser Arbeit geplanten Kalibrationsflug

In Abbildung 4.14 ist die Auswertung der neu entwickelten Kalibrationsmethode zu sehen. Zur Kalibration wurden vier Spots verwendet, welche auf Grundlage ihrer mittleren Sauberkeitswerte und der Varianz im Streuwinkel $\Theta_{I,II}$ ausgewählt wurden. Näheres zur Auswahl der Kalibrationsspots wird in Abschnitt 4.1 behandelt.

Auf der X-Achse sind Werte der Referenzsauberkeit und auf der Y-Achse sind die durch die bildbasierte Verschmutzungsmessung bestimmten Sauberkeitswerte angegeben. Letztere werden auf einen Inzidenzwinkel von 15° transformiert, dies entspricht dem Inzidenzwinkel des Handreflektometers, welches zur Messung der Referenzsauberkeitswerte verwendet wurde. Die rot gestrichelte Linie stellt die Winkelhalbierende dar. Jeder Punkt entspricht einem Spot auf dem Spiegel. Um diesen zu erhalten wurden die bestimmten Sauberkeitswerte des jeweiligen Spots für jedes Bild zu einem Wert gemittelt. Falls Punkte direkt auf der Winkelhalbierenden liegen, stimmt der bestimmte Sauberkeitswert direkt mit dem Referenzsauberkeitswert überein. Es wurden nur Messpunkte ausgewertet, welche ein Mie-Verhältnis von über 8 haben. Im Falle dieser Auswertung ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $0,914$ und ein $RMSD$ von $3,7\%$.

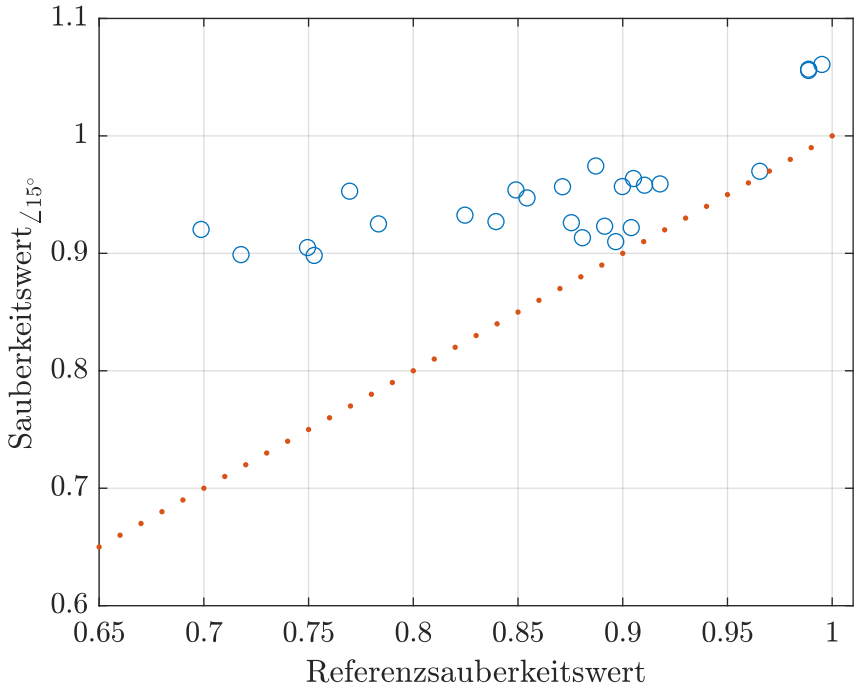


Abbildung 4.15: Auswertung der Kalibrationsmethode, welche vor dieser Arbeit genutzt wurde

Dieselbe Auswertung wurde für die vor dieser Arbeit genutzte Kalibrationsmethode durchgeführt. Hier unterscheidet sich vor allem die Bestimmung bzw. Kalibration von c_{scat}. Gemäß der vorherigen Definition und Vorgehensweise wird in der Kalibration jedem c_{scat} jeweils der Inzidenzwinkel der Sonne α_{sun} und der Differenz zwischen dem Azimutwinkel der Sonne und der Kamera zugewiesen. In der Evaluation wird auf Grundlage dieser Winkel dann das c_{scat} interpoliert. Außerdem wird nicht die geplante Flugroute verwendet, sondern der Spiralflug (vgl. Abschnitt 3.2). Weiterhin werden nur Messpunkte ausgewertet, welche ein Mie-Verhältnis von über 8 haben. Auch die Kalibrierspots wurden weiterhin verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.15 zu sehen.

Es ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $0,74$ und ein $RMSD$ von $0,103$. In diesem Fall sind nur 25% der Bilder des Spiralfluges aufgrund des Mie-Verhältnisses nutzbar. Somit wird die Menge der nutzbaren Messpunkte zur Kalibrierung deutlich beschränkt.

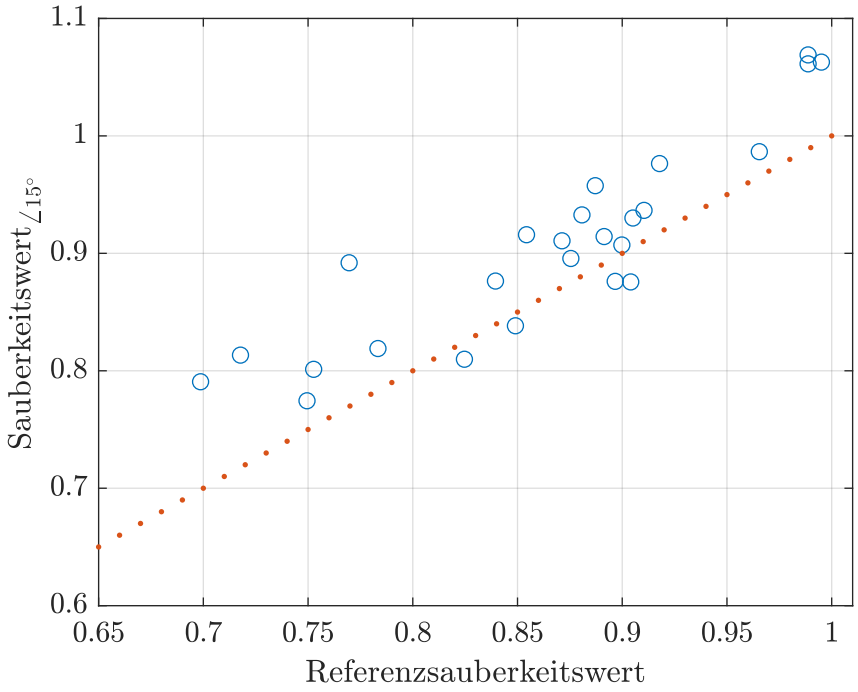


Abbildung 4.16: Auswertung der Kalibrationsmethode, welche vor dieser Arbeit genutzt wurde mit dem in dieser Arbeit geplanten Kalibrationsflug

Nutzt man zur Kalibration von von c_{scat} die Methode, welche vor dieser Arbeit genutzt wurde, verwendet allerdings den geplanten Kalibrationsflug ergibt sich das Ergebnis in Abbildung 4.16.

Es zeigt sich ein Bestimmtheitsmaß von $0,895$ und ein $RMSD$ von $0,055$. Diese Werte sind in der Nähe der neu eingeführten Bestimmung von c_{scat}. Allerdings ist die maximale Abweichung zwischen dem bestimmten Sauberkeitswert und der Refrenzmessung hier mit $0,12$ fast doppelt so hoch wie mit der Kalibrationsmethode aus dieser Arbeit. Zudem ist der Bias mehr als dreimal höher. Dies ist in Tabelle 4.4 gezeigt. In dieser sind die statistischen Auswertungen der unterschiedlichen Methoden zur Kalibration gegenübergestellt.

Es zeigen sich an dieser beispielhaften Auswertung sowohl Verbesserungen durch die Planung der Flugroute als auch durch die neue Kalibrationsmethode für c_{scat}. Die angepasste Flugroute führt zu einer deutlich gesteigerten Datengrundlage für die Kalibration und die Anpassung der Theorie zu einer vereinfachten Bestimmung von c_{scat}.

Tabelle 4.4: Statistische Auswertung der Kalibrationsmethoden

Kalibrations-methode	neu	alt	
Flugroute	geplanter Kalibrationsflug		Spiralflug
R^2 [–]	0,9143	0,8948	0,7403
$RMSD$ [–]	0,037	0,0549	0,1028
$Bias$ [–]	0,0126	0,0403	0,086
max. Abweichung der Sauberkeit [–]	0,0673	0,1224	0,3523

Somit lässt sich die neue Kalibrationsmethode in Kombination mit geplanten Kalibrationsflügen, welche in dieser Arbeit vorgestellt wurden, zur Verschmutzungsbestimmung verwenden und stellt eine Verbesserung zur Methode, welche im Vorfeld dieser Arbeit genutzt wurde, dar.

5 Fazit und Ausblick

Es zeigt sich, dass sich eine Verbesserung der Verschmutzungsbestimmung durch die in dieser Arbeit weiterentwickelte Kalibrationsmethode ergibt. Dabei spielen sowohl die angepasste Flugroute als auch die neue Bestimmung von c_{scat} eine Rolle. Es lassen sich Ergebnisse erreiche, welche unter den Voraussetzungen aus dieser Arbeit einen $RMSD$ von unter $3,5\%$ und einen $Bias$ von ca. $0,02$ erreichen (vgl. Abschnitt 4.1).

Zudem wurden Erkenntnisse erlangt, welche für die Durchführung der gesamten Methode zur Verschmutzungsbestimmung anwendbar sind. Zum einen konnten Eigenschaften für eine Auswahl der Kalibrationsspots abgeleitet werden. Diese sollten überwiegend einen niedrigen Sauberkeitswert besitzen. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass dies deutlich relevanter als die räumliche Verteilung der Kalibrierspots auf dem Spiegel ist. Ob sich eine weitere Verbesserung durch eine größere Verteilung auf dem Spiegel ergibt sollte weiter betrachtet werden. Da sich allerdings Hinweise ergeben, dass der Einfluss tendenziell gering zu erwarten ist, sollte dies nicht priorisiert werden.

Zu Aussagen über die Gültigkeitsdauer konnten die vorhandenen Daten und Simulationen genutzt werden und es wurde quantitativ nachgewiesen, dass eine Gültigkeitsdauer von einigen Stunden möglich ist und eine Kalibration, während der Sonnenstand die maximale Elevation hat, von Vorteil sein kann. Dies gilt vor allem bei Tagen mit geringeren Elevationswinkeln der Sonne. Allerdings sollte die Gültigkeitsdauer weiter untersucht werden um auch eine qualitative Aussage machen zu können. Faktoren wie zum Beispiel der abgedeckte Bereich durch die Streuwinkel und die Güte der Skalierung von R_{clean} könnten einen Einfluss haben.

Des Weiteren konnten deutliche Verbesserungen in der Flugroute gemacht werden. Während es bei einer nicht auf Grundlage des Mie-Verhältnis geplanten Flugroute dazu kommen kann, dass nur 25% der Route nutzbar sind, lassen sich durch die Planung Flugrouten gestalten, welche vollkommen genutzt werden können. Dies bedeutet hingegen nicht, dass die gesamte Spiegeloberfläche auswertbar ist. Hierfür muss eine gesonderte Betrachtung erfolgen. Es können allerdings auch weitere Erkenntnisse für die Flugplanung abgeleitet werden. Zum einen sollte der Messflug an den Kalibrierflug im Hinblick auf die Interpolation des Hintergrundsignals R_{clean} angepasst werden. In Abbildung 3.14 zeigt sich, dass das Hintergrundsignal für die Auswertung nicht nur interpoliert, sondern teilweise auch extrapoliert wird. Durch Simulationen im Voraus kann eine Extrapolation durch die Abstimmung der beiden Flugteile aufeinander vermieden werden. Zum anderen kann das Anfliegen von Positionen um den direkten

Sonnenreflex bei nicht getrackten Spiegeln vermieden werden. Zwar ist das zu Grunde liegende Mie-Verhältnis für die Messsituation in der Nähe des Sonnenreflexes meistens über dem notwendigen Schwellenwert, aber die Überbelichtung führt dazu, dass die Bilder teilweise nicht nutzbar sind.

Nicht zuletzt ergeben sich aus der erfolgten Datenverarbeitung praktische Hinweise für zukünftige Messkampagnen. Die Stellen der Spots auf dem Spiegel wurden mit weißem Klebeband markiert. Das kann zu einer Beeinflussung des Rotkanalwertes führen. Dieses Vorgehen ist mit der eingeschränkten Funktion des Parabolrinnekollektors, an welchem die Flüge durchgeführt wurden, zu erklären. Bei zukünftigen Flügen sollten die Stellen erst nach Durchführung der Flüge markiert werden und damit einen möglichen Einfluss auf die Bildwerte und ein ungewollte Interaktion mit der Schmutzschicht auszuschließen. Außerdem ergibt sich Potential bei dem Umgang mit Strukturelementen, welche teilweise nicht zuverlässig erkannt werden konnten. Hierzu kann bei der Maskierung angesetzt werden. Die Verarbeitung entsprechender Pixel ist soweit zu verbessern, dass Ergebnisse hiervon nicht beeinflusst werden.

Bei der Anwendung der Methode zur Verschmutzungsbestimmung in einem kommerziellen Kraftwerk werden die Parabolrinnenspiegel voraussichtlich dem Sonnenstand nachgeführt. Dies könnte Vorteile mit sich bringen. Während es bei einem nicht nachgeführten Spiegel zu einem Bereich auf diesem führen kann, welcher aufgrund des Mie-Verhältnisses nicht nutzbar ist (vgl. 4.8), fällt dieser Bereich bei nachgeführten Spiegeln voraussichtlich geringer aus.

Abschließen lässt sich durch die vielversprechenden Ergebnisse eine Anwendung in einem kommerziellen Kraftwerk empfehlen. Hierbei können die oben genannten Verbesserungen bereits teilweise angewendet werden und weitere Erkenntnisse gewonnen werden.

Literatur

[1] Hannah Ritchie, Pablo Rosado und Max Roser. "Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector". In: *Our World in Data* (2020).

[2] Peter Heller, Hrsg. *The performance of concentrated solar power (CSP) systems: Analysis, measurement and assessment*. Woodhead Publishing Series in Energy. Duxford, Cambridge, MA und Kidlington: Elsevier, 2017. ISBN: 9780081004470. URL: http://www.sciencedirect.com/science/book/9780081004470.

[3] Md Tasbirul Islam u. a. "A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91 (2018), S. 987–1018. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.097.

[4] Salvador Izquierdo u. a. "Analysis of CSP plants for the definition of energy policies: The influence on electricity cost of solar multiples, capacity factors and energy storage". In: *Energy Policy* 38.10 (2010), S. 6215–6221. ISSN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.06.009.

[5] Keith Lovegrove und Wes Stein, Hrsg. *Concentrating solar power technology: Principles, developments and applications*. Second edition. Woodhead Publishing Series in Energy. San Diego: Elsevier Science & Technology, 2021. ISBN: 9780128199701. URL: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6413920.

[6] Benjamin Figgis u. a. "Review of PV soiling particle mechanics in desert environments". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017), S. 872–881. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.100.

[7] Ricardo Conceição u. a. "Soiling effect in solar energy conversion systems: A review". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162 (2022), S. 112434. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112434.

[8] A. Fernández-García u. a. "Study of Different Cleaning Methods for Solar Reflectors Used in CSP Plants". In: *Energy Procedia* 49 (2014), S. 80–89. ISSN: 18766102. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.03.009.

[9] Gilbert Cohen, David Kearney und Gregory Kolb. *Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for Concentrating Solar Power Plants*. 1999. DOI: 10.2172/8378.

[10] Monto Mani und Rohit Pillai. “Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.9 (2010), S. 3124–3131. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.065.

[11] Fabian Wolfertstetter u. a. “Integration of Soiling-Rate Measurements and Cleaning Strategies in Yield Analysis of Parabolic Trough Plants”. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 140.4 (2018). ISSN: 0199-6231. DOI: 10.1115/1.4039631.

[12] Felix Terhag u. a. “Optimization of cleaning strategies based on ANN algorithms assessing the benefit of soiling rate forecasts”. In: *SOLARPACES 2018: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2019, S. 220005. DOI: 10.1063/1.5117764.

[13] Mingda Yang, Jim Ji und Bing Guo. “Soiling Quantification Using an Image-Based Method: Effects of Imaging Conditions”. In: *IEEE Journal of Photovoltaics* 10.6 (2020), S. 1780–1787. ISSN: 2156-3381. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.3018257.

[14] Fabian Wolfertstetter u. a. “Recommendations for reflectance measurements on soiled solar mirrors”. In: *SOLARPACES: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems* (2022).

[15] Abdul Hai Alami u. a. “Concentrating solar power (CSP) technologies: Status and analysis”. In: *International Journal of Thermofluids* 18 (2023), S. 1–24. ISSN: 26662027. DOI: 10.1016/j.ijft.2023.100340.

[16] Alae Azouzoute u. a. “Soiling loss of solar glass and mirror samples in the region with arid climate”. In: *Energy Reports* 6 (2020), S. 693–698. ISSN: 23524847. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.09.051.

[17] S. Bouaddi, A. Ihlal und A. Fernández-García. “Comparative analysis of soiling of CSP mirror materials in arid zones”. In: *Renewable Energy* 101 (2017), S. 437–449. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2016.08.067.

[18] Ricardo Conceição, Hugo G. Silva und Manuel Collares-Pereira. “CSP mirror soiling characterization and modeling”. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 185 (2018), S. 233–239. ISSN: 09270248. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.05.035.

[19] Philipp Bellmann u. a. “Comparative modeling of optical soiling losses for CSP and PV energy systems”. In: *Solar Energy* 197 (2020), S. 229–237. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2019.12.045.

[20] Ahmed Amine Hachicha, Israa Al-Sawafta und Dhouha Ben Hamadou. “Numerical and experimental investigations of dust effect on CSP performance under United Arab Emirates weather conditions”. In: *Renewable Energy* 143 (2019), S. 263–276. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2019.04.144.

[21] Travis Sarver, Ali Al-Qaraghuli und Lawrence L. Kazmerski. "A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013), S. 698–733. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.065.

[22] Momina Ahmad und Muhammad Zeeshan. "Multi-objective optimization of concentrated solar power plants from an energy-water-environment nexus perspective under distinct climatic conditions – Part B: Environ-economic analysis". In: *Journal of Cleaner Production* 385 (2023), S. 135689. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135689.

[23] Ahmed Alami Merrouni u. a. "CSP performance and yield analysis including soiling measurements for Morocco and Portugal". In: *Renewable Energy* 162 (2020), S. 1777–1792. ISSN: 09601481. DOI: \url{10.1016/j.renene.2020.10.014}.

[24] A. Alami Merrouni u. a. "Investigation of Soiling Effect on Different Solar Mirror Materials under Moroccan Climate". In: *Energy Procedia* 69 (2015), S. 1948–1957. ISSN: 18766102. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.03.194.

[25] Benjamin Figgis u. a. "Outdoor soiling microscope for measuring particle deposition and resuspension". In: *Solar Energy* 137 (2016), S. 158–164. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2016.08.015.

[26] Basma Aroui. "Dust Particles Accumulation on PV and CSP Surfaces". Capstone Project. AL AKHAWAYN UNIVERSITY, 2019.

[27] S. A. Biryukov. "Degradation of optical properties of solar collectors due to the ambient dust deposition as a function of particle size". In: *Journal of Aerosol Science* 27 (1996), S37–S38. ISSN: 00218502. DOI: 10.1016/0021-8502(96)00091-2.

[28] E. Roth und R. Pettit. "Effect of soiling on solar mirrors and techniques used to maintain high reflectivity". In: *Sandia National Laboratories* (1980). DOI: 10.2172/5249717.

[29] Ghassan Hassan u. a. "Analysis of environmental dust and mud adhesion on aluminum surface in relation to solar energy harvesting". In: *Solar Energy* 153 (2017), S. 590–599. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2017.06.015.

[30] Syed A.M. Said und Husam M. Walwil. "Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance". In: *Solar Energy* 107 (2014), S. 328–337. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2014.05.048.

[31] Selene Pennetta u. a. "A Case Study on Parameters Influencing Dust Accumulation on CSP Reflectors". In: *Journal of Energy and Power Engineering* 10.2 (2016). ISSN: 19348975. DOI: 10.17265/1934-8975/2016.02.001.

[32] Z. Guan u. a. “Dust characterisation for solar collector depostition and cleaning in a concentraring solar thermal power plant”. In: *Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning* (2015).

[33] Klemens K. Ilse u. a. “Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98 (2018), S. 239–254. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.015.

[34] Tianyi Luo, Robert Samuel Young und Paul Reig. “Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings”. In: 2015. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:217840962.

[35] Devices & Services. *PORTABLE SPECULAR REFLECTOMETER 15R-USB*. URL: https://www.devicesandservices.com/15R-USB%20Spec%20Sheet.pdf.

[36] Aránzazu Fernández-García u. a. “Equipment and methods for measuring reflectance of concentrating solar reflector materials”. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 167 (2017), S. 28–52. ISSN: 09270248. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.03.036.

[37] Jesús Fernández-Reche. “Reflectance measurement in solar tower heliostats fields”. In: *Solar Energy* 80.7 (2006), S. 779–786. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2005.06.006.

[38] Gregor Bern u. a. “FREDA - An automated field reflectance and degradation assessment system for central receiver systems”. In: AIP Conference Proceedings. Author(s), 2018, S. 230001. DOI: 10.1063/1.5067229.

[39] F. Wolfertstetter u. a. “Monitoring of Mirror and Sensor Soiling with TraCS for Improved Quality of Ground based Irradiance Measurements”. In: *Energy Procedia* 49 (2014), S. 2422–2432. ISSN: 18766102. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.03.257.

[40] Anna Heimsath u. a. “Automated monitoring of soiling with AVUS instrument for improved solar site assessment”. In: AIP Conference Proceedings. 2018, S. 190008. DOI: 10.1063/1.5067193.

[41] Joe Coventry u. a. “A robotic vision system for inspection of soiling at CSP plants”. In: *SOLARPACES 2019: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2020, S. 100001. DOI: 10.1063/5.0029493.

[42] Fabian Wolfertstetter u. a. “Airborne soiling measurements of entire solar fields with Qfly”. In: *SOLARPACES 2019: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2020, S. 100008. DOI: 10.1063/5.0028968.

[43] Sourav Bhattacharjee. “DLS and zeta potential - What they are and what they are not?” In: *Journal of controlled release : official journal of the Controlled Release Society* 235 (2016), S. 337–351. DOI: 10.1016/j.jconrel.2016.06.017.

[44] Sven Falke und Christian Betzel. “Dynamic Light Scattering (DLS)”. In: *Radiation in Bioanalysis*. Hrsg. von Alice S. Pereira, Pedro Tavares und Paulo Limão-Vieira. Bd. 8. Bioanalysis. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 173–193. ISBN: 978-3-030-28246-2. DOI: 10.1007/978-3-030-28247-9_6.

[45] F. S. Harris. “Calculated mie scattering properties in the visible and infrared of measured los angeles aerosol size distributions”. In: *Applied optics* 11.11 (1972), S. 2697–2705. ISSN: 1559-128X. DOI: 10.1364/AO.11.002697.

[46] Gustav Mie. “Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen”. In: *Annalen der Physik* 330.3 (1908), S. 377–445. ISSN: 0003-3804. DOI: 10.1002/andp.19083300302.

[47] Takao Kuroda. *Essential principles of image sensors*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. ISBN: 978-1-4822-2005-6. URL: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10925556.

[48] Robert Hirsch und Greg Erf. *Exploring color photography: From film to pixels*. Sixth edition. New York und London: Focal Press, 2015. ISBN: 978-1-315-84986-7.

[49] Pierre Magnan. “Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 504.1-3 (2003), S. 199–212. ISSN: 01689002. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)00792-7.

[50] Jun Jiang u. a. “What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras?” In: *2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE, 2013, S. 168–179. ISBN: 978-1-4673-5054-9. DOI: 10.1109/WACV.2013.6475015.

[51] Katsushi Ikeuchi, Hrsg. *Computer vision: A reference guide*. Springer reference. New York und Heidelberg: Springer, 2014. ISBN: 978-0-387-31439-6. DOI: 10.1007/978-0-387-31439-6.

[52] Paul E. Debevec und Jitendra Malik. “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs”. In: *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH ’97*. Hrsg. von G. Scott Owen, Turner Whitted und Barbara Mones-Hattal. New York, New York, USA: ACM Press, 1997, S. 369–378. ISBN: 0897918967. DOI: 10.1145/258734.258884.

[53] Matthew Anderson u. a. “Proposal for a standard default color space for the internet—srgb”. In: *Color and imaging conference*. Bd. 4. 1996, S. 238–245.

[54] Phil Green, Hrsg. *Fundamentals and applications of colour engineering*. Wiley-SID series in display technology. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2024. ISBN: 9781119827214. URL: https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=3701447.

[55] Anna Heimsath u. a. “Specular reflectance of soiled glass mirrors – Study on the impact of incidence angles”. In: AIP Conference Proceedings. Author(s), 2016, S. 130009. DOI: 10.1063/1.4949219.

[56] Jan Schmitt. “Simulation einer bildbasierten Verschmutzungsmessung von CSP-Anlagen bei variabler Himmelhelligkeitsverteilung”. Master Thesis. 2024.

[57] R. Perez, R. Seals und J. Michalsky. “All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation”. In: *Solar Energy* 50.3 (1993), S. 235–245. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90017-I.

[58] Craig F. Bohren und Donald R. Huffman. *Absorption and scattering of light by small particles*. A Wiley-Interscience publication. New York: Wiley-CH Verlag GmbH & Co KGaA, 2004. ISBN: 9783527618156. DOI: 10.1002/9783527618156. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527618156.

[59] Anna Heimsath und Peter Nitz. “The effect of soiling on the reflectance of solar reflector materials - Model for prediction of incidence angle dependent reflectance and attenuation due to dust deposition”. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 195 (2019), S. 258–268. ISSN: 09270248. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.03.015.

[60] Christian Mätzler. *MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption*. Bern, 2002.

[61] Wei Ji und Peter A. Rhodes. “Spectral color characterization of digital cameras: a review”. In: *Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM) 2011: Optoelectronic Sensing and Imaging*. Hrsg. von Pierre Galarneau, Xu Liu und Pengcheng Li. SPIE Proceedings. SPIE, 2012, 83320A. DOI: 10.1117/12.915768.

[62] CIE JTC 2. *CIE 018:2019 The Basis of Physical Photometry, 3rd Edition*. DOI: 10.25039/TR.018.2019.

[63] *CIE 1931 colour-matching functions, 2 degree observer*. 2019. DOI: 10.25039/CIE.DS.xvudnb9b.

[64] ITU-R. *Recommendation ITU-R BT.2020-2: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange*. 2015.

[65] Zoltán Kolláth u. a. “Introducing the dark sky unit for multi-spectral measurement of the night sky quality with commercial digital cameras”. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 253 (2020), S. 107162. ISSN: 00224073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107162.

[66] G03 Committee. *Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 Tilted Surface*. West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/G0173-03R12.

[67] Ahmad Y. Al-Hasan. “A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface”. In: *Solar Energy* 63.5 (1998), S. 323–333. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/S0038-092X(98)00060-7.

[68] Tomoyuki Ishida, Ho Ando und Michikazu Fukuhara. “Estimation of complex refractive index of soil particles and its dependence on soil chemical properties”. In: *Remote Sensing of Environment* 38.3 (1991), S. 173–182. ISSN: 00344257. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90087-M.

[69] R. Wagner u. a. “Complex refractive indices of Saharan dust samples at visible and near UV wavelengths: a laboratory study”. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 12.5 (2012), S. 2491–2512. DOI: 10.5194/acp-12-2491-2012.

[70] G. W. Grams u. a. “Complex Index of Refraction of Airborne Soil Particles”. In: *Journal of Applied Meteorology* 13.4 (1974), S. 459–471. ISSN: 0021-8952. DOI: 10.1175/1520-0450(1974)013<0459:CIOROA>2.0.CO;2.