



Lehrstuhl für
Solare Komponenten

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Die vorliegende Arbeit wurde eingereicht bei:
DLR – Institut für Solarforschung, Lehrstuhl für solare Komponenten

Weiterentwicklung des optischen Strahlungsflussdichte- Messverfahrens für Solarturm-Rohrreceiver

Further development of the flux density optical
measurement method for tube receivers of solar towers

Masterarbeit

vorgestellt von:

Utami Schmidt
389157

Erstprüfer : Univ. -Prof. Dr.-Ing. Bernhard Hoffschmidt

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

Wissenschaftlicher Betreuer: Dr. rer. nat. Christian Raeder

Aachen, 10.09.2024

Kurzfassung

An einem High Performance Molten Salt Receiver (HPMS-II) im Multifokus-Solarturm Jülich wurde die Anwendung des sogenannten Scan-Verfahrens zur optischen Messung der Strahlungs-Flussdichteverteilung für ein rohrförmiges Receiverdesign erforscht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methode des Scan-Verfahrens weiterentwickelt, erprobt und bewertet. Zunächst wurden die Reflexionseigenschaften des Receivers bei Nacht gemessen, um eine optimale Kameraposition für die verschiedenen Heliostatgruppen zu finden. Danach wurden die bidirektionalen Reflexionsfunktionen (BRDF) aller Receiver-Rohre anhand des „Scan-Verfahrens“ bei Nacht und weitere notwendige Korrekturgrößen im Rahmen der üblichen Messreihen ermittelt. Dabei wurde zusätzlich der bisher nicht betrachtete richtungsabhängige Strahlungseintrag des Strahlungsschutzes auf die Rohrrückseiten simulationsgestützt berücksichtigt. Außerdem wurden die bisherigen Bild-Auswertealgorithmen in der Programmiersprache Python neu umgesetzt und erweitert. Durch die vorgenannten Schritte können die bisher vorhandenen Überbelichtungen in den aufgenommenen Bildern nahezu vollständig vermieden werden und der optisch erfasste Informationsgehalt durch eine simulative Analyse des Strahlungseintrages in die Rohrrückseiten gesteigert werden. Dadurch wird eine robuste, erweiterungsfähige und genauere Berechnung der Flussdichteverteilung für den Rohrreceiver erreicht.

Schlagerwörter: Solarturm - Konzentrierte Solarstrahlung – Rohrreceiver – Strahlungsflussdichte – BRDF – Reflexion - CMOS-Kamera – Raytracing – Fokusverschiebung – Defokussierung.

Abstract

At a High Performance Molten Salt Receiver (HPMS-II) in the Multifocal Solar Tower Jülich, the application of the so-called scan method for the optical measurement of the radiation flux density distribution for a tubular receiver design was investigated. In the course of this work, the scan method was further developed, tested, and evaluated. Initially, the reflection properties of the receiver were measured at night to find an optimal camera position for the various heliostat groups. Subsequently, the bidirectional reflexion distribution functions (BRDF) of all receiver tubes was determined using the “scan method” at night, along with other necessary correction factors within the usual measurement series. Additionally, the previously unconsidered directional radiation input of the radiation shield on the back sides of the tubes was then taken into account through simulations. Furthermore, the existing image evaluation algorithms were re-implemented and extended in the Python programming language. Through these steps, the previously existing overexposures in the captured images can be almost completely avoided, and the optically captured information content can be increased through a simulative analysis of the radiation absorbed by the backside of the receiver tubes. This results in a robust, expandable, and more accurate calculation of the flux density distribution for the tubular receiver.

Keywords: Solar tower - concentrated solar radiation - tubular receiver - radiation flux density - BRDF - reflection - CMOS camera - raytracing - focus shift - defocussing.

Danksagung

Zunächst möchte ich meinem Betreuer Herrn Dr. Christian Raeder danken für seine fachliche Beratung, die persönlichen Gespräche, seine hilfreichen Anregungen sowie die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Versuchsreihen.

Zudem möchte ich mich beim Institut für Solarforschung des DLR in Jülich insbesondere den Herren Dr. Kai Wieghardt sowie Felix Göhring für die Ermöglichung der Messreihen trotz meiner Schwangerschaft. Des Weiteren danke ich auch Herrn Volker Rasing für seine fachliche Beratung, tatkräftige Unterstützung bei den Messungen, seine konstruktiven Kritiken und Denkanstöße. Außerdem dankend hervorgehoben seien das CST-Team in Jülich : Frau Sophie Kappertz und Herr Oliver Kaufhold, die mir die reibungsfreie Umsetzung meiner Tagesmessungen ermöglichten und mich sehr tatkräftig unterstützt haben, Herr Kevin Iding für die Bereitstellung seiner Live-Skripte für die Maxibildherstellung der Nacht-Scans, die Herren Volkmar Dohmen und Stefan Schmitz für die Herstellung der Materialproben, sowie Herr Sergio Diaz Alonso für die Unterstützung bei der Nachtmessung und die fachlichen Diskussionen.

Mein Dank gilt auch den DLR-Kollegen aus Stuttgart für die unkomplizierte Bereitschaft der abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit: Herrn Konrad Busch für die Anpassungen des FEM-Modells für die Raytracing-Simulation sowie insbesondere Herrn Dr. Reiner Buck für seine große Hilfsbereitschaft, die Simulationssoftware SPRAY an die Anforderungen meiner Arbeit anzupassen bzw. zu erweitern und meine Einarbeitung in die Raytracing-Simulation zu unterstützen. Vielen Dank auch an das Team des DLR in Almeria, besonders Herrn Dr. Florian Sutter für die Vermessung der Reflexionseigenschaften der Materialproben. „Thank you soo much“ richte ich an die damalige DLR-Masterandin Frau Divin Ganapathy für die Unterstützung bei der Nachtmessung und Freundschaft während unserer Zeit beim DLR in Jülich.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt für die Übernahme der Betreuung der Arbeit Seitens der RWTH Aachen und die Teilnahmemöglichkeit an der Exkursion zum Solarturm Jülich, die als „Tür“ für meine Masterarbeit-Reise gilt.

Abseits der fachlichen Seite, möchte ich mich auch noch herzlichst bei meinen Eltern und Freunden für die Unterstützung im Alltag und aufmunternden Worte bedanken. Auch für meine liebe Mama Putri: „Remember that you drove me to university so I could submit my bachelor thesis on time? Now I know you are watching me from above and accompanying me throughout my journey“.

Zuletzt möchte ich meiner Familie danken für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre erhebliche Unterstützung auf meinem Lebensweg. Für S, I und K: „ohne euren besonderen Rückhalt könnte mein Studium nicht absolviert werden. Ihr seid meine Inspiration und mein Antrieb. Vielen lieben Dank!“.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Strahlungsphysik	3
2.1.1	Strahlungsgrößen	3
2.1.2	Raumwinkeldefinition	4
2.1.3	Strahlungseigenschaften idealer und realer Körper	4
2.1.4	Winkelabhängige Reflexion.....	5
2.1.5	Solarstrahlung	6
2.1.6	Air-Mass-Faktor.....	7
2.2	Solarthermische Turmkraftwerke	8
2.3	Messtechnik	9
2.3.1	Radiometer.....	9
2.3.2	Messung winkelabhängiger Reflexionen	10
2.3.3	Digitale Kamerasysteme.....	11
2.4	Digitale Bildverarbeitung	12
2.4.1	Eigenschaften von Grauwertbildern	13
2.4.2	Geometrische Transformation.....	13
2.5	Raytracing.....	14
3	Stand der Technik.....	15
3.1	Solkraftwerk und Heliostatfeld am DLR-Standort Jülich.....	15
3.2	HPMS-II Solarreceiver	16
3.3	Flussdichte-Messverfahren	17
3.3.1	Messung mit Radiometern.....	17
3.3.2	Optische Messung mit Kamerasystemen.....	18
3.3.3	Scan-Verfahren.....	19
4	Stand der Entwicklung des Scan-Verfahrens am HPMS-II	20
4.1	Bisherige scheinwerfergestützte Untersuchungen.....	20
4.2	Motivation zur Untersuchung alternativer Kamerapositionen.....	22
4.3	Simulative Erfassung optisch nicht detektierter Strahlungsanteile	23
4.4	Stand der Software zur Flussdichtemessung am DLR	23
4.4.1	Allgemeiner Ablauf und Auswertungsschritte	24
4.4.2	Herausforderungen für die Anwendung auf Rohrreceiver	24
5	Bildauswertung zur Berechnung der Flussdichteverteilung	25
5.1	Entzerrung.....	26

5.2	Dynamische ROI-Bestimmung.....	28
5.3	Erzeugung von gefilterten Mittelwertbildern	32
6	Materialanalyse von Receiverrohr und Strahlungsschutz	33
6.1	Messung der Reflexionseigenschaften	33
6.2	Nutzung des Strahlungsschutzes für die Intensitätsnormierung.....	35
7	Identifikation einer optimalen Kameraposition.....	36
7.1	Effiziente Identifikationsmethode	37
7.1.1	Vorab-Bewertung (qualitativ)	37
7.1.2	Bewertung mittels Einzelbildern (quantitativ).....	38
7.2	Versuchsdurchführung für die Kamera-Positionssuche.....	42
7.2.1	Kamera-Daten und Grundeinstellungen	42
7.2.2	HPMS-II Receiver – Rohrdeformationen und deren Auswirkungen	43
7.2.3	Durchgeführte Messungen	45
7.3	Bildauswertung und Ergebnisanalyse	48
7.3.1	Ergebnisse der qualitativen Bewertung	48
7.3.2	Ergebnisse der quantitativen Bewertung	48
8	Messreihen für die optische Flussdichtemessung	54
8.1	Bestimmung der Reflexionseigenschaften des Receivers.....	54
8.1.1	Durchführung des Scan-Verfahrens	54
8.1.2	Bildauswertung und Ergebnisanalyse	55
8.2	Kalibrierung mittels Fokusverschiebung.....	59
8.2.1	Durchführung der Fokusverschiebung.....	59
8.2.2	Bildauswertung und Ergebnisanalyse	60
8.3	Bestimmung der Richtungszusammensetzung	63
8.3.1	Durchführung der Defokussierung und Rohbildaufnahmen.....	64
8.3.2	Bildauswertung und Ergebnisanalyse	64
8.4	Simulative Bestimmung der Reflexionsanteile des Strahlungsschutzes.....	70
8.4.1	Verformungsanalyse des HPMS-II Receivers.....	71
8.4.2	Integration der Mess-Ergebnisse in die Raytracing-Simulation.....	73
8.4.3	Durchführung von SPRAY-Simulationsreihen	73
8.4.4	Ergebnisanalyse.....	74
8.4.5	Integration der Simulationsergebnisse in die Flussdichteberechnung	77
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Raumwinkeldefinition - Zenit- und Azimutwinkel	4
Abbildung 2.2: Einfluss der Erdatmosphäre auf das Spektrum der Solarstrahlung. Quelle: [WIK24]	7
Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau verschiedener Solarkraftwerkstypen. Quelle: [Kal13].....	9
Abbildung 2.4: Prinzipskizze eines Gardon-Radiometers. Nach [ULM03]	10
Abbildung 3.1: Skizze des Heliostatfeldes in Jülich sowie der Heliostatgruppen. Nach [ZÖL21]	15
Abbildung 3.2: Multifokusturm Jülich (Bildquelle: [Deu24]) und dort installierter HPMS-II Receiver (Bildquelle: [MAT22]).....	16
Abbildung 3.3: Prinzipskizzen der optischen Flussdichtemessung basierend auf den Reflexionen des Absorbers (links) und des Scan-Verfahrens (rechts). Quelle: [OFF18].....	19
Abbildung 4.1: Ausgewertete Scan-Aufnahmen aus [JÄG23] von (a) der Heliostatgruppe 6 und (b) der Heliostatgruppe 10	21
Abbildung 4.2: Schema der richtungsabhängigen Reflexionen des Strahlungsschutzes. Quelle: [JÄG23]	22
Abbildung 5.1: Grafische Oberfläche des Python-Programms „OFIP“	25
Abbildung 5.2: Struktur und Bestandteile des Python-Programms OFIP	26
Abbildung 5.3: Ablauf der Entzerrung von Rohbildern zur Erzeugung von Orthoskopie-Bildern	27
Abbildung 5.4: Ablauf der dynamischen ROI-Bestimmung und Mittelwertbild-Erzeugung im Überblick.....	29
Abbildung 5.5: Beispiel der Reflexionskorrektur an einem Slice	30
Abbildung 5.6: Beispiel der Bestimmung der ROI-Grenzen und ROI-Matrix	31
Abbildung 6.1: Proben und Messaufbau zur Messung der Reflexionseigenschaften	33
Abbildung 6.2: Ergebnisse der spektralen Reflexionsmessung der Strahlungsschutz-Probe 2 ..	34
Abbildung 6.3: Ergebnisse der spektralen Reflexionsmessung der Receiverrohr-Probe 1.....	34
Abbildung 6.4: Vergleich des STJ-Strahlungsschutzes mit einem Lambert'schen Target. Nach [OFF24]	35
Abbildung 6.5: Vergleich der Reflexions- und Materialeigenschaften der Strahlungsschutz- Coatings des STJ- und HPMS-II Receivers	36
Abbildung 7.1: Ausschnitte von Einzelbild Gruppe 8 aus eigener Messung (links) und MaxiBild Gruppe 8 aus [JÄG23] (rechts); Vergleich des sichtbaren Teils der Rohrvorderseiten	37

Abbildung 7.2: Skizze des vorderen Bereichs des Versuchsgeländes mit dem Variationsbereich für die Kamerapositionen	38
Abbildung 7.3: Ablauf der Bildauswertung der Einzelbilder zur Identifikation optimaler Kamerapositionen	39
Abbildung 7.4: Geometrische Zusammenhänge zur Berechnung des Raumwinkels zwischen Heliostaten, Receiver und Kamera aus den bekannten Feldkoordinaten.....	42
Abbildung 7.5: Technische Daten der für alle Versuche eingesetzten Baumer-Industriekamera	42
Abbildung 7.6: Fotos des HPMS-II Rohrreceivers bei der Montage durch MAN Energy Solutions (Bildquelle: DLR) sowie nach Installation im MFT (Bildquelle: [MAT22]).....	44
Abbildung 7.7: Reflexionen in Einzelbildern von Jäger [JÄG23] bei ähnlichen Azimut-Winkeln φ	44
Abbildung 7.8: Skizze der Auswirkungen verschiedener Rohrversätze auf Direktreflexionen des Strahlungsschutzes	45
Abbildung 7.9: Mobiles Kamerastativ auf nivellierter und eingemessener Plattform für Nachmessungen zur Identifikation optimaler Kamerapositionen	47
Abbildung 7.10: Unterschiedliche Reflexionen in Einzelbildern bei ähnlichen Azimut-Winkeln φ	49
Abbildung 7.11: Messreihen zum Einfluss des Raumwinkels auf die Reflexionen in Einzelbildern	50
Abbildung 7.12: Überblick der normierten Einzelbilder der drei vermessenen Kamerapositionen	52
Abbildung 7.13: Gegenüberstellung der drei Kamerapositionen und deren kritischste Heliostatgruppen.....	53
Abbildung 8.1: Überblick der mit OFIP berechneten Reflexionskorrektur-Matrix	58
Abbildung 8.2: Plausibilitätsprüfung der Reflexionskorrektur für ein Einzelbild des Scans von Gruppe 1 - (a): OrthoBild des MaxiBils, (b): zugehöriges Mittelwertbild, (c): Reflexionskorrekturmatrix $A_{i,1,rel}$, (d): OrthoBild des Einzelbildes, (e): zugehöriges Mittelwertbild, (f): reflexionskorrigiertes Bild	58
Abbildung 8.3: Prinzip der Korrelation von Grauwerten und Radiometerleistungen	60
Abbildung 8.4: Mittelwertbilder und reflexionskorrigierte Bilder der ersten vier Fokusverschiebungen.....	61
Abbildung 8.5: Darstellung der Auswertepositionen der Grauwerte bei der Fokusverschiebung (Bildquelle des Receivers: [MAT22])	61

Abbildung 8.6: Richtungszusammensetzung der Bestrahlung des Defokussierungs-Versuchs V2 (HS-Gruppen 3, 1, 8, 11, 6)	66
Abbildung 8.7: Flussdichteverteilungen für die Rohbilder der Defokussierungsversuche 1, 2, 4, 6 und 8.....	67
Abbildung 8.8: Vergleich der Flussdichteverteilungen für die Rohbilder der Defokussierungsversuche 2 und 8 bei Anwendung von globaler und lokaler Reflexionskorrektur	69
Abbildung 8.9: FEM-Modellkomponenten für SPRAY und Strahlungsanteile	71
Abbildung 8.10: Prinzip der Verformungsanalyse basierend auf einem orthoskopischen Bild des Receivers.....	72
Abbildung 8.11: Gemittelte und extrapolierte Messergebnisse der Materialproben von Strahlungsschutz und Receiverrohr.....	73
Abbildung 8.12: SPRAY-Simulation bei Bestrahlung durch HS-Gruppe 2 und Gegenüberstellung mit Einzelbildaufnahme bei Scheinwerferbestrahlung aus HS-Gruppe 2	75
Abbildung 8.13: SPRAY-Simulation bei Bestrahlung durch HS-Gruppe 2 und Darstellung der von den Rohrrückseiten absorbierten Flussdichte.....	76
Abbildung 9.1: Großindustrielles Solarturm-Kraftwerk Noor Energy 1 mit facettiertem Receiver- Design	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7.1: Auswahl repräsentativer Heliostat-Positionen für die Messungen zur Identifikation optimaler Kamerapositionen.....	41
Tabelle 7.2: Zusammensetzung der Skalierungsfaktoren zur Intensitätsnormierung der Einzelbilder	51
Tabelle 7.3: Quantitative Bewertung der Kameraposition 1 anhand der prozentualen Überbelichtung.....	53
Tabelle 8.1: Überblick der auf Basis von Nacht-Scans des Strahlungsschutzes ermittelten Intensitätsnormierungs-Faktoren.....	56
Tabelle 8.2: Überblick der bereinigten Radiometer-Messwerte für die jeweiligen Offset-Positionen.....	62
Tabelle 8.3: Überblick der den einzelnen Offsets zuzuordnenden und über die verschiedenen Messungen hinweg gemittelten Grauwerte, den jeweiligen Radiometern zugeordnet	63
Tabelle 8.4: Ermittelte Kalibrierfaktoren zur Umrechnung von Grauwerten in Flussdichten, bezogen auf die zugehörigen Fokusverschiebungs-Offsets und den jeweiligen Radiometern zugeordnet	63
Tabelle 8.5: Für die Defokussierungs-Versuche verwendete Heliostatgruppen	64
Tabelle 8.6: Vergleich der mittels Scan-Verfahren berechneten Flussdichten (kurz FDM) für die Rohbilder aller Defokussierungsversuche bei Anwendung von globaler und lokaler Reflexionskorrektur	69
Tabelle 8.7: Vergleich der mittels Scan-Verfahren berechneten und mittels SPRAY simulierten Strahlungsflussdichten für alle durchgeführten Defokussierungs-Versuche	74
Tabelle 8.8: Ergebnisse der SPRAY-Simulationen mit Bestrahlung durch jeweils einen Heliostaten; Analyse der von den Rohren (Komponente 1) absorbierten Leistungen und berechneten Flussdichten	77

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
<i>Griechische Großbuchstaben</i>		
Ω	sr	Raumwinkel
<i>Griechische Kleinbuchstaben</i>		
α	-	Absorptionsgrad
γ	°	Raumwinkel zwischen Strahlungsquelle, Receiver und Kamera
ϵ	-	Emissionsgrad
θ	°	Zenitwinkel
λ	nm	Wellenlänge
ρ	-	Reflexionsgrad, Reflexionskoeffizient
ρ, ρ_{rel}	-	In Kap. 8: Mittelwertbild, relatives Mittelwertbild
$\rho_{\lambda,h}$	-	spektraler, hemisphärischer Reflexionsgrad
σ	W/m ² K ⁴	Stefan-Boltzmann-Konstante
τ	-	Transmissionsgrad
φ	°	Azimutwinkel
ϕ	W	Strahlungsfluss
ϕ_{abs}	W	absorbierter Strahlungsfluss
ϕ_i	W	eingehender Strahlungsfluss
ϕ_r	W	reflektierter Strahlungsfluss
ϕ_{trans}	W	transmittierter Strahlungsfluss
<i>Lateinische Großbuchstaben</i>		
$A_{1 2}$	m ²	Fläche (1: ausstrahlend, 2: bestrahlt)
E	W/m ²	Einstrahlungsstärke, Flussdichte
E_0	W/m ²	Solarkonstante
E_{glob}	W/m ²	Reduzierte, die Erde erreichende Solarstrahlung
E_{diff}	W/m ²	Diffuse Solarstrahlung
H	-	Transformationsmatrix
I	W/sr	Strahlstärke
L	W/m ² sr	Strahldichte
M	W/m ²	Ausstrahlungsstärke
M	-	Kap. 8: Anzahl aller ROI (Pixel) in einem Mittelwertbild
N	-	Kap. 8: Anzahl aller vermessenen Heliostatgruppen

P	W	emittierte Strahlungsleistung
Q	J	Strahlungsenergie
U_{th}	V	Seebeck-Spannung
<i>Lateinische Kleinbuchstaben</i>		
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
g	-	Grauwertbild (Rohbilder und entzerrte Bilder)
g_i	-	Grauwert
\bar{g}_*	-	Gemittelter Grauwert (bezogen auf *)
$g_{Schutz Target}$	-	Mittlerer Grauwert Strahlungsschutz Lambert'sches Target
h	Js	Planck'sches Wirkungsquantum
i	-	Index eines Pixels bzw. eines Bildsegments
j	-	Index eines Heliostaten bzw. einer Bestrahlungsrichtung
k	-	Kameraspezifischer Faktor
k	J/K	Boltzmann-Konstante
t	s	Zeit
t_{bel}	μs ms	Belichtungszeit (meist angegeben in Mikro- bzw. Millisekunden)

Abkürzung	Beschreibung
AM	Air Mass factor (engl.): Luftmassenfaktor
AR	Aspect Ratio (engl.): Höhen-/Breitenverhältnis eines Bildes
CCD	Charge-Coupled Device (engl.): Ladungsgekoppeltes Bauteil
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor (engl.): komplementärer Metalloxid-Halbleiter
CSP	Concentrating Solar Power (engl.): Konzentrierende Solarenergie
DF	Defokussierung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNI	Direct Normal Irradiance (engl.): Direktnormalstrahlung; Einheit: W/m ²
FDM	Flux Density Measurement (engl.): Flussdichte-Messung bzw. Ermittlung (hier: mit Anwendung des Scan-Verfahrens berechnete Flussdichteverteilung)
FEM	Finite Elemente Methode
FV	Fokusverschiebung
fps	Frames per Second (engl.): Bilder pro Sekunde (hier: Bildaufnahmefrequenz)
HeliOS	Heliostat Operating System (engl.): Heliostat-Betriebssystem zur individuellen Ansteuerung jedes Heliostaten
HG	Heliostat-Gruppe
HS, HS-ID	Heliostat, Heliostat-ID bzw. Heliostat-Adresse

MFT	Multifokusturm
ND	Neutraldichte (-Filter)
HPMS	High-Performance Molten Salt (engl.): Hochleistungs-Flüssigsalz
OFIP	Optical Flux density measurement Image Processor (engl.): Optische Flussdichtemessungs-Bildverarbeitung
ROI	Region of Interest (engl.): relevanter/ausgewählter Bildbereich
SALSA	Salzschmelzespeicher-Großanlage
SPRAY	Solar Power Raytracing Tool
STJ	Solar Tower Jülich (engl.): Solarturm Jülich

Kurzwort	Bedeutung
Aim Point	Zielpunkt auf dem Receiver in der DLR-Steuerungssoftware HeliOS, auf den jeder Heliostat ausgerichtet werden kann
ConvexHull	Binäres Bild mit innenliegendem weißen Receiver-Umriss auf schwarzem Hintergrund
MaxiBild	Aus mehreren Einzelbildern zusammengesetztes Bild, bei dem jeder Pixel dem Maximum aller Pixel der Einzelbilder besteht
OrthoBild	Orthoskopisches Bild (Ergebnisbild nach Entzerrung)
OrthoRef	Orthoskopische Referenz (Kontur des Receivers, Zielform der Entzerrung)
Slice	(Bild-)Ausschnitt, der über Bildkoordinaten des Ausgangsbildes definiert wird
gap-Reflexion	Durch Strahlungsschutz verursachte Reflexion in der Bildaufnahme, die im Spalt (engl. gap) zwischen zwei Absorber-Rohren liegt

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Bedeutung der CO₂-neutralen Energiegewinnung hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen, insbesondere angesichts der immer gravierenderen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Probleme, die durch den Klimawandel verursacht werden. Der Klimawandel führt zu extremen Wetterereignissen, die die Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft stark belasten. Laut dem Statistischen Bundesamt haben die Schäden durch Naturkatastrophen in Europa in den letzten Jahren signifikant zugenommen. In 2021 und 2022 lagen diese Kosten bei 133 € bzw. 117 € pro Kopf und damit mehr als drei Mal so hoch wie im langjährigen Mittel [EUR24]. Diese Entwicklungen unterstreichen die Dringlichkeit, nachhaltige und CO₂-neutrale Energiequellen zu fördern. Erneuerbare Energien sind jedoch oft wetterabhängig und können daher zu Schwankungen in der Stromerzeugung führen. Um diese auszugleichen und die Netzstabilität zu gewährleisten, sind fortschrittliche Energiespeicherlösungen und intelligente Netzmanagementsysteme erforderlich. Eine vielversprechende Technologie in diesem Kontext sind konzentrierende Solarkraftwerke (CSP, die Spiegel nutzen, um Sonnenlicht zu bündeln und damit Wärme zu erzeugen, die dann zur Stromproduktion verwendet wird. Sie ermöglichen es durch angeschlossene Speichersysteme, überschüssige thermische Energie zu speichern und bei Bedarf wieder ins Netz einzuspeisen. Dies macht CSP zu einer stabilen und zuverlässigen Energiequelle, was ein entscheidender Aspekt bei der Integration erneuerbarer Energien in den Energiemix ist [DEU21]. In Bezug auf die Kosten pro Kilowatt Leistung sind – in Regionen mit hoher Solarstrahlungsintensität – CSP-Anlagen mit Wärmespeichern im Vergleich zu Offshore-Windkraftanlagen wettbewerbsfähig. Laut einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) liegen die Stromgestehungskosten der darin untersuchten CSP-Anlagen zwischen 6 -10 ct/kWh, während die Kosten für Offshore-Windenergieanlagen zwischen 7 - 10 ct/kWh lagen [FRA21] Diese Zahlen verdeutlichen, dass CSP-Anlagen eine kosteneffiziente Ergänzung zu anderen erneuerbaren Energien darstellen können. Eine Variante von CSP Anlagen sind Solarturmkraftwerke, bei denen das Sonnenlicht über eine Vielzahl von Spiegeln, sogenannten Heliostaten, in einen Punkt auf der Spitze eines Turms konzentriert werden. Dort wird die Solarstrahlung von einem als Receiver bezeichneten Strahlungsempfänger in thermische Energie umgewandelt und einem Stromerzeugungsprozess zugeführt. Um die Effizienz und Zuverlässigkeit von Solarturm-Kraftwerken zu steigern, sind genauere Aussagen zu den Einzelwirkungsgraden von Heliostatfeld, Receiver und dem stromgewinnenden Prozessbereich des Kraftwerks von großer Bedeutung. Eine entscheidende Größe dabei ist die Strahlungsflussdichte auf der Oberfläche des Receivers. Mit Kenntnis dieser Strahlungsflussdichte lassen sich Rückschlüsse auf die Effizienz der Energieübertragung und -umwandlung im Heliostatenfeld und den Receiver ziehen. Eine kontinuierliche Überwachung der aktuellen Strahlungsflussdichte des Receivers ermöglicht eine Beurteilung des momentanen Wirkungsgrades des Receivers, um letztlich den Kraftwerksbetrieb zu optimieren.

Zur Messung der Strahlungsflussdichte sind in der Vergangenheit verschiedenste Verfahren entwickelt worden, deren industrielle Tauglichkeit jedoch in vielen Fällen noch ungeklärt ist. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat daher in den vergangenen Jahren ein optisches Flussdichte-Messverfahren intensiv erforscht, das die Reflexionen des Receivers mittels Kamerasystemen erfasst, um auf die Flussdichte schließen zu können. Am Standort Jülich des DLR wurde daraus ein patentiertes, sogenanntes „Scan-Verfahren“ entwickelt, das bereits an verschiedenen Receiver-Bauformen erprobt wurde. Im Multifokusturm (MFT) in Jülich

befindet sich ein Salzschnmelze-Rohrreceiver, der als High Performance Molten Salt Receiver (HPMS-II) bezeichnet wird. An diesem Receiver wurde die Anwendung des Scan-Verfahrens für ein rohrförmiges Receiverdesign erforscht und sukzessive weiterentwickelt. In der jüngsten Vergangenheit lag die Weiterentwicklung des Scan-Verfahrens für rohrförmige Receiver im Fokus, es konnten jedoch noch nicht alle störenden Messartefakte beseitigt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll daher weiteres Optimierungspotential des Scan-Verfahrens am HPMS-II Rohrreceiver untersucht werden.

Zielsetzung dieser Arbeit

Die Ziele dieser Arbeit sind die Reduzierung ungewollter Messartefakte und Optimierungen hinsichtlich der Messhardware und Auswertungs-Software, um die Genauigkeit der optischen Flussdichtemessung mittels Scan-Verfahren für Rohrreceiver zu steigern und die Auswertung praxistauglicher zu machen. Die im Rahmen dieser Arbeit adressierten Aspekte bezüglich der Messmethodik und Bildauswertungs-Prozesskette lauten:

- Reduktion der Messartefakte durch die Entwicklung einer effizienten Identifikationsmethode optimaler Kamerapositionen für Rohrreceiver
- Durchführung der für die Flussdichteberechnung nötigen Tages- und Nachtmessungen mit der optimierten Kameraposition
- Umsetzung der nötigen Bildauswertungs-Schritte in einer einfach erweiterbaren Bildauswertungs-Software in der Programmiersprache Python
- Entwicklung einer neuen und robusteren Methode zur Bildverzerrung und dynamische Bestimmung der auszuwertenden Bildsegmente
- Simulationsgestützte Quantifizierung des Strahlungseintrags in die Rohrrückseiten

Nach der Erläuterung einiger Grundlagen in Kap. 2 und des relevanten Standes der Technik in Kap. 3 wird in Kap. 4 der aktuelle Stand der Entwicklung des Scan-Verfahrens am HPMS-II Receiver analysiert und mögliche Verbesserungsmaßnahmen identifiziert. In Kap. 5 wird zunächst die entwickelte Python-Software zur Bildauswertung vorgestellt, da diese bei den Ergebnisanalysen der darauffolgenden Kapitel genutzt wurde. Es wird im Detail auf die Bildverzerrung, die dynamische Bestimmung der Bildsegmente sowie die Berechnung der daraus abgeleiteten Mittelwertbilder eingegangen. In Kap. 6 wird zunächst eine Materialanalyse des Strahlungsschutzes und der Receiverrohre vorgestellt und diskutiert, bevor in Kap. 7 die Methode zur effizienten Identifikation optimaler Kamerapositionen erläutert und die Ergebnisse diskutiert werden. Im Kap. 8 erfolgt schließlich die Durchführung und Ergebnisanalyse der Versuchsreihen für die Flussdichteberechnung mittels Scan-Verfahren. Es werden hier zunächst die Reflexionseigenschaften anhand von Scan-Messungen bei Nacht ermittelt. Anschließend wird die Kalibrierung mittels Fokusverschiebung durchgeführt, um eine spätere Umrechnung von Grauwerten der aufgenommenen Bilder in Flussdichten zu ermöglichen. Es folgen die Defokussierungs-Messungen zur Bestimmung der Richtungszusammensetzung der Strahlung. In diesem Abschnitt werden auch die Flussdichteverteilungen für die aufgenommenen Rohbilder berechnet und die Ergebnisse kritisch diskutiert. Das Kap. 8 schließt mit der Vorstellung der durchgeführten Raytracing-Simulationen zur Analyse der Strahlungsanteile, die durch Reflexionen des Strahlungsschutzes von hinten in die Receiverrohre eintreten, sowie einem Vorschlag zur Integration dieser Erkenntnisse in die Flussdichte-Berechnung. Die Arbeit schließt mit einer kurzen Zusammenfassung und einem Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel enthält die Grundlagen, die für das Verständnis dieser Arbeit erforderlich sind. Zu diesen zählen Kennzahlen und Prinzipien der Strahlungsphysik sowie die Konstruktion und Funktionsweise von Solarturmanlagen. Darüber hinaus werden wichtige Eigenschaften der genutzten Kamerasysteme und Aspekte der digitalen Bildverarbeitung behandelt.

2.1 Strahlungsphysik

Das Wirkprinzip von CSP-Kraftwerken (Concentrating Solar Power (engl.): Konzentrierende Solarkraft) basiert auf der Absorption elektromagnetischer Wellen, die von der Sonne emittiert werden, um diese in Wärme und elektrische Energie umzuwandeln. Ein Grundverständnis der Strahlungsphysik ist für die Erläuterung der damit verbundenen Prozesse wichtig. Die folgenden Ausführungen stützen sich, sofern nicht anders angegeben, auf das Standardwerk von Baehr et al. [BAE19], das vertiefend herangezogen werden kann.

2.1.1 Strahlungsgrößen

Die Strahlungsgrößen solarer Strahlung sind von zentraler Bedeutung für das Verständnis und die Anwendung von solaren Kraftwerkstechnologien. Die wesentliche Ausgangsgröße in diesem Kontext ist die Strahlungsenergie Q . Dies ist die Energie, die durch elektromagnetische Strahlung übertragen wird. Sie wird in Joule (J) gemessen und ist das Produkt aus dem Strahlungsfluss ϕ und der Zeit t . Mathematisch lässt sich der **Strahlungsfluss** daher wie folgt ausdrücken:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}] \quad (2.1)$$

Bezieht man den Strahlungsfluss auf eine Fläche, erhält man entweder die Ausstrahlungsstärke M oder die Bestrahlungsstärke E , je nach Betrachtungsrichtung des Strahlungsflusses. Die im Kontext dieser Arbeit relevante Größe ist die Bestrahlungsstärke, die im gängigen Sprachgebrauch des CSP-Bereichs auch als **Strahlungsflussdichte** bezeichnet wird. Sie setzt den eingehenden Strahlungsfluss ϕ_i in Relation zur bestrahlten Oberfläche A_2 :

$$E = \frac{\phi_i}{A_2} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.2)$$

Die vorgenannten Strahlungsgrößen sind ungerichtet bzw. hemisphärisch definiert. Durch den Zusatz des Index Ω können sie als gerichtete Größen in differentieller Form repräsentiert werden. Aus Gl. (2.2) ergibt sich beispielsweise die gerichtete Einstrahlungsstärke $E_\Omega = dE/d\Omega$.

Das Symbol Ω stellt dabei den Raumwinkel dar, der in Steradianen (sr) angegeben wird. Um den Strahlungsfluss gerichtet für einen Raumwinkel anzugeben, wird die **Strahlstärke** $I = d\phi/d\Omega$ (W/sr) verwendet. Bezieht man die Strahlstärke hingegen auf die Querschnittsfläche in Richtung der Ein- oder Abstrahlung, erhält man die **Strahldichte** L :

$$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}} \right] \quad (2.3)$$

2.1.2 Raumwinkeldefinition

Eine Definition von Raumwinkeln ist für den Umgang mit Strahlungsgrößen sinnvoll. Raumwinkel sind das dreidimensionale Gegenstück zum zweidimensionalen Winkel in der Ebene. Um den Raumwinkel vollständig zu beschreiben, sind zwei Winkel notwendig: der **Azimutwinkel** und der **Zenitwinkel**. Der Azimutwinkel φ ist der Winkel zwischen der Nordrichtung und der Projektion eines betrachteten Punktes P auf die horizontale Ebene. Er wird im Uhrzeigersinn von Norden aus gemessen und kann Werte zwischen 0° und 360° annehmen. Der Zenitwinkel θ ist der Winkel zwischen der Lotrichtung (Zenit) und der Richtung zum betrachteten Punkt P . Er wird von der Vertikalen aus gemessen und kann Werte zwischen 0° (direkt über dem Beobachter) und 90° (Horizont) annehmen. Dies ist in Abbildung 2.1 veranschaulicht. [TOR03]

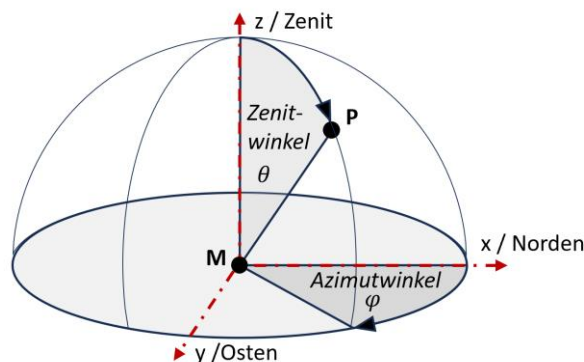


Abbildung 2.1: Raumwinkeldefinition - Zenit- und Azimutwinkel

2.1.3 Strahlungseigenschaften idealer und realer Körper

Die Strahlungseigenschaften von Materialien sind ein zentrales Thema in der Physik und Technik, insbesondere auch für die Solartechnik. Ideale und reale Körper unterscheiden sich erheblich in ihrem Verhalten gegenüber elektromagnetischer Strahlung.

Ideale Körper: Der Schwarze Körper

Ein idealer Körper in der Strahlungsphysik ist der sogenannte Schwarze Körper. Ein Schwarzer Körper ist ein theoretisches Konstrukt, das alle auftreffende elektromagnetische Strahlung unabhängig von der Wellenlänge vollständig absorbiert. Dies bedeutet, dass ein Schwarzer Körper keine Strahlung reflektiert oder durchlässt. Die Strahlung, die ein Schwarzer Körper emittiert, hängt ausschließlich von seiner Temperatur ab und folgt dem Planck'schen Strahlungsgesetz. Dieses Gesetz beschreibt die spektrale Verteilung der Strahlungsintensität eines Schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Temperatur T :

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.4)$$

$I(\lambda, T)$: spektrale Strahlungsintensität,
 h : Planck'sches Wirkungsquantum, c : Lichtgeschwindigkeit
 λ : Wellenlänge, k : Boltzmann-Konstante

Die Sonne wird als Schwarzer Körper angesehen, stellt also eine ideale Wärmestrahlungsquelle dar, die elektromagnetische Wellen in alle Raumrichtungen aussendet. Die gesamte emittierte

Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers kann über das Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnet werden, das für eine Bezugsfläche A_1 die gesamte emittierte Strahlungsleistung P eines Schwarzen Körpers in Abhängigkeit der Temperatur beschreibt:

$$P = \sigma A_1 T^4 \quad (2.5)$$

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante ($5.6034 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$)

Reale Körper: Emissions- und Absorptionsverhalten

Reale Körper weichen von diesem idealen Verhalten ab. Sie absorbieren, reflektieren und emittieren Strahlung in Abhängigkeit von ihrer Materialzusammensetzung, Oberflächenbeschaffenheit und Temperatur. Das Emissionsvermögen eines realen Körpers wird durch den Emissionsgrad ϵ beschrieben, der das Verhältnis der emittierten Strahlung eines realen Körpers zur Strahlung eines Schwarzen Körpers gleicher Temperatur angibt:

$$\epsilon = P_{real} / P_{schwarz} \quad (2.6)$$

Demnach verhält sich ein Körper mit einem Emissionsgrad von 1 wie ein Schwarzer Körper, während ein Körper mit einem Emissionsgrad von 0 keine Strahlung emittiert.

Strahlungseigenschaften realer Materialien

Reale Materialien zeigen eine Vielzahl von Strahlungseigenschaften, die von verschiedenen Faktoren abhängen. Drei wichtige Strahlungsgrößen stehen dabei in dem einfachen Zusammenhang, dass ihre Summe stets eins ergibt:

$$\alpha = \frac{\phi_{abs}}{\phi_i}; \rho = \frac{\phi_r}{\phi_i}; \tau = \frac{\phi_{trans}}{\phi_i}; \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.7)$$

Dabei ist α der Absorptionsgrad, ρ der Reflexionsgrad sowie τ der Transmissionsgrad. Der absorbierte Teil der Strahlung führt zur Erwärmung des Körpers, der Transmissionsanteil durchdringt das Material ungehindert, und der reflektierte Anteil wird materialabhängig wieder abgestrahlt. Für opake Materialien entfällt der Transmissionsanteil, wodurch sich die Relation in G. (2.7) entsprechend zu $\alpha + \rho = 1$ vereinfacht. Für das Reflexionsverhalten gibt es zwei Grenzfälle: Einerseits die spiegelnde Reflexion, bei der Strahlungseintritts- und -austrittswinkel gleich sind, andererseits die diffuse Reflexion, die unabhängig vom Eintrittswinkel hemisphärisch austritt. Ein bekanntes rein diffuses Reflexionsmodell wird als **Lambert'scher Körper** bezeichnet. Reflexionen realer Körper sind hingegen stets winkelabhängig.

2.1.4 Winkelabhängige Reflexion

Reflexionen realer Körper sind sowohl von der Bestrahlungsrichtung als auch von der Abstrahlungsrichtung abhängig. Dieses winkelanhängige Reflexionsverhalten kann durch die sogenannte Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion f_r (engl: Bi-Directional Reflexion Distribution Function, BRDF) nach Nicodemus et. al. [NIC77], vereinfacht ohne Wellenlängen- und Temperaturabhängigkeit, wie folgt beschrieben werden:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dL_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\Omega_i} \quad (2.8)$$

Sie stellt also das Verhältnis der reflektierten Strahldichte L_r zur eingehenden Bestrahlungsstärke E_i bzw. Strahldichte L_i dar.

Bedeutung der BRDF für die solare Strahlung

Im Kontext der solaren Strahlung ist die BRDF entscheidend, um zu verstehen, wie Sonnenlicht von verschiedenen Oberflächen reflektiert wird. Dies ist besonders wichtig für die Effizienz von Solarkraftwerken, da die Menge und Richtung der reflektierten Strahlung die Leistung des Kraftwerks beeinflussen kann. Oberflächen mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften können die Menge an nutzbarer Solarenergie erheblich variieren lassen. In der Solartechnik wird die BRDF verwendet, um die Reflexionseigenschaften von Materialien zu modellieren, die in Solarkollektoren oder auch zum Strahlungsschutz verwendet werden. Materialien mit einer hohen diffusen Reflexion können das Licht gleichmäßiger verteilen und so die Effizienz der Energieerzeugung verbessern. Im Gegensatz dazu sind spiegelnde Oberflächen, die das Licht in spezifische Richtungen lenken können, essenziell für konzentrierende Solarkraftwerke.

2.1.5 Solarstrahlung

Die Solarstrahlung ist die von der Sonne ausgesandte elektromagnetische Strahlung, die eine zentrale Rolle für zahlreiche technologische Anwendungen spielt. Um die physikalischen Grundlagen der Solarstrahlung zu verstehen, ist es wichtig, die Prozesse in der Sonne, das Spektrum der Strahlung und die Wechselwirkungen mit der Erdatmosphäre zu betrachten.

Entstehung der Solarstrahlung

Die Solarstrahlung entsteht durch Kernfusionsprozesse im Inneren der Sonne. Dort verschmelzen Wasserstoffkerne (Protonen) zu Heliumkernen unter enormer Energiefreisetzung. Diese Energie wird in Form von elektromagnetischer Strahlung und Teilchenstrahlung abgegeben. Die freigesetzte Energie wandert durch die verschiedenen Schichten der Sonne, bis sie schließlich die Photosphäre erreicht, die sichtbare Oberfläche der Sonne. Hier beträgt die Temperatur etwa 5.776 Grad Kelvin. Die Strahlung, die von der Photosphäre abgegeben wird, bildet ein kontinuierliches Spektrum von ultravioletter bis hin zu infraroter Strahlung.

Spektrum der Solarstrahlung

Die spektrale Verteilung der Strahlungsintensität eines Schwarzen Körpers wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben (vgl. Gl. (2.4)). Das Sonnenspektrum kann näherungsweise als das eines Schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von etwa 5.776 K beschrieben werden. Der größte Teil der Strahlung liegt im Bereich des sichtbaren Lichts, bei Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm, wobei das Maximum der spektralen Intensität bei etwa 500 nm (blau-grünes Licht) liegt.

Solarkonstante

Die Solarkonstante E_0 ist ein Maß für die mittlere extraterrestrische Bestrahlungsstärke der Sonne. Sie beträgt etwa 1361 W/m^2 und repräsentiert die Menge an solarer Energie, die senkrecht zur Strahlrichtung auf die Erde trifft, ohne den Einfluss der Atmosphäre. Die Solarkonstante ist ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Energieeinstrahlung auf die Erdoberfläche.

Wechselwirkungen mit der Erdatmosphäre

Die Solarstrahlung durchläuft auf ihrem Weg zur Erdoberfläche die Erdatmosphäre, wo sie verschiedenen Wechselwirkungen unterliegt. Diese Wechselwirkungen umfassen Absorption, Streuung und Reflexion. Die Atmosphäre wirkt als Filter, der bestimmte Wellenlängenbereiche der Strahlung stärker dämpft als andere:

- **Absorption:** Verschiedene Gase in der Atmosphäre, wie Ozon, Wasserdampf und Kohlendioxid, absorbieren spezifische Wellenlängen der Solarstrahlung.
- **Streuung:** Die Streuung der Solarstrahlung durch Moleküle und Aerosole in der Atmosphäre führt zur Diffusion des Lichts.
- **Reflexion:** Ein Teil der Solarstrahlung wird von der Erdoberfläche und den Wolken reflektiert (abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche und dem Sonnenstand).

Das Spektrum der Solarstrahlung im Weltall unterscheidet sich daher vom Spektrum auf der Erdoberfläche. Eine vergleichende Darstellung ist in Abbildung 2.2 gezeigt. [GLA24]

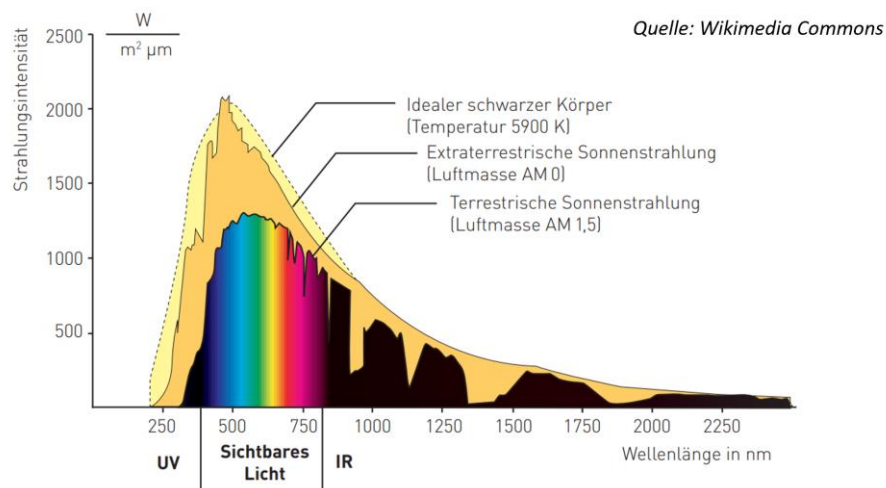


Abbildung 2.2: Einfluss der Erdatmosphäre auf das Spektrum der Solarstrahlung. Quelle: [WIK24]

Die durch die atmosphärischen Einflüsse reduzierte Solarstrahlung E_{glob} , die auf der Erdoberfläche ankommt, wird in Direktnormalstrahlung DNI (Direct Normal Irradiance (engl.)) und Diffusstrahlung E_{diff} unterschieden, die in folgendem Zusammenhang stehen, der vom Zenitwinkel θ beeinflusst wird:

$$E_{glob} = DNI \cdot \cos \theta + E_{diff} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.9)$$

Die Direktnormalstrahlung beschreibt die Menge der Sonnenstrahlung, die direkt auf eine senkrechte Fläche trifft. Diese Messgröße ist entscheidend für die aktuell erreichbare Leistung eines solarthermischen Kraftwerks. DNI wird in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) gemessen und umfasst nur die direkte Sonnenstrahlung, ohne diffuse Strahlungsanteile. Die Messung erfolgt mit einem direkt auf die Sonne ausgerichteten Pyrheliometer.

2.1.6 Air-Mass-Faktor

Die atmosphärischen Bedingungen, wie Aerosole, Wasserdampf und Ozon, beeinflussen die Strahlung durch Streuung und Absorption. Diese Effekte werden durch den Luftmassenfaktor AM (Air Mass Factor (engl.)) beschrieben, der die optische Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre angibt. Der Air Mass Faktor $AM = 1/\cos(\theta)$ wird als Verhältnis der tatsächlichen Weglänge des Lichts durch die Atmosphäre zur kürzesten möglichen Weglänge (wenn die Sonne direkt über dem Beobachter steht) definiert und nutzt den Zenitwinkel θ (vgl. Abbildung 2.1).

Definition und Bedeutung

AM0 beschreibt die solare Strahlung im Weltraum, bevor sie die Erdatmosphäre durchquert. Diese Strahlung wird auch als extraterrestrische Strahlung bezeichnet.

AM1 entspricht der solaren Strahlung, die senkrecht auf die Erdoberfläche trifft, wenn die Sonne im Zenit steht (direkt über dem Beobachter). Hierbei durchquert das Licht die Atmosphäre auf kürzestem Weg.

AM1.5 ist ein gebräuchlicher Standardwert in der Solartechnik und entspricht einem Sonnenstand von etwa $48,2^\circ$ über dem Horizont. Hierbei legt das Licht die 1.5-fache Strecke durch die Atmosphäre zurück im Vergleich zu *AM0*. Dieser Wert wird oft angegeben, da er repräsentative Bedingungen für viele geografische Standorte darstellt und ist auch in Abbildung 2.2 dargestellt.

Der Air Mass Faktor beeinflusst die Intensität und das Spektrum der solaren Strahlung, die die Erdoberfläche erreicht. Bei höheren AM-Werten wird mehr Strahlung durch die Atmosphäre gestreut und absorbiert, was zu einer geringeren Intensität und einer Veränderung des Spektrums führt. Mit steigendem AM verschiebt sich das Maximum des Strahlungsspektrums zu größeren Wellenlängen.

2.2 Solarthermische Turmkraftwerke

In CSP-Anlagen wird die solare Strahlung durch Spiegel konzentriert, um hohe Temperaturen zu erzeugen, die dann zur Stromerzeugung genutzt werden. Je nach Art der Fokussierung werden linienfokussierende und punktfokussierende Systeme unterschieden. Parabolrinnen-Kollektoren zählen zu den linienfokussierenden Systemen, wohingegen Solarturmanlagen zu den punktfokussierenden Anlagen zählen, auf die im Folgenden genauer eingegangen wird. Solarthermische Turmkraftwerke, auch Solarturmkraftwerke genannt, bestehen im Kern aus drei Bereichen: den Konzentratoren, dem Empfänger/Umwandler, sowie dem Prozessbereich.

Konzentratoren

Dieser Bereich besteht im Fall von Turmkraftwerken aus einer großen Anzahl von Spiegeln, die als Heliostate bezeichnet werden. Diese sind so angeordnet und ausgerichtet, dass sie das Sonnenlicht auf einen Strahlungsempfänger an der Spitze eines Turms fokussieren. Je nach Ausführung sind die Spiegel flach oder gewölbt, und können auch aus einzelnen Facetten bestehen, um eine stärkere Strahlungskonzentration auf dem Empfänger zu erreichen. Der Bereich der Konzentratoren wird auch Heliostatfeld genannt und ist bei Kraftwerken in Äquatornähe meist ringförmig um den Turm angeordnet. In den nördlichen bzw. südlichen Hemisphären sind die Heliostatfelder meist einseitig zum Turm ausgerichtet, was mit der vorwiegenden Winkelstellung und Trajektorie der Sonne einhergeht. In der Nordhalbkugel werden die Heliostatfelder i.d.R. nördlich des Turms positioniert, man spricht dann von Nordfeldern. Die einzelnen Heliostate werden zweiachsig der Sonnenbewegung nachgeführt, um den Strahlungsfokus auf dem Empfangsbereich des Kraftwerks zu halten (*Tracking*). Bekannte Störgrößen und genutzte Begriffe sind die Verschattung von Heliostaten (*Shading*), die Blockierung der Strahlung zwischen Heliostat und Empfänger (*Blocking*) und reflektierte Strahlung, die den Empfänger verfehlt (*Spillage*).

Empfänger/Umwandler

Der Empfänger der konzentrierten Strahlung wird als **Receiver** bezeichnet und besteht aus

einem Aufbau, in dem ein strahlungsabsorbierendes Element (allgemein als **Absorber** bezeichnet) die eintretende Strahlung absorbiert und die entstehende Wärmestrahlung an ein Prozessmedium abgibt. Es gibt eine Vielzahl an Receiverarten und eingesetzten Medien, am weitesten verbreitet sind Salzschnmelzen oder Luft. Tiefergehende Informationen finden sich beispielsweise in [STI12]. Die Reflexionseigenschaften des Absorbers sind so auszulegen, dass die Absorptionsrate maximiert wird.

Prozessbereich

Der Prozessbereich besteht aus dem Energiegewinnungssystem, üblicherweise ein Wasser-Dampf-Kreislauf mit einer Turbine und einem elektrischen Generator. Das im Absorber erhitze Prozessmedium übergibt in einem Dampferzeuger thermische Energie in den Kreisprozess. Der Dampf treibt eine Turbine an, die mit einem Generator verbunden ist, um Strom zu erzeugen. Ein wesentlicher Vorteil von Flüssigsalz-Receivern ist die Möglichkeit, überschüssige Wärme in thermischen Speichern zu speichern und bei Bedarf zu nutzen, was eine kontinuierliche Stromerzeugung auch bei Nacht oder bewölktem Wetter ermöglicht [DEU21]. In Abbildung 2.3 ist der schematische Aufbau für die zuvor erwähnten Receiverarten mit Luft bzw. Salzschnmelze dargestellt.

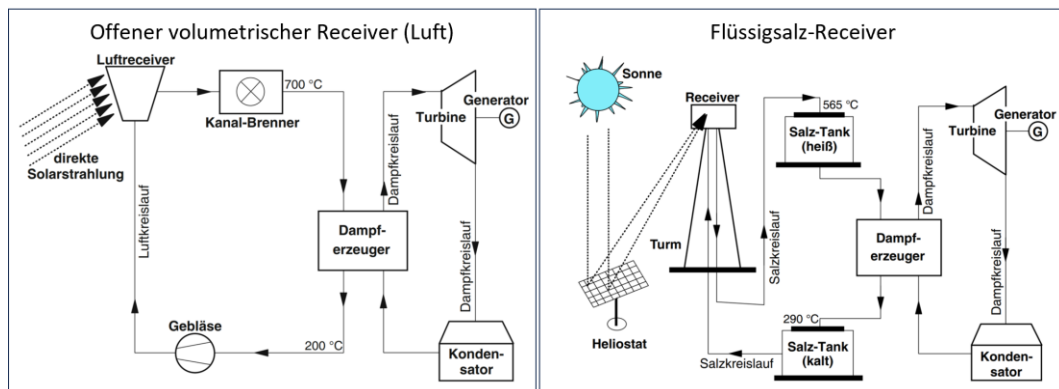


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau verschiedener Solarkraftwerkstypen. Quelle: [Kal13]

2.3 Messtechnik

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedenste Messungen durchgeführt. Hierfür sind die Grundlagen der darin eingesetzten Messtechnik von Bedeutung, auf die in den folgenden Abschnitten kurz eingegangen wird.

2.3.1 Radiometer

Es gibt verschiedene Typen von Radiometern, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien basieren, um Strahlungsleistungen zu messen: mechanische, photovoltaische und thermische Radiometer. Für den Kontext dieser Arbeit sind nur letztere relevant.

Thermische Radiometer arbeiten nach dem Wirkprinzip, eine Temperaturänderung in eine messbare physikalische Größe, wie elektrischen Widerstand oder Spannung, umzuwandeln. Ein typisches thermisches Radiometer besteht aus einem Absorber, einem Temperatursensor und einer Ausleseeinheit. Der **Absorber** ist das Material, das die einfallende Strahlung aufnimmt. Es

sollte eine hohe Absorptionsfähigkeit und eine geringe Wärmeleitfähigkeit haben, um die Temperaturänderung zu maximieren. Der **Temperatursensor** misst die Temperaturänderung des Absorbers. Häufig werden hierfür Thermoelemente oder Widerstandsthermometer genutzt. Die **Ausleseinheit** wandelt die vom Temperatursensor erfassten Daten in eine elektrische Größe um, die proportional zur Bestrahlungsstärke ist.

Eine relevante Radiometer-Bauart ist das **Gardon-Radiometer**. Es zeichnet sich durch eine sehr hohe Belastbarkeit aus und kann je nach Hersteller sehr hohe Flussdichten bis 1000 kW/m^2 messen [HUK24], ideal für die Leistungsüberwachung von Solarkraftwerken.

Aufbau und Funktionsweise

Das Gardon-Radiometer besteht aus einem wassergekühlten Kupfer-Grundkörper mit einer zylindrischen zentralen Bohrung. Auf der bestrahlten Seite ist eine geschwärzte Spezialfolie aus Konstantan (Legierung aus Kupfer, Nickel und Mangan) aufgeklebt. Diese besitzt einen näherungsweise temperaturunabhängigen elektrischen Widerstand. Durch die Kühlung des Grundkörpers entsteht ein Temperaturunterschied zwischen Radiometermitte und Rand. Zwischen einem in der Mitte des Radiometers an der Konstantanfolie angeschweißten Kupferdraht und dem erhitzten Konstantan entsteht eine Thermospannung, ebenso zwischen dem Konstantan und dem gekühlten Kupferkörper. Die daraus messbare Spannungsdifferenz wird Seebeck-Spannung U_{th} genannt und ist proportional zur Strahlungsflussdichte, sodass diese mit einem vorher ermittelten Kalibrierfaktor gemessen werden kann. Eine Prinzipskizze sowie ein Foto eines Gardon Radiometers des Herstellers Hukseflux [HUK24] sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

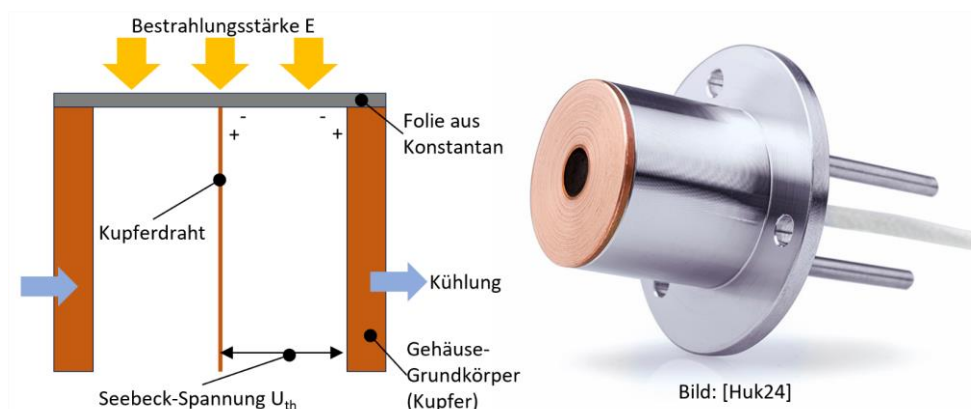


Abbildung 2.4: Prinzipskizze eines Gardon-Radiometers. Nach [ULM03]

2.3.2 Messung winkelabhängiger Reflexionen

Die winkelabhängige Reflexion lässt sich mit verschiedenen Messtechniken erfassen, wie beispielsweise Ellipsometern, Gonioreflektometern oder Spektrophotometern. Letztere kommen im Rahmen der Arbeit zum Einsatz und werden daher kurz beschrieben.

Spektrophotometer dienen der Messung der Lichtintensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge, um die Absorptions- oder Reflexionseigenschaften von Materialien zu bestimmen. Ein typisches Spektrophotometer besteht aus folgenden Hauptkomponenten: Eine **Lichtquelle** erzeugt ein breites Spektrum an Licht, das durch einen Monochromator geleitet wird. Der

Monochromator, der aus einem Prisma oder einem Beugungsgitter besteht, zerlegt das Licht in seine spektralen Komponenten und lässt nur Licht einer bestimmten Wellenlänge durch. Dieses monochromatische Licht trifft dann auf die zu untersuchende Probe, die das Licht teilweise absorbiert. Der **Detektor** misst die Intensität des durch die Probe hindurchgehenden oder von ihr reflektierten Lichts. Häufig verwendete Detektoren sind Photodioden oder Fotomultiplier. Mit der **Steuer- und Auswerteeinheit** werden die Wellenlänge des Lichts und die gemessenen Intensitäten gesteuert und verarbeitet. Spektrophotometer basieren auf der Erfassung der Lichtintensität bei verschiedenen Wellenlängen. Für eine Messung wird die Probe in den Strahlengang des monochromatischen Lichts gebracht. Der Detektor misst die Intensität des Lichts nach der Wechselwirkung mit der Probe. Die gemessenen Intensitätsspektren werden aufgezeichnet und zur Berechnung der Absorptionseigenschaften der Probe verwendet.

2.3.3 Digitale Kamerasysteme

Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Verfahren der optischen Flussdichtemessung für Rohrrezeiver erfordert den Einsatz digitaler Kamerasysteme. Bei der Digitalen Bilderfassung und -verarbeitung sind einige grundlegende Begrifflichkeiten und Eigenschaften von Bedeutung, auf die in diesem Abschnitt näher eingegangen wird.

2.3.3.1 Optische Grundlagen

Die **Blende** ist eine verstellbare Öffnung im Objektiv, die die Menge des einfallenden Lichts reguliert. Sie besteht aus mehreren Lamellen, die sich öffnen und schließen, um die Größe der Öffnung zu verändern. Die Größe der Blendenöffnung wird durch den Blendenwert (f-Wert) angegeben. Ein kleiner f-Wert (z.B. $f/1.8$) bedeutet eine große Öffnung, durch die viel Licht einfällt, während ein großer f-Wert (z.B. $f/16$) eine kleine Öffnung bedeutet. Kleine Blendenzahlen steigern die Lichtempfindlichkeit des Sensors, reduzieren aber die Schärfentiefe.

Die **Brennweite** ist der Abstand zwischen der Linse und dem Brennpunkt, an dem das Licht fokussiert wird. Sie wird in Millimetern angegeben und bestimmt den Bildausschnitt und die Vergrößerung des Motivs. Die Brennweite beeinflusst auch die Perspektive und die Schärfentiefe des Bildes. Kurze Brennweiten erzeugen eine größere Schärfentiefe, während lange Brennweiten eine geringere Schärfentiefe erzeugen.

2.3.3.2 CMOS-Kamerasensoren

In digitalen Kameras wird das Licht von einem Bildsensor erfasst, der es in elektrische Signale umwandelt. Es gibt zwei Haupttypen von Bildsensoren: CCD (Charge-Coupled Device) und CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Beide Typen bestehen aus einer Matrix von lichtempfindlichen Pixeln, die die Intensität des einfallenden Lichts messen. **CCD-Sensoren** sind bekannt für ihre hohe Bildqualität und Empfindlichkeit. Sie arbeiten, indem sie die Ladung von jedem Pixel zu einem Ausgangspunkt verschieben, wo sie in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. **CMOS-Sensoren** sind kostengünstiger und energieeffizienter als CCD-Sensoren. Jeder Pixel hat seinen eigenen Verstärker, der Lichtsignale direkt in elektrische Signale umwandelt. [CAN24]

Im Kontext dieser Arbeit wird eine Kamera verwendet, die einen CMOS-Sensor nutzt. Daher beschränken sich die folgenden Ausführungen auf diesen Sensortyp.

Grundlagen

CMOS-Sensoren nutzen den photoelektrischen Effekt, bei dem Photonen auf ein

Halbleitermaterial treffen und Elektronen in das Leitungsband heben. Diese elektrischen Ladungen sind als Strom messbar, der proportional zur Intensität des einfallenden Lichts ist. Im Gegensatz zu CCD-Sensoren, bei denen die Ladung über das gesamte Sensorarray verschoben wird, erfolgt die Signalverarbeitung bei CMOS-Sensoren direkt in jedem Pixel. [CAN24]

Aufbau

Ein CMOS-Sensor besteht aus einer Matrix von lichtempfindlichen Pixeln, die auf einem Halbleitersubstrat angeordnet sind. Jeder Pixel enthält mehrere Komponenten: Die **Photodiode** wandelt einfallendes Licht in elektrische Ladung um. **Transistoren** in jedem Pixel dienen der Verstärkung, dem Auslesen und der Weiterleitung des elektrischen Signals. Ein **Verstärker** erhöht die Signalstärke, um eine präzise Messung zu ermöglichen. Ein **Analog-Digital-Wandler** wandelt das analoge Signal schließlich in ein digitales Signal um, das von der Kameraelektronik weiterverarbeitet werden kann. [CAN24]

2.3.3.3 Kamera-Korrekturen

Digitale Kamerasysteme sind komplexe Geräte, die verschiedene Korrekturen benötigen, um die Bildqualität zu optimieren. Zu den in diesem Kontext relevanten Korrekturen gehören Shading-Korrektur und Dunkelstromkorrektur.

Shading-Korrektur

Die Shading-Korrektur, auch als Vignettierungskorrektur bekannt, zielt darauf ab, Helligkeitsunterschiede im Bild zu korrigieren, die durch ungleichmäßige Beleuchtung oder optische Verzerrungen entstehen und auch von der Blendeneinstellung abhängig sind. Diese Korrektur ist besonders wichtig bei Weitwinkelobjektiven, bei denen die Ecken des Bildes oft dunkler erscheinen als die Mitte. Einige moderne Kamerasysteme unterstützen eine interne Shading-Korrektur. Ansonsten kann diese auch manuell erfolgen, indem eine Aufnahme eines weißen Targets in ein relatives Helligkeitsverteilungsbild überführt wird und dieses multiplikativ auf die aufgenommenen Rohbilder aufgeschlagen wird:

$$B_{corr} = B_{roh} \frac{\bar{B}_{calib}}{B_{calib}}. \quad (2.10)$$

Dunkelstromkorrektur

Der Dunkelstrom ist ein unerwünschtes Signal, das durch thermische Elektronen in den Bildsensoren erzeugt wird, selbst wenn kein Licht auf den Sensor fällt. Dieser Dunkelstrom führt zu Bildrauschen, insbesondere bei langen Belichtungszeiten und hohen Temperaturen. Die Dunkelstromkorrektur erfolgt durch die Aufnahme eines Dunkelbildes (*Dark Frame*), das unter denselben Bedingungen wie das eigentliche Bild, aber unter vollständigem Ausschluss von Lichteinfall aufgenommen wird. Dieses Dunkelbild wird dann vom eigentlichen Bild subtrahiert.

$$B_{corr} = B_{roh} - B_{dark} \quad (2.11)$$

2.4 Digitale Bildverarbeitung

Die bei Anwendung des optischen Flussdichtemessung aufgenommenen Graustufen-Rohbilder müssen digital weiterverarbeitet werden. Dabei ist einerseits die Kenntnis über die

grundsätzlichen Eigenschaften von Grauwertbildern sowie der mathematische Hintergrund geometrischer Transformationen relevant.

2.4.1 Eigenschaften von Grauwertbildern

Grauwertbilder, auch als Graustufenbilder bekannt, sind Bilder, die ausschließlich aus verschiedenen Grautönen bestehen. Diese Bilder sind in vielen Bereichen der Bildverarbeitung und Computer Vision von großer Bedeutung, da sie eine vereinfachte Darstellung von Bildern bieten, die dennoch viele wichtige Informationen enthalten. Die **Auflösung** eines Grauwertbildes bezieht sich auf die Anzahl der Pixel, die das Bild enthält. Höhere Auflösungen ermöglichen detailliertere Bilder, da mehr Pixel zur Darstellung von Details zur Verfügung stehen. Die **Genauigkeit** eines Grauwertbildes hängt von der Bit-Tiefe des Kamerasensors ab, die die Anzahl der möglichen darstellbaren Graustufen pro Pixel bestimmt. Der kleinste darstellbare Wert ist stets 0. Aus der Binärpotenz mit der Bittiefe n ergibt sich der Maximalwert $g_{max} = 2^n - 1$. Bei einem 8-Bit-Grauwertbild reicht somit der Wertebereich von 0 (schwarz) bis 255 (weiß), was 256 verschiedene Graustufen ergibt. Bei einem 12-bit Grauwertbild reicht der Wertebereich bereits von 0 bis 4095, bei 16 Bit sind es 0 – 65535. Sowohl hohe Auflösungen als auch hohe Bittiefen wirken sich signifikant auf den benötigten Speicherbedarf und die Rechenleistung der Kamera während der Bildverarbeitung aus, weswegen sie nicht beliebig groß gewählt werden können.

2.4.2 Geometrische Transformation

Geometrische Transformationen sind grundlegende Operationen in der Bildverarbeitung und Computergaphik, die es ermöglichen, Objekte innerhalb eines Koordinatensystems zu verschieben, zu skalieren, zu drehen und zu spiegeln. Zu den häufigsten Transformationen gehören Translation, Rotation, Skalierung und Spiegelung. Jede dieser Transformationen kann durch eine entsprechende Transformationsmatrix beschrieben werden, die auf die Koordinaten der Punkte angewendet wird. [TUW24]

Perspektivische Transformation

Die perspektivische Transformation, auch als *Projektive Transformation* bekannt, ist eine komplexere Art der geometrischen Transformation, die verwendet wird, um die Projektion eines dreidimensionalen Objekts auf eine zweidimensionale Ebene zu modellieren. Diese Transformation berücksichtigt die Perspektive, wodurch Objekte, die weiter entfernt sind, kleiner erscheinen als solche, die näher am Betrachter liegen und ist gültig für perspektivisch verzerrte Darstellungen planarer Objekte. Mathematisch wird die perspektivische Transformation durch eine 3x3-Matrix beschrieben, die auf homogene Koordinaten angewendet wird. Die homogenen Koordinaten eines Punktes $[x \ y]$ werden durch $[x \ y \ 1]$ dargestellt. Die Transformationsmatrix H für die perspektivische Transformation hat die folgende Form:

$$H = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Die neuen Koordinaten $[x' \ y']$ nach der Transformation werden durch die Multiplikation der Matrix H mit den homogenen Koordinaten $[x \ y \ 1]$ berechnet:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}x & a_{12}y & a_{13} \\ a_{21}x & a_{22}y & a_{23} \\ a_{31}x & a_{32}y & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Um bei bekannten kartesischen Zielkoordinaten $[x' \ y']$ eine passende Transformationsmatrix zu identifizieren, werden vier Paare von Bildpunkten im verzerrten und unverzerrten Zustand benötigt. Anschließend kann aus Gl. (2.13) für jedes alle vier Bildpunktpaare ein gemeinsames, lineares Gleichungssystem gebildet werden, um die Transformation eindeutig zu bestimmen. Diese Transformation ermöglicht es, die Effekte der Perspektive in Bildern zu modellieren bzw. zu korrigieren und ist besonders nützlich in der Computergraphik und der Bildverarbeitung, um realistische Darstellungen dreidimensionaler Szenen zu erzeugen oder durch Anwendung der inversen Matrix H^{-1} Bilder zu entzerren um orthoskopische Darstellungen erhalten.

2.5 Raytracing

Raytracing (Strahlnachverfolgung) simuliert den Weg von Lichtstrahlen durch verschiedene Medien und ihre Interaktionen mit Oberflächen. Dies umfasst die Berechnung der Absorption (wie viel Licht von einem Material aufgenommen wird) und der Reflexion (wie viel Licht von der Oberfläche zurückgeworfen wird). Dazu werden mindestens eine Strahlungsquelle und ein meist dreidimensionales und geometrisch fein aufgelöstes Modell der zu bestrahlenden Geometrie benötigt. Weiterhin müssen für dieses Modell die Oberflächeneigenschaften für alle verwendeten Materialien möglichst genau definiert werden, um ein realistisches Verhalten der Simulation zu erzielen. Das grundsätzliche Prinzip einer Strahlengangrechnung besteht aus den folgenden Schritten:

- **Strahlenverfolgung:** Eine möglichst große Anzahl von Strahlen wird von einer Lichtquelle ausgesendet und durch das Medium verfolgt. Dabei kann ggf. berücksichtigt werden, wie das Licht durch das Medium gestreut und absorbiert wird.
- **Interaktion mit Oberflächen:** Wenn die Strahlen eine Oberfläche treffen, werden Reflexion und Absorption berechnet. Die Reflexion kann in verschiedene Richtungen erfolgen, abhängig von den Materialeigenschaften der Oberfläche.
- **Absorptionsberechnung:** Die Menge des absorbierten Lichts hängt von den optischen Eigenschaften des Materials ab, wie dem Absorptionskoeffizienten. Dies wird verwendet, um die Energieverteilung innerhalb des Materials zu berechnen.
- **Reflexionsberechnung:** Die Reflexion wird durch die Reflexionseigenschaften der Oberfläche bestimmt, wie den Reflexionsgrad. Dies kann zu weiteren Strahlen führen, die erneut verfolgt werden.
- **Rekursion:** Der Prozess wird rekursiv wiederholt, indem bei jeder Oberflächeninteraktion neue Strahlen für reflektiertes und gestreutes Licht ausgesendet werden, bis eine maximale Rekursionstiefe erreicht ist oder die verbliebene Lichtintensität vernachlässigbar wird.

3 Stand der Technik

In Kap. 2 wurden zunächst einige für das Verständnis dieser Arbeit hilfreiche Grundlagen kurz erläutert. In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf die Strahlungsflussdichtemessung an Solarturm-Receivern mit Schwerpunkt auf Rohrreceiver vorgestellt. Nach einem Überblick über das Solarkraftwerk und den Forschungsstandort in Jülich wird näher auf den dort installierten HPMS-II Solarreceiver eingegangen. Es folgt eine Zusammenfassung bestehender Ansätze zur Flussdichtemessung. Hauptaugenmerk liegt auf dem vom DLR patentierten Verfahren der optischen, kamerabasierten Flussdichtemessung anhand der Reflexionen des Absorbers.

3.1 Solarkraftwerk und Heliostatfeld am DLR-Standort Jülich

Der ursprüngliche „Solarturm Jülich“ wurde im Jahr 2008 als kommerzielles Kraftwerk für die Stadtwerke Jülich gebaut. Der 60 m hohe Turm ist seit 2011 in den Besitz des DLR übergegangen und wird seitdem für Forschungszwecke genutzt. Im obersten Bereich des Turms ist der Hauptreceiver (STJ-Receiver) installiert, der eine um 20° nach unten geneigte gewölbte Oberfläche aufweist, in der insgesamt 1080 offene keramische Receiver-Module verbaut sind. Die eintreffende Strahlung erhitzt die Module, mit denen angesaugte Luft auf bis zu 700° erhitzt wird. Mit dieser Energie wird Wasserdampf erzeugt und kann einem Wasser-Dampf-Kreislauf zur Stromerzeugung zugeführt werden. Das Kraftwerk besitzt eine elektrische Leistung von 1,5 MW, die in das örtliche Netz eingespeist werden kann. Durch die hohe Auslastung des STJ-Receiver mit wissenschaftlichen Untersuchungen wurde ein 55 m hoher, zweiter Turm für die Erforschung alternativer Reivertypen errichtet und 2020 in Betrieb genommen. Dieser als Multifokusturm (MFT) bezeichnete Turm weist drei Versuchsebenen in 26, 33 und 41 m Höhe auf, die unabhängig voneinander für Forschungszwecke genutzt werden können. Der im Rahmen dieser Arbeit für Versuche genutzte HPMS-II Solarreceiver, der im folgenden Abschnitt genauer beschrieben wird, ist auf der untersten Versuchsebene angebracht und Teil der sich über mehrere Etagen erstreckenden Salzschmelzespeicher-Großanlage SALSA. [DEU19], [DEU24a]

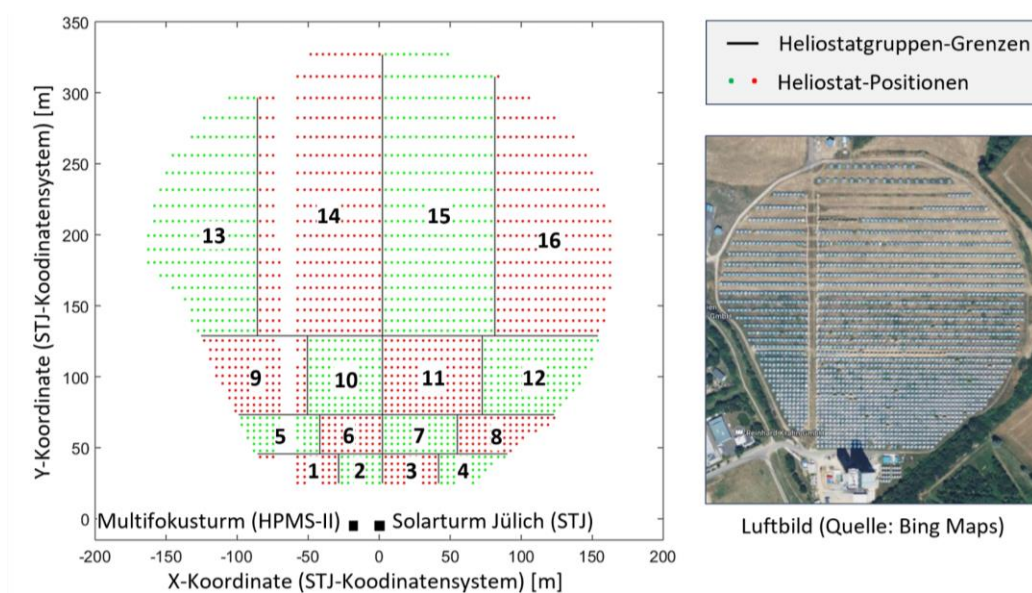


Abbildung 3.1: Skizze des Heliostatfeldes in Jülich sowie der Heliostatgruppen. Nach [ZÖL21]

Zu dem Solarkraftwerkskomplex gehört ein Heliostatfeld mit insgesamt 2153 Heliostaten, die nördlich der Solartürme in einer näherungsweise kreisförmigen Fläche von ca. 10 Hektar aufgestellt sind, siehe Abbildung 3.1. Jeder Heliostat besteht aus vier planaren Spiegelfacetten mit einer Gesamtfläche von 8.24 m². Die Heliostate können mit der vom DLR entwickelten Software HeliOS unabhängig voneinander in zwei Achsen gesteuert bzw. ausgerichtet werden, sodass eine gleichzeitige Bestrahlung mehrerer Versuchsanlagen möglich ist. Die vier Spiegelsegmente sind leicht zur Mitte hin angestellt, sodass sie das eintreffende Sonnenlicht auf Höhe des Receivers konzentriert wird um die Energiedichte zu erhöhen. [DEU24a]

Das Heliostatfeld ist in 16 Gruppen aufgeteilt, bei denen jede Gruppe aus einer Teilmenge an Heliostaten besteht, die ähnliche Winkel zum Solarturm aufweisen [GOR17]. Abbildung 3.1 zeigt links eine maßstabsgerechte Skizze des Heliostatfelds im STJ-Koordinatensystem [ZÖL21], das als Referenzkoordinatensystem für alle Positionsbetrachtungen auch im Rahmen dieser Arbeit dient. Dort sind auch die Heliostatgruppen-Grenzen eingezeichnet.

3.2 HPMS-II Solarreceiver

Im Rahmen des Projekts „HPMS-II“ wurde bis 2019 der gleichnamige HPMS-II-Receiver aufgebaut. Die Abkürzung HPMS steht dabei für „*High Performance Molten Salt*“, es handelt sich also um einen Hochleistungs-Flüssigsalzreceiver. Das Transportmedium für die absorbierte Solarstrahlung ist ein verflüssigtes Salz. Der prinzipielle Aufbau dieses Kraftwerkstypen ist in Abbildung 2.3 rechts gezeigt. Die Auslasstemperatur des HPMS-II Receivers, die für den nachgeschalteten Wasserdampf-Kreislauf bereitgestellt wird, beträgt bis zu 600° C. Die thermische Leistung ist auf bis zu 1 MW ausgelegt. [FRA23]

Der Multifokusturm und der darin installierte HPMS-II Receiver sind in Abbildung 3.2 dargestellt.



Abbildung 3.2: Multifokusturm Jülich (Bildquelle: [Deu24]) und dort installierter HPMS-II Receiver (Bildquelle: [MAT22])

Aufbau und Funktion der Receiver-Rohre

Der HPMS-II Receiver besteht aus insgesamt 16 flüssigkeitsdurchströmten Rohren, die in acht seriellen Strängen mit jeweils zwei parallelen Rohren verschaltet sind. Die Maße des sichtbaren Bereichs der Receiverrohre betragen ca. 2232 mm (H) x 604 mm (B). Die Receiverrohre haben

jeweils einen Außendurchmesser von 36,8 mm und weisen einen Rohrabstand von einem Millimeter auf. Die Funktion der Receiverrohre ist, einen möglichst effizienten Wärmeaustausch der eintreffenden Solarstrahlung in den Kraftwerkskreislauf zu ermöglichen. Der aus den Rohren bestehende Bereich des Receivers wird auch Absorber genannt. Die Receiverrohre sind mit einer speziell für Rohrreceiver entwickelten Beschichtung versehen, die einen äußerst geringen Reflexionsgrad von ca. 2.5% aufweist [LAD21], um einen möglichst großen Anteil der eintreffenden Solarstrahlung zu absorbieren. Der geringe Anteil an reflektierter Strahlung dient optischen Messmethoden dazu, auf die absorbierte Strahlungsflussdichte zurückzuschließen. Dieses Messprinzip wird in Kap. 3.3.3 erläutert.

Aufbau und Funktion des Strahlungsschutzes

Der Strahlungsschutz dient, wie der Name bereits sagt, dem Schutz vor der hochkonzentrierten Solarstrahlung, die neben dem Receiver-Aufbau auch auf die Fassade der Kraftwerkstürme treffen und ungeschützte Bereiche beschädigen kann.

Der Absorber des HPMS-II Receivers sitzt in einer rechteckigen Vertiefung und ist auf 5 Seiten von einer Tragestruktur mit wärmedämmenden Platten umgeben, die mit einer speziellen Strahlungsschutz-Beschichtung den Wärmeeintrag in die Receiverstruktur und Fassade minimieren. Im Gegensatz zu der Beschichtung für den Absorber ist die Beschichtung des Hitzeschutzes darauf ausgelegt, einen möglichst hohen Reflexionsgrad sowohl des sichtbaren Lichtes als auch des Infrarotlichtes aufzuweisen. Im Bereich hinter dem Absorber führt der Strahlungsschutz weiterhin dazu, dass es einen rückseitigen Strahlungseintrag in die Receiverrohre gibt. Dieser Aspekt wird insbesondere in Kap. 8.4 aufgegriffen.

3.3 Flussdichte-Messverfahren

In Röger et. al. [RÖG14] werden mehrere Messverfahren vorgestellt, von denen einige in diesem Abschnitt kurz erläutert werden. Sofern nicht gesondert erwähnt, sind die hier genannten Informationen aus [RÖG14] entnommen. Grundsätzlich gibt es direkte Verfahren, bei denen mit Radiometern aufgenommene Leistungen direkt gemessen werden, sowie indirekte Verfahren, bei denen mittels einer Kamera die Reflexionen erfasst werden, aus denen auf die absorbierte Leistung geschlossen werden kann.

3.3.1 Messung mit Radiometern

Mit Radiometern können Strahlungsflussdichten punktuell direkt gemessen werden (vgl. Kap. 2.3.1). Um aus diesen punktuellen Messungen auf Strahlungs- bzw. Flussdichteverteilungen zu schließen, gibt es verschiedene Verfahren, von denen hier zwei genannt werden sollen.

Festinstallation

Bereits mit einer kleinen Anzahl an fest verbauten Radiometern im Bereich des Absorbers können die erfassten individuellen Werte durch Interpolation und Extrapolation zu einer orts aufgelösten Flussdichteverteilung zusammengesetzt werden. Der Vorteil fest verbauter Radiometer liegt in einer vereinfachten mathematischen Berechnung der Flussdichteverteilungen bei bekannten geometrischen Zusammenhängen zwischen den Sensoren. Außerdem kann im laufenden Betrieb kontinuierlich die Flussdichteverteilung gemessen werden. Neben des notwendigen regelmäßigen Kalibrierungsaufwands der Radiometer

durch Witterungseinflüsse ist auch die sehr kurze Lebensdauer bei Dauerbestrahlung (ca. 6 Monate) ein großer Nachteil dieser Messmethode [RÖG14]. Außerdem wird für große Receiveroberflächen eine zunehmend große Anzahl an Radiometern benötigt, was die Beschaffungs- und Instandhaltungskosten erhöht. Eine Installation in nächster Nähe zum Absorber relativiert diese Probleme, führt aber auch zu Limitationen der Genauigkeit, mit der örtliche Flussdichteverteilungen berechnet werden können.

Moving Bar mit Radiometern

Im Gegensatz zu einer Festinstallation können schnell reagierende Flussdichtesensoren auch auf einem sogenannten *Moving Bar* montiert werden, der vor der Absorberfläche verfahren werden kann. Durch das Verfahren des Sensorbalkens durch den bestrahlten Bereich und einer örtlichen Zuordnung der Messwerte zu Verfahrspositionen lässt sich eine orts aufgelöste Flussdichteverteilung generieren. Vorteile dieser Methode sind eine einfache Datenauswertung sowie eine geringe Messunsicherheit von ca. 5% [ULM12]. Die größten Nachteile liegen in den großen konstruktiven Aufwänden für die verfahrbaren Apparaturen, insbesondere bei großen Absorbergrößen, die relativ lange Messdauer durch die Verfahrbewegung sowie die Störung des Betriebs für die Dauer der Messung.

3.3.2 Optische Messung mit Kamerasystemen

3.3.2.1 Verfahren auf Basis diffus reflektierender Ersatzflächen

Es gibt verschiedene Verfahren, die auf der Basis von diffus reflektierenden Flächen (auch *Targets* genannt) Flussdichteverteilungen berechnen können, anstatt den Absorber direkt zu betrachten. Hierzu ist im Gegensatz zur direkten Radiometermessung eine Kalibrierung notwendig, um aus den mit der Kamera aufgenommenen Grauwerten auf die korrespondierende Flussdichte zu schließen. Dies wird durch den Einsatz eines einzelnen Radiometers auf dem diffusen Target ermöglicht. Zwei Verfahren werden hier vorgestellt.

Moving Bar mit diffusem Target

Analog zu der in 3.3.1 genannten Methode mit Radiometern kann auch ein reflektierendes Target auf dem Moving Bar mit einer Kamera erfasst werden. Während der Verfahrbewegung des Targets werden Einzelbilder aufgenommen und anschließend zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Zusätzlich zu den Vor- und Nachteilen der Moving Bar-Methode mit Radiometern kommt hier ein erhöhter Aufwand durch die Bildauswertung hinzu.

Ortsfestes Target und Fokusverschiebung

Das vorgenannte Prinzip lässt sich auch umkehren. Statt das Target zu verfahren wird der Strahlungsfokus über ein neben dem Receiver ortsfest montiertes Target bewegt. Auch hierbei werden kontinuierliche Aufnahmen des Targets im Nachgang zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Die konstruktiven Aufwände eines ortsfesten Targets sind geringer, im Gegenzug muss jedoch die Verfahrbewegung des Strahlungsfokus genau gesteuert werden. Bei beiden hier genannten Verfahren wird der reguläre Betrieb für die Dauer der Messung gestört.

3.3.2.2 Optische Verfahren ohne die Nutzung diffuser Targets

Statt einer diffus reflektierenden Ersatzfläche können die Reflexionen des Absorbers auch direkt gemessen und interpretiert werden, vgl. Abbildung 3.3. Dieses Vorgehen ist mathematisch deutlich aufwändiger, da die Reflexionseigenschaften des Absorbers nicht diffus sind und die

reflektierte Leistung sehr gering ist. Die Herausforderung besteht also in der Bestimmung der Reflexionsgrade des Absorbers. Diese sind von der Bestrahlungs- und Auswertungsrichtung abhängig. Außerdem sind der Aufbau des Absorbermaterials und seine Struktur inhomogen, weswegen verschiedene Stellen unterschiedlich stark reflektieren. Der Vorteil dieser Methoden ist jedoch, dass keine zusätzlichen Apparaturen benötigt werden und dass nach einmaliger Erfassung der komplexen Reflexionseigenschaften des Absorbers eine Flussdichtemessung im laufenden Betrieb unterbrechungsfrei möglich ist. Ein solches Verfahren ist das sogenannte Scan-Verfahren, das aufgrund der Relevanz für diese Arbeit im nächsten Abschnitt gesondert erläutert wird.

3.3.3 Scan-Verfahren

Das kamerabasierte Verfahren zur Flussdichtemessung anhand der Absorber-Reflexionen wurde durch Göhring et. al. [GÖH11] sowie Röger et. al. [RÖG14] am Solarturm Jülich erprobt und zum 2018 vom DLR patentierten Scan-Verfahren weiterentwickelt [OFF18]. Dieses Verfahren ist eine Methode zur Bestimmung der orts- und richtungsabhängigen Reflexionseigenschaften des Absorbers sowie der finalen Umrechnung von Kamera-Grauwertbildern in Flussdichteverteilungen [OFF18]. Eine Skizze des optischen Messprinzips (links) sowie des Scan-Verfahrens (rechts) ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Das Messprinzip zeigt einen Heliostaten (16), der aus einer Richtung das einfallende Sonnenlicht auf den Receiver (12) lenkt. Die Reflexionen werden von einer Kamera (18) aus einem anderen Blickwinkel erfasst. Abhängig von der Position und dem Winkel des Heliostaten zum Receiver ändert sich die Reflexion des Absorbers. Die auf den Kamerasensor treffenden Reflexionen fallen je nach Betrachtungswinkel ebenfalls unterschiedlich aus. Um die Richtungsabhängigkeit der Reflexion für eine Kameraposition und alle Bereiche des Absorbers bestimmen zu können, erzeugt das Scan-Verfahren eine homogene Ausleuchtung des gesamten Absorbers, um daraus dessen relative Reflexionseigenschaften abzuleiten. Da der Strahlungsfokus nicht ausreichend groß ist um den Absorber ganzflächig homogen zu beleuchten, wurde ein mäanderförmiger Verfahrzyklus entwickelt (rechts in Abbildung 3.3), bei dem jeder Bereich des Absorbers mindestens einmal mit dem maximalen Strahlungsfokus überstrichen wird und bei dem gleichzeitig Serienbildaufnahmen durchgeführt werden, die später in sogenannte Maximalbilder überführt werden. [OFF18, OFF19]

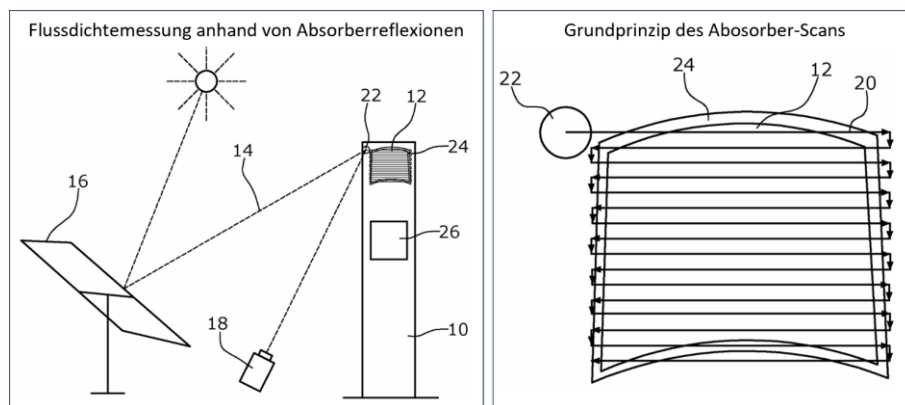


Abbildung 3.3: Prinzipskizzen der optischen Flussdichtemessung basierend auf den Reflexionen des Absorbers (links) und des Scan-Verfahrens (rechts). Quelle: [OFF18]

Durch die Verwendung eines leistungsstarken Scheinwerfers und Durchführung der Scan-Versuche in der Nacht wird der Anlagenbetrieb nicht behindert. Diese Nacht-Scans wurden auch im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. An dieser Stelle werden die mathematischen Zusammenhänge, die das Reflexionsverhalten des Absorbers und den Zusammenhang zwischen Grauwertbild und Flussdichteverteilung beschreiben, in vereinfachter Form dargestellt. Diese Formeln werden insbesondere in Kap. 5 und Kap. 8 referenziert.

Generell bezeichnet in den folgenden Formeln der Index i ein kleines Teilsegment des Absorbers und der Index j referenziert einen der in Abbildung 3.1 gezeigten Heliostaten und somit eine Bestrahlungsrichtung. Zunächst kann ein Zusammenhang zwischen einem in dem Bildbereich i gemittelten Grauwert g_i und den Strahlungsflussdichten $E_{i,j}$ aller beteiligten Strahlungsquellen definiert werden:

$$g_i = \sum_j E_{i,j} \cdot \rho_{i,j} \cdot k \quad [-] \quad (3.1)$$

k : kameraspezifischer Faktor,
 $\rho_{i,j}$: Reflexionsgrad des Segments i bei Bestrahlung aus j

Das Verhältnis einer Strahlungsflussdichte $E_{i,j}$ in einem Segment i bei Bestrahlung aus Richtung j zur gesamten Strahlungsflussdichte E_i in einem Segment i wird als Größe $x_{i,j}$ bezeichnet:

$$x_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{E_i} \Leftrightarrow E_{i,j} = x_{i,j} \cdot E_i \quad [-] \quad (3.2)$$

Nach Einsetzen von Gl. (3.2) in Gl. (3.1), Umstellung nach der gesuchten Strahlungsflussdichte E_i sowie Einführung eines Referenzreflexionsgrades $\bar{\rho}$ ergibt sich schließlich die Hauptformel zur Flussdichte-Berechnung für ein einzelnes Absorbersegment i [OFF19]:

$$E_i = g_i \cdot \underbrace{\frac{1}{\sum_j [x_{i,j} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}}]}}_{\text{Korrektur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho} \cdot k}}_{\text{Kalibrierung}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.3)$$

4 Stand der Entwicklung des Scan-Verfahrens am HPMS-II

Innerhalb dieses Kapitels wird der aktuelle Entwicklungsstand des Scan-Verfahrens zur optischen Flussdichtemessung von Rohrreivern zu Beginn der vorliegenden Arbeit zusammengefasst. Es werden verschiedene Ansätze für die Verbesserung der Flussdichtemessung mittels Reflexion an Rohrreivern präsentiert. Hierbei wird insbesondere auf die Herausforderungen bei der Bildauswertung sowie die dafür verantwortlichen Ursachen eingegangen. Das Kapitel schließt mit den im Rahmen dieser Arbeit vorgesehenen Maßnahmen zur weiteren Optimierung des Scan-Verfahrens, sowohl hinsichtlich der Messmethodik als auch der Bildauswertung. Die Umsetzung dieser Maßnahmen wird in Kap. 5 bis Kap. 8 beschrieben.

4.1 Bisherige scheinwerfergestützte Untersuchungen

Eine Anwendung des für den offenen volumetrischen Receiver entwickelten Scheinwerfer-Scans auf Rohrreivern wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „TubeMon“ ausschließlich anhand

von Nachtversuchen durch [LAD21] und [MEY21] umgesetzt. In Folgearbeiten von [GLI21] und [ZÖL21] wurde der Testreceiver darüber hinaus auch tagsüber mit Heliostaten bestrahlt.

Eine Erprobung des Verfahrens auf den HPMS-II Rohrreceiver wurde erst durch [MAT22] durchgeführt. Dort wird beschrieben, dass bei Bestrahlung aus bestimmten Positionen des Heliostatfeldes fehlerhafte Aufhellungen in den Aufnahmen im Bereich zwischen den Rohren innerhalb des Receivers auftraten. Aus diesen Richtungen werde die Bestimmung der Flussdichte erschwert und verfälscht. Als Ursache für diese Aufhellungen wurde der Blooming-Effekt von CCD-Sensorkameras vermutet, also ein Ladungsüberlauf der Photozellen in benachbarte Zellen.

Auf diesen Ergebnissen aufbauend setzte [JÄG23] stattdessen eine CMOS-Sensorkamera ein, um eine Verringerung der Auswirkungen des Blooming-Effekts in den Messergebnissen der Scankorrektur zu erzielen. Trotz Einsatz der CMOS-Sensorkamera zeigten seine Nachtmessungen jedoch weiteren Optimierungsbedarf bezüglich der störenden Reflexionen. Die dadurch hervorgerufenen Überbelichtungen innerhalb des Receivers konnten nicht korrigiert werden. Dies hatte zur Folge, dass die Ergebnisse der betroffenen Gruppen prinzipiell ungenauer sein konnten war als jene, bei denen keine Überbelichtung vorlag.

Beispiele für stark reflexionsbehaftete Aufnahmen sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Die zugrunde liegende Ursache für diese überbelichteten Bereiche der Heliostatgruppen 6 und 10 sind eine Kombination aus verbogenen Receiverrohren und Direktreflexionen des hinter dem Receiver befindlichen Strahlungsschutzes. Das heißt, zwischen den Rohren auf den Strahlungsschutz treffende Strahlung wird aufgrund der näherungsweise Lambert'schen Reflexionseigenschaften des Strahlungsschutzes ungerichtet wieder zurück reflektiert und trifft als stark erkennbare Reflexion den Kamerasensor. Aufgrund des im Kamerasensor auftretenden Blooming-Effektes und einer begrenzten Kameradynamik kommt es anschließend zu nicht korrigierbaren Überbelichtungen in den Aufnahmen, die bis in den Randbereich der Rohre hinein reichen und nicht kompensierbar sind.

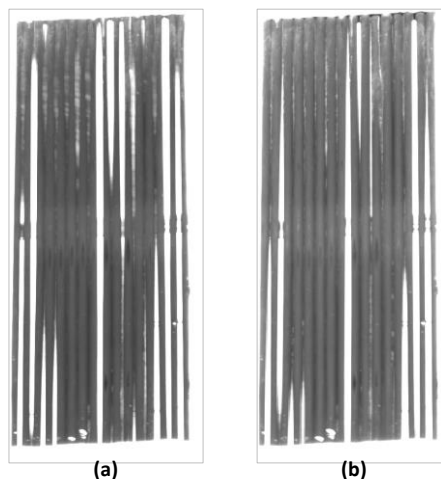


Abbildung 4.1: Ausgewertete Scan-Aufnahmen aus [JÄG23] von (a) der Heliostatgruppe 6 und (b) der Heliostatgruppe 10

Außerdem wurde von Jäger ein Zusammenhang zwischen Reflexionen und der Lage von Scheinwerfer und Kamera in einer Flucht zum Receiver anhand von geometrischen Überlegungen vermutet [JÄG23]. Eine Quantifizierung dieses Effekts, wie beispielsweise eine Grenzwinkelbetrachtung, ab der keine direkte Bestrahlung des Strahlungsschutzes mehr stattfinden kann, wurde in [JÄG23] nicht durchgeführt. Diese wäre aufgrund der nur schwer quantifizierbaren und im Betrieb thermisch induzierten, veränderlichen Rohrdeformationen auch nicht zweckführend und wird daher auch in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

4.2 Motivation zur Untersuchung alternativer Kamerapositionen

In den vorhergehenden Arbeiten wurde die Kamera stets mittig vor dem Receiver positioniert. Der von dieser Kameraposition aus im Bild sichtbare Rohrabstand ist dabei maximal, sodass bei problematischen Einfallswinkeln viel Licht vom Strahlungsschutz in die Kamera reflektiert wird. Das ist besonders problematisch, da der Strahlungsschutz einen deutlich höheren Reflexionsgrad aufweist als die Absorber-Rohre (siehe Kap. 6.1). Abbildung 4.2 zeigt dazu eine Schema-Darstellung aus [JÄG23].

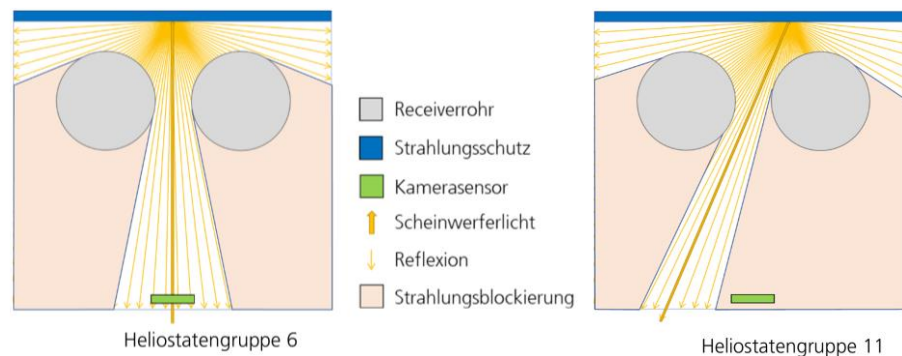


Abbildung 4.2: Schema der richtungsabhängigen Reflexionen des Strahlungsschutzes. Quelle: [JÄG23]

Mit zunehmendem Versatz der Kamera von der Mittelposition wird der perspektivisch sichtbare Rohrabstand immer kleiner. Daraus wurde die Annahme abgeleitet, dass außermittige Kamerapositionen geringere Reflexionsprobleme verursachen [JÄG23]. Es konnte exemplarisch gezeigt werden, dass die Reflexionen mit steigendem Versatz stetig abgenommen haben. Eine Positionsvariation wurde als Gegenmaßnahme für Reflexionen nur bei kritischen Heliostatgruppen vorgeschlagen [JÄG23]. Es wurde jedoch zu bedenken gegeben, dass die Nutzung unterschiedlicher Kamerapositionen für verschiedene Heliostatgruppen bei der Reflexionskorrektur aufgrund der Verschiebung von Bildinhalten problematisch sei. Eine ausschließliche Nutzung einer außermittigen Position wurde nicht in Betracht gezogen. Ebenso fehlte eine systematische Methode zur Suche und Bewertung optimaler Kamerapositionen.

Daraus leitet sich die Anforderung ab, im Rahmen dieser Arbeit, eine Methode zur effizienten Identifikation optimaler Kamerapositionen zu entwickeln und auf den HPMS-II Rohrreceiver in Jülich anzuwenden. Diese wird in Kap. 6 näher beschrieben. Die Positionsbestimmung der Kamera wird mit großer Sorgfalt durchgeführt, da auf Basis dieser Ergebnisse die Lokalisierung eines neuen professionell geplanten und gebauten Mastes zur dauerhaften Flussdichtemessung der SALSA Großanlage errichtet werden soll.

4.3 Simulative Erfassung optisch nicht detektierter Strahlungsanteile

Durch die optische Flussdichtemessung anhand von Reflexionen der Receiverrohre kommt es verfahrensbedingt dazu, dass gewisse Reflexionsanteile, die einen Einfluss auf die Bestimmung der Flussdichte haben, nicht detektierbar sind. Einerseits begünstigen die teilweise vergrößerten Rohrabstände, dass ein gewisser Anteil der eintreffenden Strahlung direkt vom Strahlungsschutz wieder zurück reflektiert, ohne die Absorberrohre zu treffen. Dies wird als Direktreflexion bezeichnet, führt schließlich zu lokalen Überbelichtungen der Aufnahmen und verfälscht durch Blooming-Effekte weiterhin die angrenzenden Bildbereiche, wie in den vorigen Absätzen beschrieben. Andererseits können Reflexionen des hinter den Rohren liegenden Strahlungsschutzes auf die Rohrrückseiten und der damit verbundene Strahlungseintrag in den Receiver nicht in den aufgenommenen Aufnahmen erfasst werden. Dadurch kommt es zu einem von der Bestrahlungsrichtung abhängigen, nicht erfassten Anteil an absorbierte Strahlung.

Eine Möglichkeit zur Erfassung der o.g. richtungsabhängigen Reflexionsanteile besteht in der Nutzung von Raytracing-Software (vgl. Kap. 2.5). Am DLR steht diesbezüglich unter Anderem das Softwaresystem SPRAY zur Verfügung [BUC24]. Es bietet die Möglichkeit, realistische Simulationen für das Solarkraftwerk Jülich durchzuführen, da sowohl alle Heliostaten des Heliostatfelds als Strahlungsquellen als auch ein Modell des HPMS-II Receivers als Zielobjekt bereits existieren. Die Heliostate werden jeweils mit vier flachen Spiegelfacetten in individuellen Winkelstellungen abgebildet, um den korrekten Brennpunkt auf dem Receiver zu erzielen. Der Receiver besteht aus einer Vielzahl an Flächenelementen des Strahlungsschutzes und der Receiverrohre, die über ein FEM-Modell (FEM: Finite Elemente Methode) beschrieben werden. Die auf das Modell treffenden und mehrfach reflektierten Strahlen werden pro Element detektiert. Somit können die absorbierten Leistungen ortsaufgelöst berechnet werden, was für die Analyse im Rahmen dieser Arbeit von besonderer Bedeutung ist.

Die SPRAY-Software ist eine Windows-Konsolenanwendung und nutzt mehrere Eingabedateien. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt ebenfalls über eine Reihe von Textdateien, in denen die absorbierten Leistungen und Flussdichten pro FEM-Element enthalten sind. Eine grafische Ausgabe oder Visualisierung der Ergebnisse ist nicht vorgesehen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die SPRAY-Software genutzt, um die reflektierten und absorbierten Strahlungsanteile, die optisch nicht erfassbar sind, näher zu untersuchen und einen Integrationsvorschlag für das optische Flussdichte-Messverfahren zu erarbeiten. Diese Arbeiten werden in Kap. 8.4 näher beschrieben.

4.4 Stand der Software zur Flussdichtemessung am DLR

Die am DLR entwickelte Software zur optischen Flussdichtemessung wurde im Kontext der Forschungsarbeiten am STJ-Receiver des Solarturms Jülich entwickelt und über die Jahre erweitert und angepasst. Die Software basiert auf der Programmiersprache *MATLAB*[®] von *Mathworks Inc.*, die im wissenschaftlichen Umfeld nach wie vor weit verbreitet ist.

4.4.1 Allgemeiner Ablauf und Auswertungsschritte

Zur Nutzung der Software muss zunächst ein umfangreiches Konfigurations-Skript mit verschiedenen Einstellungen für den zu betrachtenden Anwendungsfall erstellt bzw. eines der vorhandenen Skripte angepasst werden. Hier muss unter anderem der Receiver-Typ, die Receivergröße und die Pixelauflösung definiert werden sowie die Kameraposition in einem speziellen Datenformat codiert werden, damit später eine Entzerrung der aufgenommenen Rohbilder möglich ist. Außerdem muss das lokale Arbeitsverzeichnis angegeben und weitere Konfigurationsparameter definiert werden, die den Ablauf der Bildauswertung und der Berechnungsschritte steuern.

Anschließend kann die grafische Benutzeroberfläche „EvalGUI“ gestartet werden. Zu Beginn muss der gewünschte Betriebsmodus der Software ausgewählt werden, ob z.B. eine Live-Kameraaufzeichnung durchgeführt werden soll, oder ob nachgelagerte Absorber-Analysen von Einzel- oder Serienbilddaufnahmen durchgeführt werden sollen. Die Ergebnisse werden innerhalb der Software angezeigt und können teilweise als MATLAB-spezifische Ergebnisdateien (*.mat) exportiert werden. Für eine ausführliche Beschreibung der EvalGUI-Software soll an dieser Stelle auf die Arbeiten von Meyer [MEY21] und Zöllner [ZÖL21] verwiesen werden, wo auf den Bedienungsablauf und die Benutzeroberfläche genauer eingegangen wird.

4.4.2 Herausforderungen für die Anwendung auf Rohrreceiver

Die EvalGUI Software wurde wie bereits erwähnt für die Auswertung des offenen volumetrischen STJ-Receivers entwickelt und in diversen Folgearbeiten kontinuierlich erweitert. Insbesondere wurde die Analyse von Rohrreceivern ermöglicht, indem an unterschiedlichen Stellen im Programm Anpassungen vorgenommen und zusätzliche Einstellungen ergänzt wurden.

Eine der größten Herausforderungen liegt dabei darin, dass der Bild-Entzerrungsprozess für den gewölbten und winklig angestellten STJ-Receiver bauartbedingt wesentlich komplexer ist als für den planaren Rohrreceiver, dieser aber trotzdem die gleichen Algorithmen bzw. Berechnungsschritte mit angepasster Parametrierung verwendet. In der Anwendung war dieser Vorgang fehleranfällig und nur aufwändig zu beherrschen, sodass Prozesse mehrfach wiederholt werden mussten bis eine Bildentzerrung erfolgreich war. Weiterhin müssen bei ständig wechselnden Bildgrößen und Kamerapositionen sowohl die Ecken des Absorbers im Bild manuell ausgewählt werden, als auch die Kameraposition in Raumkoordinaten berechnet und im Konfigurationsfile hinterlegt werden. Zusätzlich ist EvalGUI nicht darauf ausgelegt, Zwischenergebnisse in freien Formaten zu exportieren.

Als größte Herausforderung wird jedoch erachtet, dass die Programmstruktur eine Komplexität aufweist, die Softwareanpassungen bzw. -erweiterungen extrem zeitaufwändig macht, sodass eine Nutzung im Rahmen dieser Arbeit nicht zeiteffizient möglich ist. Daher wurde entschieden, die grundlegenden notwendigen Bildauswertungsschritte und neue verbesserte Ansätze in einer neuen Basis-Implementation in der mittlerweile weit verbreiteten und offenen Programmiersprache Python umzusetzen. Diese wird im folgenden Kap. 5 ausführlich beschrieben.

5 Bildauswertung zur Berechnung der Flussdichteverteilung

Wie im vorhergehenden Kapitel 4.4.2 beschrieben, ist die aktuell am DLR für optische Flussdichtemessungen verfügbare MATLAB-Software „EvalGUI“ ursprünglich für den STJ-Receiver entwickelt worden und auf die spezifischen Anforderungen dieses Receptertypen angepasst. Die Arbeiten in den letzten Jahren haben versucht, diese Programmstrukturen und Bildverarbeitungsschritte für Rohrreiver zu nutzen und anzupassen, was jedoch aufgrund der Komplexität der Softwarestruktur mit Schwierigkeiten und Einschränkungen verbunden war.

Für die notwendigen Bildauswertungsschritte wurde daher im Rahmen dieser Arbeit das neue Programm „*OpticalFdmImageProcessor*“ (kurz OFIP) in der Programmiersprache Python entwickelt und einige zuvor fehleranfällige Bildverarbeitungsschritte verbessert oder vereinfacht. Python bietet eine große Auswahl frei verfügbarer und hochwertiger Bibliotheken (sog. *packages*) zur effizienten Signal- und Bildverarbeitung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde intensiv von den folgenden zusätzlichen python-packages Gebrauch gemacht:

- **numpy**: „numerical python“ für numerische und rechenintensive Aufgaben, ermöglicht insbesondere effiziente Vektor- und Matrixoperationen. Die zu verarbeitenden Grauwertbilder werden als numpy arrays verarbeitet
- **scipy**: „scientific python“ beinhaltet numerische Algorithmen wie beispielsweise Signalverarbeitungs- und -analysealgorithmen, die im Rahmen der Berechnung der Bildsegmente verwendet wurden
- **scikit-image**: kurz skimage ist eine umfangreiche und leistungsstarke Bibliothek für die Bildverarbeitung, die für viele Bildverarbeitungsschritte im Rahmen dieser Arbeit essentielle Algorithmen bereitstellt
- **matplotlib**: eine weit verbreitete Bibliothek zur Visualisierung von Daten wird für alle Darstellungen in OFIP verwendet

Ein Überblick der GUI (Graphical User Interface (engl.): grafische Benutzeroberfläche) des Python-Programms OFIP ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

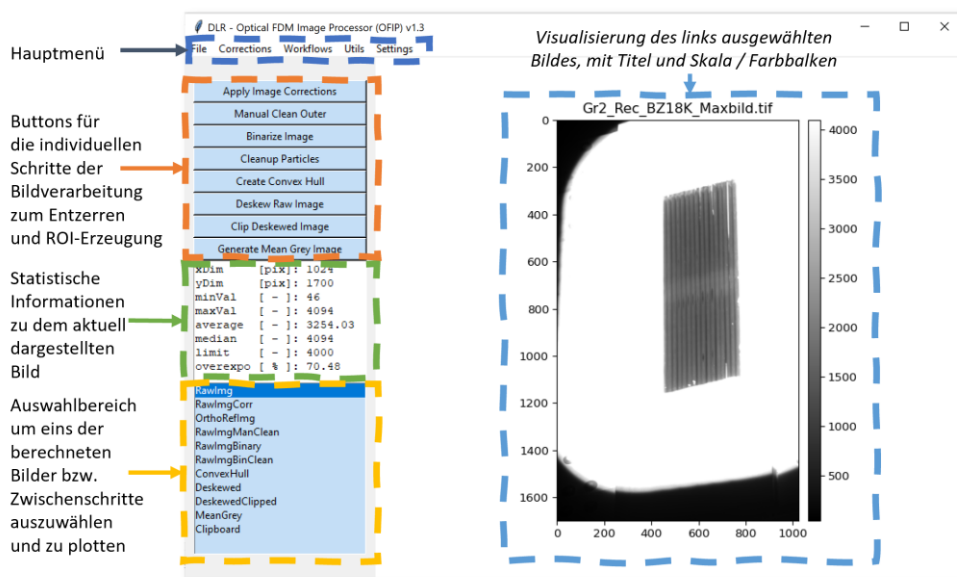


Abbildung 5.1: Grafische Oberfläche des Python-Programms „OFIP“

Neben einem Hauptmenü besteht die Oberfläche auf der linken Seite aus Kontrollelementen und auf der rechten Seite aus einem Bereich, in dem das aktuell ausgewählte Bild angezeigt werden kann.

Strukturell ist das Programm aus mehreren eigenen Python-Packages aufgebaut, die sich mit den übergeordneten Aufgaben für die Bildverarbeitung und Flussdichteberechnung befassen, siehe Abbildung 5.2. Daneben gibt es noch zwei Konfigurationsdateien, in denen die Parameter der verwendeten Algorithmen gespeichert sind. Die einzelnen Funktionen werden über das Python-Modul „*maingui.py*“ angesteuert. Auf einige Arbeitsschritte und Algorithmen wird im Folgenden genauer eingegangen.

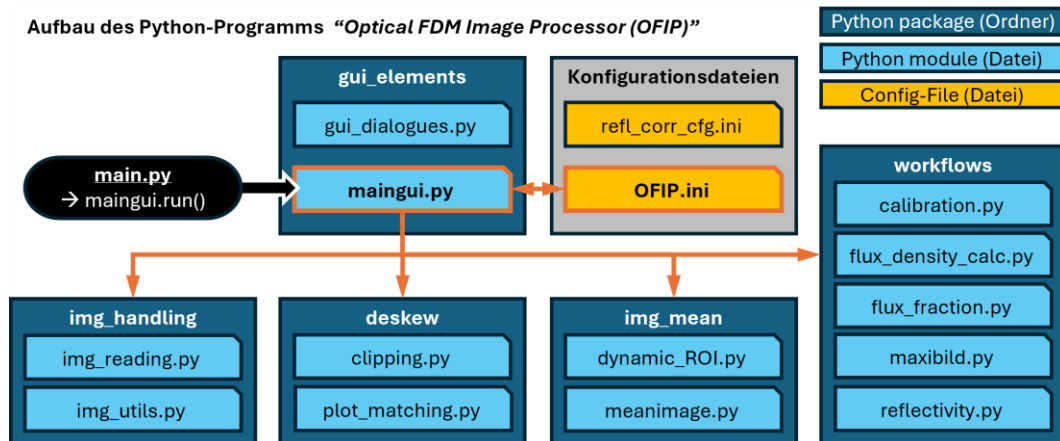


Abbildung 5.2: Struktur und Bestandteile des Python-Programms OFIP

5.1 Entzerrung

Ein wichtiger zentraler Bildverarbeitungsschritt ist die Entzerrung von Rohbildern des Receivers, die aus beliebigen Winkeln aufgenommen wurden. Hierbei kann, im Gegensatz zum zylindrisch gewölbten STJ-Receiver, ausgenutzt werden, dass der HPMS-II Receiver aus einer ebenen Fläche besteht, in der die Receiverrohre liegen. In diesem Fall besteht die Entzerrung aus einer reinen perspektivischen Transformation. Um diese Transformation durchführen zu können, reichen vier Bildpunkte im verzerrten Zustand aus, denen jeweils ein Bildpunkt im unverzerrten Sollzustand zugeordnet ist (vgl. Kap. 2.4.2).

Zunächst muss daher der Sollzustand definiert werden. Dieser wird als orthoskopische Referenz, kurz *OrthoRef*, bezeichnet. In [JÄG23] hatten alle entzerrten zugeschnittenen Bilder eine Größe von 353 x 1295 Pixeln (ausgehend von einer Receivergröße von 567.8 x 2082.2 mm), was einem Höhen-/Breitenverhältnis (kurz AR für Aspect Ratio) von 3.67 entspricht. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon abweichend (basierend auf den Konstruktionszeichnungen des Receivers) von einer Receivergröße von 604 x 2232 mm (AR: 3.70) ausgegangen. Die Abmessungen der *OrthoRef* werden auf 400 x 1475 Pixel festgelegt (AR: 3.69). Einerseits ist diese Größenaufteilung günstig für die Berechnung der Bildsegmente, andererseits ist mit der Größe auch sichergestellt, dass die Auflösung der *OrthoRef* mindestens so groß ist wie in den Abbildungen im verzerrten Zustand, um keine Pixelinformationen bei der Transformation zu verlieren. Das Zielobjekt des Receivers ist als weißes Rechteck mittig in einem schwarzen Bild der Größe 1550 x 1550 Pixel positioniert. Dieses Ziel-Bild stellt den unverzerrten

„Ausgangszustand“ für die perspektivisch verzerrten Rohbilder dar und wird für den Entzerrungsalgorithmus benötigt.

In Abbildung 5.3 ist ein Ablaufdiagramm der Entzerrung skizziert. Kern des Entzerrungsprozesses ist die teilautomatische Erzeugung der für die Entzerrung notwendigen Transformationsmatrix. Dieser Prozess ist im Diagramm mit orangen gestrichelten Linien umrandet.

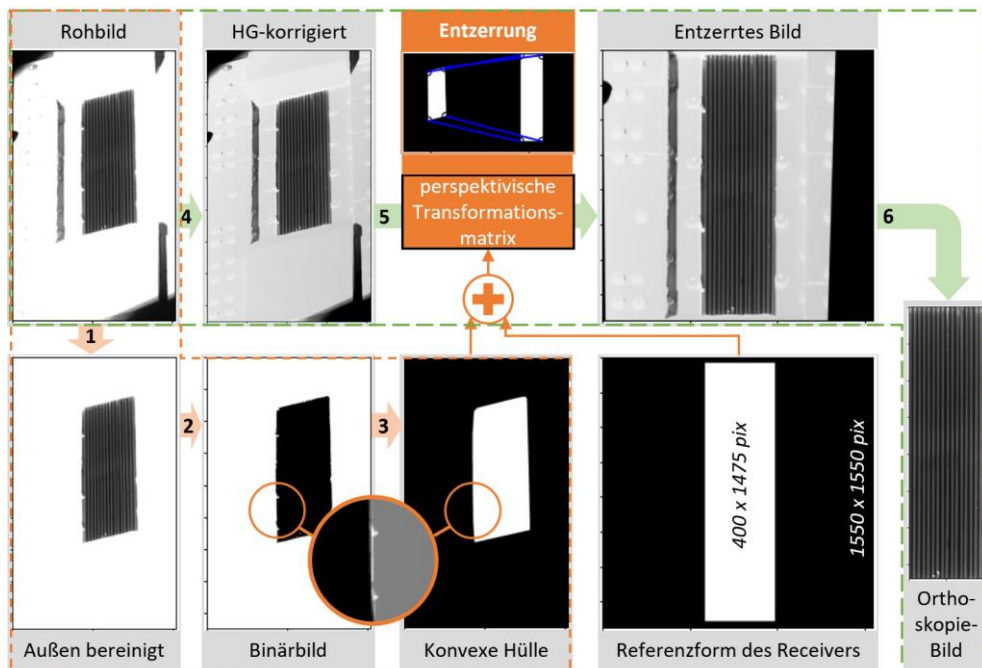


Abbildung 5.3: Ablauf der Entzerrung von Rohbildern zur Erzeugung von Orthoskopie-Bildern

Der erste Schritt besteht in der Bereinigung der äußeren Bereiche des Rohbildes, sodass lediglich der Receiver im Zentrum erkennbar ist. Sofern das Rohbild bereits außerhalb des Receivers vollständig überbelichtet ist, kann Schritt 1 auch entfallen. Die Bereinigung funktioniert, indem vier Punkte rund um den Receiver gewählt werden. Die Pixel des eingespannten Vierecks werden ignoriert und der Rest des Bildes wird mit einem Grauwert von 4095 (12bit Maximum) überschrieben. Im Gegensatz zu EvalGUI müssen die Ecken des Receivers nicht genau angewählt werden, sofern ein ausreichend überbelichteter Bereich außerhalb des Receivers existiert, wie im Beispiel in Abbildung 5.3 oben links erkennbar. Sofern dies nicht der Fall ist (z. B. für ein dunkleres Hintergrundbild), müssen die Ecken des Receivers sauber ausgewählt werden. Da die Bildsegmente dynamisch ermittelt werden, muss die Auswahl aber nicht pixelgenau erfolgen.

In Schritt 2 wird entweder das bereinigte Bild oder das Rohbild in ein Binärbild überführt. In letzterem Fall sollte anschließend noch ein Partikel-Filteralgorithmus (*black_tophat* aus *skimage.morphology*) angewendet werden, um alle eventuell vorhandenen schwarzen Partikel/Pixel im Außenbereich des Bildes zu eliminieren. Diese können beispielsweise durch defekte Pixel, Tiere oder Schmutz auftreten und würden zu Fehlern im Folgeschritt führen.

Der dritte und wichtigste Schritt ist die Generierung einer konvexen Hülle um den innenliegenden Bereich des Bildes, der den isolierten und binärcodierten Receiver enthält. Der Algorithmus (*convex_hull_image* aus *skimage.morphology*) spannt eine glatte Kontur um den Receiver und sorgt dafür, dass nur sauber erkennbare Ecken entstehen die automatisch

identifiziert werden können. Das im Folgenden als *ConvexHull* bezeichnete binäre Bild mit dem innenliegenden weißen Receiver-Umriss auf schwarzem Hintergrund liefert die Basis für die Entzerrung und kann in OFIP sowohl exportiert als auch später wieder importiert werden, sodass die Schritte 1-3 nicht wiederholt werden müssen.

Grundsätzlich ist das *ConvexHull* für eine Kameraposition und Orientierung gültig. Aufgrund kleiner Bewegungen des Kamerastativs durch Windeinfluss oder Kamerapositionierung kann es jedoch zu Verschiebungen des Receivers im Bild kommen, sodass ein neues *ConvexHull* erforderlich wird.

Die Schritte 4-6 aus Abbildung 5.3 sind grün gestrichelt umrandet und können mit einem existierenden *ConvexHull* beliebig oft für verschiedene geladene Rohbilder durchgeführt werden. Grundsätzlich kann in OFIP entweder das unmodifizierte Rohbild entzerrt werden, oder es kann vor der Entzerrung noch eine Bildkorrektur durchgeführt werden. Dabei kann neben der Subtraktion eines Hintergrundbildes auch eine Shading- und Dunkelstromkorrektur durchgeführt werden. Für alle Korrekturen müssen die jeweiligen Aufnahmen ausgewählt und die Belichtungszeiten dieser Bilder sowie des Rohbildes angegeben werden.

Anschließend wird in Schritt 5 die Entzerrung durchgeführt. Zunächst wird eine automatische Eckenerkennung auf das *ConvexHull* und auch auf das *OrthoRef*-Bild angewendet. Für das *OrthoRef*-Bild identifiziert der Algorithmus stets 4 Ecken, für das verzerrte *ConvexHull* können es aber auch mehr als 10 Ecken sein. Daher wird anschließend eine Suche nach den besten Kandidaten aus allen Ecken innerhalb des *ConvexHull* Bildes durchgeführt und nach der Methode der geringsten Fehlerquadrate die den vier unverzerrten Ecken ähnlichsten Ecken ausgewählt. Die vier Paare aus verzerrten und unverzerrten Ecken-Koordinaten werden genutzt, um daraus eine perspektivische Transformationsmatrix aufzustellen, mit der anschließend das verzerrte Bild entzerrt werden kann (siehe Kap. 2.4.2). Eine Vorlage für diese gesamte Algorithmik der Entzerrung wird in der Dokumentation der Python-Bibliothek *scikit-image* bereitgestellt und wurde für OFIP angepasst und integriert. [SCI24]

Im 6. Schritt kann nun das entzerrte Bild auf die Eck-Koordinaten des Receivers zurechtgeschnitten werden und ergibt das orthoskopische Bild (kurz *OrthoBild*), welches auch die Basis für die Erzeugung von Mittelwertbildern liefert.

5.2 Dynamische ROI-Bestimmung

Aus den *OrthoBildern* müssen für die Verwendung zur Flussdichteberechnung Mittelwertbilder erstellt werden. Diese Mittelwertbilder mit einer deutlich reduzierten Auflösung beinhalten in jedem Pixel den gemittelten Grauwert einer sogenannten ROI (Region of Interest (engl.): relevanter/ausgewählter Bildbereich). Bei [JÄG23] waren dies 16 x 58 ROIs, wobei jedes ROI aus 22 x 22 Pixeln bestand (AR: 3.63) und ein gewisser Pixelbereich der *OrthoBilder* (353 x 1295 Pixel) nicht berücksichtigt wurde (16*22 Pixel = 352 Pixel Breite, 58*22 Pixel = 1276 Pixel Höhe). In OFIP bestehen Mittelwertbilder aus 16 x 59 ROIs mit einer Größe von 25 x 25 Pixeln. Daraus ergeben sich exakt die Abmessungen des *OrthoRef*-Bildes (400 x 1475 Pixel) mit der auch alle entzerrten *OrthoBilder* in OFIP erzeugt werden.

In den vergangenen Arbeiten wurde ein statisches Koordinatenraster über die *OrthoBilder* gelegt und auf dieser Basis Pixel einer ROI zugeordnet. Das hat im Einzelfall zu verschiedenen

Problemen mit Pixelversatz geführt, woraus in der Folge Bildartefakte und Fehlberechnungen resultieren konnten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine dynamische ROI-Bestimmung entwickelt, die sowohl Rohrdeformationen als auch geringe Schiefstellungen der Rohre in den *OrthoBildern* kompensieren kann. Ein Überblick der ROI-Bestimmung und Mittelwertbild-Erzeugung ist in Abbildung 5.4 dargestellt und besteht im Wesentlichen aus 6 Schritten:

- Zerlegung des *OrthoBildes* in 59 horizontale Bildabschnitte (sog. *Slices*)
- Identifikation und Entfernung von „Gap-Reflexionen“ zwischen den Rohren
- Histogramm-Analyse der bereinigten und invertierten Slices
- Bestimmung der horizontalen ROI-Grenzen aus den Histogramm-Maxima und Zusammensetzung der ROI-Matrix
- Erzeugung von gefilterten ROI-Statistiken für jedes ROI (insbesondere den Mittelwert)
- Zusammensetzung und Export eines Mittelwertbildes aus den Mittelwerten der ROI

Der Grundgedanke hinter der dynamischen Festlegung der ROI-Grenzen ist, die Grauwertunterschiede bzw. dunklen Zwischenräume zwischen den Rohren als ROI-Grenzen festzulegen und dies für jeden der 59 vertikalen Bildabschnitte unabhängig und automatisch abzuarbeiten. Dann ist die absolute Lage, Breite und Verformung jedes einzelnen Rohres nicht mehr relevant, es existieren lediglich drei Randbedingungen:

- ausreichender Grauwertkontrast, um einzelne Rohre im Bild identifizieren zu können
- vorkommen von 16 Rohren im *OrthoBild*, bzw. 15 Rohrzwischenräumen
- es dürfen keine hellen Reflexionen zwischen den Rohren vorkommen

Gerade die letzte Randbedingung lässt sich jedoch in der Regel nicht erfüllen. Daher wird im zweiten Schritt der ROI-Bestimmung, nach Zerlegung des *OrthoBildes* in 59 horizontale Slices, eine Reflexionsbereinigung durchgeführt.

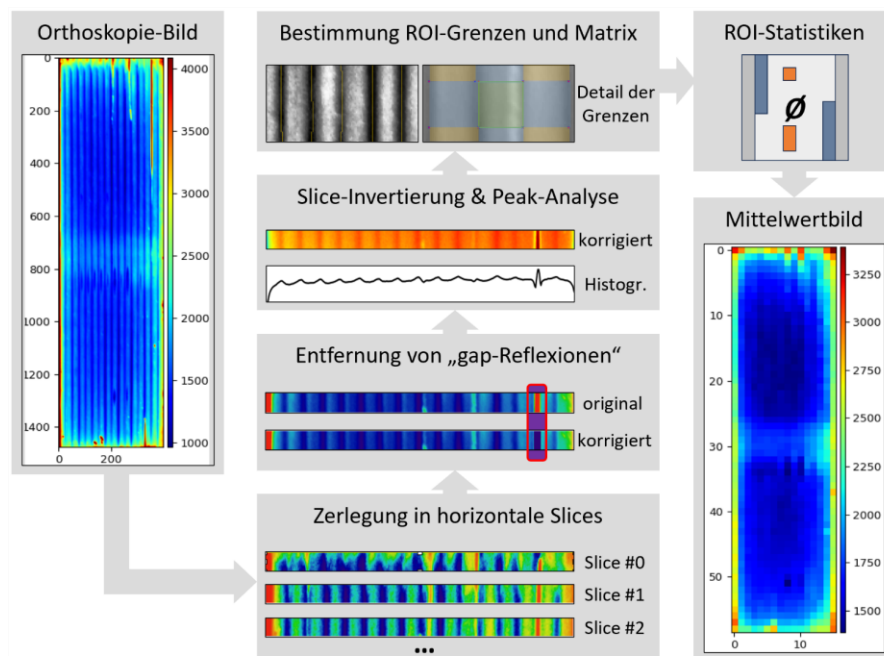


Abbildung 5.4: Ablauf der dynamischen ROI-Bestimmung und Mittelwertbild-Erzeugung im Überblick

Reflexionsbereinigung

Die Eliminierung von Reflexionen basiert auf der Signalanalyse vertikaler Histogramme der einzelnen Slices. Dazu wird zunächst ein vertikales Histogramm über den aktuellen Slice gebildet, also $H_v(x) = \sum_y g_{y,x}$. Dieses eindimensionale Signal wird anschließend auf seine lokalen Maxima hin untersucht. Die Liste der gefundenen Maxima wird dann hinsichtlich der Prominenz, also der Distanz, mit der die Maxima über die Signalgrundlinie hinausragen, analysiert. Reflexionen weisen deutlich größere Prominenzen auf als helle Bereiche auf den Rohren und können daher voneinander unterschieden werden. Das Maximum mit der größten Prominenz wird dahingehend geprüft, ob es eine Reflexion einer Rohrlücke („gap-Reflexion“) ist. Falls ja, wird der horizontale Slice im Bereich des Peaks invertiert, um einen dunklen Rohrzweischenraum zu erzeugen. Anschließend wird das Maximum aus der Liste der Maxima gelöscht. Diese Schritte werden wiederholt, bis die Anzahl der Maxima 14 erreicht und keine Reflexion mehr gefunden wurde. Das bereinigte Histogramm wird anschließend weiterverwendet um die ROI-Grenzen zu ermitteln. Ein Ablaufdiagramm des Algorithmus für einen einzelnen Slice ist im Anhang III dargestellt. Die Reflexionsbereinigung wird an einem Beispiel in Abbildung 5.5 verdeutlicht. Hier wird ein *MaxiBild* (vgl. Kap.8.1.1) der Heliostatgruppe 2 und daraus das 8. Slice analysiert.

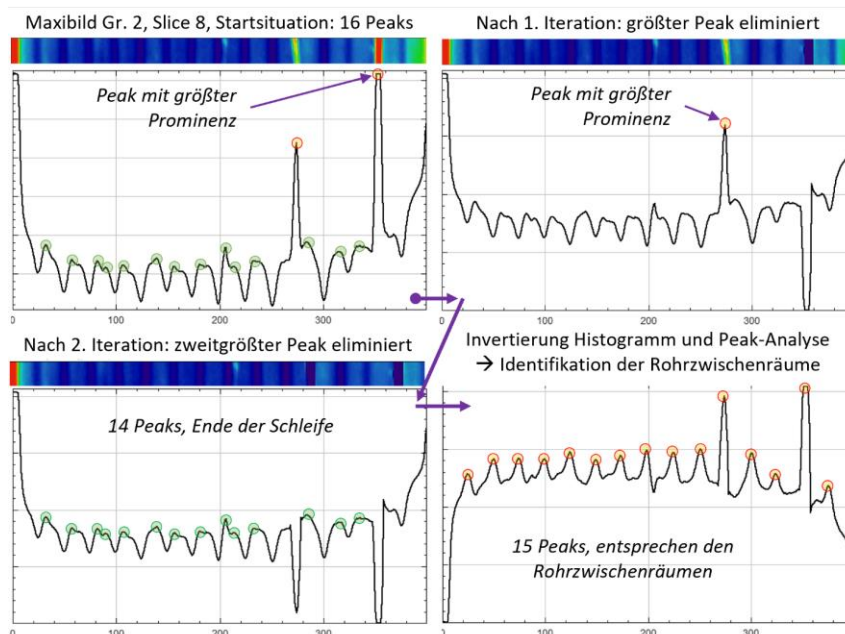


Abbildung 5.5: Beispiel der Reflexionskorrektur an einem Slice

Zu Beginn der Reflexionsanalyse weist das vertikale Histogramm 16 Maxima auf. Hierbei wird ausgenutzt, dass die verwendete Python-Funktion (*find_peaks* aus *scipy.signal._peak_finding*) die Möglichkeit bietet, Kriterien wie minimale Breiten, Prominenzen und Abstände zu definieren, um numerische Spitzen von den gesuchten Maxima zu unterscheiden. Im Bild oben links ist das Histogramm dargestellt und grün bzw. orange markiert sind alle identifizierten Maxima. Oberhalb des Histogramms ist zur Verdeutlichung das horizontale Slice in Falschfarben (Farbskala „Jet“, blau-rot) abgebildet. Das Maximum mit der größten Prominenz wird als gap-Reflexion identifiziert und der Slice-Bereich um dieses Maximum wird invertiert (im Bild oben rechts). Auch das zweithöchste Maximum wird als Reflexion identifiziert und die Reflexionsanalyse ist beendet. Invertiert man das reflexions-bereinigte Slice und bildet erneut

ein vertikales Histogramm (unten rechts), kann man darin 15 Maxima ablesen, aus denen die horizontalen ROI-Grenzen abgeleitet werden.

Es gibt im unteren Bereich des Receivers sehr stark reflektierende Flecken auf den Receiver-Rohren 6 und 7 (von links). Würden solche Reflexionen auch eliminiert, würde das ggf. zu zusätzlichen Rohrzwischenräumen führen und die ROI-Grenzen verfälschen. Das wurde im Algorithmus berücksichtigt, sodass Reflexionen die nicht im erwartbaren Koordinatenbereich einer Rohrlücke liegen, nicht eliminiert werden. Ein Ergebnis der Reflexionskorrektur für das gesamte *OrthoBild* der Gruppe 2 ist im Anhang IV dargestellt.

Dynamische ROI-Grenzen und ROI-Matrix

Zur weiteren Stabilisierung der Bestimmung der ROI-Grenzen für Bilder mit vielen Reflexionen oder geringem Kontrastverhältnis werden die in den Reflexions-korrigierten Slices identifizierten Maxima nicht sofort als ROI-Grenzen übernommen, sondern auf ihre Position hin überprüft. Aufgrund einer nominellen ROI-Breite von 25 Pixeln sollte die X-Koordinate jedes Maximums in einem gewissen Bereich um ein Vielfaches dieser 25 Pixel liegen. Ist das nicht der Fall, wird die Position des Maximums durch Mittelung zwischen benachbarten Grenzen korrigiert, bevor eine ROI-Grenze festgelegt wird. Abschließend wird aus den individuellen horizontalen ROI-Grenzen aller Slices sowie dem festen vertikalen Raster von 25 Pixeln eine ROI-Matrix mit Eck-Koordinaten für alle ROIs erstellt. Diese Matrix dient als Grundlage für die Erstellung des Mittelwertbildes. Der Verfahrensablauf der ROI-Grenzermittlung ist im Anhang V dargestellt.

Die ROI-Grenzermittlung und Matrix-Erstellung werden ebenfalls an einem Beispiel veranschaulicht. In Abbildung 5.6 ist auf der linken Seite ein *OrthoBild* mit verstärktem Kontrast dargestellt, mit einer Überlagerung von vertikalen gelben Linienstücken, welche die identifizierten horizontalen ROI-Grenzen pro Slice darstellen.

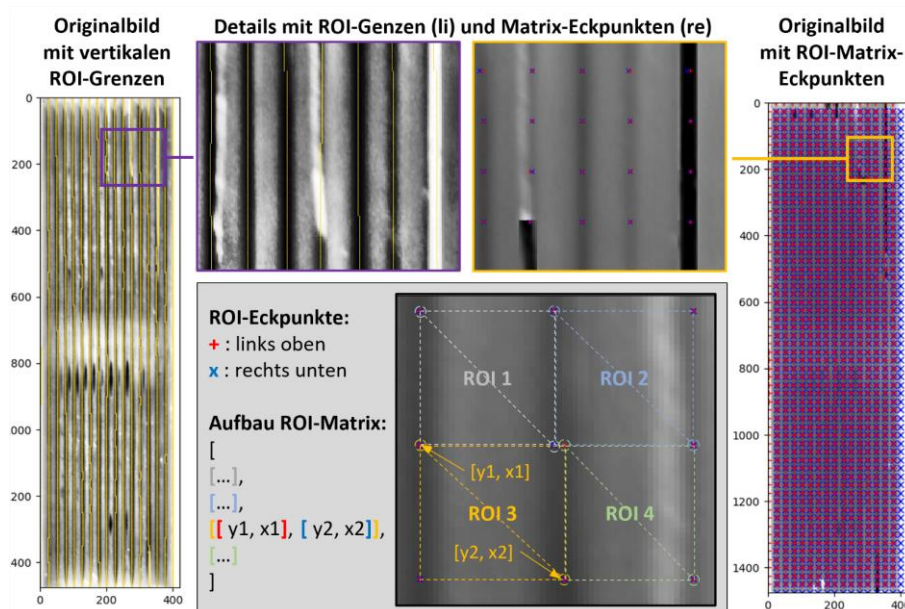


Abbildung 5.6: Beispiel der Bestimmung der ROI-Grenzen und ROI-Matrix

Rechts im Bild ist das aus den reflexions-korrigierten Slices zusammengesetzte Originalbild dargestellt mit einer Überlagerung der ermittelten Eckpunkte der ROI-Segmente der ROI-Matrix.

Die Grenzen jedes einzelnen ROI werden dabei durch ein rotes „+“ in seiner oberen Linken Ecke sowie ein blaues „x“ in seiner unteren rechten Ecke beschrieben. Mittig unten im Bild ist nochmal verdeutlicht, dass jedes ROI in der Breite variieren kann. Außerdem wird der Aufbau der ROI-Matrix, die aus einer verschachtelten Liste besteht, an dem Beispiel der vier farblich dargestellten ROIs erklärt. Das Verfahren der dynamischen Ermittlung der ROI-Grenzen funktioniert auch für geringfügig schiefgestellte *OrthoBilder*, wie sie ggf. bei unsauberer Entzerrung entstehen können. Ein Beispiel dafür ist im Anhang VI gezeigt und erläutert.

5.3 Erzeugung von gefilterten Mittelwertbildern

Nachdem die ROI-Matrix ermittelt wurde, lässt sich diese nutzen um aus dem unmodifizierten *OrthoBild* ein Mittelwertbild zu erzeugen. Aus [JÄG23] ist bekannt, dass eine Filterung der Grauwerte innerhalb der ROI, die zur Berechnung der Mittelwerte herangezogen werden, eine deutliche Reduktion von störenden Artefakten bewirkt. Damit lässt sich eine Verbesserung der Genauigkeit in der gesamten Verfahrenskette zur Flussdichteberechnung erzielen. Daher wurden auch im Rahmen dieser Arbeit Möglichkeiten zur Filterung der ROI-Daten berücksichtigt. Grundsätzlich kommen drei Filtermechanismen zum Einsatz:

- Geometrische Filterung (lokal): Der oberste und unterste Rand der *OrthoBilder* weist häufig starke Bildstörungen und überbelichtete Bereiche auf. Daher kann über das Attribut „vtrim“ (vertical trimming (engl.): vertikale Beschneidung) für die oberste und unterste Bildzeile ein Pixelbereich angegeben werden, der von der Mittelwertberechnung ausgenommen wird (in dieser Arbeit: 15 Pixel).
- Geometrische Filterung (global): Innerhalb jedes ROI besteht der rechte und linke Rand aus Pixeln, die einer Rohrlücke zuzuordnen sind und daher bei der Mittelwertberechnung ausgeschlossen werden sollten. Dies kann über das Attribut „hpad“ (horizontal padding (engl.): horizontale Polsterung) definiert werden (in dieser Arbeit: 3 Pixel).
- Wertebereichs-Filterung (global): Weiterhin wurde in [JÄG23] eine Begrenzung der am ROI-Mittelwert beteiligten Pixel vorgeschlagen. Pixel mit Werten unterhalb einer Minimalgrenze oder oberhalb einer Maximalgrenze sollten dabei ignoriert werden. Dies ist über das Attribut „limits“ möglich (in dieser Arbeit: [0, 4000]).

Um eine ausreichende Flexibilität bei der Erzeugung der Mittelwertbilder und Einstellbarkeit der vorgenannten Filter zu erhalten, wurden zwei Klassen in Python implementiert: das „*ROISlice*“ und das „*MeanGreylmage*“. Ein *ROISlice* wird aus den Eckpunkten eines Eintrages der ROI-Matrix erzeugt, und das *MeanGreylmage* beinhaltet eine Matrix aus *ROISlices*, auf die es zugreifen und deren Eigenschaften es abfragen kann. Jedes *ROISlice* verwaltet und berücksichtigt dabei die vorgenannten Filter selbst. Zunächst wird die zuvor ermittelte ROI-Matrix zusammen mit dem *OrthoBild* übergeben, ein *MeanGreylmage* erzeugt und die Filterparameter gesetzt. Aus den gefilterten Mittelwerten aller *ROISlices* wird dann eine Matrix erstellt die als Grauwertbild ausgelesen werden kann. Ein Ablaufdiagramm der Mittelwertbild-Berechnung, bei der diese beiden Klassen verwendet werden, befindet sich im Anhang VII.

6 Materialanalyse von Receiverrohr und Strahlungsschutz

6.1 Messung der Reflexionseigenschaften

Für die Steigerung der Genauigkeit der optischen Flussdichtemessung ist eine Kenntnis der Reflexions-Eigenschaften sowohl des Receivers als auch des Strahlungsschutzes von großer Bedeutung. Bei den bisherigen Versuchen zur optischen Flussdichtemessung am HPMS-II Receiver kam es bei der Bestrahlung aus einigen Heliostatgruppen zu problematischen Reflexionen insbesondere zwischen den Lücken der Receiverrohre, die Überbelichtungen hervorgerufen haben. Dadurch konnten diese Bilder nicht vollständig ausgewertet werden, und es kam zu Problemen bei der Flussdichteberechnung. Die Materialanalyse dient dazu, die Raytracing-Simulation SPRAY des DLR durch winkelabhängige Reflexionseigenschaften der Materialien zu ergänzen, um eine möglichst realitätsnahe Simulation zu ermöglichen. Damit wird erwartet, dass die mit optischer Messtechnik nicht erfassbaren Informationen ergänzt werden können. Der Ansatz für diese Kompensation wird in Kap. 8.4 beschrieben.

Die Receiverrohre des HPMS-II Receivers sind angelehnt an den vorhergehenden „TubeMon“-Testreceiver und mit der gleichen Beschichtung versehen, die von *Brightsource Israel* speziell für Rohrreceiver entwickelt wurde. Der Strahlungsschutz hinter den Absorberrohren des HPMS-II Receivers ist mit dem Hitzeschutz „*CeProTec® Mastic HT*“ beschichtet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Materialproben eines kleinen Receiverrohr-Segments des TubeMon-Receivers sowie eine neu angefertigte planare Probe des Strahlungsschutzes vermessen. Hierbei wurde mittels eines *Perkin Elmer Lambda 1050*-Spektrophotometers für verschiedene Bestrahlungswinkel der Reflexionsgrad ρ ermittelt. Die Proben und der Messaufbau sind in Abbildung 6.1 dargestellt.

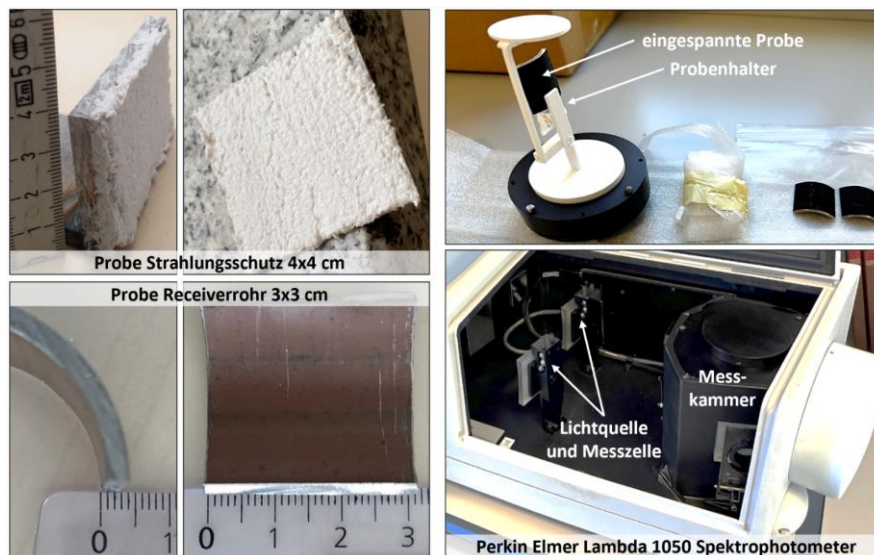


Abbildung 6.1: Proben und Messaufbau zur Messung der Reflexionseigenschaften

Die Proben wurden in einen zylindrischen Probenhalter eingespannt und über Kopf in eine Messkammer gesteckt. Der Bestrahlungswinkel wurde durch eine Drehung des Probenhalters variiert. Der minimale einstellbare Bestrahlungswinkel ist durch die Konstruktion des Messgeräts auf 10 Grad begrenzt.

Es wurden jeweils zwei Proben des Strahlungsschutzes und der Receiverrohre vermessen. Der Winkel wurde dabei jeweils von 10° bis 60° in 6 Schritten variiert. Der spektrale Messbereich betrug 250 nm bis 2500 nm. Die Ergebnisse der Messungen für das gesamte Spektrum sowie den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (380 nm – 780 nm) sind in Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 jeweils für eine der beiden Proben dargestellt.

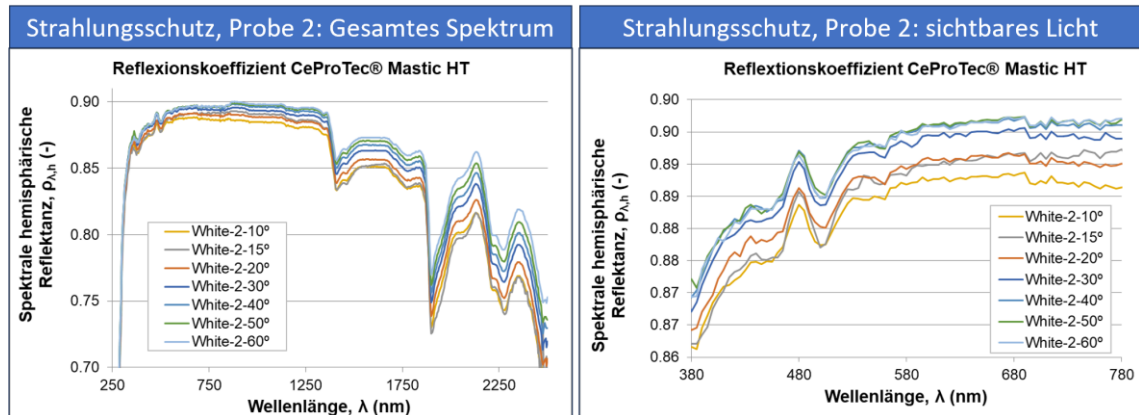


Abbildung 6.2: Ergebnisse der spektralen Reflexionsmessung der Strahlungsschutz-Probe 2

Der Reflexionsgrad ρ des Strahlungsschutzes ist bei kleinen Wellenlängen bis ca. 1300nm am größten und liegt dort bei ca. 90% (Probe 2) bzw. ca. 91% (Probe 1). Im höheren Wellenlängenbereich fällt er un stetig bis auf knapp über 70% ab. Im Bereich des sichtbaren Lichtes liegt ρ zwischen knapp 87% bei 380nm und gut 89% bei 780 nm (bei 10° Bestrahlungswinkel). Mit steigendem Bestrahlungswinkel steigt bei allen Proben beider Materialien die Reflexionsrate. Für den Strahlungsschutz liegt der Wert bei 60° um ca. 1% höher als bei 10°.

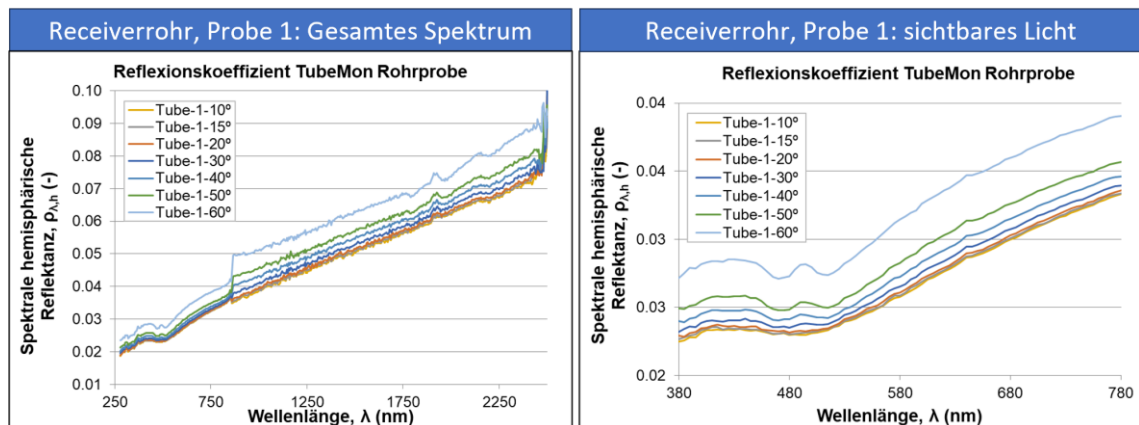


Abbildung 6.3: Ergebnisse der spektralen Reflexionsmessung der Receiverrohr-Probe 1

Der spektrale Verlauf der Reflexionsrate der Receiverrohre zeigt einen annähernd linearen Verlauf, zwischen ca. 2% bei 250 nm bis knapp über 7% bei 2500 nm. Im Bereich des sichtbaren Lichtes liegt ρ zwischen ca. 2,5% bei 380nm und gut 3,5% bei 780 nm (bei 10° Bestrahlungswinkel). Mit steigendem Bestrahlungswinkel liegt der Wert für die Receiverrohre bei 60° etwas mehr als 1% über der Referenz bei 10°. Die Mess-Ergebnisse der winkelabhängigen Reflexionsgrade sind bei der Integration der Materialeigenschaften in die Raytracing-Simulation in Kap. 8.4.2 von besonderer Bedeutung und werden dort aufgegriffen.

6.2 Nutzung des Strahlungsschutzes für die Intensitätsnormierung

Während der Entwicklung des Scan-Verfahrens wurden die Reflexionseigenschaften des Strahlungsschutzes am STJ-Receiver ausführlich untersucht und einem Lambert'schen Target gegenübergestellt. Dabei wurde bei Scheinwerferbestrahlung das Verhältnis der am Strahlungsschutz und auf dem Target gemessenen Grauwerte bei unterschiedlichen Bestrahlungsdistanzen genauer analysiert, siehe Abbildung 6.4. [OFF24]

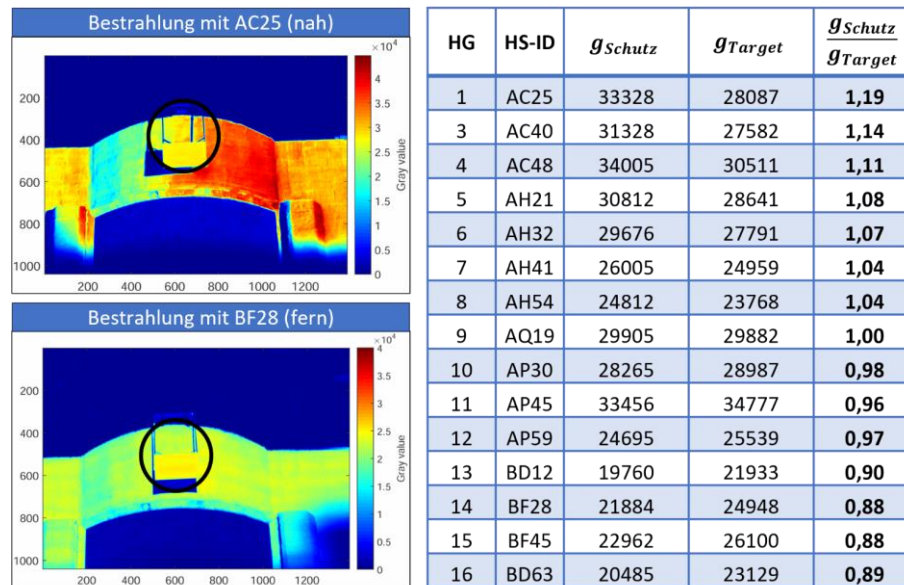


Abbildung 6.4: Vergleich des STJ-Strahlungsschutzes mit einem Lambert'schen Target. Nach [OFF24]

Bei kurzen Distanzen lagen die Grauwerte des Strahlungsschutzes oberhalb derer des Targets, bei langen Distanzen darunter. Da der maximale relative Unterschied zwischen den Quotienten g_{Schutz}/g_{Target} bis zu 35 % beträgt, wurde der Einsatz eines diffusen Targets zur Intensitätsnormierung empfohlen. Außerdem wurde die Vermutung aufgestellt, dass die qualitative Abweichung des Strahlungsschutzes von einem Lambert'schen Reflexionsverhalten tendenziell eher retro-reflektiv statt spiegelnd ist. Eine Zusammenfassung der Erkenntnisse ist in Abbildung 6.4 zusammengefasst. [OFF24]

Beim Einsatz eines diffusen Targets muss dies sich innerhalb des Kamerabildes befinden und daher möglichst nah am Receiver angebracht werden. Bei früheren Arbeiten wurde das Target entweder über eine Halterung am Turm befestigt, oder es wurden Teile des Strahlungsschutzes demontiert und durch das Target ersetzt. Aufgrund der Gegebenheiten am HPMS-II Receiver entfallen beide Möglichkeiten, daher wurde in Vorgängerarbeiten eine Teleskoparbeitsbühne genutzt, um das Target auf die Höhe des Receivers zu fahren. Dort war die Arbeitsbühne jedoch Windböen ausgesetzt, die Verschiebungen des Targets in den Bildern erzeugt haben. [MAT22]

Aufgrund der vorgenannten Schwierigkeiten wird im Rahmen dieser Arbeit der Einsatz eines Targets ausgeschlossen, da die Praxistauglichkeit des Verfahrens im Vordergrund steht. Daher muss für Intensitätsnormierungen auf den Strahlungsschutz zurückgegriffen werden. Durch eine Nutzung der Vergleichsfaktoren von Strahlungsschutz zu Target aus [OFF24] wird eine Kompensation der Abweichungen des Strahlungsschutzes angestrebt.

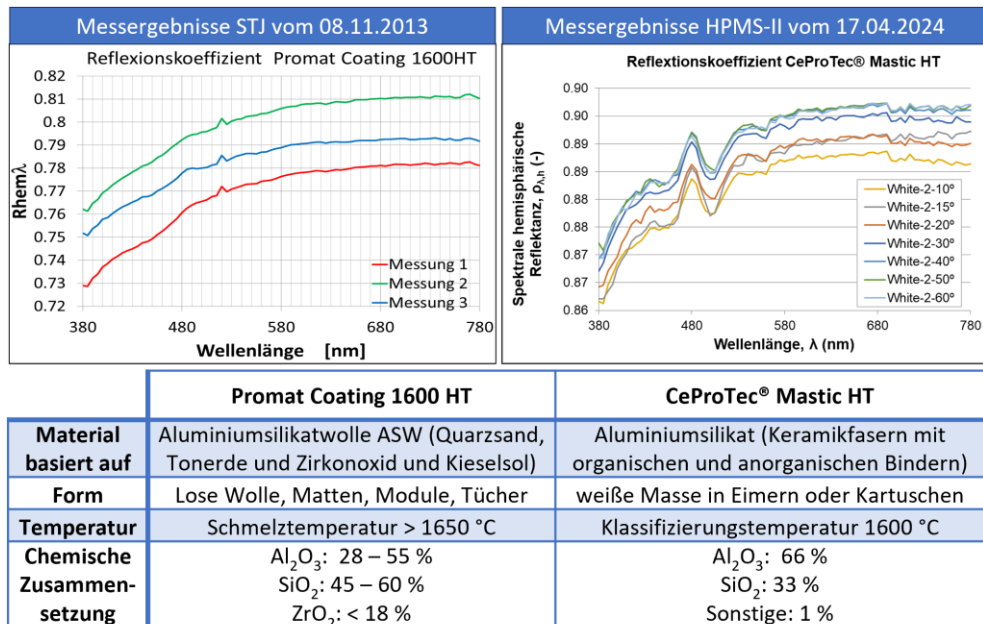


Abbildung 6.5: Vergleich der Reflexions- und Materialeigenschaften der Strahlungsschutz-Coatings des STJ- und HPMS-II Receivers

Ein Vergleich des Reflexionsverhaltens der Strahlungsschutz-Beschichtung der STJ- und HPMS-II Receiver zeigt einen qualitativ vergleichbaren Verlauf, siehe Abbildung 6.5. Weiterhin ist die chemische Zusammensetzung der Beschichtung ähnlich und beide basieren auf einer pastösen Beschichtung auf Aluminiumsilikat, sodass eine Nutzbarkeit der Vergleichsfaktoren als ausreichend angesehen wird. Auf die Vergleichbarkeit der Reflexionseigenschaften wird bei der Bestimmung der Intensitätsnormierung der Grauwertbilder bei Scheinwerfer-Bestrahlung in Kap. 7.1.2 sowie bei der Bestimmung der Reflexionseigenschaften mittels Scan-Verfahren in Kap. 8.1.2.1 verwiesen.

7 Identifikation einer optimalen Kameraposition

Aufgrund von starken Reflexionen für gewisse Heliostatgruppen kam es bei einer Positionierung der Kamera mittig vor dem Receiver in den bisherigen Arbeiten zu Problemen bei der Bildauswertung und Flussdichtebestimmung. Innerhalb dieses Kapitels wird daher eine Methode zur effizienten messtechnischen Ermittlung und Bewertung alternativer Kamerapositionen vorgestellt und auf den HPMS-II Rohrreceiver in Jülich angewendet.

Bei der Suche nach optimalen außermittigen Kamerapositionen ändert sich die Betrachtungsperspektive des Receivers. Durch die schräge Betrachtung der Rohre ist dann ein geringfügig anderer Teil der Rohrvorderseiten in den Aufnahmen sichtbar als in den Vorgängerarbeiten. Trotz des schrägen Blickwinkels ist eine sinnvolle Analyse der Flussdichte möglich, da sowohl die angewendete Reflexionskorrektur als auch die Korrektur der Richtungszusammensetzung der Strahlung ebenfalls basierend auf dieser Kameraposition durchgeführt wird (siehe Kap. 8.3). Weiterhin wurde vorab durch Einzelaufnahmen sichergestellt, dass ein Winkelversatz der Kamera nicht zu einem unzulässig starken Versatz der

im Bild erkennbaren hellen Bereiche auf den Vorderseiten der Rohre führt. Eine beispielhafte Gegenüberstellung ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Hier wurden Aufnahmen bei Scheinwerfer-Bestrahlung aus der Heliostatgruppe 8, die einen großen Azimutwinkel zum Receiver aufweist, ausgewählt. Der in der Abbildung weiß umrandete Bereich zeigt auf, dass der Grauwert-Gradient über dem Rohr bei exzentrischer Kameraposition (-6.5m) etwas steiler ist als bei mittlerer Kameraposition. Es ist jedoch weiterhin eine ausreichende Erfassung der reflektierten Strahlung im Bild erkennbar, sodass die Auswertung der Aufnahmen als nicht gefährdet eingestuft wird.

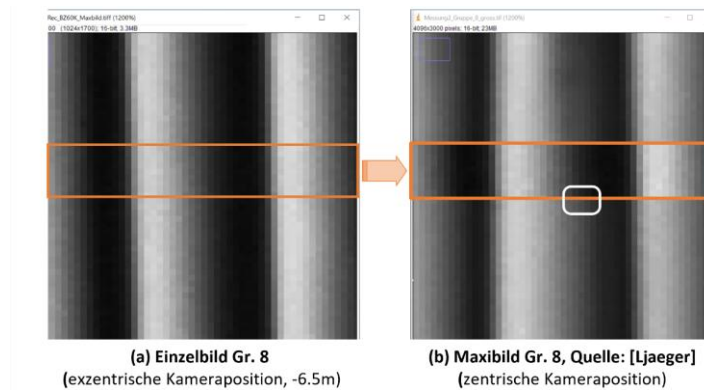


Abbildung 7.1: Ausschnitte von Einzelbild Gruppe 8 aus eigener Messung (links) und MaxiBild Gruppe 8 aus [JÄG23] (rechts); Vergleich des sichtbaren Teils der Rohrvorderseiten

7.1 Effiziente Identifikationsmethode

Aufgrund des komplexen Reflexionsverhaltens des Receivers ist eine Bewertung der störenden Reflexionen in den Bildaufnahmen nur direkt messtechnisch möglich. Um den Kraftwerksbetrieb nicht zu beeinträchtigen und möglichst konstante Versuchsbedingungen zu haben, sind dafür Nachtmessungen am besten geeignet. Die Messungen bei Nacht sind jedoch mit einem hohen logistischen Aufwand verbunden, weil ein mobiler Scheinwerfer an verschiedenen Positionen im Heliostatfeld aufgestellt und händisch auf den Receiver ausgerichtet werden muss. Daher ist für ein praxistaugliches Verfahren die Entwicklung einer zeiteffizienten Identifikationsmethode notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein zweistufiger Messablauf entwickelt, der im Folgenden beschrieben wird.

7.1.1 Vorab-Bewertung (qualitativ)

Auf dem Versuchsgelände des Solarturms Jülich steht ein Bereich von ca. 20 m Breite zwischen dem Heliostatfeld und dem Multifokusturm für die Installation einer Kamera zur Verfügung. Die aktuelle Position des Kameramasts liegt bei -19.8 m im STJ-Koordinatensystem und damit direkt frontal vor den Versuchsebenen des MFT. Für die Neupositionierung der Kamera wurde ein Bereich von bis zu 8 m Abstand zu der aktuellen Kameraposition nach Ost und West festgelegt.

Die Ergebnisse der bisherigen Abschlussarbeiten, die den HPMS-II Receiver untersucht haben, haben gezeigt, dass die Bildreflexionen sich selbst bei kleinen Änderungen der Bestrahlungswinkel bereits unterscheiden. Dies ist bei der Suche nach einer optimalen Kameraposition zu beachten, sodass ein engmaschiges Raster an 17 potentiellen Positionen im

Abstand von einem Meter definiert wurde. Abbildung 7.2 zeigt eine Skizze des vorderen Bereichs des Versuchsgeländes mit dem Variationsbereich für die Kamerapositionen.

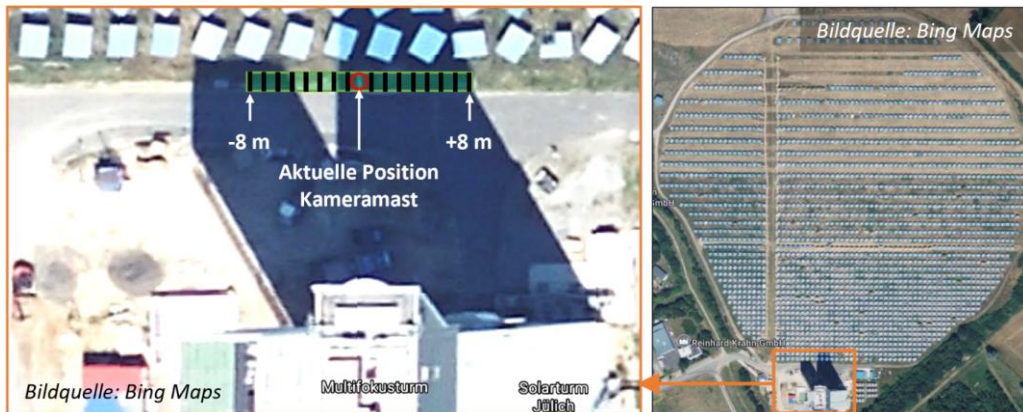


Abbildung 7.2: Skizze des vorderen Bereichs des Versuchsgeländes mit dem Variationsbereich für die Kamerapositionen

Die teilweise in den Kameraaufnahmen sichtbaren, störenden Reflexionen sind sowohl von der Kameraposition als auch von der Bestrahlungsrichtung durch die verschiedenen Heliostate abhängig. Daraus ergibt sich bereits für 16 Heliostatgruppen und 17 mögliche Kamerapositionen eine große Anzahl von 272 möglichen Kombinationen, die hinsichtlich der auftretenden Reflexionen bewertet werden müssten. Die Aufnahme von Einzelbildern für alle Kombinationen wäre nicht mit einem vertretbaren Aufwand möglich. Insbesondere das Versetzen der Kamera von einer Position zur nächsten ist mit einem Ausrichtungsaufwand verbunden, weil die Kamera an den verschiedenen Positionen mit hoher Wiederholgenauigkeit ausgerichtet werden müsste.

Daher besteht der erste Schritt des im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Identifikationsverfahrens in einer Vorauswahl der potentiellen Kameraposition durch eine Beurteilung des Reflexionsverhaltens mit bloßem Auge, wobei der Betrachter der Reihe nach das Messraster der Kamerapositionen durchschreitet während der Receiver aus einer fixen Heliostatposition bestrahlt wird. Die Beurteilung der mit bloßem Auge erkennbaren Reflexionen auf dem Receiver beinhaltet eine qualitative Beurteilung der Intensität bzw. der räumlichen Ausbreitung sichtbarer Reflexionen auf einer Skala von 1 (gering) bis 4 (stark) sowie E (extreme Reflexion). Die Beurteilung wird protokolliert und der Ablauf für alle 16 Heliostatgruppen-Referenzpositionen wiederholt. Anhand des Messprotokolls erfolgt dann eine Vorauswahl der vielversprechendsten Kamerapositionen, die über alle ausgewerteten Heliostat-Positionen hinweg die geringsten Reflexionen aufweisen.

7.1.2 Bewertung mittels Einzelbildern (quantitativ)

Durch die Reduktion der Kandidaten für optimale Kamerapositionen aus der Vorab-Auswertung auf wenige potentielle Kamerapositionen reduziert sich der Versuchsaufwand deutlich. Für die verbleibenden Positionen werden im zweiten Schritt Einzelbilder bei unterschiedlichen Bestrahlungsrichtungen aufgenommen, um eine quantitative Bewertung der Stärke der Reflexionen in den aufgenommenen Bildern für die jeweiligen Kamerapositionen durchführen zu können. Hierbei ist es nicht notwendig, alle 16 Heliostatgruppen zu berücksichtigen. Die Aufnahme von Einzelbildern ermöglicht eine Quantifizierung und objektive Bewertung der Höhe

der voraussichtlich auftretenden Reflexionen in den aufgenommenen Bildern. Ein Überblick des Ablaufs der Bildauswertung ist in Abbildung 7.3 dargestellt und wird im Folgenden genauer beschrieben.

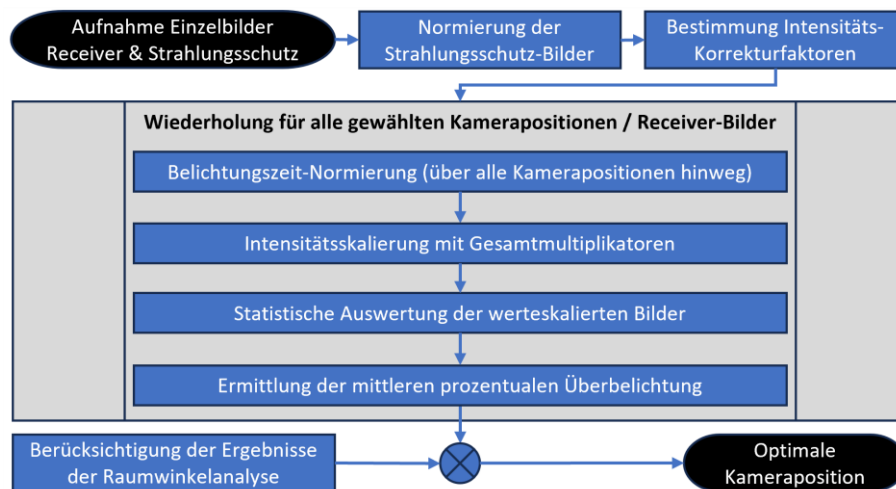


Abbildung 7.3: Ablauf der Bildauswertung der Einzelbilder zur Identifikation optimaler Kamerapositionen

Um in allen Bildaufnahmen Grauwerte in sinnvollen mittleren Wertebereichen (ohne Über- oder Unterbelichtung) zu erzielen, muss die Belichtungszeit für jede Heliostatgruppe einzeln angepasst werden. Die Bestrahlung des Receivers durch einen Scheinwerfer aus unterschiedlichen Distanzen führt dazu, dass die Fläche des Scheinwerferfokus und damit die Lichtintensität der auf den Receiver treffenden Strahlung variiert. Daher sollten die Bilder mit Bestrahlung aus unterschiedlichen Heliostatgruppen hinsichtlich der Bestrahlungsintensität normiert werden, um eine vergleichende Bewertung durchführen zu können. Dazu wird für jede Heliostatgruppe ein zusätzliches Referenzbild des Strahlungsschutzes unterhalb des Receivers aufgenommen, wobei der Scheinwerferfokus jeweils mittig auf diesen Bereich gerichtet ist.

Die Unterschiede der mittleren Grauwerte im Bereich des Strahlungsschutzes werden dann für den Helligkeitsausgleich der Einzelbilder genutzt. Dabei können je Heliostatgruppe die Bilder aller Kamerapositionen mit den gleichen Faktoren multipliziert werden, aufgrund der weitestgehenden Richtungsunabhängigkeit der Reflexionen des Strahlungsschutzes. Für den Helligkeitsausgleich werden zunächst die Belichtungszeiten aller Strahlungsschutzbilder gleichgesetzt, siehe Gl. (7.1). Dabei wird auf die kleinste Belichtungszeit normiert, damit durch die Normierung keine überbelichteten Bilder entstehen.

$$f_{BZ,j} = \frac{t_{bel,min}}{t_{bel,j}} \quad (7.1)$$

Danach wird in den so normierten Bildern des Strahlungsschutzes ein fester Bereich (eine ROI), definiert. Dabei muss darauf geachtet werden, dass im ausgewählten Bereich keine erkennbaren Ungleichmäßigkeiten (Verschmutzung, Beschädigung, Verschattung oder Kanten) vorliegen. Über diese ROI werden die enthaltenen Grauwerte gemittelt. Anschließend wird der Quotient aus dem maximalen Mittelwert durch die jeweiligen Mittelwerte der Bilder bestimmt, siehe Gl. (7.2). Die Normierung wird mit dem maximalen Grauwert im Zähler gewählt, damit im Nachgang keine Einzelbilder des Receivers mit Faktoren kleiner eins multipliziert werden, weil sonst

eventuelle Überbelichtungen in der Receiverfläche nicht mehr als solche identifiziert werden können. Dieser Quotient wird als heliostatspezifischer Intensitätskorrekturfaktor bezeichnet:

$$f_{HS,j} = \frac{\bar{g}_{ROI,max}}{\bar{g}_{ROI,j}} \quad (7.2)$$

Aufgrund der Einschränkung, dass die Eigenschaften des Strahlungsschutzes nicht hinreichend Lambert'sch sind um direkt für eine Intensitätsnormierung genutzt werden zu können (vgl. Kap. 6.2) wird der dort beschriebene Zusammenhang zwischen den Grauwerten des Strahlungsschutzes und eines diffusen Targets als weiterer Korrekturfaktor definiert:

$$f_{OG,j} = \frac{\bar{g}_{tgt,max}}{\bar{g}_{SS,max}} * \frac{\bar{g}_{SS,j}}{\bar{g}_{tgt,j}} \quad (7.3)$$

Aus Gl. (7.2) und Gl. (7.3) ergibt sich schließlich multiplikativ der Gesamtfaktor zur Intensitätsnormierung der Grauwertbilder:

$$f_{IN,j} = f_{HS,j} * f_{OG,j} \quad (7.4)$$

Dieser korrigierte Normierungsfaktor wird für die Intensitätsnormierung aller Einzelbilder des Receivers aus verschiedenen Heliostatgruppen und Kamerapositionen genutzt. Analog zu den Strahlungsschutzbildern müssen vorher die Belichtungszeiten der Receiver-Einzelbilder normiert werden. Bei dieser Belichtungszeit-Normierung müssen alle Bilder aller Kamerapositionen auf die gleiche Belichtungszeit normiert werden, damit später ein quantitativer Vergleich zwischen den verschiedenen Kamerapositionen möglich ist.

7.1.2.1 Messungen mit unterschiedlichen Azimut-Winkeln

Wie auch in Kap. 3.1 beschrieben, ist das Heliostatfeld in 16 Gruppen eingeteilt und für jede Gruppe gibt es vier repräsentative Heliostate. Für die Bewertung der verschiedenen potentiellen Kamerapositionen werden daraus Heliostate ausgewählt, die eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Azimut-Winkel bezüglich dem Receiver aufweisen um eine möglichst gute Datenbasis für die Bewertung der potentiellen Kamerapositionen zu erhalten. Bei mehreren Heliostaten aus unterschiedlichen Gruppen, die einen ähnlichen Azimut-Winkel aufweisen, muss zur Reduktion des Messaufwandes nur ein Heliostat bzw. eine Gruppe ausgewählt werden.

Durch die Bestrahlung des Receivers aus möglichst vielen unterschiedlichen Azimut-Winkeln lässt sich darüber hinaus der Verformungszustand der Receiverrohre und dessen Einfluss auf die Bildaufnahme und sichtbaren Reflexionen aus unterschiedlichen Kamerapositionen charakterisieren. Basierend auf den folgenden Informationen werden die Azimut-Winkel von jedem repräsentativen Heliostaten berechnet:

- Position der repräsentativen Heliostaten im globalen STJ-Koordinatensystem
- Offset des HPMS-II Receivers zum STJ-Koordinatensystem
- Heliostatposition relativ zum HPMS-II Receiver

Tabelle 7.1 zeigt, sortiert nach dem Azimut-Winkel der Heliostat-Position zum Receiver, welche repräsentativen Heliostat-Positionen für die Suche nach einer optimalen Kameraposition ausgewählt wurden. Ein Azimut-Winkel von 0° entspricht dabei einer frontalen Ausrichtung des Heliostaten zum Receiver, die positive Drehrichtung ist Richtung Osten.

Tabelle 7.1: Auswahl repräsentativer Heliostat-Positionen für die Messungen zur Identifikation optimaler Kamerapositionen

HS-Gruppe	HS-Adresse	Azimut-Winkel [°]	Abstand zu Receiver [m]	Winkelbereich HG-Zentrum [°]
5	AH21	-43	82.67	-43 bis -39
1	AC27	-30	43.01	-38 bis -30
13	BD11	-26	226.22	-29 bis -26
10	AP30	-5	98.93	-5 bis -2
6	AH32	1	60.40	-3 bis 1
2	AC33	8	37.75	8 bis 16
15	BD46	17	212.07	16 bis 18
11	AP45	30	114.37	27 bis 30
3	AC40	44	51.88	44 bis 51
4	AC48	62	80.39	62 bis 67

Aus den 16 Heliostatgruppen wurde eine Auswahl von 10 Heliostat-Positionen ausgewählt. Die Gruppen 7, 8, 9, 12, 14 und 16 wurden nicht verwendet, da deren Azimut-Winkel zum Receiver bereits durch die verwendeten Gruppen annähernd abgedeckt sind. Weiterhin wurde darauf geachtet, auch verschiedene Abstände zum Receiver zu berücksichtigen.

7.1.2.2 Messungen mit unterschiedlichen Raumwinkeln

Neben der quantitativen Bewertung der potentiellen Kameraposition anhand unterschiedlicher Azimut-Winkel werden Messungen mit weiteren Bestrahlungspositionen außerhalb der repräsentativen Heliostaten durchgeführt. Das Ziel dieser Messungen ist die Überprüfung, ob die beste Kameraposition anhand der Bewertung mit unterschiedlichen Azimut-Winkeln auch dann noch die beste Position bleibt, wenn sich die Strahlungsquelle in unmittelbarer Nähe bzw. in einer Flucht hinter der Kamera befindet. Zusätzlich wird somit auch der in Kap. 4 am Anfang erwähnte Zusammenhang zwischen verstärkten Reflexionen bei in einer Flucht liegender Strahlungsquelle und Kamera für außermittige Kamerapositionen untersucht, vgl. [JÄG23].

Hierbei wird der Raumwinkel zwischen dem bestrahlenden Heliostaten bzw. Scheinwerfer und der jeweiligen Kameraposition berechnet und für die Bewertung herangezogen. Eine schematische Darstellung dieses Raumwinkels γ ist in Abbildung 7.4 zu sehen.

Der betrachtete Raumwinkel γ stellt den Winkel zwischen Kameraposition (Index k), Absorbermitte und Heliostat bzw. Lichtquelle (Index j) im dreidimensionalen Raum dar. Dieser Winkel berechnet sich aus dem allgemeinen Cosinus-Satz und aus den Kantenlängen a , b , und c des in Abbildung 7.4 grün dargestellten Dreiecks über einfache Arithmetik wie folgt:

$$\gamma_{j,k} = \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \right) \quad (7.5)$$

Dabei lassen sich die Kantenlängen a , b , und c sowie die ebenen Distanzen $r_{\{HS|kam\}HS-kam}$ über den Satz des Pythagoras aus den Koordinaten der Heliostaten, der Kamerapositionen und des Receivers bestimmen.

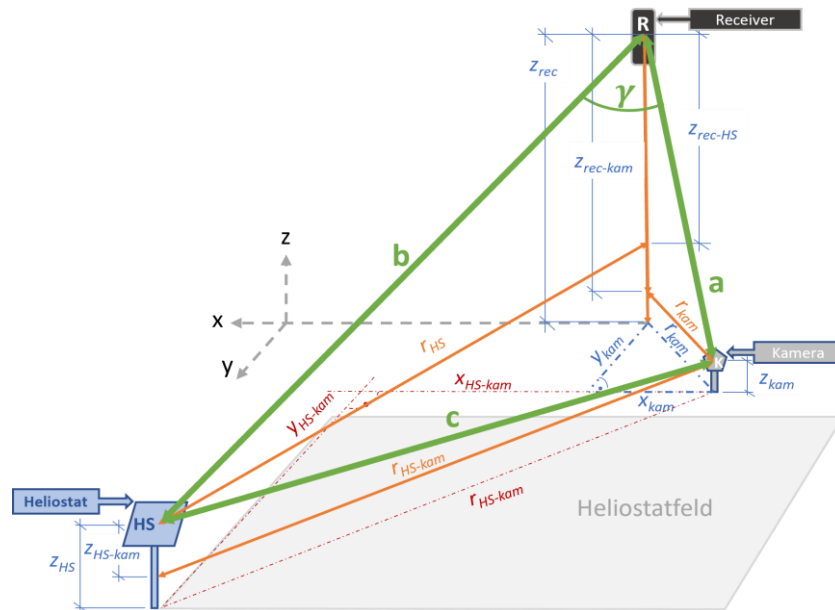


Abbildung 7.4: Geometrische Zusammenhänge zur Berechnung des Raumwinkels zwischen Heliostaten, Receiver und Kamera aus den bekannten Feldkoordinaten

7.2 Versuchsdurchführung für die Kamera-Positionsuche

Innerhalb dieses Kapitels werden die Versuche beschrieben, welche für die Suche nach einer optimalen Kameraposition für die kamerabasierte Flussdichtemessung mittels Scan-Verfahren durchgeführt wurden. Zuvor werden jedoch allgemeine Punkte der Versuchsdurchführung behandelt, insbesondere bezüglich der technischen Daten und Grundeinstellungen der Kamera. Außerdem wird auf die Eigenschaften und den aktuellen Zustand des HPMS-II Receivers eingegangen, da dies für die Interpretation der Versuchsergebnisse von Bedeutung ist.

7.2.1 Kamera-Daten und Grundeinstellungen

Für alle Versuche im Rahmen dieser Arbeit wird eine Industriekamera der Firma Baumer eingesetzt. Dabei handelt es sich um das Modell VCXG-124, welches mit einem monochromen 12bit-CMOS-Sensor ausgestattet ist. Einige technische Daten sind in Abbildung 7.5 gelistet. Weitere Daten finden sich im technischen Datenblatt der Kamera [BAU24].



Technische Daten der Industriekamera	
Modell	Baumer VCXG124
Sensor	Monochrom CMOS
Bittiefe	12 bit (4096 Grauwerte)
Auflösung	4096 x 3000 Pixel (max.)
Framerate	15 fps (bei max. Auflösung)
Objektiv	Tamron 1:3,9 Ø 25.5mm
Brennweite	75mm (fix)

Abbildung 7.5: Technische Daten der für alle Versuche eingesetzten Baumer-Industriekamera

Die Ansteuerung der Kamera erfolgt mittels der Software „*Camera Explorer*“ von Baumer. Diese bietet viele Einstellmöglichkeiten, unter anderem sind neben Einzelbildern auch Serienbildaufnahmen mit wählbarer Framerate, Belichtungszeit und Auflösung möglich. Bezüglich der Wahl der Einstellungen sind unter anderem folgende Dinge zu beachten:

- Um Shading-Effekte zu vermeiden, sollte der Receiver bzw. das betrachtete Objekt immer möglichst mittig im Bild positioniert werden
- Die Bildauflösung bzw. der Bildausschnitt sollte nur so groß wie nötig gewählt werden, um insbesondere bei Serienbild-Aufnahmen die Datenmenge zu reduzieren und die Netzwerkverbindung nicht zu überlasten
- Bei Serienaufnahmen muss die Belichtungszeit so gering gewählt sein, dass sie bei der gewählten Bildaufnahme Frequenz *fps* (Frames-per-Second (engl.)) noch umsetzbar ist; dabei sollte etwas zeitlicher Puffer eingerechnet werden (z.B.: bei einer Framerate von 20 fps kann theoretisch jedes Bild maximal 50 ms belichtet werden, es wird aber noch Zeit für die Bildverarbeitung innerhalb der Kamera benötigt; daher sollte man eher Kombinationen wie 17 fps bei 50 ms oder 20 fps bei 45 ms wählen)
- Die Grauwerte des betrachteten Objektes sollten sich im mittleren Wertebereich befinden, damit keine Überbelichtung stattfindet und nichtlineare Effekte bei sehr niedrigen oder sehr hohen Grauwerten möglichst vermieden werden; die Höhe der Grauwerte wird über die Belichtungszeit eingestellt und variiert mit der Messaufgabe
- Die Blendeneinstellung sollte innerhalb aller Versuche konstant bleiben (im Rahmen dieser Arbeit wurde durchgängig mit maximal geöffneter Blende, d.h. der kleinsten Blendenzahl gearbeitet)

7.2.2 HPMS-II Receiver – Rohrdeformationen und deren Auswirkungen

Wie in Kap. 3.2 beschrieben, besteht Der HPMS-II Receiver aus 16 Absorberrohren mit jeweils 36,8mm Durchmesser und einem theoretischen Rohrabstand von 1mm. Die Deformationen der Rohre des Receivers, unter Anderem bereits durch die Montage und die spätere thermische Belastung im Betrieb, führt aber zu unregelmäßigen Rohrabständen. Daraus ergeben sich örtlich verschiedene Reflexionen, die zudem von der Bestrahlungs- und Betrachtungsrichtung abhängig sind. Die im Bild mitunter sichtbaren störenden Aufhellungen können auf den Strahlungsschutz hinter den Absorberrohren zurückgeführt werden, dessen Reflexionen zwischen den Absorberrohren sichtbar sind. In Abbildung 7.6 sind die unterschiedlichen Rohrabstände klar erkennbar und teilweise deutlich größer als 1mm.



Abbildung 7.6: Fotos des HPMS-II Rohrreceivers bei der Montage durch MAN Energy Solutions (Bildquelle: DLR) sowie nach Installation im MFT (Bildquelle: [MAT22])

In Abbildung 7.7 (a) und (b) sind die Azimut-Winkel von der Bildaufnahme von [JÄG23] nahezu gleich mit -2° bis -3° , weisen aber Unterschiede in den Reflexionen auf (rot markierte Bereiche). In Abbildung 7.7 (c), (d), (e) variieren die Azimut-Winkel jeweils um 6° und auch dort zeigen sich Unterschiede in den gelb markierten Bereichen. Daraus ist zu erkennen, dass bereits kleine Änderungen des Azimut-Winkels der Strahlungsquelle einen spürbaren Einfluss auf die Reflexion in den aufgenommenen Bildern haben.

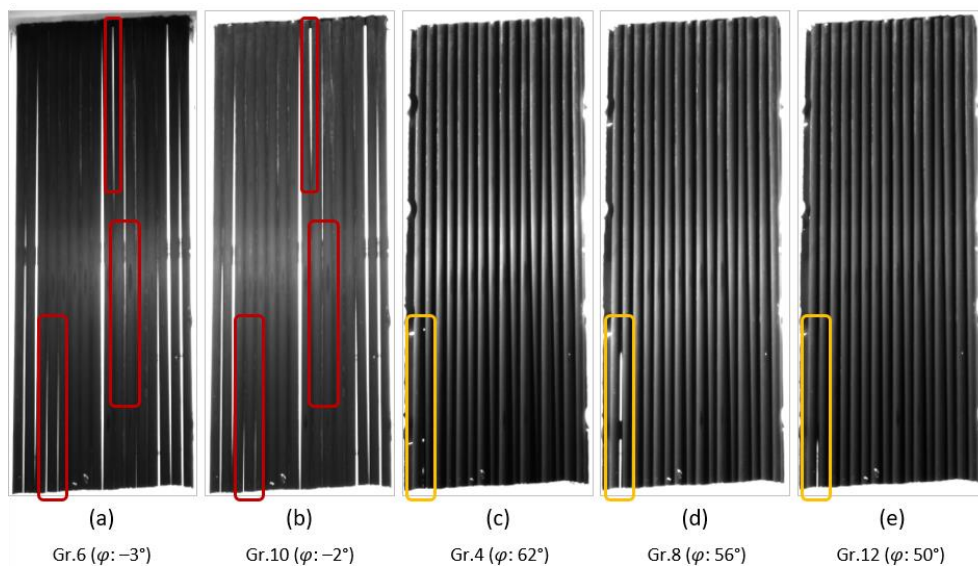


Abbildung 7.7: Reflexionen in Einzelbildern von Jäger [JÄG23] bei ähnlichen Azimut-Winkeln φ

Aus der Abbildung ist auch erkennbar, dass die Rohre teilweise nach vorne oder hinten versetzt sind. Dieser Versatz in Normalenrichtung zur Receiverebene führt bei schräger Bestrahlung zu einer asymmetrischen Ausprägung von Reflexionen bei betragsmäßig nahezu gleichen Azimut-

Winkeln mit unterschiedlichem Vorzeichen, wie in der Abbildung 7.8 dargestellt. Der dort in einer Draufsicht dreier Receiverrohre skizzierte Grenzwinkel stellt den maximalen Azimutwinkel eines Betrachters dar, nach dem keine direkte Sichtbarkeit des Strahlungsschutzes mehr möglich ist. Eine Winkelvergrößerung stellt dabei ein verstärktes Risiko für das Auftreten von Reflexionen dar, eine Winkelverkleinerung entsprechend ein reduziertes Risiko.

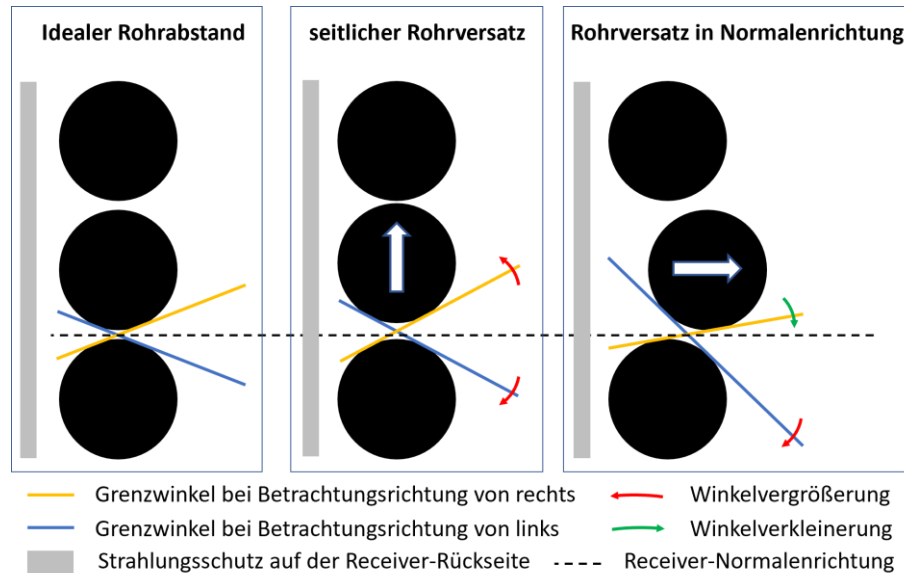


Abbildung 7.8: Skizze der Auswirkungen verschiedener Rohrversätze auf Direktreflexionen des Strahlungsschutzes

Mittig in Abbildung 7.8 erkennt man, dass ein seitlicher Rohrversatz eine symmetrische Änderung des Grenzwinkels hervorruft. Die beim HPMS-II Receiver auch vorliegenden Rohrversätze in Receiver-Normalenrichtung führen jedoch zu asymmetrischen Auswirkungen auf auftretende Reflexionen, wie rechts im Bild dargestellt. Treten beide Verschiebungen gleichzeitig auf, führt dies dazu, dass bei einer Betrachtungsrichtung (rechts bzw. links der Mittelachse) grundsätzlich stärkere Reflexionen in den Bildaufnahmen zu erwarten sind, als bei der anderen Betrachtungsrichtung.

7.2.3 Durchgeführte Messungen

Die Messungen zur Suche nach einer optimalen Kameraposition wurden in Zeitraum von Mitte Dezember bis Ende Januar an insgesamt vier Nächten durchgeführt. Aufgrund von schlechten Wetterbedingungen (Frost, Schnee und Regen) mussten zwei Nachtversuche unterbrochen und wiederholt werden. Im Folgenden wird die Versuchsplanung und -durchführung beschrieben.

Für die Messungen wurde ein Scheinwerfer des Modells *ROBIN MegaPointe* [ROB24] der Firma ROBE als Strahlungsquelle verwendet. Der Scheinwerfer wurde über einen Dieselgenerator mit Strom versorgt. Zum Transport dieser Ausrüstung innerhalb des Feldes kommt ein geländegängiges Fahrzeug mit offener Ladefläche zum Einsatz. Für die Versuchsdurchführung wurden zwei Personen eingesetzt. Eine Person war im Heliostatfeld zur Steuerung und Positionierung des Scheinwerfers und die andere befand sich in dem Variationsbereich der Kamerapositionen zwischen Heliostatfeld und Multifokusturm.

7.2.3.1 Qualitative Bewertung

Wie in Kap. 7.1.1 beschrieben, wurden auf dem Versuchsgelände 17 verschiedene potentielle Kamerapositionen in einem Messraster von 1m definiert. Vor der ersten Nachtmessung wurde die X-Komponente des idealen Rasters der Kamerapositionen mit wasserdichtem Panzertape auf den Rand des asphaltierten Bereiches vor dem Heliostatfeld angebracht.

Die qualitative Bewertung der einzelnen Kamerapositionen geschah mit bloßem Auge, um eine Grobauswahl potentiell geeigneter Positionen in kürzester Zeit identifizieren zu können. Der mobile Scheinwerfer wurde nacheinander an alle Referenzpositionen der 16 Heliostat-Gruppen verfahren und mittig auf den Receiver ausgerichtet. An jeder Position des Scheinwerfers ging ein Beobachter dann das Messraster für die potentiellen Kamerapositionen der Reihe nach durch, bewertete mit bloßem Auge unmittelbar die auftretenden Reflexionen des Receivers anhand eines Bewertungsschemas und notierte die Ergebnisse in ein Versuchsprotokoll.

Wie in Kap. 7.1.1 erwähnt, beinhaltet die unmittelbare Bewertung mit bloßem Auge eine qualitative Beurteilung der Intensität bzw. der räumlichen Ausbreitung der Reflexionen auf einer Skala von 1 (gering) bis 4 (stark) sowie E (extreme Reflexion). Während der Versuchsdurchführung ist aufgefallen, dass bei mehreren Heliostatgruppen Reflexionen am Rand des Receivers aufgetreten sind. Je nach Heliostatgruppe waren entweder nur Randreflexionen oder nur Reflexionen im mittleren Bereich des Receivers erkennbar. Daher wurden bei der qualitativen Bewertung neben der Intensität der Reflexionen noch die drei übergeordneten Kategorien „reflexionsfrei“, „Randreflexionen“ sowie „innere Reflexionen“ unterschieden, um eine aufsteigende Signifikanz der Beeinträchtigung für eine spätere Bildauswertung zu zeigen.

7.2.3.2 Quantitative Bewertung

Nach der Auswertung des Messprotokolls der qualitativen Bewertung und Vorauswahl potentiell geeigneter Kamerapositionen erfolgte eine quantitative Bewertung der Kandidaten. Dazu wurden Einzelbilder mit Bestrahlung des Receivers aus Richtung einer repräsentativen Auswahl von Heliostatgruppen aufgenommen.

Aufgrund der weiterhin hohen Anzahl nötiger Bildaufnahmen (3 Kamerapositionen, je 10 Scheinwerferpositionen) wurde bereits bei der Versuchsplanung davon ausgegangen, dass die Bildaufnahme sich über mehrere Termine erstrecken wird. Die Einmessung und Speicherung der Kamerapositionen war daher von großer Bedeutung, um eine möglichst hohe Wiederholgenauigkeit bei der Ausrichtung der Kamera an unterschiedlichen Tagen erreichen zu können, da mit einem mobilen Kamerastativ (Dreibein) gearbeitet wurde.

Versuchsvorbereitung

An den Versuchstagen wurden zunächst drei Plattformen für die drei potentiellen Kamerapositionen auf gleicher Y-Position wie der fest installierte HPMS-II Kameramast (+21 m) und an den unterschiedlichen X-Positionen auf dem Rand des Heliostatfelds ausgelegt und mit Holzkeilen in Waage gebracht. Als Plattform dienten große Metall-Einlegeböden, sodass das Kamerastativ mit allen drei Beinen auf die nivellierten Plattformen gestellt werden konnte. Dadurch mussten die Füße des Stativs bei einem Positionswechsel der Kamera nicht neu eingestellt werden und die notwendige Zeit zum Versetzen der Kamera von einer Position zur nächsten während der Nachtmessung minimiert, was aufgrund des begrenzten Zeitfensters sehr wichtig war. Um eine möglichst genaue Positionierung des Stativs zu erreichen, wurde der

Mittelpunkt des Stativs über ein Lot auf einer markierten Referenzposition der Plattform ausgerichtet. Die Distanzen der Referenzpositionen der Plattformen zum stationären Kameramast wurden mit einem Laser-Entfernungsmesser bestimmt. Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 7.9 dargestellt.

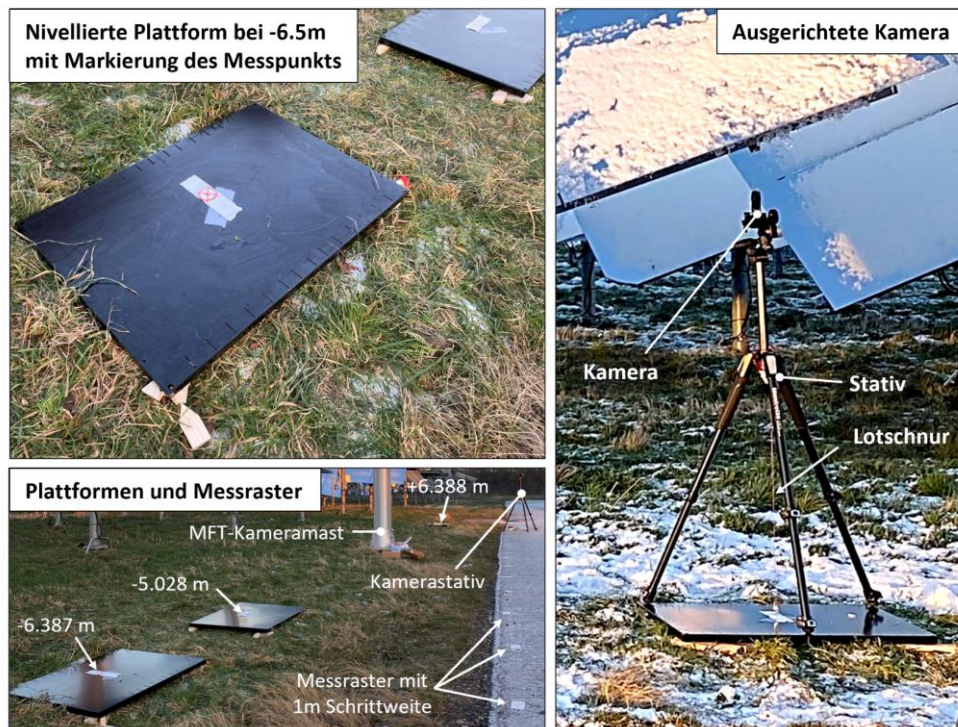


Abbildung 7.9: Mobiles Kamerastativ auf nivellierter und eingemessener Plattform für Nachtmessungen zur Identifikation optimaler Kamerapositionen

Versuchsdurchführung

Grundsätzlich können die Versuche zur quantitativen Bewertung auf zweierlei Arten durchgeführt werden:

- Variante A: Der Scheinwerfer wird der Reihe nach auf die nächste auszuwertende Heliostatposition gefahren und ausgerichtet, wonach aus den verschiedenen Kamerapositionen jeweils Einzelbilder aufgenommen werden.
- Variante B: Für jede Kameraposition wird der Scheinwerfer nacheinander in alle auszuwertenden Heliostatpositionen gebracht, bevor die Kamera auf die nächste Position versetzt wird.

Die Messungen wurden aufgrund der Genauigkeit (alle Aufnahmen für eine Kameraposition verwenden die selbe Bildausrichtung) und Zeiteffizienz (Versatz und Neuausrichtung der Kamera dauern bei Dunkelheit länger als das Anfahren der nächsten Scheinwerferposition) nach Variante B durchgeführt.

Zusätzlich zu den Aufnahmen des Receivers werden auch für jede Scheinwerferposition Bilder des Strahlungsschutzes benötigt, um eine Intensitätsnormierung der Aufnahmen untereinander durchführen zu können. Da das Reflexionsverhalten des Strahlungsschutzes vorwiegend diffus ist, reicht es für die Untersuchungen in diesem Kapitel jedoch aus, die Bilder aus einer

Kameraposition aufzunehmen und die berechneten Intensitätskorrektur-Faktoren auf alle Positionen anzuwenden. Da diese Faktoren relative Größen sind, ist es auch nicht notwendig, die Messungen des Strahlungsschutzes bei jeder Nachtmessung zu wiederholen oder gar in der gleichen Nacht durchzuführen, in der auch die Einzelbilder des Receivers gemacht werden.

7.3 Bildauswertung und Ergebnisanalyse

7.3.1 Ergebnisse der qualitativen Bewertung

Die qualitative Bewertung mit bloßem Auge hat sich als sehr effiziente und systematisch umsetzbare Messung zur Vorabauswahl geeigneter Kamerapositionen erwiesen. Die auftretenden Reflexionen im Receiver lassen sich nicht nur quantitativ gut abschätzen, sondern auch klar verorten, ob sie im Inneren des Receivers aufgetreten sind oder am Rand des Strahlungsschutzes. Ein Gesamtüberblick des Messprotokolls ist in Anhang VIII dargestellt.

Wie in Kap. 7.2.3.1 erwähnt, wurde eine weitere Unterscheidung zwischen inneren Reflexionen und Randreflexionen eingeführt, wobei Randreflexionen als weniger störend als innere Reflexionen zu bewerten sind. Die Randreflexionen traten fast ausschließlich am linken Receiverrand auf - bei leichten Reflexionen am unteren Rand und mit steigender Reflexionsstärke bis zum oberen Receiverrand. Um dieses Phänomen quantifizierbar zu dokumentieren, wurden für Randreflexionen Werte von 1 (untere Ecke) bis 10 (gesamte Höhe des Receivers) vergeben.

Auffällig ist, dass ausgeprägte Randreflexionen verstärkt bei den hinteren Heliostatgruppen (13-16) aufgetreten sind. Mit Ausnahme der Gruppe 15 konzentrierten sich die störenden inneren Reflexionen auf den Bereich mit geringeren Kamera-Offsets kleiner ± 4 Metern zum MFT-Kameramast. Die stärksten Reflexionen waren bei den Gruppen 1, 2, 6 und 10 zu beobachten.

Die Vorauswahl vielversprechender Kandidaten für eine optimale Kameraposition wurde durch eine Betrachtung der Spalten in der Auswertungsmatrix und ein Scoring-System (vgl. Anhang VIII) durchgeführt. Östlich des MFT-Kameramasts ergab sich nach Auswertung der Spaltensummen ein Optimum bei ca. 6-7 Metern. Westlich des Kameraturms lagen insgesamt die besten Scoring-Werte vor. Hier wurden zwei Kandidaten für eine nähere Untersuchung mit Einzelbildern gewählt, da bewertet werden sollte, wie sich ein größerer seitlicher Offset auf die Bildaufnahmen auswirkt.

7.3.2 Ergebnisse der quantitativen Bewertung

7.3.2.1 Beobachtungen anhand der Rohbilder

Wie beispielhaft in Abbildung 7.10 zu sehen ist, zeigen die aufgenommenen Bilder (a) und (b) von *Kameraposition 1* (Ost, $X= +5,018\text{m}$ und $Y= 24,2\text{m}$ vom HPMS-II Receiver) unterschiedliche Reflexionen bei Bestrahlung aus Gruppe 6 (HS-ID AH33) und Gruppe 10 (HS-ID AM33) mit Azimut-Winkel von jeweils 5° und 4° . HS steht dabei für Heliostat und HS-ID für die eindeutige Adresse. Die aufgenommenen Bilder von *Kameraposition 3* (West, $X= -7,907\text{m}$ und $Y= 24,2\text{m}$ vom HPMS-II Receiver) bei Bestrahlung aus Gruppe 2 von unterschiedlichen HS-IDs (AA30 und AC30) mit Azimut-Winkel von -16° und -12° , weisen auch Variationen in den Reflexionen auf, wie in Abbildung 7.10 (c) und (d) gezeigt.

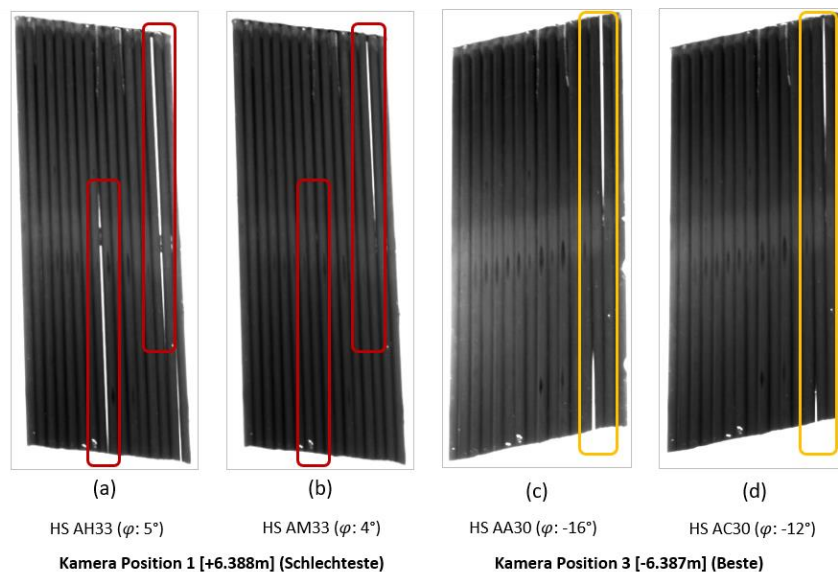


Abbildung 7.10: Unterschiedliche Reflexionen in Einzelbildern bei ähnlichen Azimut-Winkeln φ

Die Tatsache, dass bei einer Bestrahlung mit einem betragsmäßig größeren Winkel (c) eine stärkere Reflexion erkennbar ist als bei einem geringeren Winkel (d), deutet darauf hin, dass das Rohr links von der Reflexion nach vorne bzw. das Rohr rechts von der Reflexion nach hinten deformiert ist (vgl. Abbildung 7.8). Dass dies bei dem 2. Und 3. Rohr von rechts tatsächlich der Fall ist, lässt sich auch aus Abbildung 7.6 erkennen (rote Markierung mittig unten).

Außerdem wurden abseits des Standard-Messplans weitere Bildreihen aufgenommen, um das Reflexionsverhalten bei Variation des Raumwinkels näher zu untersuchen. Es wurden für die Kameraposition 1 und 3 jeweils Messungen mit Bestrahlung entlang einer Nord-Süd-Linie, jeweils genau an der gleichen X-Koordinate wie die zugehörige Kameraposition, durchgeführt, mit variierendem Abstand zum Receiver. Die Ergebnisse der beiden Messreihen sind in Abbildung 7.11 zusammengefasst. Der Messplan ist oben rechts dargestellt, wobei die orangefarbenen Markierungen zur Kameraposition 3 gehören und die hellblauen zu Position 1.

Durch eine Verringerung der Distanz des Scheinwerfers zum Receiver reduziert sich auch der Raumwinkel γ , der zwischen Scheinwerfer, Receiver und Kamera aufgespannt wird (siehe Abbildung 7.4). Gleichzeitig vergrößert sich jedoch der Betrag des Azimut-Winkels des Scheinwerfers bezogen auf den Receiver geringfügig. Dieser Zusammenhang gilt für beide Messreihen. Vergleicht man zum Beispiel aus der Messreihe zu Kameraposition 1 die Messungen von AH33 und AC33, so reduziert sich die Distanz zum Receiver um 30% und der Raumwinkel halbiert sich. Gleichzeitig steigt aber der Azimut-Winkel um 3 Grad. Bei den im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Aufnahmen wurde beobachtet, dass die Reflexionen mit betragsmäßig steigendem Azimutwinkel tendenziell abnehmen. Trotzdem konnte bei beiden Messreihen beobachtet werden, dass die Reflexionen bei einer Reduktion des Raumwinkels, wenn also der Scheinwerfer bzw. die Strahlungsquelle zunehmend mit der Kamera in einer Flucht zum Receiver steht, merklich zunehmen. Für die Kameraposition 1 ist dieser Effekt besonders deutlich erkennbar, für Kameraposition 3 in abgeschwächter Form ebenfalls. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ließe sich mit einem anteilig retroreflektiven Verhalten des Strahlungsschutzes erklären. In ähnlicher Form wurde diese Vermutung auch in [OFF24] bereits

erwähnt, im Kontext der Analyse des Reflexionsverhaltens von Strahlungsschutz und diffusem Target am STJ-Receiver (vgl. Kap. 6.2).

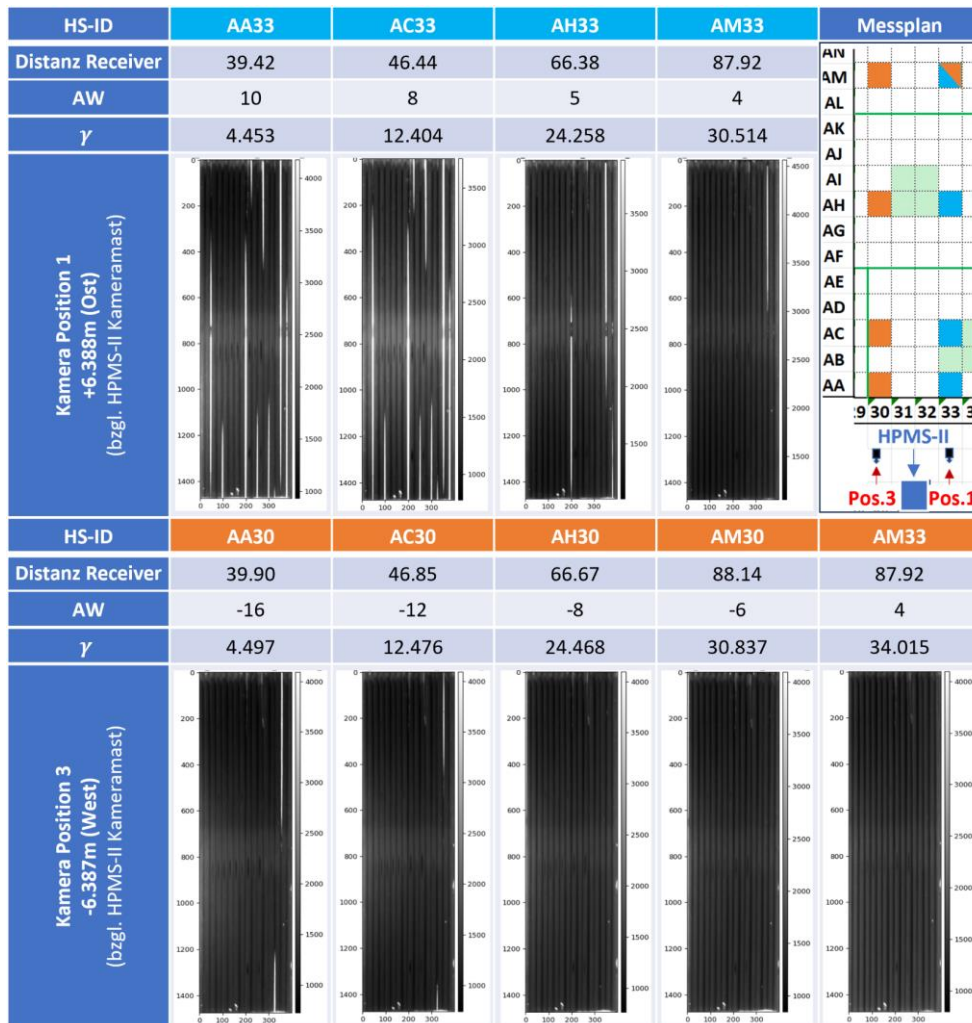


Abbildung 7.11: Messreihen zum Einfluss des Raumwinkels auf die Reflexionen in Einzelbildern

7.3.2.2 Ergebnisse der Intensitätsnormierung

Als vorbereitender Schritt der quantitativen Bewertung wurde eine Intensitätsnormierung der Einzelbilder vorgenommen. Dazu wurden Einzelbilder des Strahlungsschutzes unterhalb des Receivers ausgewertet. Hierfür wurde zunächst der Belichtungszeit-Normierungsfaktor f_{BZ} für alle Einzelbilder des Strahlungsschutzes ermittelt, wobei die zweitgeringste Belichtungszeit als Referenz gewählt wurde. Bei der Wahl wurde das Bild der Heliostatgruppe 2, das aufgrund starker Reflexionen eine noch geringere Belichtungszeit aufwies, ignoriert.

Für die mit f_{BZ} multiplizierten Bilder wurden anschließend ROI-Bereiche auf dem Strahlungsschutz unterhalb des Receivers definiert und mittlere Grauwerte für diese ROI ermittelt. Daraus wurde über den heliostatspezifischen Intensitätskorrektur-Faktor und den Strahlungsschutzfaktor der Gesamtfaktor bestimmt, der für die Normierung aller Einzelbilder verwendet wird. Die Zwischen- und Endergebnisse sind in Tabelle 7.2 zusammengestellt.

Tabelle 7.2: Zusammensetzung der Skalierungsfaktoren zur Intensitätsnormierung der Einzelbilder

Heliostat-Gruppe	Belichtungszeit-Normierungsfaktor $f_{BZ,i}$	ROI-Grauwert (BZ-normiertes Bild)	Heliostatspezifische Intensitätskorrektur $f_{HS,i}$	Strahlungsschutzfaktor $f_{OG,i}$	Gesamtfaktor Intensitätsnorm. $f_{IN,i}$
1	1.0000	2412.14	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.3333	2293.52	1.0517	1.0215	1.0743
3	0.6667	1391.77	1.7331	1.0439	1.8092
4	0.4000	561.75	4.2940	1.0721	4.6035
5	0.5000	1016.98	2.3719	1.1019	2.6135
6	1.0000	2139.56	1.1274	1.1121	1.2538
10	0.5000	950.78	2.5370	1.2143	3.0806
11	0.5000	800.47	3.0134	1.2396	3.7354
13	0.2222	421.35	5.7248	1.3222	7.5695
15	0.2000	441.06	5.4690	1.3523	7.3956

Auffällig sind einerseits die signifikant kleineren Grauwerte der Heliostatgruppen 5 (kurz HG) und insbesondere 4, die deutlich unter denen von HG 6 liegen, obwohl sie ähnlich nah oder näher zum Receiver stehen. Der Abfall der Grauwerte der hinteren Reihe (13, 15) ist ebenfalls sehr ausgeprägt und erscheint sehr gering. Bei der Nutzung von Einzelbildern als Normierungsquelle ist grundsätzlich die Genauigkeit dadurch begrenzt, dass die Position des Strahlungsfokus bei den einzelnen Aufnahmen ggf. deutlich variiert, was die Grauwerte im ROI ebenfalls stark beeinflusst. Für den Kontext der Bewertung unterschiedlicher Kamerapositionen ist eine exakte Normierung von geringerer Bedeutung, da hierbei die prozentuale Überbelichtung der Einzelbilder betrachtet wird. Diese wird primär durch lokale Reflexionen hervorgerufen, die scharf abgegrenzt sind, wodurch sich bei einer Erhöhung oder Reduktion des Grauwert-Niveaus im Bild die Fläche der Reflexionen nur geringfügig ändert.

7.3.2.3 Ergebnisse der quantitativen Bewertung der Kamerapositionen

Die jeweils 10 Einzelbild-Aufnahmen der drei potentiellen Kamerapositionen wurden zunächst entzerrt und beschnitten, um anschließend mithilfe der zuvor ermittelten Gesamtfaktoren multipliziert und dadurch normiert zu werden. In Abbildung 7.12 sind alle Bilder der drei Kamerapositionen tabellarisch dargestellt. Dabei sind die Spalten sortiert nach dem Azimut-Winkel φ der jeweiligen Heliostatpositionen. Für eine kontrastreichere Darstellung wurde die Farbskala „Jet“ (blau - rot) aus der Python-Bibliothek *matplotlib* verwendet. Die dunkelroten Bereiche weisen Reflexionen mit Grauwerten bis 4095 auf, niedrige Werte sind dunkelblau.

Es ist klar erkennbar, dass die am weitesten vom Receiver entfernten Gruppen 13 und 15 spürbar dunkler sind als die restlichen Gruppen. Trotzdem ist bei Kameraposition 1 (oberes Drittel der Abbildung) und Gruppe 15 eine Reflexion deutlich erkennbar, sodass die quantitative Bewertung der prozentualen Überbelichtung auch für diese Gruppen noch funktioniert. Die einzige großflächige Reflexion tritt bei Kameraposition 1 und Gruppe 2 auf, wohingegen Gruppe 6, die einen noch geringeren Azimutwinkel zum Receiver hat, lediglich geringe Reflexionen aufweist. Aus der Abbildung ist weiterhin erkennbar, dass bei den Gruppen 3 und besonders 4 starke Kontraste in den Rohren auftraten, diese stellen jedoch keine Reflexion bzw. Überbelichtung dar. Die Ursache dafür liegt darin, dass die Gruppen 3 und 4 große Azimutwinkel von 44° bzw. 62° zum Receiver aufweisen. Die statistische Auswertung der Bilder ist davon jedoch nicht betroffen.


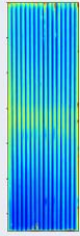
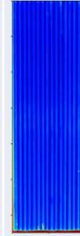
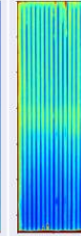
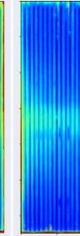
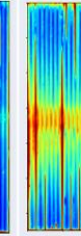
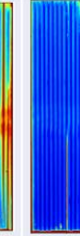
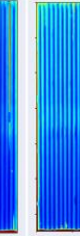
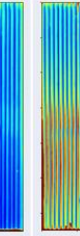

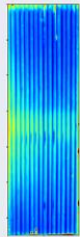

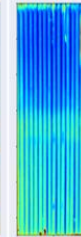
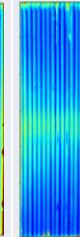
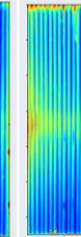
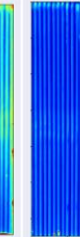
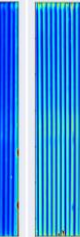
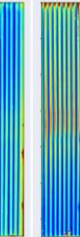

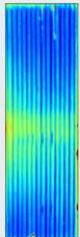

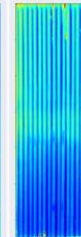
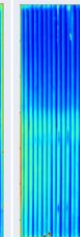
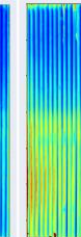
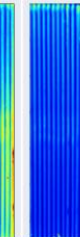
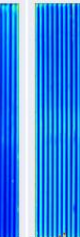
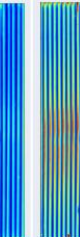
HG	5	1	13	10	6	2	15	11	3	4
HS-ID	AH21	AC27	BD11	AP30	AH32	AC33	BD46	AP45	AC40	AC48
φ	-43	-30	-26	-5	1	8	17	30	44	62
Kamerapos. 1 (+6.388m, Ost)	γ	53	35	52	35	25	12	41	38	32
	Normiertes Einzelbild									
Kamerapos. 2 (-5.028m, West)	γ	37	19	42	33	26	21	49	51	50
	Normiertes Einzelbild									
Kamerapos. 3 (-6.387m, West)	γ	36	17	41	34	27	22	50	53	52
	Normiertes Einzelbild									
HG	5	1	13	10	6	2	15	11	3	4

Abbildung 7.12: Überblick der normierten Einzelbilder der drei vermessenen Kamerapositionen

In Tabelle 7.3 sind beispielhaft die Zwischenschritte für die quantitative Bewertung dargestellt. Zunächst muss der kumulative Bildmultiplikator $f_{kum,i}$ für jedes Bild bestimmt werden. Mit diesen Faktoren werden die entzerrten und beschnittenen Bilder multipliziert und anschließend die prozentuale Überbelichtung O_p bestimmt. Diese bestimmt sich aus der Anzahl der Pixel im Bild, die oberhalb eines Schwellwertes (im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Grauwert von 4090 gewählt) liegen, dividiert durch die Gesamtpixelzahl des Bildes.

Tabelle 7.3: Quantitative Bewertung der Kameraposition 1 anhand der prozentualen Überbelichtung

Berechnung Bildmultiplikator $f_{kum,i}$ Kameraposition 1, +6,388m, Ost					Multiplikation der Einzelbilder mit $f_{kum,i}$ & statistische Auswertung	Bewertung Kameraposition 1 über prozentuale Überbelichtung O_p				
HG	BZ	$f_{BZ,i}$	$f_{IN,i}$	$f_{kum,i}$		HG	min	max	mean	O_p
1	250	1.0000	1.0000	1.0000		1	369	4094	1547	0.10
2	185	1.3514	1.0743	1.4517		2	1245	4094	2694	10.28
3	250	1.0000	1.8092	1.8092		3	644	4094	2317	2.36
4	660	0.3788	4.6035	1.7437		4	485	4094	2108	1.91
5	550	0.4545	2.6135	1.1879		5	360	4094	1407	1.20
6	250	1.0000	1.2538	1.2538		6	835	4094	1707	1.39
10	500	0.5000	3.0806	1.5403		10	847	4094	2073	1.91
11	680	0.3676	3.7354	1.3733		11	629	4094	1574	1.67
13	1800	0.1389	7.5695	1.0513		13	301	4094	894	0.70
15	1500	0.1667	7.3956	1.2326		15	749	4094	1492	2.86
						∅				2.44

Vergleicht man die Ergebnisse der oben beschriebenen Auswertung für die drei im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kamerapositionen, ergibt sich die Kameraposition 3 als optimal, mit einer mittleren prozentualen Überbelichtung von 0,32 % und einer maximalen prozentualen Überbelichtung von 1.73 % bei der Heliostatgruppe 4. Eine Zusammenfassung der Auswertung ist in Abbildung 7.13 dargestellt.

HG	Prozentuale Überbelichtung O_p			Pos. 1, HG 2	Pos. 2, HG 4	Pos. 3, HG 4
	Kamera- pos. 1	Kamera- pos. 2	Kamera- pos. 3			
1	0.10	0.16	0.09			
2	10.28	0.31	0.26			
3	2.36	0.47	0.47			
4	1.91	2.98	1.73			
5	1.20	0.06	0.23			
6	1.39	0.13	0.31			
10	1.91	1.76	0.03			
11	1.67	0.25	0.04			
13	0.70	0.06	0.01			
15	2.86	0.09	0.01			
∅	2.44	0.63	0.32			

Abbildung 7.13: Gegenüberstellung der drei Kamerapositionen und deren kritischste Heliostatgruppen

Auffällig ist, dass bei beiden westlichen Kamerapositionen die Aufnahmen bei Bestrahlung aus Gruppe 4 die höchsten Überbelichtungen aufweisen. Das erklärt sich primär durch den stark erhöhten Intensitätskalierungsfaktor der Gruppe (vgl. gelbe Markierung in Tabelle 7.2). Reflexionsprobleme durch ein Durchscheinen des Strahlungsschutzes waren in den Abbildungen ausschließlich am unteren linken Receiverrand erkennbar.

Fazit der Positionsbestimmung:

Mit dem Ziel eines Bauauftrags zur Errichtung eines Kameramastes zur Flussdichtemessung an der SALSA-Großanlage wurde eine Positionsbestimmung erforderlich, welche eine perspektivisch basierte Minimierung der Reflexionsproblematik im Vergleich zur vorherigen Mastposition gewährleistet. Die quantitative Analyse dreier potentieller Kamerapositionen hat ergeben, dass bei der Nutzung der Kameraposition 3 insgesamt mit den geringsten Reflexionen

in den Bildaufnahmen zu rechnen ist. Dieses Ergebnis wird durch eine Analyse des Raumwinkels γ für Kameraposition 1 und 3 unterstützt, bei der die Neigung zur Reflexionsbildung bei kleinen γ für Position 3 deutlich geringer ausfällt als für Position 1 (vgl. Abbildung 7.11). Alle weiteren Messungen und Auswertungen zur Berechnung der Flussdichteverteilung wurden daher mit der Kameraposition 3 durchgeführt.

8 Messreihen für die optische Flussdichtemessung

In diesem Kapitel werden die Messreihen, die für eine optische Flussdichtemessung mittels Scan-Verfahren notwendig sind, vorgestellt. In den vorhergehenden Arbeiten, die sich mit der Erprobung und Weiterentwicklung dieses Messverfahrens befasst haben ([GLI21], [ZÖL21], [MAT22], [JÄG23], etc.), wurden nur ausgewählte Heliostatgruppen untersucht. Um eine möglichst große Datenbasis zur Bewertung der optimierten Flussdichtemessung zu erhalten, wurde im Rahmen dieser Arbeit versucht eine Mehrheit der Heliostatgruppen in den Messungen zu berücksichtigen. Jeder Unterabschnitt behandelt neben einer Vorstellung der notwendigen Messreihen die zugehörigen Auswertungen, um einen der Korrektur- bzw. Kalibrierungsterme der Hauptformel zur Flussdichteberechnung mittels Scanverfahren (siehe Gl. (3.3)) bestimmen zu können.

Verwendete Nomenklatur:

Rohbildaufnahmen und entzerrte Grauwertbilder werden mit dem Symbol g bezeichnet. Mittelwertbilder werden ρ genannt. Jeder Pixel der Mittelwertbilder entspricht einem ROI und ist in den folgenden Formeln mit dem Index i assoziiert. Die Anzahl aller ROI (Pixel) der Mittelwertbilder wird mit M bezeichnet. Die unterschiedlichen Heliostatgruppen werden mit dem Index j assoziiert, die Anzahl aller vermessenen Heliostatgruppen mit N .

8.1 Bestimmung der Reflexionseigenschaften des Receivers

Wie die richtungsabhängigen Reflexionseigenschaften des Receivers sich bei Betrachtung aus der optimierten Kameraposition verhalten, ist von besonderem Interesse. Daher wurden aus den 16 Heliostatgruppen 13 Gruppen vermessen. Lediglich die Gruppen 7, 9 und 13 wurden dabei ausgelassen.

8.1.1 Durchführung des Scan-Verfahrens

Die Scan-Versuche wurden nachts mittels eines Hochleistungs-Scheinwerfers durchgeführt, da dies sowohl den regulären Betrieb der Anlage nicht behindert als auch hinsichtlich der Bildauswertung einfacher ist, da DNI-Schwankungen nicht berücksichtigt werden müssen. Der grundsätzliche Ablauf des Scan-Verfahrens mittels Scheinwerfer bei Nacht ist ausführlich u. A. in den Arbeiten von [GLI21], [MAT22], [ZÖL21] und [JÄG23] beschrieben und soll daher an dieser Stelle nur kurz erläutert werden.

Die Messungen wurden am 13. und 14.03.2024 durchgeführt, wobei sowohl Receiver-Scans als auch Scans des Strahlungsschutzes unterhalb des Receivers jeweils direkt nacheinander für alle untersuchten Heliostat-Gruppen durchgeführt wurden. Für die Durchführung der Versuche waren drei Personen im Einsatz. Eine Person war für die Bedienung des Scheinwerfers im

Geländegängigen Fahrzeug zuständig, eine weitere Person hat die Kamerabedienung und Versuchsprotokollierung im MFT-Raum durchgeführt. Eine dritte Person war an der Kamera dafür zuständig, zwischen den Scans des Receivers und des Strahlungsschutzes einen ND-Filter (Neutraldichte-Filter) vor das Kameraobjektiv zu montieren bzw. zu demontieren. Aufgrund der hohen Reflexionsrate des Strahlungsschutzes mussten sehr kurze Belichtungszeiten bei den Strahlungsschutz-Scans gewählt werden. Dies hat zu ungewünschten Artefakten (Wellenmustern) in den *MaxiBildern* geführt. Ein *MaxiBild* ist dabei ein aus allen Einzelbildern eines Scans zusammengesetztes Bild, bei dem für jede Pixelposition der Maximalwert aus allen Aufnahmen übernommen wird. Durch den Einsatz eines ND-Filters (optische Dichte 0.9, Transmission 12.5%) konnten die Belichtungszeiten um mehr also den Faktor 8 gesteigert werden. Durch diesen glättenden Effekt konnten die Schwebungen und Artefakte wirkungsvoll unterdrückt werden. Dies wurde in Vorversuchen festgestellt und bei den Nachtskans entsprechend eingeplant. Für die Scans des Receivers hingegen konnte ein ND-Filter nicht eingesetzt werden, da sonst die Anzahl der Bilder pro Sekunde bei der Serienbildaufnahme deutlich hätte reduziert werden müssen, was wiederum eine signifikante Verlangsamung des mäanderförmigen Scanzklus des Scheinwerfers erfordert hätte. Daher musste der ND-Filter bei jedem Positionswechsel des Scheinwerfers demontiert und wieder montiert werden.

Der Ablauf jedes Receiver- bzw. Strahlenschutz-Scans beginnt damit, den mobilen Scheinwerfer an die repräsentative Stelle der jeweiligen Heliostatgruppe zu bringen und auf das Ziel auszurichten. Der Lichtfokus wird dabei mittig auf das Zielobjekt gerichtet, um die ideale Belichtungszeit für den Scan einzustellen, da diese für jede Scheinwerferposition variiert. Anschließend beginnt der automatische Scanzklus des Scheinwerfers, der eine horizontale mäanderförmige Bewegung vollzieht und dabei mit dem Brennfleck jeden Punkt des Receivers überstreicht. Währenddessen wird die Serienbildaufnahme gestartet, und es kann mit einer Python-Auswertesoftware live das sich aufbauende Maximalbild als Überlagerung der maximalen Pixelwerte aller Einzelbilder überwacht werden, um Überbelichtungen von vornherein ausschließen zu können. In den vorherigen Arbeiten war dies nur nachträglich möglich, wodurch eine direkte Wiederholung des Scans mit reduzierter Belichtungszeit im Falle einer Überbelichtung innerhalb des Receivers nicht möglich war. Nach Abschluss des Scans wird der Scheinwerfer zur nächsten Position im Heliostatfeld gefahren. Je nach Abstand des Scheinwerfers zum Receiver, der damit verbundenen unterschiedlichen Lichtintensität und Belichtungszeit dauert ein Scan ca. 5-15 Minuten. Um eine möglichst zeiteffiziente Nachtmessung zu erreichen, ist der Weg durchs Heliostatfeld im Vorhinein sinnvoll und zeitsparend zu planen.

8.1.2 Bildauswertung und Ergebnisanalyse

Während der einzelnen Scans aus den verschiedenen Heliostatpositionen wurden jeweils einige Hundert Serienbildaufnahmen durchgeführt. Aus diesen Serienbildern wurden im ersten Schritt *MaxiBilder* generiert. Diese wurden anschließend jeweils durch Subtraktion eines Hintergrundbildes korrigiert. Das Ergebnis ist ein im Bereich des Receivers homogen ausgeleuchtetes Bild, das für die Charakterisierung der individuellen relativen Reflexionsgrade jedes Teilbereichs des Receivers genutzt werden kann.

8.1.2.1 Intensitätsnormierung basierend auf den Strahlungsschutz-Scans

Wie bereits in Kap. 7.1.2 erläutert, soll eine Intensitätsnormierung für die Vergleichbarkeit von Bildern verschiedener Heliostatgruppen sorgen. Zur Berechnung der Normierungsfaktoren wird zunächst auf allen *MaxiBildern* des Strahlungsschutzes eine ROI unterhalb des Receivers definiert und innerhalb dieser ROI der mittlere Grauwert bestimmt. In [JÄG23] wurde hingegen das gesamte Bild analysiert, was zu Verfälschungen der Grauwert-Verhältnisse führen kann.

Basierend auf dem in Kap. 6.2 erläuterten Intensitätsverhältnis $g_{Schutz,j} / g_{Target,j}$ werden die mittleren Grauwerte aus den ROI korrigiert und anschließend auf die jeweilige Belichtungszeit bezogen, um spezifische Grauwerte zu erhalten. Der Intensitätskorrekturfaktor ergibt sich anschließend aus dem Quotienten des mittleren spezifischen Grauwerts durch den individuellen spezifischen Grauwert:

$$IK_j = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\bar{g}_{corr,k} / t_{bel,k})}{\bar{g}_{corr,j} / t_{bel,j}} ; \bar{g}_{corr,j} = \bar{g}_j \cdot \frac{g_{Target,j}}{g_{Schutz,j}} \quad (8.1)$$

In Tabelle 8.1 sind die Intensitätsnormierungs-Faktoren der 13 gemessenen Heliostatgruppen zusammengefasst. In der zweiten Spalte sind die bereits mit dem Strahlungsschutz-Korrekturfaktor verrechneten Grauwerte aus der definierten ROI dargestellt. Der spezifische Grauwert in der dritten Spalte zeigt, dass die Intensitätsunterschiede zwischen sehr nahen hellen Gruppen und sehr weit entfernten Gruppen sich stark unterscheiden (zwischen den HS-Gruppen 1 und 16 variiert der spezifische Grauwert um den Faktor 18). Die sich daraus ergebenden Normierungsfaktoren IK_j sind den Ergebnissen für Gruppen aus vorherigen Arbeiten (HS-Gruppen 10, 11 [ZÖL21]; HS-Gruppen 6, 8, 10, 11 [JÄG23]) in der letzten Spalte gegenübergestellt. Für die Gruppen 6, 10 und teilweise 11 sind die Ergebnisse gut vergleichbar. Für Gruppe 8 gibt es eine deutliche Diskrepanz zu dem Ergebnis aus [JÄG23], dessen Faktor jedoch aufgrund der starken Reflexionsprobleme als nicht belastbar eingeschätzt wird.

Tabelle 8.1: Überblick der auf Basis von Nacht-Scans des Strahlungsschutzes ermittelten Intensitätsnormierungs-Faktoren

HS-Gruppe	korrigierter mittlerer Grauwert $\bar{g}_{ROI,corr}$	spezifischer Grauwert $\bar{g}_{ROI,corr,j} / t_{exp,j}$	Intensitätsnormierungsfaktor IK_j	Referenz- IK_j aus [Zoller] [Jäger]
1	2156.15	269.5183	2.8225	- -
2	2292.44	84.9052	0.8892	- -
3	1773.06	147.7553	1.5473	- -
4	1521.39	43.4682	0.4552	- -
5	2194.57	87.7830	0.9193	- -
6	2964.49	197.6325	2.0697	- 2.2170
8	2289.21	152.6143	1.5982	- 0.3165
10	2899.25	96.6415	1.0121	1.0907 0.9278
11	2464.38	61.6095	0.6452	1.0396 0.5387
12	2238.34	24.8705	0.2605	- -
14	2563.07	32.0384	0.3355	- -
15	2817.27	28.1727	0.2950	- -
16	2584.08	14.3560	0.1503	- -

Die Berechnung der Intensitätskorrektur-Faktoren wird in einer Excel-Tabelle durchgeführt und muss einmalig vor der Nutzung in OFIP durchgeführt werden. Die berechneten Faktoren müssen

anschließend in der Konfigurationsdatei „*refl_corr_cfg.ini*“ für OFIP eingetragen werden (vgl. Anhang II, [IntensityCorrection]→“group_correction_factors“).

8.1.2.2 Berechnung der Reflexionskorrekturmatrix

Für die Berechnung der Reflexionskorrektur der einzelnen Heliostatgruppen werden die hintergrundkorrigierten *MaxiBilder* der Receiver-Scans entzerrt und auf den Absorberbereich zugeschnitten. Aus diesen orthoskopischen Bildern werden Mittelwertbilder generiert, mit denen alle weiteren Bildauswertungsschritte durchgeführt werden. Zuerst werden daraus relative Mittelwertbilder erzeugt, indem sie durch die Belichtungszeit geteilt und mit dem Intensitätsnormierungsfaktor multipliziert werden, Gl. (8.2). Daraus werden die Mittelwerte dieser skalierten Mittelwertbilder bestimmt, Gl. (8.3). Weiterhin wird der Mittelwert dieser Mittelwerte von allen betrachteten Heliostatgruppen gebildet, Gl. (8.4).

$$\rho_{i,j,rel} = \frac{\rho_{i,j,roh}}{t_{bel,j}} IK_j \quad (8.2)$$

$$\bar{\rho}_{j,rel} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \rho_{i,j,rel} \quad (8.3)$$

$$\bar{\rho}_{rel} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{\rho}_{j,rel} \quad (8.4)$$

Aus Gl. (8.2) und Gl. (8.4) wird schließlich die Reflexionskorrektur-Matrix A aufgestellt, in der die unterschiedlichen Helligkeitsniveaus einzelner Heliostatgruppen durch die Normierung mit $\bar{\rho}_{rel}$ berücksichtigt werden, Gl. (8.5):

$$A_{i,j} = \frac{\rho_{i,j,rel}}{\bar{\rho}_{rel}} \quad (8.5)$$

Die Berechnung dieser Matrizen wird in OFIP über das Hauptmenü gestartet („*Workflows*“ → „*Calculate Reflectivity Correction Matrix*“) und das Ergebnis wird in Form der reziproken Korrekturmatrix (1/A) im internen Speicher des Programms abgelegt. Von dort kann es genutzt werden um

- eine Plausibilitätsprüfung für ein Einzelbild eines Scans durchzuführen, oder
- für das Rohbild eines Defokussierungs-Versuches gemeinsam mit den restlichen Termen der Hauptformel ein Flussdichtebild zu berechnen.

Die Berechnung der Korrekturmatrix ist in OFIP im Modul „*workflows/reflectivity.py*“ implementiert, und fragt zuerst nach einem Ordner, der alle Mittelwertbilder des Nachtskans enthält. Dieser Ordner wird automatisch durchsucht und alle Mittelwertbilder, die einem festen Namensmuster entsprechen (z.B. Gr14_Rec_BZ80_meanGrey.tif) werden verwendet. Aus dem Namensmuster wird neben der Heliostat-Gruppe auch die Belichtungszeit extrahiert. Für alle Heliostat-Gruppen mit vorliegenden Mittelwertbildern nach gültigem Namensmuster wird ein entsprechender Eintrag in der Korrekturmatrix berechnet, alle nicht im Ordner enthaltenen Heliostat-Gruppen erhalten einen neutralen Eintrag mit $A_{i,j} = 1.0 \forall i, j \in M, N$.

Die Ergebnisse der berechneten Reflexionskorrektur-Matrizen sind in Abbildung 8.1 zusammengefasst. Die großen Unterschiede in den Intensitätsnormierungsfaktoren setzen sich in den Mittelwerten der skalierten Grauwertbilder (vgl. Gl. (8.3)) fort. Dies führt dazu, dass bei Berechnung der Korrekturmatrizen die Wertebereiche sehr stark variieren, von ca. [0.1, 0.24] bei Gruppe 1 bis [44, 83] bei Gruppe 16.

HS-Gruppe	1	2	3	4	5	6	8	10	11	12	14	15	16
$\bar{p}_{j,rel}$	235.6	90.3	65.0	6.8	25.6	109.1	18.0	22.1	8.8	1.6	2.3	1.7	0.6
$A_{i,j,rel}$ [min, max]	0.10 0.24	0.28 0.65	0.30 0.93	3.60 9.00	1.00 2.20	0.28 0.52	1.40 3.25	1.25 2.46	3.10 6.40	15.8 35.0	13.8 24.0	16.0 32.0	44.0 83.0
1 $A_{i,j,rel}$													

Abbildung 8.1: Überblick der mit OFIP berechneten Reflexionskorrektur-Matrix

Um die Plausibilität der Reflexionskorrektur zu überprüfen, kann ein einfaches Verfahren angewendet werden. Dabei wird ein Einzelbild aus der Bilderserie eines Scan-Vorgangs entnommen, bei dem der Strahlenfokus mittig auf dem Receiver lag. Dies wird entzerrt und in ein Mittelwertbild konvertiert. Anschließend wird es mit der reziproken Reflexionskorrektur-Matrix dieser Gruppe multipliziert und sollte idealerweise einen klar abgegrenzten Fokus zeigen. Die Plausibilitätsprüfung wurde für alle aufgenommenen Heliostatgruppen durchgeführt. Abbildung 8.2 zeigt diese Prüfung exemplarisch für ein Einzelbild aus dem Scan von Gruppe 1.

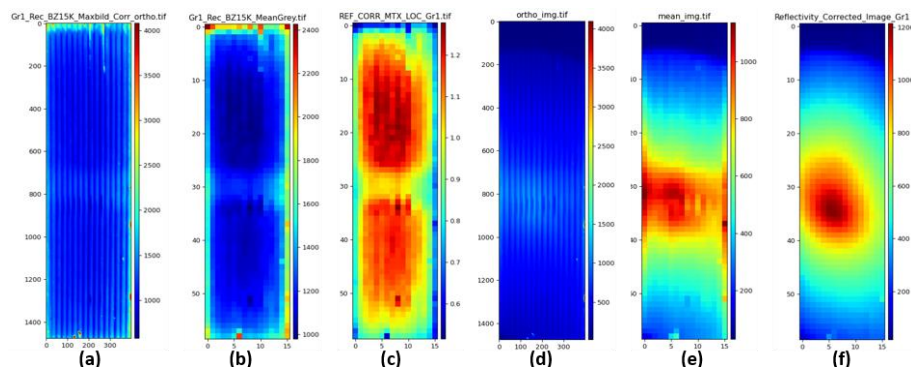


Abbildung 8.2: Plausibilitätsprüfung der Reflexionskorrektur für ein Einzelbild des Scans von Gruppe 1 -
(a): OrthoBild des MaxiBilds, (b): zugehöriges Mittelwertbild, (c): Reflexionskorrekturmatrix $A_{i,1,rel}$,
(d): OrthoBild des Einzelbildes, (e): zugehöriges Mittelwertbild, (f): reflexionskorrigiertes Bild

Die Ergebnisbilder der Plausibilitätsprüfung der weiteren Gruppen 2-16 befinden sich im Anhang (siehe Anhang IX, Anhang X). Grundsätzlich konnte folgendes festgestellt werden:

- für die vorderen Gruppen sind die Korrekturmatrizen weniger verrauscht und führen zu sehr homogenen reflexionskorrigierten Bildern
- bei Gruppen mit betragsmäßig großen Azimut-Winkeln kommt es zu einem größeren Rauschen in den Korrekturmatrizen und korrigierten Bildern
- Die hintersten Heliostatgruppen haben einen weniger konzentrierten Fokus als die vorderen Gruppen; dieser Effekt ist auch in den reflexionskorrigierten Bildern erkennbar und erscheint plausibel

8.2 Kalibrierung mittels Fokusverschiebung

Um aus den mit der Kamera erfassten Reflexionen des Receivers auf die absorbierte Strahlung schließen zu können und Grauwerte im Bild in Strahlungsflussdichten umrechnen zu können, muss analog zu den Vorgängerarbeiten der Kalibrierungsfaktor

$$K = \frac{1}{(\bar{\rho} \cdot k)} \quad (8.6)$$

bestimmt werden. Dieser Kalibrierungsfaktor ist neben den Kameraeigenschaften und der gewählten Belichtungszeit abhängig vom Verschmutzungsgrad des Receivers und der Radiometer, sodass eine regelmäßige Neukalibrierung erforderlich ist. Weiterhin ist anzunehmen, dass auch die neue Kameraposition einen Einfluss auf die erfassten Grauwerte und das Verhältnis zwischen Grauwert und Flussdichte hat, sodass auch im Rahmen dieser Arbeit die Durchführung der Fokusverschiebungsmessungen erforderlich ist.

8.2.1 Durchführung der Fokusverschiebung

Das Grundprinzip der Fokusverschiebung liegt darin, während einer schrittweisen horizontalen Verschiebung des Fokus jeweils gemittelte Grauwerte mehrerer aufgenommener Einzelbilder mit Radiometerleistungen ins Verhältnis zu setzen. Da die Radiometer rechts und links unmittelbar neben dem Receiver angebracht sind, reicht es aus die Grauwerte mit einem geringen horizontalen Versatz zum aktuellen Strahlungsfokus bzw. Brennpunkt auszulesen und mit den Radiometerleistungen in dem Verschiebungsschritt zu vergleichen, bei dem die Radiometer den gleichen horizontalen Versatz zum Brennpunkt aufweisen. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 8.3 skizziert. Dort wird das Verrechnungsprinzip für das oberste der vier Radiometer mit einem Auswerterversatz von 0.2 m bzw. einem horizontalen Versatzschritt dargestellt. In Hellblau ist jeweils die horizontale Position des Brennpunktes zu sehen, und in Rot die definierten Punkte auf dem Receiver, von denen die Grauwerte ausgelesen und gemittelt werden sollen (Abbildung 8.3 links, mittig). Rechts in der Abbildung ist die Messung dargestellt, bei der statt eines Bildpunktes die Radiometerleistung ausgelesen wird. Das gleiche Prinzip wird für alle Radiometer und auch für einen größeren Versatz zwischen Brennpunkt und Auswertestelle durchgeführt, um die Datenmenge für die Berechnung des Kalibrierfaktors, also welcher Anstieg an Radiometerleistung pro Anstieg des Grauwertes vorliegt, zu erhöhen. Das Verfahren ist ausführlich in [ZÖL21] und [JÄG23] beschrieben.

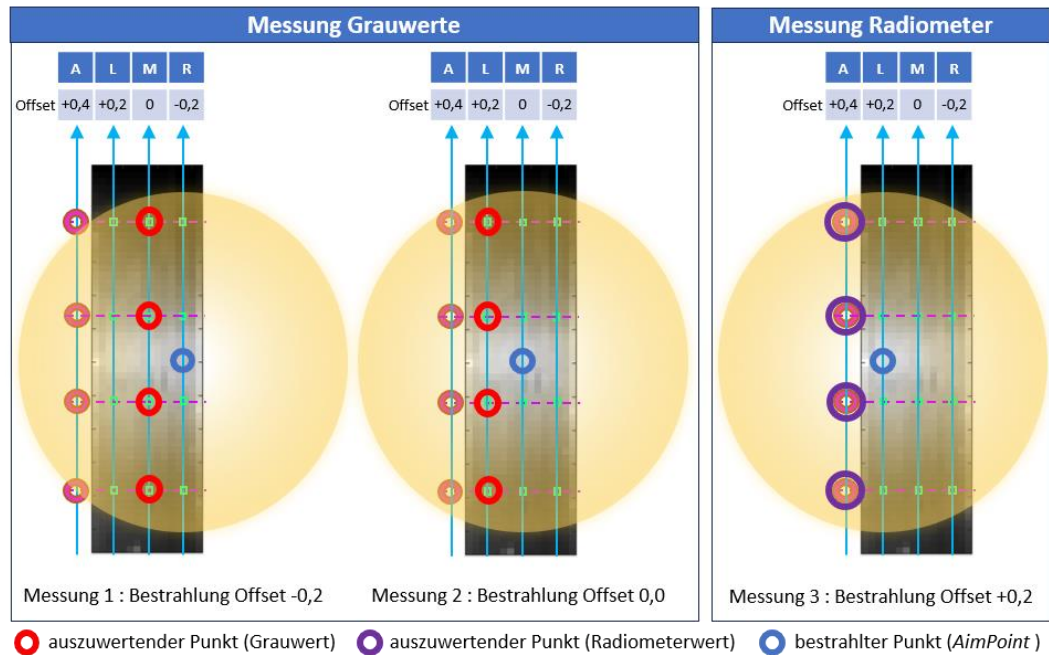


Abbildung 8.3: Prinzip der Korrelation von Grauwerten und Radiometerleistungen

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Fokusverschiebungsmessungen fanden am 10.04.2024 zwischen 15:39 Uhr und 15:52 Uhr statt. Da sich der Receiver weiterhin im Winterbetrieb befand, konnten für die Bestrahlung nur fünf Heliostate verwendet werden und die Bestrahlungsdauer musste möglichst kurz sein. Für die Bestrahlung wurden fünf benachbarte Heliostate aus der Heliostatgruppe 10 ausgewählt (AP28 - AP32), da diese frontal vor dem Receiver stehen und einen wenig verzerrten Strahlungsfokus erzeugen.

8.2.2 Bildauswertung und Ergebnisanalyse

Die DNI war während des Versuchszeitraums sehr konstant, der Referenzwert bei Beginn der Messungen lag bei ca. 868.2 W/m^2 . Die DNI-Normierungsfaktoren lagen zwischen 0.9893 und 1.0062. Alle Bildaufnahmen wurden mit einer Belichtungszeit von $250 \mu\text{s}$ aufgenommen.

Die während der horizontalen Fokusverschiebung aufgenommenen Einzelbilder werden jeweils mit einem Hintergrundbild bereinigt um den Strahlungseintrag der Bestrahlung durch die Heliostaten zu messen. Anschließend werden die Bilder in *OrthoBilder* überführt und in Mittelwertbilder umgewandelt. Bei der Erzeugung der Mittelwertbilder muss unbedingt darauf geachtet werden, die gleichen Filtereinstellungen für die Berechnung der ROI-Mittelwerte (vgl. Kap. 5.3) zu verwenden wie sie auch bei den anderen Bildauswertungsschritten gewählt wurden.

Bei Analyse der Bildaufnahmen wurde festgestellt, dass der in der Heliostat-Steuerung HeliOS auswählbare *Aim Point*, der eine automatische Positionierung auf eine Fixkoordinate auf dem Receiver zulässt, einen Versatz von -0.2 m zum realen Brennfleck aufweist. Die erste Messung wurde mit *Aim Point* 14 durchgeführt, was einem Versatz von -0.4 m (auf den westlichen Radiometern rechts neben dem Receiver) entsprechen sollte. Die zugehörige Bildaufnahme wurde mit der reziproken Reflexionskorrekturmatrix für die Heliostatgruppe 10 reflexionsbereinigt, um den Brennfleck identifizieren zu können. Dieser lag jedoch bei einem

Offset von ca. -0.2 m im Bereich der Auswertungsposition im rechten Receiverbereich. Der beobachtete Versatz von -0.2 m wurde daher bei der Auswertung berücksichtigt. In Abbildung 8.4 sind jeweils links die Mittelwertbilder der ersten vier Versatzschritte sowie jeweils rechts deren reflexionsbereinigte Bilder dargestellt. Der ungefähre Brennfleck ist jeweils durch einen Kreis gekennzeichnet.

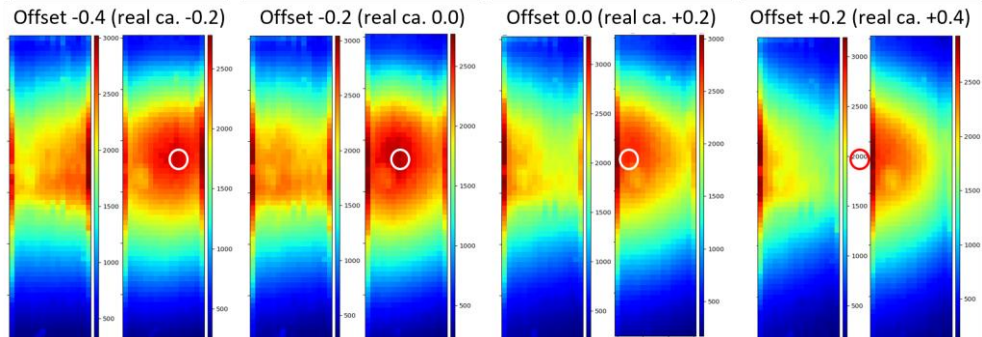


Abbildung 8.4: Mittelwertbilder und reflexionskorrigierte Bilder der ersten vier Fokusverschiebungen

Die Mittelwertbilder müssen jeweils an 12 diskreten Punkten in einem zuvor spezifizierten Messraster ausgewertet werden. Die Koordinaten der 12 Messpunkte orientieren sich an der vertikalen Position der vier Radiometer im Bezug zum Receiver sowie der Schrittweite der Versatzschritte. In horizontaler Richtung werden drei Positionen ausgewertet, wobei die Receivermitte durch eine Mittelung des 8. und 9. Pixels ausgewertet wird. Abbildung 8.5 gibt einen Überblick der Auswertepositionen in Relation zur Lage der Radiometer.

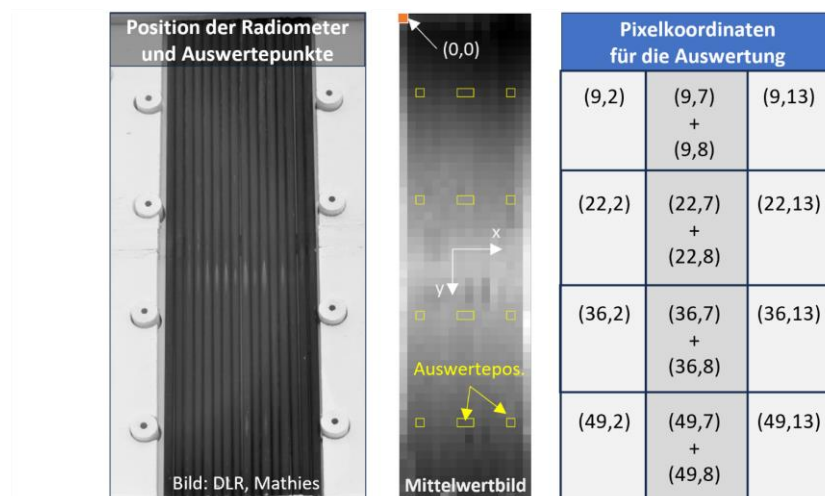


Abbildung 8.5: Darstellung der Auswertepositionen der Grauwerte bei der Fokusverschiebung (Bildquelle des Receivers: [MAT22])

Die Extraktion der Bildinformationen ist automatisiert in OFIP mit der Funktion „*calibration.extract_data_for_focus_shift*“ möglich und wird über das Hauptmenü ausgeführt. Die Methode erwartet einen Ordner, in dem die auszuwertenden Mittelwertbilder liegen und exportiert für jedes gefundene Mittelwertbild die 12 geforderten Werte in eine eigene CSV-Datei (Comma Separated Values (engl.): kommagetrennte Werte). Die restliche Auswertung der

Fokusverschiebungs-Versuche geschieht aufgrund des Umfangs und der Komplexität mit Hilfe von Excel. Im Einzelnen sind die folgenden Auswertungsschritte durchzuführen:

- Zeitliche Zuordnung der Bildaufnahmen zu dem Messprotokoll der DNI-Werte, Kontrolle und Mittelung der DNI-Werte im Bereich jeder Bildaufnahme (± 10 Sekunden)
- Bestimmung der DNI-Normierungsfaktoren für alle Bildaufnahmen
- Berechnung des mittleren Offsets und Rauschens der Radiometer vor Messbeginn
- Zeitliche Zuordnung der Bildaufnahmen zu dem Protokoll der Radiometerwerte, Kontrolle und Mittelung der Radiometerwerte im Bereich jeder Bildaufnahme (± 10 Sekunden)
- DNI-Normierung der ermittelten mittleren Radiometerwerte
- Leerlaufkorrektur der Radiometerwerte, d. h. Abzug des Offsets und Rauschens vom aufgezeichneten Messwert
- Übertragung der extrahierten Grauwerte der aufgenommenen Bilder und Bildung des Quotienten aus Radiometerleistung und Grauwert der zugehörigen Bildposition
- Arithmetische Mittelung aller berechneten Quotienten über alle Messungen und Radiometer, zur Bestimmung des gemittelten Kalibrierfaktors

Es wurden insgesamt 9 horizontale Versatzschritte von je 0.2 m aufgenommen, beginnend bei einem Offset des Strahlungsfokus von der Receivermitte von -0.2 m (westlich, auf den Bildaufnahmen rechts des Receivers) bis hin zu +1.6 m (östlich). Bei der Auswertung wurden lediglich die vier östlichen Radiometer (CR008, CR004, CR002, CR006; von oben nach unten) ausgewertet. Nach der 9. Messung war der Grauwert auf dem Receiver nicht mehr auswertbar und die Radiometer wiesen Werte in der Nähe des Grundmesswerts auf. In Tabelle 8.2 sind die DNI- und Leerlaufleistungs-bereinigten Radiometer-Messwerte der horizontalen Fokusverschiebungs-Messungen 3 bis 12 dargestellt, die sich auf die Offsets von -0.2 m bis +1.6 m beziehen. Ab einem Offset von 1.4 m sind die Leistungen bereits sehr gering, daher sind diese Werte tendenziell mit größeren Unsicherheiten behaftet

Tabelle 8.2: Überblick der bereinigten Radiometer-Messwerte für die jeweiligen Offset-Positionen

Messung für Offset (m)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(1) R8 [kW/m ²]	4.79	5.21	4.81	4.10	3.12	2.11	1.25	0.62	0.11	0.01
(2) R4 [kW/m ²]	7.69	8.10	7.75	6.92	5.41	3.73	2.24	1.15	0.32	0.07
(3) R2 [kW/m ²]	5.30	5.41	5.27	4.67	3.68	2.57	1.44	0.76	0.21	0.04
(4) R6 [kW/m ²]	1.79	1.66	1.57	1.23	0.88	0.50	0.21	0.13	0.02	0.01

In Tabelle 8.3 sind die den einzelnen Offsets zuzuordnenden gemittelten Grauwerte, die sich aus mehreren verschiedenen Messungen mit unterschiedlichem Auswerterversatz zusammensetzen, vgl. Auswerteprozess in Abbildung 8.3. Analog zu den Radiometerleistungen sind auch die Grauwerte an den jeweiligen Messpositionen in den Mittelwertbildern ab einem Versatz von 1.4 m sehr gering.

Tabelle 8.3: Überblick der den einzelnen Offsets zuzuordnenden und über die verschiedenen Messungen hinweg gemittelten Grauwerte, den jeweiligen Radiometern zugeordnet

Offset (m)	-0.2	0.0	+0.2	+0.4	+0.6	+0.8	+1.0	+1.2	+1.4	+1.6
(1) R8 [-]	1293	1368	1286	1114	856	539	324	142	23	2
(2) R4 [-]	2275	2391	2253	2041	1635	1067	655	295	73	5
(3) R2 [-]	1716	1740	1668	1505	1192	800	466	222	58	11
(4) R6 [-]	740	697	681	571	395	252	134	61	16	10

Dieser Umstand ist auch in Tabelle 8.4 zu erkennen, in der die ermittelten Kalibrierfaktoren zur Umrechnung von Grauwerten in Flussdichten zusammengefasst sind. Die Schwankungen in den Faktoren von Offset 1.4 zu 1.6 sind besonders bei Radiometer R4 signifikant.

Tabelle 8.4: Ermittelte Kalibrierfaktoren zur Umrechnung von Grauwerten in Flussdichten, bezogen auf die zugehörigen Fokusverschiebungs-Offsets und den jeweiligen Radiometern zugeordnet

Offset (m)	-0.2	0.0	+0.2	+0.4	+0.6	+0.8	+1.0	+1.2	+1.4	+1.6
(1) R8 [W/m ²]	3.70	3.81	3.74	3.68	3.65	3.91	3.86	4.40	4.66	2.87
(2) R4 [W/m ²]	3.38	3.39	3.44	3.39	3.31	3.50	3.42	3.89	4.44	13.31
(3) R2 [W/m ²]	3.09	3.11	3.16	3.11	3.09	3.21	3.10	3.43	3.64	3.64
(4) R6 [W/m ²]	2.42	2.38	2.31	2.15	2.24	1.97	1.60	2.10	1.52	0.56

Aus diesem Grund wurden die in allen drei vorigen Tabellen gelb hinterlegten Ergebnisse ab +1.4 m Offset für die Berechnung des Kalibrierfaktors nicht mehr genutzt. Die abschließende Mittelung aller individuellen Ergebnisse ergibt einen finalen mittleren Kalibrierfaktor von **3.15 W/m²** bei einer Belichtungszeit von 250 μ s bei maximal geöffneter Blende, mit einer Baumer VCXG124 12bit CMOS-Kamera.

Der ermittelte Kalibrierfaktor sowie die Referenz-Belichtungszeit, die zur Berechnung herangezogen wurde, ist in OFIP in der Funktion „*calibration.calculate_calibration_factor*“ direkt hinterlegt. Diese Funktion kann über das Hauptmenü ausgeführt werden. Da die Berechnung des Faktors noch in Excel stattfindet, gibt die Funktion in OFIP zunächst direkt den extern ermittelten Wert und die Belichtungszeit zurück.

In [JÄG23] wurde mit der gleichen Kamera bei einer Belichtungszeit von 600 μ s ein Kalibrierfaktor von ca. 1.56 W/m² ermittelt. Skaliert man den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Kalibrierfaktor gemäß dem Verhältnis der Belichtungszeiten unter Annahme eines linearen Verhaltens, ergäbe sich ein Faktor von ca. 1.31 W/m² bei 600 μ s. Die Tatsache, dass der hier ermittelte Faktor geringer ausfällt als in der Vorgängerarbeit, kann unter anderem mit einem geänderten Alterungs- und Verschmutzungszustand des Receivers oder der Radiometer erklärt werden. Auch unterschiedliche Filtereinstellungen bei Berechnung der Mittelwertbilder (vgl. Kap. 5.3) haben einen Einfluss auf die Grauwerte und somit den Kalibrierfaktor.

8.3 Bestimmung der Richtungszusammensetzung

Neben der Bestimmung der Reflexionskorrektur ist die Richtungszusammensetzung der Strahlung als zweite Komponente des Korrekturterms von zentraler Bedeutung für die Berechnung von Flussdichteverteilungen. Die Richtungszusammensetzung der Strahlung kann zwar auch simulativ ermittelt werden. Da der Fokus dieser Arbeit jedoch auf der Weiterentwicklung des optischen Flussdichte-Messverfahrens liegt, ist die Nutzung der als

Defokussierung bekannten Messmethode zur möglichst genauen Bestimmung der Richtungszusammensetzung der Strahlung naheliegend. Außerdem dienen die Defokussierungsmessungen, die tagsüber bei Realbestrahlung durchgeführt werden, der Aufnahme der Rohbilder, aus denen die Flussdichteverteilung berechnet werden soll.

8.3.1 Durchführung der Defokussierung und Rohbildaufnahmen

Wie auch bei der Fokusverschiebung waren bedingt durch den Winterbetrieb der Anlage maximal fünf Heliostate zur gleichzeitigen Bestrahlung des Receivers zulässig. Dies bietet jedoch gegenüber [JÄG23], wo nur drei Heliostate verwendet werden konnten, mehr Spielraum für die Kombination mehrerer unterschiedlicher Heliostatgruppen. Die Versuchsreihen zur Defokussierung wurden am gleichen Tag mit der Fokusverschiebung am 10.4.2024 durchgeführt. Es wurden insgesamt 8 Versuche mit verschiedenen Kombinationen von Heliostaten durchgeführt. Dabei kamen 12 der 13 Heliostatgruppen zum Einsatz, für die auch Reflexionskorrekturen bestimmt wurden. In Tabelle 8.5 sind die jeweils verwendeten Heliostatgruppen und Defokussierungs-Reihenfolgen aller Versuche aufgelistet.

Ein Defokussierungs-Versuch beginnt stets mit der Aufnahme eines oder mehrerer Hintergrundbilder mit unterschiedlichen Belichtungszeiten. Anschließend werden alle genutzten Heliostate (im Rahmen dieser Arbeit jeweils fünf) auf die Mitte des Receivers gerichtet. Nach Einstellung der Belichtungszeit wird ein Rohbild aufgenommen und die Belichtungszeit für den gesamten Versuch notiert, da diese nicht mehr verändert werden darf. Es folgen vier weitere Aufnahmen, vor denen jeweils einer der verbliebenen Heliostate defokussiert wird, also der Strahlungsfokus des Heliostaten vom Receiver genommen wird. Im letzten Defokussierungs-Schritt wird der letzte Heliostat entfernt und es wird noch ein Hintergrundbild aufgenommen.

Tabelle 8.5: Für die Defokussierungs-Versuche verwendete Heliostatgruppen

Versuch \ Reihenfolge	1. Defokuss.	2. Defokuss.	3. Defokuss.	4. Defokuss.	5. Defokuss.
1	1	2	12	4	3
2	3	1	8	11	6
3	14	12	15	16	1
4	6	14	3	10	2
5	11	3	1	8	15
6	8	4	12	16	10
7	2	1	6	14	16
8	10	15	11	4	12

8.3.2 Bildauswertung und Ergebnisanalyse

Analog zur Fokusverschiebung muss bei der Defokussierung, da diese tagsüber bei Realbestrahlung stattfindet, eine DNI-Korrektur durchgeführt werden. Diese ist sogar besonders wichtig, da sonst die Richtungszusammensetzung bzw. Strahlungsanteile der einzelnen Heliostate durch DNI-Schwankungen während der Defokussierung signifikant verfälscht werden. Für die Bildauswertung müssen die aufgenommenen Einzelbilder zunächst entzerrt und in Mittelwertbilder umgewandelt werden. Dabei gilt zu beachten, dass die Bilder vorher nicht

hintergrundbereinigt werden müssen. Stattdessen werden auch die Hintergrundbilder in Mittelwertbilder umgewandelt. Außerdem müssen (nur innerhalb jedes Versuches) die DNI-Normierungsfaktoren für jedes Einzelbild (mit Ausnahme der Hintergrundbilder) bestimmt werden, wobei das Rohbild stets als Basis für die Normierung dient und somit den Faktor 1.0 zugewiesen bekommt. Zur Bestimmung der Faktoren wird hier ebenfalls eine zeitliche Mittelung von ± 10 Sekunden um den Zeitpunkt der Bildaufnahme durchgeführt. Der nächste Schritt der Bildauswertung besteht darin, Die Hintergrundbilder vor und nach der Defokussierung zu einem gemittelten Hintergrundbild $\tilde{\rho}_{i,HG}$ zu verrechnen, um Helligkeitsschwankungen während der Defokussierungs-Schritte möglichst auszugleichen:

$$\tilde{\rho}_{i,HG} = \left(\rho_{i,HG0} + \frac{t_{bel,HG0}}{t_{bel,HG1}} \cdot \rho_{i,HG1} \right) \cdot 0.5 \quad (8.7)$$

Anschließend wird die DNI-Korrektur der Einzelbilder mit Ausnahme des mittleren Hintergrundbildes sowie des Rohbildes durchgeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass die berechneten Strahlungsanteile nicht von DNI-Schwankungen beeinflusst werden. Das mittlere Hintergrundbild wird verwendet, um eine Hintergrundkorrektur des Rohbildes durchzuführen, wobei auch hier die Belichtungszeiten von Rohbild und Hintergrundbild zu beachten sind:

$$\rho_{i,Roh,HGcorr} = \rho_{i,Roh} - \frac{t_{bel,Roh}}{t_{bel,HG0}} \cdot \tilde{\rho}_{i,HG} \quad (8.8)$$

Es folgt der Kern der Bildauswertung, bei der zunächst die Grauwertfraktionen der einzelnen beteiligten Heliostate berechnet werden:

$$\rho_{i,j, Anteil} = \rho_{i,\Sigma}^d - \rho_{i,\Sigma \setminus j}^{d+1} \quad (8.9)$$

Σ : Summe aller beteiligten Heliostate in Defokussierungs-Schritt d
 $\Sigma \setminus j$: Summe aller beteiligten Heliostate in $d + 1$, ohne Heliostat j

Aufgrund der DNI-Normierung der einzelnen Mittelwertbilder entspricht die Summe der Grauwertfraktionen nicht mehr dem Rohbild. Um aus den Grauwertfraktionen die relativen Fraktionen für die Richtungszusammensetzungs-Matrix zu bestimmen, wird die Summe der Grauwertanteile verwendet, um die relativen Fraktionen zu berechnen:

$$\rho_{i,Sum} = \sum_k \rho_{i,k, Anteil} \quad (8.10)$$

$$x_{i,j} = \rho_{i,j, Anteil} / \rho_{i,Sum} \quad (8.11)$$

Die $x_{i,j}$ in Gl. (8.11) entsprechen den Richtungszusammensetzungs-Anteilen des Korrekturterms in der Hauptformel zur Flussdichteberechnung.

Die zuvor beschriebenen Berechnungen sind in OFIP im Modul „*workflows.flux_fraction.py*“ implementiert und können über das Hauptmenü („*Workflows*“ \rightarrow „*Calculate Flux Fractions*“) ausgeführt werden. Die Berechnung verwendet im Hintergrund die Konfigurationsdatei „*refl_corr_cfg.ini*“, in der einige Angaben zu den Namen der einzelnen Mittelwertbilder, den Belichtungszeiten, den Heliostatgruppen, sowie den zuvor zu berechnenden DNI-Korrekturfaktoren gemacht werden müssen (vgl. Anhang II). Die Berechnung wird immer für einen aktiven bzw. zu betrachtenden Defokussierungsversuch durchgeführt. Die Angabe der Versuchsnummer wird zu Beginn der Berechnungen abgefragt. Die Ergebnisse der Berechnung werden im internen Speicher von OFIP abgelegt und können genutzt werden, um im Anschluss

die Flussdichteverteilung für das Rohbild des ausgewählten Defokussierungs-Versuchs zu berechnen, sofern auch die Reflexionskorrekturmatrix und der Kalibrierungsfaktor zuvor mit OFIP berechnet wurden. Alle durchgeführten Defokussierungsversuche wurden mit OFIP ausgewertet. In Abbildung 8.6 ist exemplarisch das Ergebnis für den Versuch 2 dargestellt.

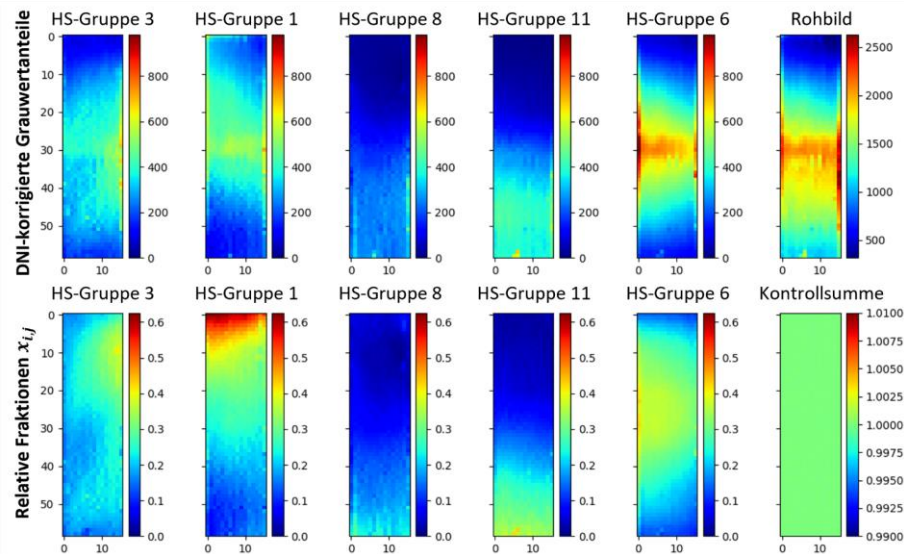


Abbildung 8.6: Richtungszusammensetzung der Bestrahlung des Defokussierungs-Versuchs V2 (HS-Gruppen 3, 1, 8, 11, 6)

In der oberen Reihe sind die DNI-korrigierten, absoluten Grauwertanteile jedes Heliostaten am Gesamtbild dargestellt, sowie ganz rechts das Rohbild. In der unteren Reihe sind die relativen Anteile $x_{i,j}$ gemäß Gl. (8.11) dargestellt, sowie eine Kontrollsumme der Fraktionen.

Die in jedem Defokussierungsversuch ermittelten Richtungszusammensetzungen bzw. Fraktionen gelten nur für die individuelle Kombination an Heliostaten, die an dem Versuch beteiligt waren. Sobald diese sich ändert, verschieben sich auch die individuellen Fraktionen der einzelnen Heliostaten. Somit liegen nur für das Rohbild des aktuell analysierten Defokussierungsversuchs alle erforderlichen Korrekturterme vor, um die Flussdichteberechnung durchzuführen. Die Hauptformel zur Flussdichteberechnung sei an dieser Stelle erneut gezeigt:

$$E_i = g_i \cdot \frac{1}{\sum x_{i,j} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}}} \cdot \frac{1}{\bar{\rho} \cdot k} \quad (8.12)$$

Die in Gl. (8.12) gezeigte Formel wird in OFIP für die Berechnung der Flussdichteverteilung für den jeweils analysierten Defokussierungs-Versuch angewendet. Voraussetzung dafür ist, dass zuvor bereits die Berechnung der Reflexionskorrekturmatrix, die Berechnung der Strahlungsanteile sowie die Berechnung des Kalibrierungsfaktors durchgeführt wurden, da deren Ergebnisse in den internen Speicher von OFIP geladen werden und anschließend von der Flussdichte-Berechnungsmethode genutzt werden können. Die Flussdichteberechnung ist im Modul „workflows/flux_density_calc.py“ untergebracht und lässt sich über das Hauptmenü („Workflows“ → „Get Flux Distribution Image (current defocus trial)“) ausführen.

Der erste Schritt der Berechnung besteht darin, die Summe im Nenner des Korrekturterms zu berechnen. Mit Verwendung von Gl. (8.5) ergibt sich diese Summe zu:

$$C = \sum_{j=1}^N (x_{i,j} \cdot A_{i,j}) = \sum_{j=1}^N \left(x_{i,j} \cdot \frac{\rho_{i,j,rel}}{\bar{\rho}_{rel}} \right) \quad (8.13)$$

N : Anzahl der bei der Defokussierung verwendeten Heliostate

Anschließend wird mit Verwendung von Gl. (8.6), Gl. (8.8) und Gl. (8.13) die Gesamtformel nach Gl. (8.12) ausmultipliziert, wobei zusätzlich die ggf. verschiedenen Belichtungszeiten bei der Fokusverschiebung und bei der Defokussierung berücksichtigt werden müssen:

$$E_i = \rho_{i,Roh,HGcorr} \cdot \frac{1}{C} \cdot K \frac{t_{bel,FV.}}{t_{bel,DF.}} \quad (8.14)$$

FV : Fokusverschiebung, DF : Defokussierung

Im Folgenden werden die resultierenden Flussdichtebilder für einige der durchgeführten Defokussierungsversuche dargestellt und diskutiert. Bei der Präsentation der Ergebnisse wird neben den unmodifizierten Ergebnissen der Flussdichteverteilung, deren Dimensionen Mittelwertbildern entsprechen, analog zu den Darstellungen der Vorgängerarbeiten eine gefilterte und auf die Größe von *OrthoBildern* interpolierte Darstellung gewählt.

In Abbildung 8.7 sind die berechneten Flussdichteverteilungen von vier verschiedenen Defokussierungs-Versuchen dargestellt. In der oberen Bilderreihe sind die unmodifizierten Ergebnisse dargestellt, in der unteren Reihe die interpolierten *OrthoBilder*. Bei allen Ergebnissen ist der Fokus klar erkennbar, auch wenn es zu Artefakten innerhalb der Bereiche mit stärkerer Bestrahlung kommt. Es ist jedoch auffällig, dass die Flussdichte-Niveaus der einzelnen Versuche stark unterschiedlich ausfallen. Die Versuche sind von links nach rechts mit aufsteigenden Flussdichtewerten angeordnet. Bei den beiden ersten Versuchen V1 und V2 liegt die maximale Flussdichte deutlich unter dem zu erwartenden Niveau.

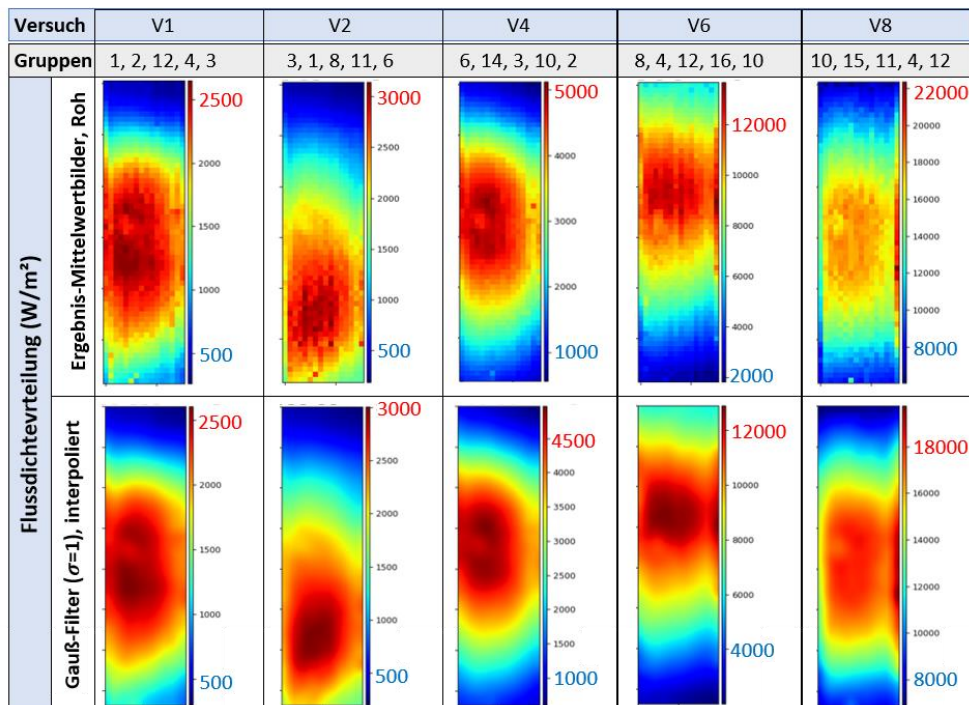


Abbildung 8.7: Flussdichteverteilungen für die Rohbilder der Defokussierungsversuche 1, 2, 4, 6 und 8

Am Beispiel des Versuches V2 lässt sich das verdeutlichen: Das hintergrundkorrigierte Rohbild dieses Defokussierungsversuchs weist einen maximalen **Grauwert von ca. 2000** im Bereich des Fokus auf, siehe Abbildung 8.6 (oben rechts). Bei Nutzung von Gl. (8.14) unter Berücksichtigung des **Kalibrierfaktors von 3.15 W/m²** und eines **Belichtungszeit-Ausgleichsfaktors von 0.89** liegen die erwarteten maximalen **Flussdichten bei ca. 5600 W/m²**, das Ergebnis der Flussdichteberechnung liegt jedoch bei ca. 3000 W/m². Betrachtet man hingegen die Ergebnisse der Versuche V6 oder V8, liegen die berechneten maximalen Flussdichten im Bereich des Strahlungsfokus bei unrealistisch hohen 12000-18000 W/m².

Es kann bei genauerer Betrachtung ein Zusammenhang hergestellt werden zwischen dem Flussdichteniveau und den jeweils verwendeten Gruppen. Die Versuche V1 und V2 bestehen mehrheitlich aus Gruppen mit kurzen Distanzen zum Receiver, bei denen $\rho_{i,j}/\bar{\rho}$ im gesamten Bild deutlich über 1 liegen (siehe Abbildung 8.1) und die gleichzeitig einen hohen Anteil an der Gesamtstrahlung aufweisen. Dadurch wird der gesamte Term C (Gl. (8.13)) groß und führt durch die reziproke Multiplikation in der Gesamtformel zu einer Reduktion der Bildwerte. Bei den Versuchen V6 und V8 ist es umgekehrt, hier wurden überwiegend Heliostate mit großen Receiver-Abständen gewählt, der Term C wird klein und führt zu sehr großen Flussdichtewerten.

Als Ursache für die Fehlskalierung wird diese asymmetrische Reflexionskorrektur angenommen. Daher wurde eine lokale Reflexionskorrektur bei der Berechnung der Reflexionskorrekturmatrix untersucht. Hierzu wird die Summe über alle verwendeten Heliostate bei der Rohbildaufnahme (der Term C in Gl. (8.13)) erneut betrachtet. In dieser Summe werden die **anteiligen** Reflexionskorrekturen der einzelnen Heliostaten addiert. In den einzelnen Strahlungsanteilen $x_{i,j}$ sind bereits die unterschiedlichen Intensitäten der verschiedenen Heliostate enthalten, sodass es plausibel erscheint, eine **lokale Reflexionskorrektur** unter Nutzung von Gl. (8.3) zu verwenden. Damit ändert sich der Term C zu:

$$C_{loc} = \sum_{j=1}^N (x_{i,j} \cdot A_{i,j,loc}) = \sum_{j=1}^N \left(x_{i,j} \cdot \frac{\rho_{i,j,rel}}{\bar{\rho}_{j,rel}} \right) \quad (8.15)$$

Bei Verwendung der *lokalen Korrektur* wird jede Korrekturmatrix über ihren eigenen Mittelwert normiert und es ergeben sich gleichmäßige Wertebereiche von ca. 0.5 bis 1.4 für alle Gruppen.

Ein Vergleich der berechneten Flussdichten zwischen globaler und lokaler Reflexionskorrektur für die Defokussierungs-Versuche V2 und V8 ist in Abbildung 8.8 dargestellt. Zur einfacheren Beurteilung der Wertebereiche der berechneten Flussdichteverteilungen sind rechts in der Abbildung die hintergrundkorrigierten Rohbilder der beiden Defokussierungs-Versuche sowie deren Belichtungszeiten angefügt. Die berechneten Flussdichten bei lokaler Korrektur sind für beide Versuche plausibel. Weiterhin fällt auf, dass besonders bei Versuch V2 auch der Strahlungsfokus gegenüber der globalen Korrektur deutlich verschoben ist und in seiner Lage eher dem Rohbild entspricht. Die Verschiebung des Fokus bei der globalen Korrektur ist durch eine unzulässige Verstärkung der Gruppen 8 und 11, deren Strahlungsanteile auf den unteren Receiverbereich konzentriert waren (vgl. Abbildung 8.6), erklärbar.

Ein Überblick der mit lokaler Korrektur berechneten Flussdichteverteilungen aller 8 Defokussierungsversuche ist in Anhang XI dargestellt.

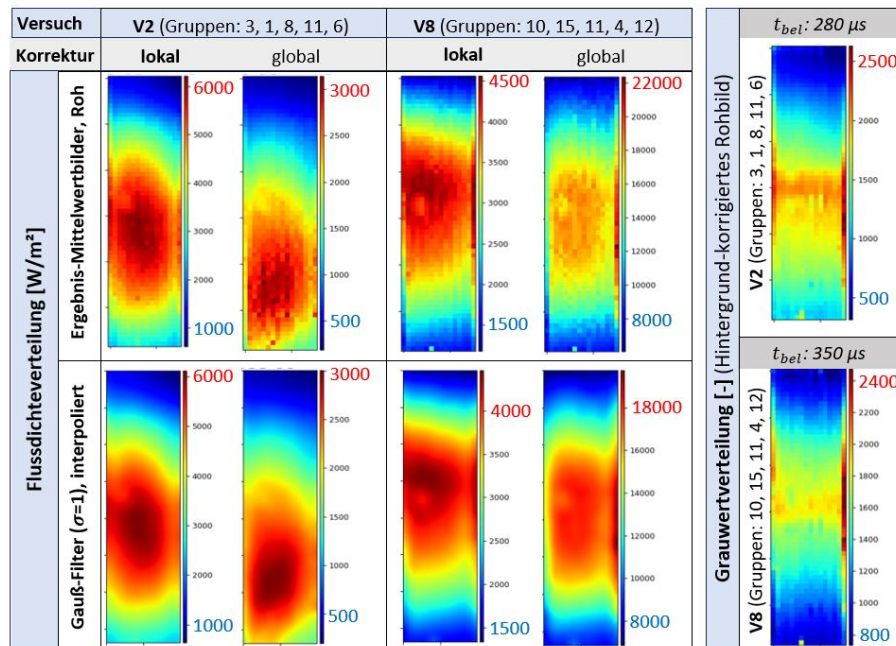


Abbildung 8.8: Vergleich der Flussdichteverteilungen für die Rohbilder der Defokussierungsversuche 2 und 8 bei Anwendung von globaler und lokaler Reflexionskorrektur

Tabelle 8.6 zeigt eine Zusammenfassung der maximalen sowie mittleren Strahlungsflussdichten für die hintergrundkorrigierten Rohbilder aller durchgeführten Defokussierungsversuche. Vergleicht man für die lokale Korrektur beispielsweise den Versuch V4 mit V8 und berücksichtigt die jeweilige Heliostatkombination dieser Versuche, ist erkennbar, dass die Flussdichtewerte bei der Nutzung der vorderen und frontalen Heliostaten (V4) etwa 50% über denen von V8 liegen, wo ausschließlich Heliostaten der hintersten bzw. seitlichsten Gruppen genutzt wurden.

Tabelle 8.6: Vergleich der mittels Scan-Verfahren berechneten Flussdichten (kurz FDM) für die Rohbilder aller Defokussierungsversuche bei Anwendung von globaler und lokaler Reflexionskorrektur

Versuch Nr.	Genutzte Heliostatgruppen	Strahlungsflussdichte [W/m²]			
		FDM, globale Korrektur		FDM, lokale Korrektur	
		Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Maximum
1	1, 2, 3, 4, 12	1740	2603	3872	5946
2	1, 3, 6, 8, 11	1835	3005	4022	6116
3	1, 12, 14, 15, 16	1926	2823	4083	5905
4	2, 3, 6, 10, 14	3082	4971	4509	7285
5	1, 3, 8, 11, 15	2050	2855	3897	5485
6	4, 8, 10, 12, 16	8466	12898	2517	4082
7	1, 2, 6, 14, 16	2025	3106	4850	7682
8	4, 10, 11, 12, 15	14075	19752	3220	4467

Zusammenfassend erscheint die lokale Korrektur bei der Nutzung der Hauptformel zur Flussdichteberechnung auf der Basis von Defokussierungsmessungen plausible Ergebnisse zu erzielen, weil die Richtungszusammensetzung der Strahlung und somit die anteilige Verrechnung der Reflexionskorrekturen bereits in der Höhe der Anteile $x_{i,j}$ enthalten ist. Sofern diese Anteile beispielsweise durch Raytracing-Simulationen ermittelt werden sollen, sind weitere Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Erkenntnisse dieser Arbeit nötig.

8.4 Simulative Bestimmung der Reflexionsanteile des Strahlungsschutzes

In diesem Abschnitt werden Möglichkeiten diskutiert, zusätzliche Informationen über das Absorptions- und Reflexionsverhalten des Receivers über Strahlengang-Berechnungen (vgl. Kap. 2.5) zu erhalten. Wie in Kap. 4.3 motiviert, soll dazu die am DLR verfügbare Raytracing-Software SPRAY eingesetzt werden, da für diese Software bereits ein FEM-Modell des HPMS-II Receivers vorhanden ist. Die notwendigen Anpassungen der Software bzw. Ergänzungen des Modells für den vorgesehenen Zweck wurden im Rahmen dieser Arbeit spezifiziert und seitens DLR bereitgestellt. Für die Simulation sind die folgenden Aspekte von besonderer Bedeutung:

- Berücksichtigung der deformierten Rohrgeometrien
- Berücksichtigung der Reflexionseigenschaften von Strahlungsschutz und Receiverrohren
- Erfassung einzelner Reflexionsanteile der ausgehenden Strahlung

Auf die erstgenannten Punkte wird in den nächsten Abschnitten genauer eingegangen, der letzte Punkt wird im Folgenden zuerst erläutert.

Ziel der SPRAY-Simulationen im Rahmen dieser Arbeit ist es, ein tieferes Verständnis für die Reflexionsanteile vor, auf und hinter den Receiverrohren zu erhalten, um eine Grundlage für die Ableitung weiterer Optimierungspotentiale der optischen Flussdichteberechnung zu erhalten. Dafür müssen diese einzelnen Anteile getrennt voneinander messbar gemacht werden. Dazu gibt es bei Nutzung der SPRAY-Software zwei Instrumente, die genutzt werden sollen:

- Analyse der komponentenweisen Output-Dateien mit absorbierten Flussdichte- und Leistungswerten pro FEM-Element sowie den zugehörigen Raumkoordinaten
- Nutzung von sogenannten Auswerteflächen, die für Strahlen einseitig ungehindert durchlässig sind, diese in der Gegenrichtung jedoch vollständig absorbieren

In Abbildung 8.9 ist das FEM-Modell für die SPRAY-Simulation dargestellt, sowie welche Modellkomponenten separat ausgewertet werden, um einzelne Strahlungsmengen separat zu erfassen. Das Modell besteht aus vier Komponenten:

- *Komponente 1*: die 16 Receiverrohre
- *Komponente 2*: der gesamte Strahlungsschutz um und hinter den Receiverrohren
- *Komponente 3*: eine entlang der Mittelachse der Receiverrohre liegende Auswertefläche
- *Komponente 4*: eine vor den Receiverrohren liegende Auswertefläche

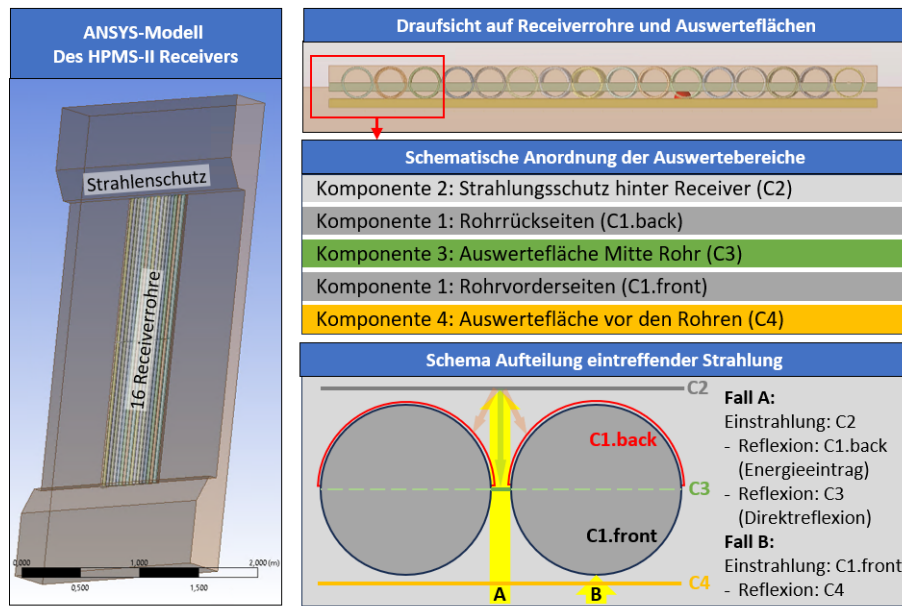


Abbildung 8.9: FEM-Modellkomponenten für SPRAY und Strahlungsanteile

Wie in der Abbildung rechts dargestellt, wird ein Koordinatenbereich aus Komponente 2, der genau hinter den Receiverrohren liegt, separat ausgewertet (C2). Aus der absorbierten Leistung und dem Reflexionsgrad von C2 lässt sich abschätzen, wie viel Strahlung rückwärtig auf die Rohre trifft und wie viel als Direktreflexion aus dem Receiver wieder austritt. Um diese Strahlungsanteile gleichzeitig zu erfassen, werden einerseits die Rohrrückseiten separat ausgewertet (C1.back). Andererseits werden die Direktreflexionen mit der innenliegenden Auswertefläche C3 erfasst. Auf der vorne liegenden Auswertefläche (C4) wird lediglich die Strahlung absorbiert, die von den Rohrvorderseiten (C1.front) reflektiert wurde. Damit soll analysiert werden, ob diese Informationen genutzt werden können, um die überbelichteten Bereiche in den aufgenommenen Bildern zu ergänzen.

Mit Hilfe dieser Auswertemöglichkeiten sollen die Verteilungen der absorbierten und reflektierten Strahlungsmengen ausgewertet werden, um zu prüfen inwiefern sich diese Informationen für die Verbesserung der Genauigkeit der optischen Flussdichtemessung nutzen lassen könnten.

8.4.1 Verformungsanalyse des HPMS-II Receivers

Der HPMS-II Rohrreceiver weist, wie in Kap. 7.2.2 beschrieben, deutliche Rohrdeformationen auf. Durch mehrere vergrößerten Spalte zwischen den Rohren gelangt, von der Bestrahlungsrichtung abhängig, signifikant mehr Strahlung hinter die Receiverrohre als es bei einem gleichmäßigen engen Rohrabstand der Fall wäre. Damit die Raytracing-Simulation sinnvolle Erkenntnisse über quantitative Anteile von direkt reflektierter oder rückseitig vom Receiver absorbiertes Strahlung geben kann, soll das für die Simulation verwendete geometrische Receivermodell im Bereich der Rohre modifiziert werden, um vergleichbare Spalte zwischen den Rohren zu schaffen wie sie beim aktuellen HPMS-II Receiver vorliegen.

Eine manuelle Vermessung der Rohrabstände im eingebauten Zustand auf der Versuchsebene in 30 m Höhe wäre mit erheblichem Aufwand verbunden. Da die Modifikationen am

Receivermodell ohnehin nur in vereinfachter Form umgesetzt werden können, wurde eine Schätzung der Abstände anhand der Analyse einer entzerrten Aufnahme des Receivers durchgeführt. Das Prinzip der Verformungsanalyse ist in Abbildung 8.10 zusammengefasst.

Eine hochaufgelöste Tageslichtaufnahme des Receivers aus einer möglichst frontalen Perspektive wurde mittels des in Kap. 5 beschriebenen Python-Programms OFIP entzerrt. Das entzerrte und auf die Receiverrohre zugeschnittene Bild bildet die Datenbasis der Verformungsanalyse. Es wurde eine Einteilung in 5 Auswertebereiche vorgenommen (oben, Mitte oben, Mitte, Mitte unten, unten). Für jeden der Bereiche wurde die seitliche Verschiebung über die individuellen Abstände der Rohre im Bild abgeschätzt und eine Einteilung der Normalverschiebung der Rohre in „vorne“, „mittig“ und „hinten“ vorgenommen. Für die seitliche Verschiebung wurde über den Längenvergleich einer ganzen Rohrbreite sowie der Rohrlücken im Bild auf die reale Lückenbreite geschlossen. Im dargestellten Beispiel in Abbildung 8.10 entsprechen 16,4 mm im Bild einem Rohrdurchmesser von 36,8 mm. Daraus ergibt sich für eine im Bild gemessene Lücke von 1,5 mm eine reale Lücke von ca. 3,37 mm.

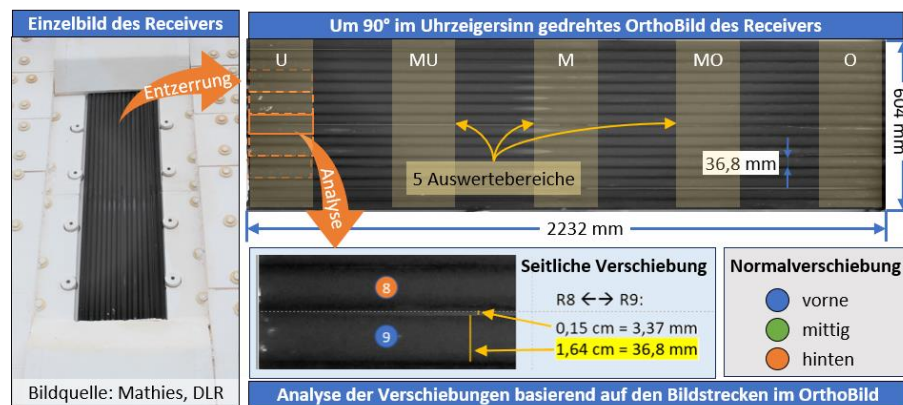


Abbildung 8.10: Prinzip der Verformungsanalyse basierend auf einem orthoskopischen Bild des Receivers

Die Ergebnisse aus allen 5 Auswertebereichen wurden in eine Matrix übertragen. Die Ergebnisse zeigen die größten Lücken zwischen den Rohren 8 und 9 in der Mitte des Receivers sowie zwischen Rohr 14 und 15 am rechten oberen Receiverbereich, was sich mit den häufig beobachteten stärksten Reflexionen in den Aufnahmen des HPMS-II Receivers deckt. Die Normalverschiebung wurde abhängig von der Rohrverschattung im Bild in drei Kategorien eingeteilt. Unterstützend wurden dabei alte Aufnahmen mit deutlichen Reflexionen herangezogen. Gemäß dem in Abbildung 7.8 dargestellten Schema lässt sich so einschätzen, welche Rohre nach vorne oder hinten verschoben sind. Da eine Quantifizierung des Betrages der Normalverschiebungen sich nicht aus Bildern ausmessen lässt, wurde die Verschiebung zwischen zwei Ebenen auf ca. 5 mm festgelegt, sodass zwischen der vordersten und hintersten Ebene maximal 10 mm Differenz liegen. Die seitlichen Rohrdeformationen wurden seitens DLR durch eine Verbiegung der Rohre im FEM-Modell umgesetzt. Die Aufwände für eine zusätzliche Durchbiegung der Rohre in Normalenrichtung waren zu groß um sie für die Simulationen im Rahmen dieser Arbeit bereitzustellen. Eine detailliertere Zusammenfassung der Ergebnisse der Verschiebungsanalyse ist im Anhang XII zu finden.

8.4.2 Integration der Mess-Ergebnisse in die Raytracing-Simulation

Um eine möglichst realitätsnahe Raytracing-Simulation zu ermöglichen, ist auch eine genaue Modellierung des Reflexionsverhaltens der beiden eingesetzten Materialien (Strahlungsschutz und Receiverrohr) erforderlich. Besonders eine genaue Quantifizierung des Reflexionsgrades und dessen Abhängigkeit vom Bestrahlungswinkel ist wichtig, um die reflektierten und absorbierten Leistungen möglichst genau abbilden zu können. Die Ausgangslage der SPRAY-Simulation ließ diese detaillierte Art der Materialmodellierung nicht zu. Daher musste eine Erweiterung der Software seitens DLR umgesetzt werden, die es erlaubte, ein Kennfeld von Bestrahlungswinkeln und der jeweiligen Reflexionsrate pro Material zu hinterlegen. Die Kennfelder für beide Materialien sind in Abbildung 8.11 dargestellt. Diese wurden aus den in Kap. 6.1 vorgestellten Messergebnissen berechnet.

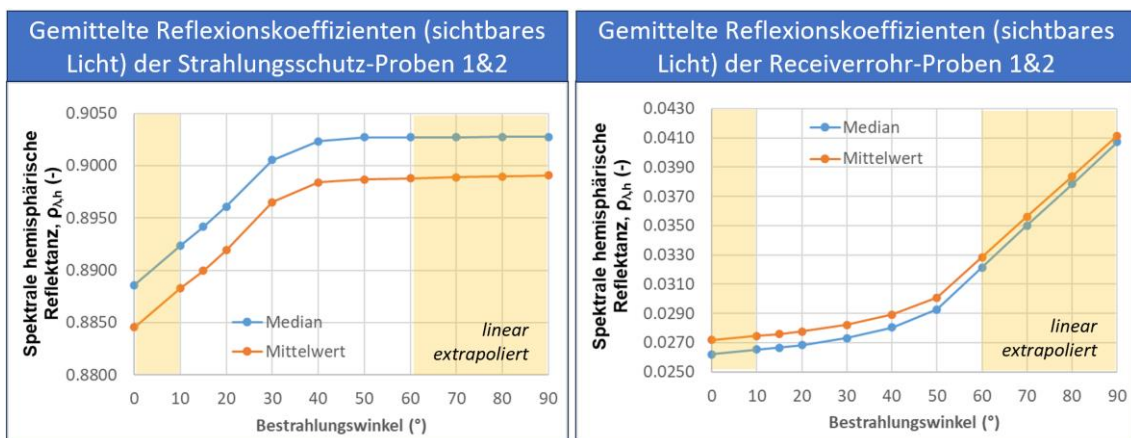


Abbildung 8.11: Gemittelte und extrapolierte Messergebnisse der Materialproben von Strahlungsschutz und Receiverrohr

Um den vollständigen Zenitwinkel-Bereich von 0° bis 90° im Kennfeld abzudecken, wurden die Werte für 0° sowie 70° - 90° linear aus den angrenzenden Winkelbereichen extrapoliert. Ein von der Wellenlänge der Bestrahlungsquelle abhängiger Reflexionsgrad lässt sich in der Simulation nicht berücksichtigen. Daher wurde für jeden Bestrahlungswinkel sowohl der Median als auch der Mittelwert des sichtbaren Lichtspektrums von 380 nm bis 780 nm pro Probe bestimmt. Für die Simulation wurde jeweils der über beide Proben eines Materials gemittelte Median (blaue Kurven) gewählt.

8.4.3 Durchführung von SPRAY-Simulationsreihen

Es wurden zwei verschiedene Simulationsreihen mit SPRAY durchgeführt, die sich jeweils in der Wahl der genutzten Heliostate unterscheiden. Grundsätzlich wurde aufgrund der geringen Zahl der gemeinsam genutzten Heliostate mit einer feinen Auflösung von 1000*1000 Strahlen pro Heliostat gerechnet, um eine möglichst hohe räumliche Dichte der Strahlen, die auf die Receiverrohre treffen, zu erreichen. Dies ist wichtig um sicherzustellen, dass eine ausreichende Zahl an Strahlen durch die kleinen Spalte der Rohre bis auf den Strahlenschutz hinter dem Receiver gelangen kann.

In der ersten Simulationsreihe wurden für die 8 durchgeführten Defokussierungs-Messungen jeweils die Gesamtbestrahlungen simuliert, analog zu den real aufgenommenen Rohbildern. Dabei wurden jeweils die fünf real verwendeten Heliostate ausgewählt. Hierbei musste für jede Simulation der gemeinsame *Aim Point* der Heliostate angepasst werden, um den Strahlungsfokus in der Simulation möglichst vergleichbar zur realen Messung auf dem Receiver zu positionieren. Ziel der ersten Simulationsreihe ist eine Quantifizierung der gesamten Strahlungsanteile, die von den einzelnen Auswerteflächen bzw. Komponenten erfasst wurden und ein Vergleich der Simulationen mit den in Kap. 8.2.2 dargestellten Ergebnissen der berechneten Flussdichteverteilungen.

In der zweiten Simulationsreihe wurden die 12 in den realen Messungen verwendeten Heliostate einzeln zur Bestrahlung genutzt. Auch hier musste für jede Simulation der *Aim Point* des verwendeten Heliostats angepasst werden, damit der Strahlungsfokus möglichst mittig auf dem Receiver ist. Ziel der zweiten Simulationsreihe ist eine Analyse der Richtungsabhängigkeit der einzelnen Reflexionsanteile und absorbierten Leistungen, insbesondere bezogen auf die Rohrückseiten.

8.4.4 Ergebnisanalyse

Die SPRAY-Software ist eine Konsolenanwendung, liefert aber viele detaillierte Simulationsergebnisse in einzelnen Ergebnisdateien für jede Komponente. Diese Dateien enthalten die gesamten absorbierten Leistungen sowie Flussdichten pro FEM-Element des Geometriemodells sowie räumliche Koordinaten der Elementmittelpunkte. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit Auswerteskripte in MATLAB programmiert, mit denen auch eine visuelle Analyse der Ergebnisse möglich ist.

Zunächst sind in Tabelle 8.7 jedoch die mittels Scan-Verfahren und lokaler Korrektur berechneten Flussdichten (kurz: FDM) den SPRAY-Ergebnissen gegenübergestellt.

Tabelle 8.7: Vergleich der mittels Scan-Verfahren berechneten und mittels SPRAY simulierten Strahlungsflussdichten für alle durchgeführten Defokussierungs-Versuche

Versuch Nr.	Genutzte Heliostatgruppen	Strahlungsflussdichte [W/m^2]				Abweichung SPRAY zu FDM [%]
		FDM, lokale Korrektur		SPRAY-Simulation		
		Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Maximum	
1	1, 2, 3, 4, 12	3872	5946	4508	7890	16
2	1, 3, 6, 8, 11	4022	6116	5556	10080	38
3	1, 12, 14, 15, 16	4083	5905	4556	7000	12
4	2, 3, 6, 10, 14	4509	7285	6278	10720	39
5	1, 3, 8, 11, 15	3897	5485	5174	9860	33
6	4, 8, 10, 12, 16	2517	4082	3778	8920	50
7	1, 2, 6, 14, 16	4850	7682	6131	10060	26
8	4, 10, 11, 12, 15	3220	4467	4769	9270	48

Die beste Übereinstimmung war bei den Versuchen V1 und V3 gegeben, mit +12% bis +16% Abweichung der Simulation zur optischen Berechnung nach dem Scan-Verfahren (FDM). Die größten Abweichungen liegen bei den Versuchen V6 und V8 vor. Greift man hier die überschlägigen Abschätzungen basierend auf den Grauwerten der Rohbilder und dem ermittelten Kalibrierungsfaktor auf (siehe Kap. 8.3.2, S. 67), erscheint die SPRAY-Simulation an dieser Stelle zu hohe Flussdichten zu ermitteln.

Einerseits können die realen Reflexionseigenschaften der Rohre (inkl. Alterung, Verschmutzung und Materialschwankungen) nicht in SPRAY abgebildet werden. Eine weitere Erklärung für die unterschiedlichen Abweichungen könnte sein, dass die Fokussierung der Heliostate auf den Absorber in SPRAY auch bei großen Distanzen sehr präzise ist. Zukünftige Arbeiten sollten an dieser Stelle anknüpfen und sich detaillierter mit der Simulationsparametrisierung auseinandersetzen.

Neben dem Vergleich der Simulation mit der optischen Flussdichtemessung liegt der Hauptgrund der Simulationen in der Analyse, ob eine Berücksichtigung der reflektierten Strahlungsanteile bei der Flussdichteberechnung grundsätzlich möglich und sinnvoll erscheint. Um die Modifikationen am FEM-Modell und die Simulationsergebnisse und Auswertestrategie qualitativ zu bewerten, kann mithilfe der im Rahmen dieser Arbeit implementierten MATLAB-Visualisierungsskripte ein Vergleich eines Einzelbildes bei Bestrahlung aus Gruppe 2 (HS-ID AC33) mit einer SPRAY-Simulation bei Bestrahlung aus der Gleichen HS-Gruppe durchgeführt werden. Dies ist in Abbildung 8.12 dargestellt.

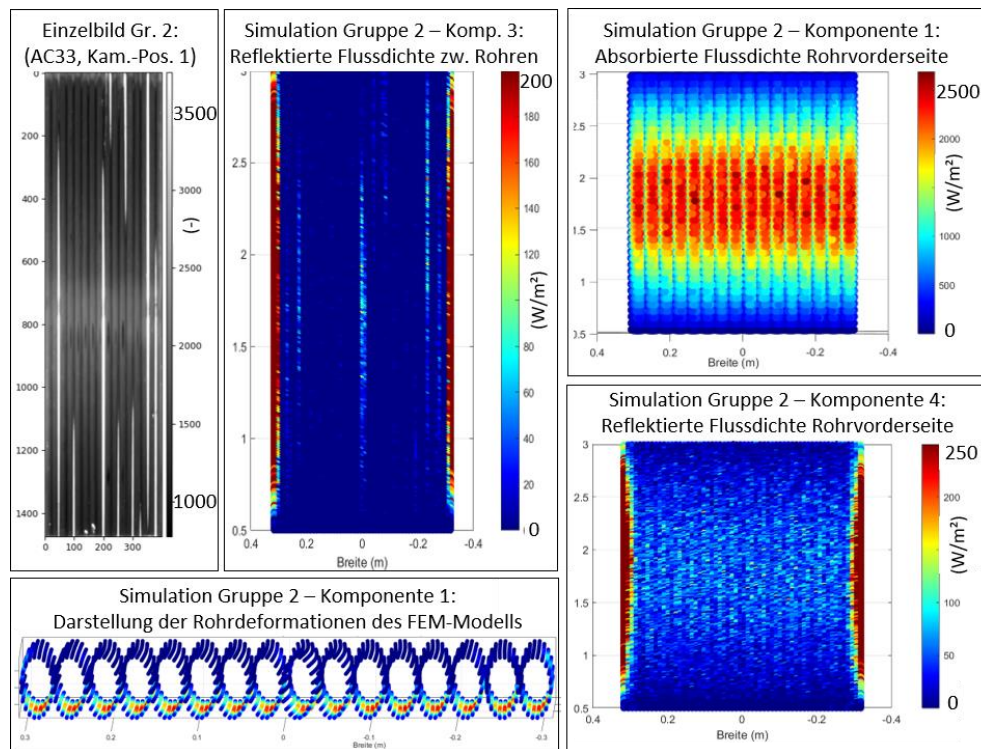


Abbildung 8.12: SPRAY-Simulation bei Bestrahlung durch HS-Gruppe 2 und Gegenüberstellung mit Einzelbildaufnahme bei Scheinwerferbestrahlung aus HS-Gruppe 2

Links ist ein entzerrtes Einzelbild (Kameraposition 1) mit deutlichen Reflexionen bei Bestrahlung aus HS-Gruppe 2 zu sehen. Mittig ist ein Flussdichte-Plot der Komponente 3 dargestellt. Diese Auswertefläche liegt mittig zwischen den Rohren und detektiert alle Direktreflexionen des Strahlungsschutzes. Die Reflexionen in der Simulation zeigen eine große Ähnlichkeit mit den im realen Bild erfassten Überbelichtungen (links im Bild), woraus abgeleitet werden kann, dass eine Rohrdeformation im FEM-Modell der Raytracing-Simulation realistische Ergebnisse herbeiführen kann. Die mittlere Flussdichte der Komponente 3 beträgt ca. 24 W/m^2 . Die absorbierte Flussdichte der Rohrvorderseiten (rechts im Bild), beträgt im Mittel 950 W/m^2 , bei

einem Absorptionsgrad von ca. 90%. Die unten rechts dargestellte Komponente 4, die die reine vom Absorber reflektierte Strahlung in Richtung der Kamera erfasst, weist eine mittlere Flussdichte von 55 W/m^2 auf. Setzt man diesen Wert in Relation zu den 24 W/m^2 der Komponente 3, wird deutlich, wie groß der Störanteil der Direktreflexionen bei dieser Bestrahlung durch Gruppe 2 ist. Anhand der Visualisierung der Komponente 4 ist jedoch auch erkennbar, dass die ursprünglich geplante Nutzung dieser Flussdichtewerte zur Ergänzung von Bildinformationen in überbelichteten Bereichen der aufgenommenen Bilder nicht umsetzbar zu sein scheint. Die einzelnen Rohre sind kaum erkennbar und auch ein klarer Strahlungsfokus ist nicht sichtbar, da sich die von den Rohren reflektierte Strahlung durch die gewölbten Rohroberflächen stark über die Auswertefläche verteilt.

Die zu Beginn aufgestellte Vermutung, dass durch die signifikanten Lücken zwischen den Rohren ein messbarer Strahlungseintrag auf den Rohrrückseiten entsteht, lässt sich hingegen beispielsweise mit Visualisierungen der gleichen SPRAY-Simulationsergebnisse bei Bestrahlung durch einen Heliostaten der Gruppe 2 zeigen. In Abbildung 8.13 ist auf der linken Seite die absorbierte Flussdichte der FEM-Elemente auf der Rückseite der Komponente 1 (Rohrrückseiten) visualisiert.

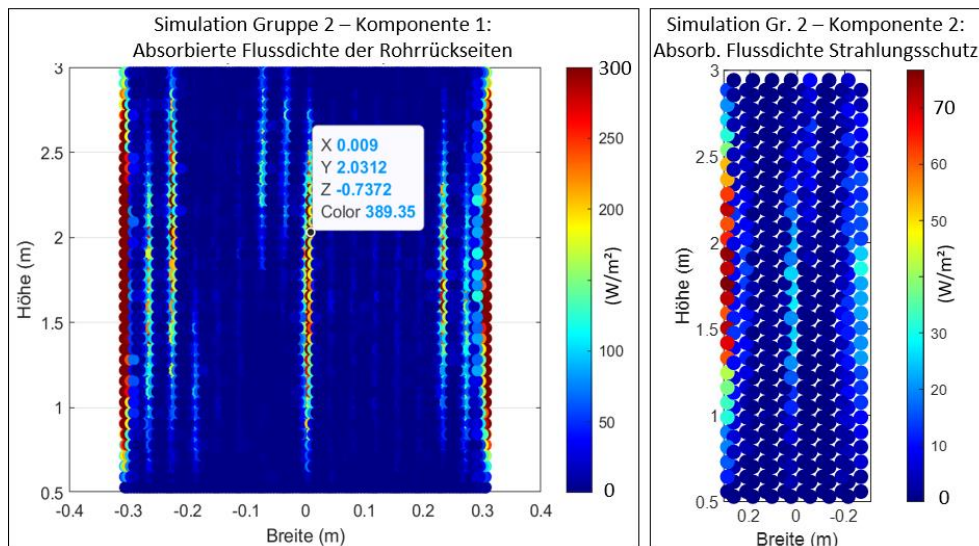


Abbildung 8.13: SPRAY-Simulation bei Bestrahlung durch HS-Gruppe 2 und Darstellung der von den Rohrrückseiten absorbierten Flussdichte

Dominant ist die absorbierte Strahlung in der Mitte des Receivers, angrenzend an die große Lücke zwischen den Rohren 8 und 9, mit maximalen Flussdichten von ca. 390 W/m^2 . Selbst an Stellen ohne große Rohrdeformationen ist ein geringer Strahlungseintrag erkennbar. Die mittlere Flussdichte auf den Rohrrückseiten beträgt ca. 53 W/m^2 . Betrachtet man die gesamte absorbierte Leistung der Receiverrohre in der Simulation (2303 W) und bezieht diese auf die frontal sichtbare zweidimensionale Fläche des Absorbers, erhält man eine mittlere Flussdichte von ca. 1541 W/m^2 . Gemessen daran beträgt der Anteil der nicht sichtbaren mittleren Flussdichte ca. **3.4%**.

Die zweite Simulationsreihe, zu der auch die zuvor vorgestellten Ergebnisse der Gruppe 2 gehören, dient der Analyse der Richtungsabhängigkeit der zuvor diskutierten Strahlungsanteile für alle 12 Heliostaten, die während der Defokussierungs-Messungen verwendet worden sind.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Messreihe ist in Tabelle 8.8 gegeben. Die dort aufgeführten Zahlenwerte in der 2., 3. Und 5. Spalte (von links) wurden aus den SPRAY-Ergebnisdateien für Komponente 1 über die entwickelten MATLAB-Auswerteskripte extrahiert.

Tabelle 8.8: Ergebnisse der SPRAY-Simulationen mit Bestrahlung durch jeweils einen Heliostaten; Analyse der von den Rohren (Komponente 1) absorbierten Leistungen und berechneten Flussdichten

HS-Gruppe	Gesamte absorbierte Leistung [W]	Maximale Flussdichte [W/m ²]	Auf 2d Frontfläche bezogene mittlere Flussdichte [W/m ²]	Mittlere Flussdichte der Rohrrückseiten [W/m ²]	Anteil der nicht sichtbaren absorbierten Flussdichte [%]
1	2095	2870	1402.35	25.40	1.81
2	2303	2690	1541.07	52.97	3.44
3	1892	3020	1265.99	17.82	1.41
4	1124	2780	751.98	3.40	0.45
6	2327	2900	1557.61	59.22	3.80
8	1176	2590	786.80	6.12	0.78
10	2214	2830	1481.73	55.52	3.75
11	1949	2760	1304.08	26.35	2.02
12	1163	2100	778.28	8.74	1.12
14	1597	1720	1068.76	39.62	3.71
15	1498	1660	1002.60	27.18	2.71
16	1044	1250	698.62	10.52	1.51

Die mittlere Spalte mit den auf die 2D- Frontfläche bezogenen Flussdichtewerten wurde wie oben erläutert aus den gesamten absorbierten Leistungen abgeleitet. Es ist erwartungsgemäß deutlich erkennbar, dass die Anteile nicht sichtbarer absorbierten Flussdichte (rechte Spalte) bei Heliostatgruppen mit großen Azimutwinkeln (Heliostatgruppen 4, 8, 12) am geringsten sind, bei Heliostatgruppen mit geringen Azimutwinkeln (Heliostatgruppen 6, 10, 14) hingegen am größten. Die berechneten Größenordnungen sind ausreichend, um eine Berücksichtigung der Erkenntnisse in der Berechnungsvorschrift der optischen Flussdichtemessung zu rechtfertigen. Dazu wird im folgenden Abschnitt ein Vorschlag vorgestellt.

8.4.5 Integration der Simulationsergebnisse in die Flussdichteberechnung

Aus den Simulationsergebnissen bei Bestrahlung durch die einzelnen Heliostaten ist ein klar erkennbarer richtungsabhängiger Strahlungseintrag auf die Rohrrückseiten erkennbar. Dieser Strahlungseintrag, der durch die deformierten Rohre und somit größeren Lücken in signifikanter Größe auf den hinter dem Absorber liegenden Strahlungsschutz trifft und überwiegend in die Rohrrückseiten reflektiert wird, ist in den Kamerabildern nicht detektierbar.

Während der Fokusverschiebung wurde ein Kalibrierfaktor zwischen Grauwert und Flussdichte ermittelt, wobei eine Bestrahlung mit mehreren Heliostaten stattgefunden hat. Dabei wurde ein auf der Rohrvorderseite gemessener Grauwert mit einem ebenfalls vorderseitig bestrahlten Radiometer in Relation gesetzt. Die tatsächlich von den Rohren absorbierte Strahlung ist bei dieser Kalibrierung jedoch nicht messbar. Als logische Konsequenz wird also die optisch messbare Flussdichte nur auf die rohrvorderseitige Absorption bezogen.

Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, den durch die Rohrrückseiten absorbierten Strahlungsanteil, der pro Heliostat und daher richtungsabhängig durch die SPRAY-Simulation als absolute Größe quantifiziert werden kann, als zusätzlichen additiven Korrekturterm in der

Hauptformel zur Flussdichteberechnung zu berücksichtigen. Dabei setzt sich diese additive Korrektur in erster Näherung aus der Summe der mittleren Flussdichten der Rohrrückseiten (Komponente 1.back, vgl. Abbildung 8.9) aller an der Bestrahlung beteiligten Heliostaten zusammen. Mit der Einführung des Formelzeichens $\bar{E}_{R,j}$ für die mittlere Strahlungsflussdichte der Rohrrückseiten bei Bestrahlung aus Richtung j ergibt sich die ergänzte Hauptformel zu:

$$E_i = g_i \cdot \underbrace{\frac{1}{\sum_j \left(x_{i,j} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}} \right)}}_{\text{Reflexionskorrektur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho} \cdot k}}_{\text{Kalibrierung}} + \underbrace{\sum_j \bar{E}_{R,j}}_{\text{additive Korrektur}} \quad (8.16)$$

Durch den additiven Charakter können damit die ermittelten Flussdichten um einen absoluten Aufschlag korrigiert werden. Für die Defokussierungs-Messung V4 würde dieser Aufschlag am größten und würde **225 W/m²** betragen (4,99 % bezogen auf die mittlere Flussdichte des Absorbers), für die Messung V6 wäre er mit **84 W/m²** am geringsten (3,34 % bezogen auf die mittlere Flussdichte des Absorbers).

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst die bisherigen Untersuchungen am HPMS-II Receiver analysiert. Es wurden Rohrverbiegungen und dadurch entstehende Überbelichtungen in den Aufnahmen als zentrales Problem für die Nutzbarkeit der optischen Flussdichtemessung bestätigt. Als primäre Gegenmaßnahme wurde eine außermittige Kameraposition identifiziert. Es wurde anschließend eine zweistufige Methode zur zeiteffizienten Ermittlung alternativer, optimaler Kamerapositionen entwickelt und praktisch erprobt. Die Methode besteht aus einer Vorab-Bewertung mit bloßem Auge zur Reduktion potentieller Kamerapositionen, sowie einer quantitativen Bewertung der potentiellen Kamerapositionen anhand der prozentualen Überbelichtung basierend auf bei Dunkelheit aufgenommenen Einzelbildern. Die Methode hat sich als zeiteffizient und praktikabel herausgestellt. Es wurde eine optimale Kameraposition 6.388 m westlich zum aktuellen MFT-Kameramast identifiziert, an der kaum Reflexionen aufgetreten sind. Im Zuge der Nachtmessungen wurde ebenfalls ein tendenziell retro-reflektives Verhalten des Strahlungsschutzes beobachtet, wie es bereits in [OFF24] angenommen wurde.

Um eine einfache Weiterentwicklung sowie eine robuste und unkomplizierte Bildauswertung und Flussdichteberechnung zu ermöglichen, wurde der Bildauswertungsprozess, der bisher in der MATLAB-Software EvalGUI ablief, in Python neu implementiert. Im Rahmen dieser Arbeit konnte diese „*Optical Flux density measurement Image Processor*“ (OFIP) genannte Software für alle nötigen Auswertungsschritte eingesetzt werden. Neben einer teilautomatischen und flexibel einsetzbaren Bildverzerrung wurde eine dynamische ROI-Ermittlung implementiert. Diese identifiziert automatisch die Rohrzwischenräume. Die generierten Mittelwertbilder sind somit unempfindlich gegenüber Rohrdeformationen oder Bildversätzen.

Die notwendige Messkette zur Berechnung von Flussdichteverteilungen (Nacht-Scans, Fokusverschiebung, Defokussierung) wurde mit der optimierten Kameraposition erfolgreich durchgeführt. Es wurden bis zu 13 verschiedene Heliostatgruppen aus allen Entfernungsbereichen zum Receiver für die Messungen gewählt. Während der Flussdichteberechnung unter Benutzung der globalen Reflexionskorrektur mit $\bar{\rho}$ sind

unrealistische Flussdichte-Niveaus bei einigen Messungen aufgetreten, die durch eine fehlerhafte Reflexionskorrektur zustande gekommen sind. Als Ursache dafür wurden die starken Helligkeitsunterschiede bei den Nachtskans, insbesondere zwischen den vordersten und hintersten Heliostatgruppen, vermutet. Diese relativen Intensitätsunterschiede der verschiedenen Heliostatgruppen sind bei Nutzung der Defokussierung zur Bestimmung der Richtungszusammensetzung bereits in den Fraktionen $x_{i,j}$ enthalten. Daher konnten durch die Verwendung einer lokalen Reflexionskorrektur mit $\bar{\rho}_j$ realistische Flussdichte-Niveaus für alle Messungen berechnet werden. Die aufgetretenen Bildartefakte waren dabei meist gering.

Anhand von Materialproben, die durch das DLR vermessen wurden, sind die winkelabhängigen Reflexionseigenschaften des Strahlungsschutzes und der Absorberrohre des HPMS-II Receivers analysiert worden. Aus den Messergebnissen wurden gemittelte Kennfelder der winkelabhängigen Reflexionsraten abgeleitet, um die Materialeigenschaften in der Raytracing-Simulation SPRAY des DLR berücksichtigen zu können. Es wurde weiterhin eine Rohrdeformationsanalyse durchgeführt, um das für SPRAY genutzte FEM-Receivermodell durch das DLR modifizieren zu lassen. Mittels SPRAY-Simulationen wurden für jede genutzte Heliostatgruppe j die Strahlungsanteile quantifiziert, die von den Rückseiten der Receiverrohre absorbiert werden. Diese mittleren Flussdichten wurden als $\bar{E}_{R,j}$ bezeichnet.

Es wurde die Ergänzung eines additiven Korrekturterms $\sum_j \bar{E}_{R,j}$ in die Hauptformel zur Flussdichteberechnung vorgeschlagen. Mit diesem Korrekturterm konnte beispielsweise für die Tagesmessung V4 (während der Defokussierung) gezeigt werden, dass die zu addierende Flussdichte ca. 5% der mittels Scan-Methode berechneten mittleren Flussdichte entspricht.

Ausblick

Die in jedem Defokussierungsversuch ermittelten Richtungszusammensetzungen bzw. Fraktionen gelten nur für die individuelle Kombination an Heliostaten, die an dem Versuch beteiligt waren. Sobald diese sich ändern, verschieben sich auch die individuellen Fraktionen aller beteiligten Heliostate. Somit liegen nur für das Rohbild des aktuell analysierten Defokussierungsversuchs alle erforderlichen Korrekturterme vor, um die Flussdichteberechnung durchzuführen. Für eine zukünftige Anwendung des optischen Flussdichte-Messverfahrens auf beliebige Einzelbilder müsste daher theoretisch eine Bestimmung der individuellen Strahlungsanteile jedes einzelnen Heliostaten bezogen auf die Summe aller Heliostaten des Solarkraftwerks durchgeführt werden. Es sollten effiziente Methoden entwickelt werden, um eine genaue Bestimmung der Richtungszusammensetzung der Strahlung für eine große Anzahl an Heliostaten praktisch umsetzbar zu machen.

Bezüglich der SPRAY-Simulation sollte eine Modellierung der Verformung der Rohre in Normalenrichtung, wie sie in der Realität auftritt, untersucht werden. Bei Heliostat-Gruppen mit großen Azimutwinkeln würde dann mehr Strahlung auf die Rückseiten der Absorberrohre treffen und es wären noch stärkere Ähnlichkeiten in den Reflexionsmustern der Simulation und Realität zu erwarten (vgl. Abb. Abbildung 8.12).

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Auswertungen zur Berechnung des Kalibrierungsfaktors wurden manuell mit Excel durchgeführt und sind äußerst umfangreich und fehleranfällig. Eine automatisierte Auswertung und Integration in die Python-Software OFIP

würde die praktische Einsatzfähigkeit deutlich steigern. Die grundlegende Softwarestruktur wurde dafür bereits vorbereitet.

Bei großen Solarturmkraftwerken, wie zum Beispiel der in Abbildung 9.1 dargestellte „Noor Energy 1“ in Al Qudra, Dubai, UAE (100MW Flüssigsalzreceiver mit 15h Speicherkapazität, 70.000 Heliostate) [NOO24], oder „Ashalim Power Station“ in Ashalim, Israel, werden mehrere Rohrreceiver-Facetten ringförmig auf einem Turm aufgebaut, sodass die Heliostaten auf dem kreisförmigen Heliostatfeld aus allen Richtungen den zylindrischen Solarturm bestrahlen können. Dabei müssten mehrere Kameras eingesetzt werden, um ein vollständiges Abbild der Receiver-Mantelfläche zu erhalten. Die Auswertungssoftware müsste daher in der Lage sein, Bilder mehrerer Kameras zu entzerren und zu einem Gesamtbild zusammenzusetzen oder die Facetten separat zu analysieren und für eine Kraftwerksregelung geeignet zu kombinieren.



Abbildung 9.1: Großindustrielles Solarturm-Kraftwerk Noor Energy 1 mit facettiertem Receiver-Design

Literaturverzeichnis

- [BAE19] H. D. Baehr, K. Stephan: „Wärme- und Stoffübertragung“. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. DOI: 10.1007/978-3-662-58441-5
- [BAU23] Baumer Optronik GmbH: „Datenblatt VCXG 124M“. Firmenschrift. URL: <https://www.baumer.com/us/en/p/23813>. Stand: 07.09.2024
- [BUC24] R. Buck: „Solar Power Raytracing Tool SPRAY – User Manual“. Firmenschrift. Version 22 vom 17.06.2024, 2024
- [CAN24] Canon Deutschland: „Infobank - Bildsensoren erklärt“. Firmenschrift. URL: <https://www.canon.de/pro/infobank/image-sensors-explained/>. Stand: 27.08.2024
- [DEU19] Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt: „Drei in eins- Neuer DLR-Solarturm ermöglicht drei Experimente gleichzeitig“. URL: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2019/03/20190816_drei-in-eins_neuer-dlr-solarturm-ermoeslicht-drei-experimente.html. Stand: 07.09.2024
- [DEU21] Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt: „Solarthermische Kraftwerke – Wärme Strom und Brennstoffe aus konzentrierter Sonnenenergie“. Studie. URL: https://www.dlr.de/de/sf/medien/publikationen/sonstige-publikationen/studie-solarthermische-kraftwerke_dlr_2021-03.pdf. Stand: 07.09.2024
- [DEU24] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: „Der Solarturm Jülich“. URL: https://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/grossanlagen/juelich/Solarturm_Juelich.pdf
- [EUR24] Eurostat: „Statistics for the European Green Deal: Climate Related Economic Losses“. Datenquelle: European Environment Agency. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/egd-statistics/>. Stand: 07.09.2024
- [FRA23] C. Frantz, M. Ebert, B. Schlögl-Knothe, M. Binder, C. Schuhbauer: „Experimental receiver setup of a high performance molten salt test receiver system“. AIP Conf. Proc. 6 October 2023; 2815 (1): 100003. <https://doi.org/10.1063/5.0148772>
- [GLA24] Glas Trösch: „Bauphysikalische Grundlagen – Sonne und Licht“. Firmenschrift. URL: <https://www.glastroesch.com/ch/de/service/fachwissen/glas-und-praxis/bauphysikalische-grundlagen/sonne-und-licht>. Stand: 07.09.2024
- [GLI21] M. Glinka: „Strahlungsflussdichtemessung mittels Reflexion an Solartürmen - Inbetriebnahme und Nutzung eines wassergekühlten Rohrreceivers“. BA RWTH Aachen, 2021
- [GOR17] P. Gorzalka: „Messung der Reflexionseigenschaften von Absorbern für die Strahlungsflussdichtemessung an Solarturmreceivern“. MA RWTH Aachen, 2017
- [GÖH11] F. Göhring, O. Bender, M. Röger, J. Nettelau, P. Schwarzbözl: „Flux density measurement on open volumetric receivers“. In: Proceedings of SolarPACES (2011). <https://elib.dlr.de/73090/>
- [HUK24] Hukseflux Thermal Sensors: „GG01 - Gardon gauge water-cooled high heat flux sensor“. Firmenschrift. URL: https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/GG01_v2007.pdf. Stand: 27.08.2024
- [KAL13] M. Kaltschmitt, W. Streicher, A. Wiese: „Erneuerbare Energien“. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978364203248 6. Stand: 07.09.2024
- [LAD21] A. Lademann: „Strahlungsflussdichtemessung am Rohrreceiver eines Solarturms mittels Reflexion am Absorber“. BA RWTH Aachen, 2021
- [MAT22] J. Matthies: „Strahlungsflussdichtemessung an Flüssigsalzreceivern in Solarturmkraftwerken mittels Scan-Verfahren“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): Jülich, BA RWTH Aachen, 2022

- [MEY21] D. Meyer: „Software Engineering für die Strahlungsflussdichtemessung an Rohrreivern von Solarturmanlagen“. BA RWTH Aachen, 2021
- [NET08] J. Nettelau: „Entwicklung und Erprobung eines Messsystems zur kontinuierlichen Strahlungsmessung an Strahlungsempfänger solarer Turmkraftwerke“. Diplomarbeit Universität Stuttgart, 2008
- [NIC77] F.E. Nicodemus, J.C. Richmond, J.J. Hsia, I.W. Ginsberg, T. Limperis: „Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance“. Gaithersburg, MD: U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1977
- [NOO24a] Noor Energy: Central Tower - Construction Site Photos, Full View.
URL: <http://noorenergy.ae/wp-content/uploads/2021/12/CTv1-scaled.jpg>.
Stand:17.08.2024
- [NOO24b] Noor Energy: Central Tower - Construction Site Photos, Full View.
URL: https://noorenergy.ae/wp-content/uploads/2020/04/20200418_103900-773x1030.jpg. Stand:17.08.2024
- [OFF18] M. Offergeld, M. Röger, H. Stadler: „Verfahren zur Bestimmung von relativen Reflexionsgraden einer Absorberfläche eines Receivers einer Solarturmanlage“, Deutsches Patent, DE102016226033B4, 2018
- [OFF19] M. Offergeld, M. Röger, H. Stadler, P. Gorzalka, B. Hoffschmidt: „Flux density measurement for industrial-scale solar power towers using the reflection off the absorber“, in: AIP Conference Proceedings, Jul. 2019, vol. 2126. DOI: 10.1063/1.5117617.
- [OFF24] M. Offergeld: „Flux Density Measurement Using the Reflection at External Receivers of Industrial-Scale Solar Tower Plants“, Dissertation RWTH (noch unveröffentlicht, Erscheinung vrs. 2024), 2024
- [RÖG14] M. Röger, P. Herrman, S. Ulmer, M. Ebert, C. Prah, F. Göhring: „Techniques to Measure Solar Flux Density Distribution on Large-Scale Receivers“. J. Sol. Energy Eng. Aug 2014, 136(3) (2014), Nr. 031013. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4027261>.– DOI 10.1115/1.4027261
- [SCI24] SCIKIT-IMAGE python Imaging library: „Examples: Robust matching using RANSAC“. Online-Dokumentation. URL: https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/transform/plot_matching.html#robust-matching-using-ransac. Stand: 07.09.2024
- [STI12] R. Stieglitz, V. Heinzel: „Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen“. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012
- [TOR03] W. Torge: „Geodäsie“. Walter de Gruyter (Hrsg.), WdeG: Berlin, New York, 2. Ausg., 2003
- [TUW24] TU Wien: „Computergraphik 1 - Geometrische Transformationen“. Foliensatz. URL: <https://www.cg.tuwien.ac.at/courses/CG1/textblaetter/02%20Geometrische%20Transformationen.pdf>. Stand: 27.08.2024
- [ULM12] S. Ulmer: „Messung der Strahlungsflussdichte-Verteilung von punktkonzentrierenden solarthermischen Kraftwerken“, Diss. Universität Stuttgart, 2003
- [WIK24] Wikimedia Commons: „Intensität der Sonnenstrahlung bei AM0 (erdnahe Weltraum) und AM1,5 (etwa zum Sonnenhöchststand in Wien) im Vergleich zur Emission eines idealen Schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 5900 K“. Bild auf Webseite, URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Sonne_Strahlungsintensitaet.svg. Stand: 27.08.24
- [ZÖL21] J. Zöllner: „Strahlungsflussdichtemessung mittels Reflexion an Solarturm-Rohrreivern – Bildaufnahme und softwarebasierte Bildverarbeitung“. BA RWTH Aachen, 2021

A Anhang

```
1  [General]
2  plot_grey = 0
3  overexpo_limit = 4000
4  # do not edit this image file name or the receiver reference shape!
5  ortho_ref_image = ideal_ref_16bit.tif
6  receiver_ref_shape = 1475, 400
7  data_dir = D:\Masterarbeit\10_Software\OpticalFdmImageProcessor\DATA
8
9  [ManualCleanOuter]
10 num_points = 4
11 fill_value = 4096
12
13 [BinarizeImage]
14 automatic = 1
15 threshold = 0.5
16 as_binary = 1
17
18 [CleanupParticles]
19 radius = 1
20 bright_spots = 0
21 show_plot = 0
22
23 [ConvexHull]
24 need_inversion = 1
25 show_plot = 1
26
27 [DeskewImage]
28 corner_detection = harris
29 corner_sharpness = 0.0015
30 rel_threshold = 0.0001
31 min_distance = 5
32 subpix_window = 9
33
34 [ClipImage]
35 show_plot = 1
36
37 [MeanGreyImage]
38 prominence_factor = 2.0
39 broad_reflexion_limit = 0.4
40 nominal_stepping_deviation = 0.25
41 v_trim_pixel = 15
42 h_padding_pixel = 3
43 value_limits_for_mean = 0, 4000
```

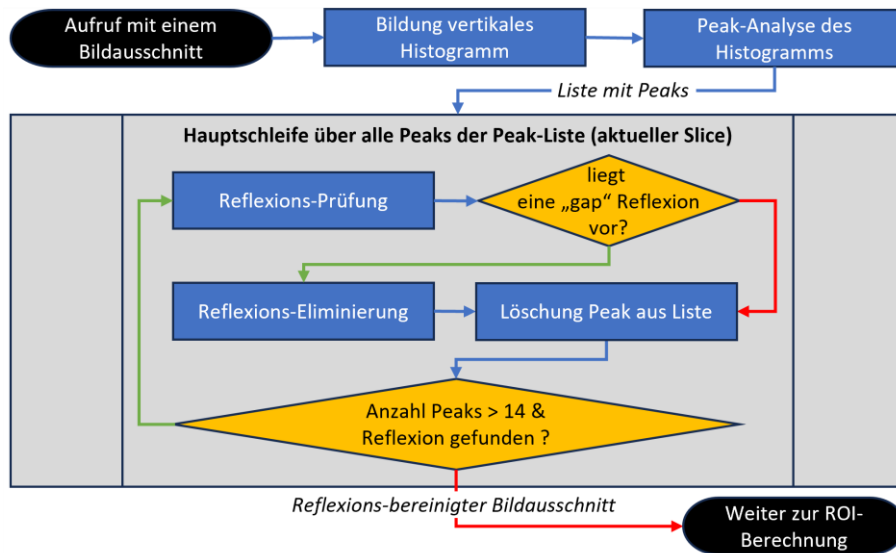
Anhang I: Konfigurationsdatei „OFIP.ini“ für das gleichnamige Python-Programm zur Bildverarbeitung

```

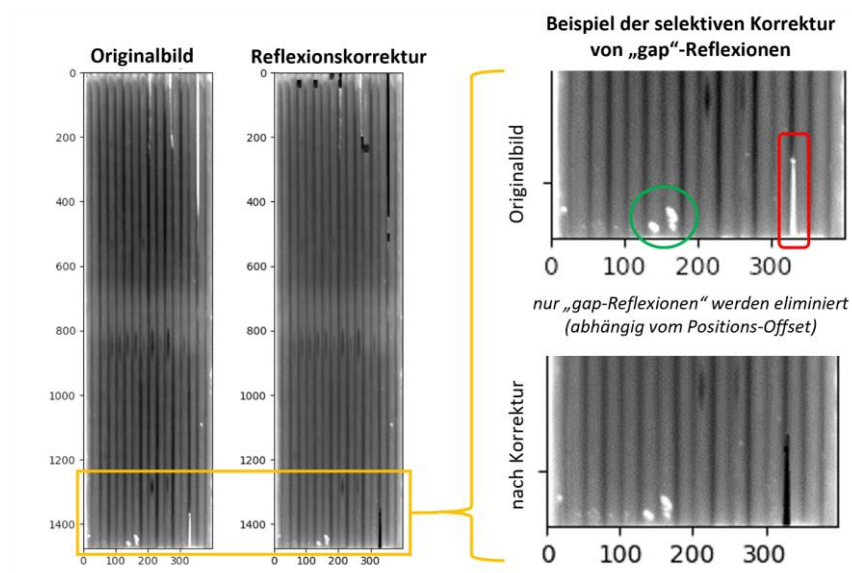
1 [IntensityCorrection]
2 # IK_
3 group_correction_factors = 2.8225, 0.8892, 1.5473, 0.4552, 0.9193, 2.0697, 1.0000, 1.5982, 1.0000, 1.0121, 0.6452, 0.2605, 1.0000, 0.3355, 0.2950, 0.1503
4
5
6 [Defocus_General]
7 number_of_trials = 8
8 number_of_helios = 5
9
10 [Defocus_Trial1]
11 subfolder = V1_Gr1-2-12-4-3
12 main_exposure = 300
13 background_before = V1_01_HG_BZ1000_meanGrey.tif, 1000
14 raw_image = V1_02_Rohbild_BZ300_2500_57.tif
15 defocused = V1_031_OhneGr1_AC27_BZ300_2500_589_meanGrey.tif, V1_032_OhneGr2_AC30_BZ300_2603_meanGrey.tif, V1_033_OhneGr12_AU60_BZ300_2627_meanGrey.tif, V1_034_OhneGr4_AE50_BZ300_2640_meanGrey.tif
16 background_after = V1_035_OhneGr3_AC40_BZ300_2641_meanGrey.tif, 300
17 used_groups = 1, 2, 12, 4, 3
18 # dni correction factors order: 1st defocus, 2nd defocus, etc. (raw_image is normalized to 1.0; last defocus = background image doesn't need dni corrections)
19 dni_corr = 0.9975, 0.9970, 0.9963, 0.9970
20
21 [Defocus_Trial2]
22 subfolder = V2_Gr3-1-8-11-6
23 main_exposure = 280
24 background_before = V2_01_HG_BZ1000_meanGrey.tif, 1000
25 raw_image = V2_02_Rohbild_BZ280_2406_meanGrey.tif
26 defocused = V2_031_OhneGr3_AC40_BZ280_2416_meanGrey.tif, V2_032_OhneGr1_AC27_BZ280_2427_meanGrey.tif, V2_033_OhneGr8_AJ49_BZ280_2448_meanGrey.tif, V2_034_OhneGr11_AP44_BZ280_2465_meanGrey.tif
27 background_after = V2_035_OhneGr6_AH30_BZ280_2484_meanGrey.tif, 280
28 used_groups = 3, 1, 8, 11, 6
29 # dni correction factors order: 1st defocus, 2nd defocus, etc. (raw_image is normalized to 1.0; last defocus = background image doesn't need dni corrections)
30 dni_corr = 0.9998, 1.0005, 1.0036, 1.0031
31
32 [Defocus_Trial3]
33
34 [Defocus_Trial4]
35 subfolder = V4_Gr6-14-3-10-2
36 main_exposure = 300
37 background_before = V4_01_HG_BZ1000_meanGrey.tif, 1000
38 raw_image = V4_02_Rohbild_BZ300_2500_meanGrey.tif
39 defocused = V4_031_OhneGr6_AH30_BZ300_2501_meanGrey.tif, V4_032_OhneGr14_BC28_BZ300_2511_meanGrey.tif, V4_033_OhneGr3_AC40_BZ300_2538_meanGrey.tif, V4_034_OhneGr10_AP30_BZ300_2552_meanGrey.tif
40 background_after = V4_035_OhneGr2_AC30_BZ300_2569_meanGrey.tif, 300
41 used_groups = 6, 14, 3, 10, 2
42 # dni correction factors order: 1st defocus, 2nd defocus, etc. (raw_image is normalized to 1.0; last defocus = background image doesn't need dni corrections)
43 dni_corr = 0.9984, 0.9978, 0.9989, 1.0003
44
45 [Defocus_Trial5]
46 subfolder = V5_Gr11-3-1-8-15
47 main_exposure = 300
48 background_before = V5_01_HG_BZ1000_meanGrey.tif, 1000
49 raw_image = V5_02_Rohbild_BZ300_1900_meanGrey.tif
50 defocused = V5_031_OhneGr11_AF44_BZ300_1950_meanGrey.tif, V5_032_OhneGr3_AC40_BZ300_1936_meanGrey.tif, V5_033_OhneGr1_AC27_BZ300_1952_meanGrey.tif, V5_034_OhneGr8_AH54_BZ300_1969_meanGrey.tif
51 background_after = V5_035_OhneGr1_BC40_BZ300_1970_meanGrey.tif, 300
52 used_groups = 11, 3, 15
53 # dni correction factors order: 1st defocus, 2nd defocus, etc. (raw_image is normalized to 1.0; last defocus = background image doesn't need dni corrections)
54 dni_corr = 0.9979, 1.0014, 0.9974, 0.9997
55
56 [Defocus_Trial6]
57 subfolder = V6_Gr8-4-12-16-10
58 main_exposure = 400
59 background_before = V6_01_HG_BZ1000_meanGrey.tif, 1000
60 raw_image = V6_02_Rohbild_BZ400_1692_meanGrey.tif
61 defocused = V6_031_OhneGr8_AH54_BZ400_1693_meanGrey.tif, V6_032_OhneGr4_AC49_BZ400_1716_meanGrey.tif, V6_033_OhneGr12_AP60_BZ400_1717_meanGrey.tif, V6_034_OhneGr16_BB65_BZ400_1741_meanGrey.tif
62 background_after = V6_035_OhneGr10_AP30_BZ400_1742_meanGrey.tif, 400
63 used_groups = 8, 4, 12, 16, 10
64 # dni correction factors order: 1st defocus, 2nd defocus, etc. (raw_image is normalized to 1.0; last defocus = background image doesn't need dni corrections)
65 dni_corr = 0.9955, 0.9996, 1.0042, 0.9997
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77

```

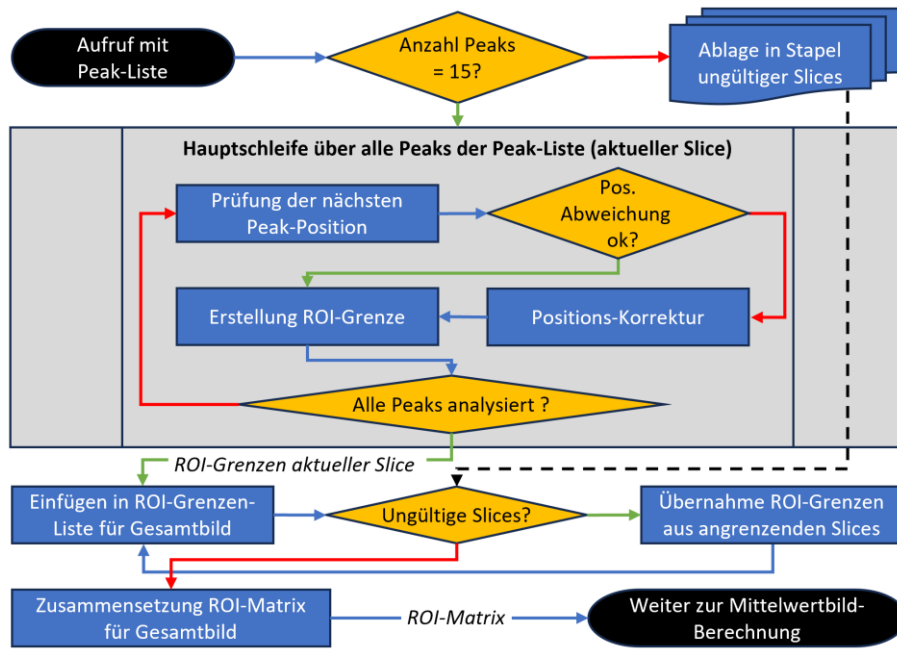
Anhang II: Konfigurationsdatei "refl_corr_cfg.ini" für das Python-Programm OFIP



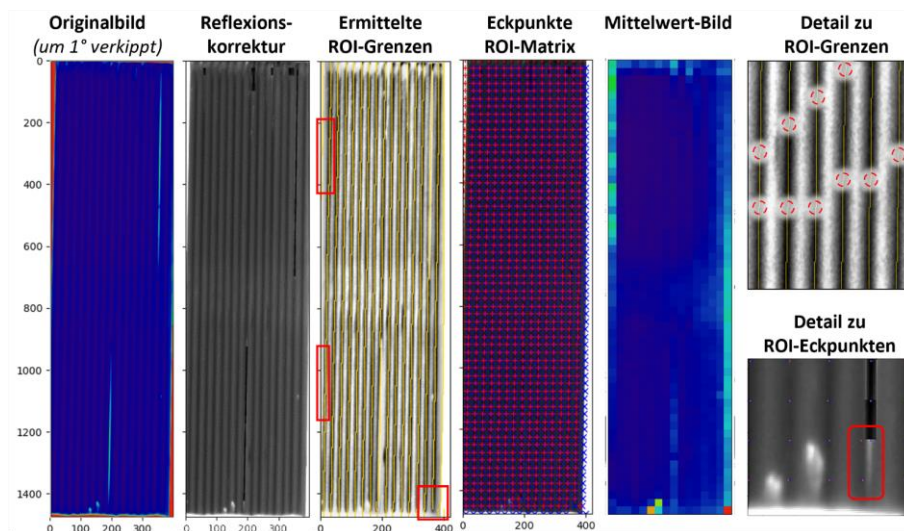
Anhang III: Verfahrensablauf der Reflexions-Erkennung und -beseitigung



Anhang IV: Reflexionskorrektur zur Bestimmung der ROI-Grenzen am entzerrten MaxiBild der Gruppe 2

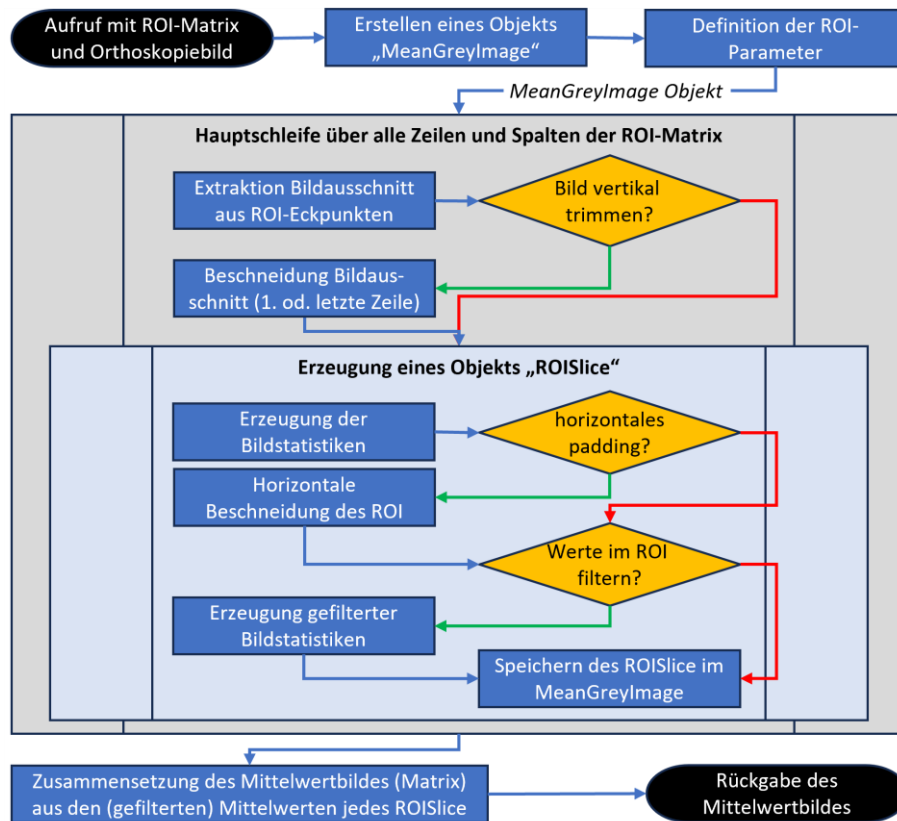


Anhang V: Verfahrensablauf der Bestimmung der ROI-Grenzen und ROI-Matrix



Anhang VI: Anwendung der dynamischen ROI-Bestimmung auf ein verkipptes Orthoskopie-Bild

Hier ist der Prozess der ROI-Bestimmung für ein *OrthoBild*, das manuell um 1° im UZS gedreht wurde, demonstriert. Die bei der Rotation entstehenden leeren Bildbereiche in den Ecken wurden dabei mit Maximalwert 4095 aufgefüllt, wie er bei einem realen Bild durch den Strahlungsschutz auch vorhanden wäre. Anhand der mittig im Bild dargestellten ROI-Grenzen und Eckpunkte der ROI-Matrix ist erkennbar, dass die ROI-Grenzen dem Verkippungswinkel der Rohre folgen und von einem horizontalen Slice zum nächsten jeweils einen leichten Versatz aufweisen, vgl. Detail oben rechts in der Abbildung, wo die Sprünge der ROI-Grenzen rot umrandet sind. Die Bestimmung des Mittelwert-Bildes und die Zuordnung von Bildbereichen zu einzelnen Rohrabschnitten und ROIs ist somit von der Schiefstellung des *OrthoBildes* nicht beeinflusst. Die Methode stößt dann an ihre Grenzen, wenn durch die Schiefstellung die Rohre so weit von ihrer nominellen Position abweichen, dass „gap“-Reflexionen nicht mehr erkannt werden und eliminiert werden, wie es im Detail unten rechts dargestellt ist. Dadurch dass die Reflexion nicht eliminiert wird, kommt es an dieser Stelle zu einem Sprung der ROI-Grenze links neben die Reflexion, sodass diese im ROI verbleibt und letztlich für den roten Pixel unten rechts im Mittelwert-Bild verantwortlich ist.



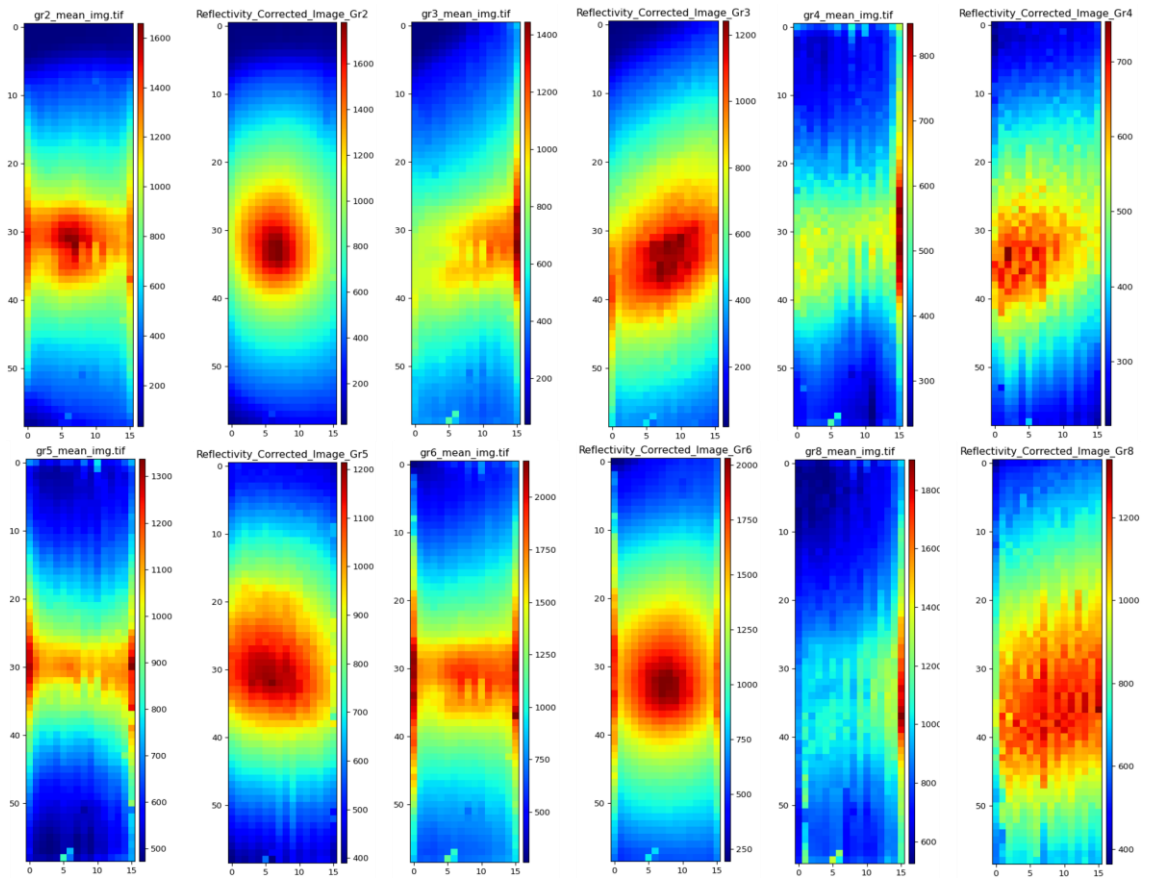
Anhang VII: Ablauf der Mittelwertbild-Berechnung

HG	Offset der Messpositionen zu MFT-Kameramast in Metern																
	Ost	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	West	
1	-	-	-	-	-	-	i-1	i-2	i-3	i-4	E	E	i-4	i-2	i-1	-	
2	-	-	i-2	i-3	i-4	E	i-4	i-3	i-2	i-1	-	-	-	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	-	-	-	i-1	i-2	i-3	i-4	E	i-4	i-3	i-2	i-1	-	-	-	-	
7	r-10	r-9	r8	r-7	r-6	r-5	r-4	r-3	r-2	r-1	-	-	-	-	-	-	
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	r-1	r-1	r-1	r-1	r-1	r-1	
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	-	-	r-1	i-1	i-2	i-4	E	i-4	i-2	i-1	r-1	r-1	-	-	
11	i-2	i-1	r-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	r-10	r-10	r-10
14	-	-	-	-	-	i-1	i-1	i-2	i-3	i-4	i-3	i-2	i-1	i-1	r-10	r-10	r-10
15	i-4	i-3	i-2	i-1	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10
16	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	r-10	-	-	-	-	-	-
Score	70	50	54	58	73	162	132	222	231	171	181	146	56	36	26	16	16

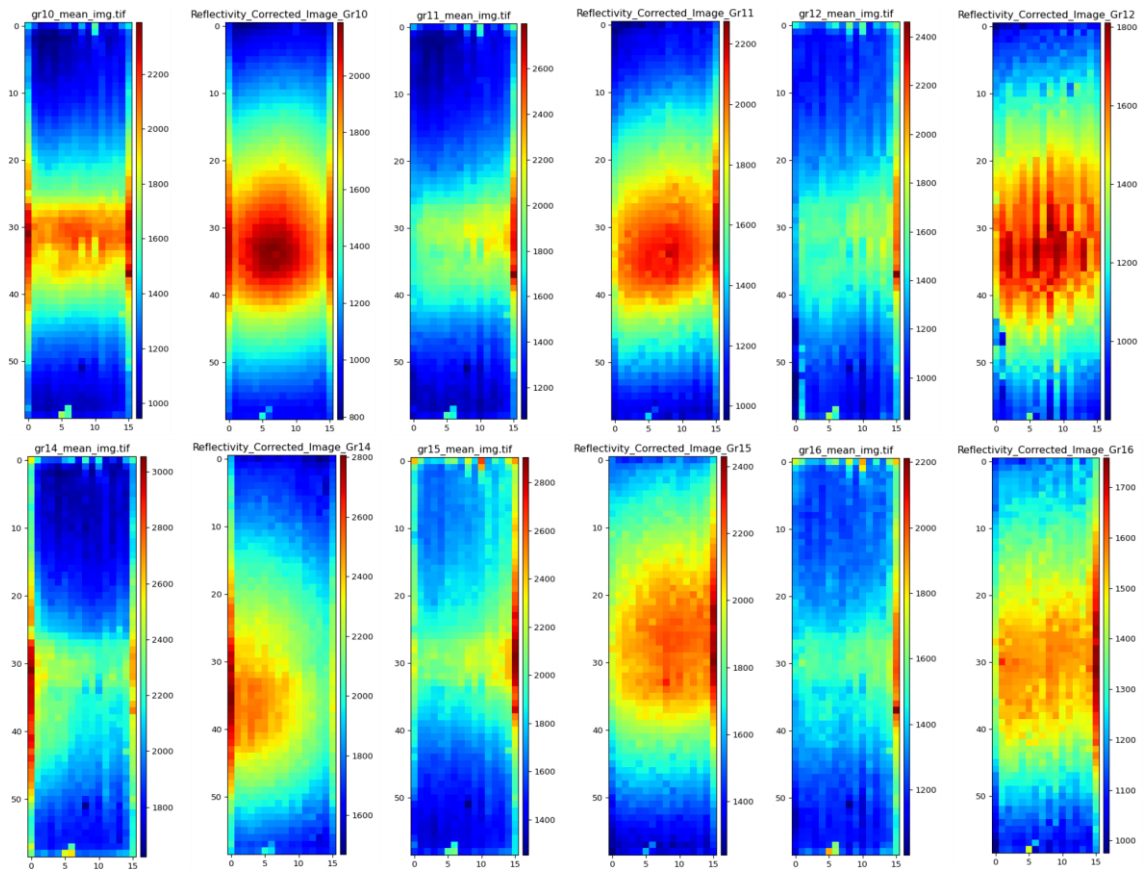
3 *Drei vorausgewählte Kamerapositionen* 2 1

Legende: - reflexionsfrei Score: 0 r-# Randreflexion (1-10) Score: 0.5-5 i-# Innere Reflexion (1-4, E) Score: 10-40, 100

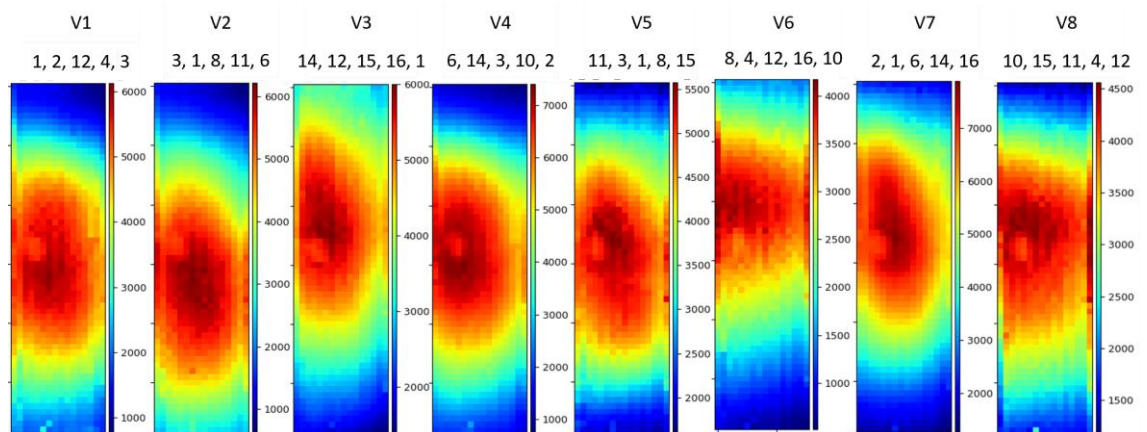
Anhang VIII: Ausgewertetes Messprotokoll zur qualitativen Vorab-Analyse potentieller Kamerapositionen



Anhang IX: Plausibilitätsprüfung der Reflexionskorrektur für die Heliostat-Gruppen 2-6 und 8



Anhang X: Plausibilitätsprüfung der Reflexionskorrektur für die Heliostat-Gruppen 10-12 und 14-16



Anhang XI: Flussdichteverteilungen aller 8 Defokussierungsversuche bei lokaler Reflexionskorrektur

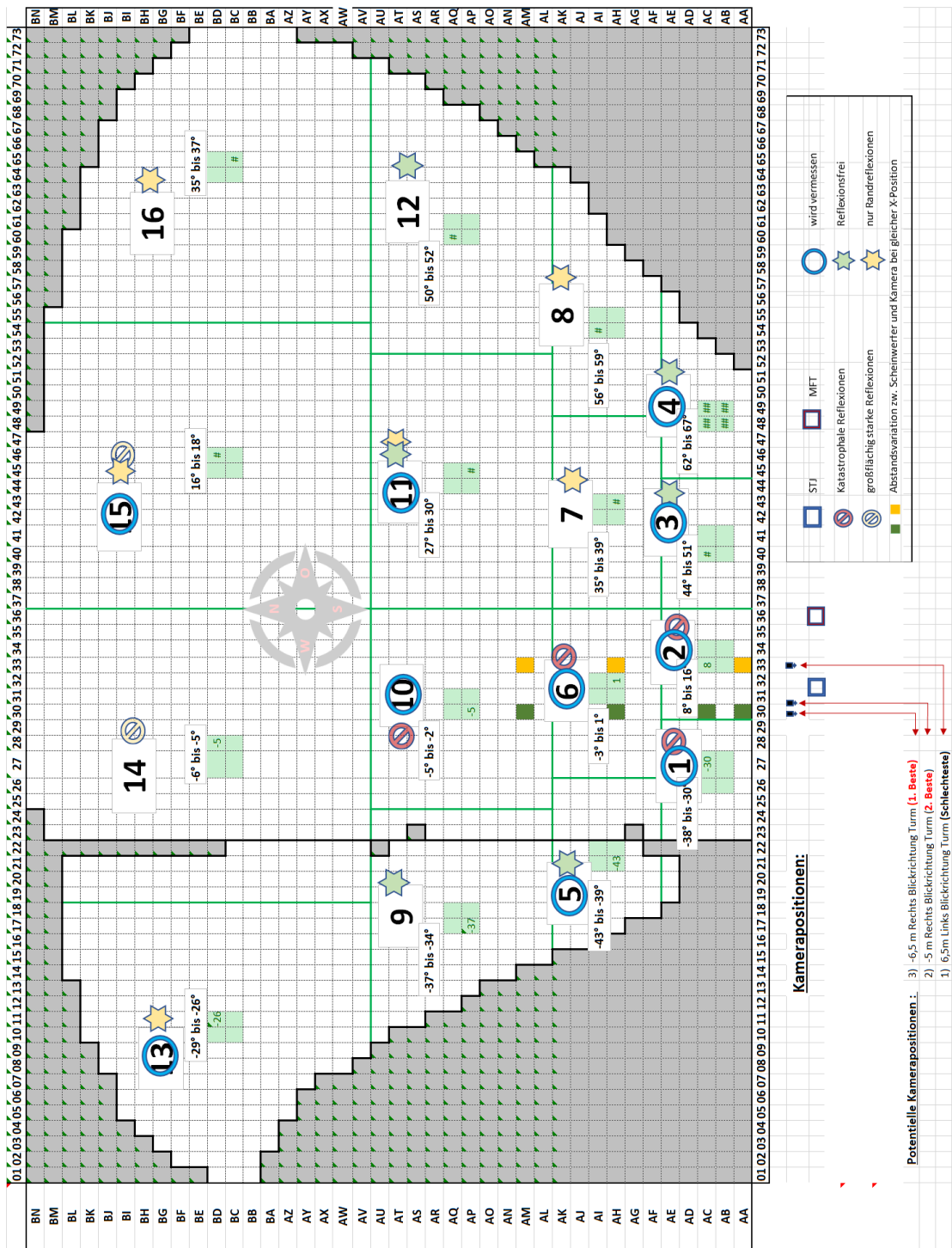
Auswertung der Verschiebung (Abstände der Rohre) anhand der Bilder									
in mm	R1 <-> R2	R2 <-> R3	R8 <-> R9	R9 <-> R10	R11 <-> R12	R13 <-> R14	R14 <-> R15	R15 <-> R16	
OBEN	1.00	1.00	1.00	3.59	4.94	1.00	6.28	1.00	
MITTE OBEN	1.00	1.12	4.49	1.00	1.00	1.00	4.94	1.00	
MITTE	2.00	3.37	4.94	1.00	1.00	1.00	3.37	2.92	
MITTE UNTEN	2.92	2.81	5.16	1.00	1.00	1.80	3.37	2.92	
UNTEN	3.37	1.00	3.37	1.00	1.00	3.37	2.02	2.69	
Vereinfachung wegen der Teilung der Rohre in der Mitte									
OBEN	1	1	1	3.59	4.94	1	6.28	1	
MITTE	2.185	3.37	5.05	1	1	1	3.37	2.92	
UNTEN	3.37	1	3.37	1	1	3.37	1	2.92	

Oberkante der Rohre															
Verkippung: Rohr 4, 9, 14: -5 mm Rohr 6, 11, 13, 15: -10 mm															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Mitte der Rohre															
(fixiert, daher alle gleich tief)															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Unterkante der Rohre															
Verkippung: Rohr 6, 14 : -5 mm Rohr 2, 4, 8, 10, 12: -10 mm															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Anhang XII: Ergebnisse der Analyse der Rohrverschiebungen anhand eines OrthoBildes



Anhang XIII : Heliostatplan für die Suche nach einer optimalen Kameraposition