



Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences



Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Faculty of Mechanical and Process Engineering



Diese Arbeit wurde vorgelegt am
DLR - Institut für Solarforschung Jülich, Düsseldorf University of Applied Sciences

Optimierung der Scan-Methode zur Flussdichtemes- sung an Rohrreceivern

Optimization of the Scanning-Method for Flux Density Measure-
ment on Tube Receivers

Bachelorarbeit

vorgelegt von
Lukas Jäger
Matrikelnummer: 818054

Erstprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Franziska Schaub
Zweitprüfer: Dr. rer. nat. Christian Raeder

Betreuender wiss. Mitarbeiter: Dr. rer. nat. Christian Raeder

Düsseldorf, den 13.02.2023

Danksagung

Zunächst möchte ich meinem Betreuer Herrn Dr. rer. nat. Christian Raeder danken für seine fachliche Beratung, seinen hilfreichen Anregungen und konstruktiven Kritiken.

Meinen Dank gilt auch Frau Prof. Dr.-Ing. Franziska Schaub für die Betreuung und Beratung durch die Hochschule Düsseldorf.

Ich danke dem Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Felix Göhring sowie seinem gesamten Team für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Ich danke Herrn Dipl. Ing. (FH) Volker Rasing für seine fachliche Beratung, Unterstützung bei Messungen und seine Denkanstöße. Danke an Herrn Dipl.-Ing. (FH) Oliver Kaufhold und Frau M. Sc. Sophie Kappertz welche mir die reibungsfreie Umsetzung meiner Messungen ermöglichten.

Mein Dank gilt Dipl.-Ing. Matthias Offergeld für seine fachlichen Anregungen im Grundlagen- und Theorieteil, welche mich vorangebracht haben.

Gleichfalls gebührt mein Dank dem Vorstand der Weesbach-Stiftung, Dr. Ralf-Peter Simon, Prof. Dr. Brigitte Grass und Dr. Christian Schmidt, für meine individuelle Förderung im Rahmen des Deutschlandstipendium seit nunmehr drei Jahren.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen	3
2.1.1 Strahlungsgrößen	3
2.1.2 Reale Körper	4
2.1.3 Schwarzkörper	5
2.1.4 Solarstrahlung	5
2.1.5 Air-Mass-Faktor	6
2.2 Konzentrierende Solarkraftwerke (CSP)	7
2.2.1 Allgemeine Funktionsweise	7
2.2.2 Solarkraftwerk Jülich	8
2.3 Kamera-Sensorsysteme	10
2.3.1 Optische Kameratechnik	10
2.3.2 CCD-Sensor	10
2.3.3 CMOS-Sensor	11
2.3.4 Weitere Kamera-Eigenschaften und Korrekturen	12
2.4 Radiometer	14
3 Stand von Wissenschaft und Technik	15
3.1 Flussdichtemessung - Allgemein	15
3.2 Flussdichtemessung mittels Radiometer	15
3.2.1 Radiometer Moving-Bar	16
3.2.2 Radiometer – Ortsfeste Installation außerhalb des Receivers	16
3.3 Flussdichtemessung mit optischem Kamerasystem	17
3.3.1 Lambert'sche Moving-Bar – Bewegtes Target	17
3.3.2 Fokusverschiebung mittels ortsfestem Target	18
3.4 Flussdichtemessung mittels Scan-Methode	19
4 Versuche am HPMS-II-Receiver	22
4.1 Ermittlung der Reflexionseigenschaften	24
4.1.1 Durchführung – Korrektur der Reflexionseigenschaft	25
4.1.2 Ergebnis – Korrektur der Reflexionseigenschaft	29
4.1.3 Diskussion – Korrektur der Reflexionseigenschaft	33
4.2 Kalibrierung mittels Fokusverschiebung	36

4.2.1 Durchführung – Fokusverschiebung.....	36
4.2.2 Ergebnis – Fokusverschiebung	40
4.2.3 Diskussion – Fokusverschiebung	43
4.3 Rohbildaufnahme und Richtungszusammensetzung der Flusssdichte durch Defokussierung	44
4.3.1 Durchführung – Rohbild und Defokussierung.....	44
4.3.2 Ergebnis – Rohbild und Defokussierung	46
4.3.3 Diskussion – Rohbild und Defokussierung	50
5 Flusssdichteverteilung am HPMS-II-Receiver.....	51
5.1 Flusssdichteverteilung	53
5.1.1 Heliostatengruppe 10, 11 und 12.....	53
5.1.2 Heliostatengruppe 4, 8 und 12.....	54
5.1.3 Heliostatengruppe 6, 11 und 8.....	55
5.1.4 Heliostatengruppe 6, 10 und 4.....	55
5.2 Diskussion – Flusssdichteverteilung.....	57
6 Verbesserung von Hard- und Software	58
6.1 Hardwareanpassung - Reflexionskorrektur.....	58
6.1.1 Durchführung – Hardwareanpassung	58
6.1.2 Ergebnisse – Hardwareanpassung – Belichtungsvariation.....	60
6.1.3 Ergebnisse – Hardwareanpassung – Positionsvariation	63
6.1.4 Diskussion – Hardwareanpassung.....	64
6.2 Softwareanpassungen – Reflexionskorrektur	65
6.2.1 Ergebnisse – Softwareanpassung.....	66
6.2.2 Diskussion – Softwareanpassung	69
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	70
Literaturverzeichnis	72

Nomenklatur

Lateinische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
AM	Air-Mass-Faktor	—
bf	Belichtungsfaktor	—
cp	Spezifische Wärmekapazität	$J/(kg * K)$
E	Bestrahlungsstärke / Flussdichte	W/m^2
f	unkorrigiertes Maximalbild	—
g	Rohbild Grauwertbild	—
h	Enthalpie	J/kg
k	Kameraspezifischer Faktor	—
M	Spezifische Ausstrahlung	W/m^2
n	Anzahl	—
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
P	Leistung	W
$\dot{Q}$	Strahlungsenergie	J
t	Zeit	s
T	Temperatur	K
x	Flussdichteanteil	—

Griechische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Absorptionsgrad	—
β	Zenitwinkel	$^\circ$
η	Wirkungsgrad	—
λ	Wellenlänge	m
ρ	Reflexionsgrad	—
σ	Stefan-Bolzmann-Konstante	$W/(m^2 * K^4)$
τ	Transmissionsgrad	—
ϕ	Strahlungsleistung	W

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ABG	Anti-Blooming-Gates
AM	Air-Mass-Faktor
AD-Wandler	Analog-Digital-Wandler
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CSP	Concentrated Solar Power
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNI	Direct Normal Irradiance (Direkt-Normalstrahlung)
FPS	Frames per Second (Bilder die Sekunde)
GUI	Graphical User Interface
HPMS-II	High Performance Molten Salt Tower Receiver System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ROI	Region of Interest (Relevante Bereiche)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beitrag zum Treibhausgaseffekt durch Kohlendioxid und langlebige Treibhausgase 2020 [2].....	1
2.1	a) Reflexion (ρ) der einfallenden Solarstrahlung; b) Absorption (α) und daraus resultierenden Erwärmung; c) Transmission (τ) durch das Objekt	4
2.2	Darstellung der elektromagnetischen Spektren bei verschiedenen Temperaturen [7]	6
2.3	Darstellung des Weges der Lichtphotonen nach Eintritt in die Erdatmosphäre. Direkter Vergleich der Air-Mass Faktoren und der dazugehörigen Zenitwinkeln	6
2.4	Solarkraftwerk mit Heliostaten - Solarturm	7
2.5	Heliostatenfeld des Instituts für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) – Quelle: Ulrich Kieselbach [24]	8
2.6	Die vom Institut für Solarforschung genutzten Solartürme. Links: Hauptsolarturm. Rechts: Multifokusturm inklusive HPMS-II-Receiver im unteren Bereich	9
2.7	Detaillierte Darstellung eines CCD-Sensors.....	10
2.8	Detaillierte Darstellung eines CMOS-Sensors.....	11
2.9	Beispielhafter Ausschnitt des Totpixelbilds bei einer Belichtungszeit von 40.000.000 μ s	12
2.10	Verhalten des Lichtes bei Aufnahme in einer Linse	12
2.11	Shading-Korrektur in Falschfarben (oben) und in Grauwerten (unten).....	13
2.12	Aufbau eines Radiometers des Typs Gardon [25]	14
3.1	Ausführungsarten der Flussdichtemessung mittels Radiometer; a) Moving-Bar mit eingebauten Radiometern ohne aktive Wasserkühlung; b) Ortsfeste Radiometer neben der Receiverfläche mit aktiver Wasserkühlung; c) Ortsfeste Radiometer auf einer separaten Fläche mit aktiver Wasserkühlung	16
3.2	Darstellung der Moving-Bar und mögliche Ausführungen.....	17
3.3	Flussdichtemessung mittels Fokusverschiebung auf ein ortsfestes Target; Erstellte Bildausschnitte und das zusammengesetzte Flussdichtebild	18
3.4	Darstellung des mäanderförmigen Scans des Lichtkegels	20
4.1	HPMS-II-Receiver in Nahdarstellung.....	22
4.2	a) Maximalbild Heliostatengruppe 6 aufgenommen mit einer CCD-Kamera. b) Spezifisches Ergebnisbild der Heliostatengruppe 10 mit Streifenbildung [11]	23
4.3	Heliostatenfeld in Jülich und Einteilung der Heliostatengruppen [9]	24
4.4	a) Bildaufnahme der Heliostatengruppe 8 während der Scanmessung, b) Maximalbild der Heliostatengruppe 8; c) Entzerrtes Maximalbild der Heliostatengruppe 8, nur auf den relevanten Receiverbereich begrenzt; d) Mittelwertbild in Grauwerten e) Mittelwertbild in Farben	26
4.5	Abbildung a) entspricht dem Maximalbild, welches unkorrigiert ist. Ein ungewollter Schattenwurf ist am linken Bildrand zu erkennen.; Abbildung b) zeigt den vollständig entzerrten Receiver	27
4.6	a) Allgemeine Übersicht über die Aussparungen innerhalb des entzerrten Maximalbildes; b) Detaillierte Darstellung der ausgesparten Bereiche; c) Darstellung des Verfahrens zur Bestimmung des Mittelwertbilds (Dargestellte Grauwerte beispielhaft)	28
4.7	Darstellung der Maximalbilder der Heliostatengruppen 6, 8 und 11. Nur eine Darstellung pro Kriterium, soweit sie innerhalb eines Kriteriums ähnlich sind.....	29

4.8	Referenztargets bei unterschiedlichen Scans der Gruppen 6, 8 und 11	30
4.9	Darstellung der Mittelwertbilder der in der Nachtmessung aufgenommenen Heliostatengruppen 4, 6, 8, 10, 11, 12	30
4.10	Darstellung der spezifischen Ergebnisbilder der in der Nachtmessung aufgenommenen Heliostatengruppen 6, 8, 11	31
4.11	Reflexionsverhalten bei Scan-Aufnahme der Heliostatengruppe 6; Problematische (diffuse) Reflexion des Strahlungsschutzes	33
4.12	Reflexionsverhalten bei Scan-Aufnahme der Heliostatengruppe 11; Unproblematische Reflexion von Strahlungsschutz.....	34
4.13	Kategorisierung des Heliostatenfeldes bei Positionierung der Kamera vor dem HPMS-II Receiver	34
4.14	Durchführungsplan für die Erstellung der Fokusverschiebung am HPMS-II Receivers	36
4.15	Links: Mittige Positionierung des Fokus auf dem Receiver während der Fokus- verschiebung Mitte: Entzerrung der Aufnahme. Rechts: Überführung in ein Mittelwertbild	37
4.16	Raster für die Fokusverschiebung	38
4.17	vereinfachter Ablauf der Fokusverschiebung am HPMS-II Receiver	39
4.18	DNI-Intensitätsverlauf während der Fokusverschiebung; Darstellung der einzelnen Startpunkte der Messaufnahmen.	40
4.19	Darstellung des linearen Zusammenhangs von Flussdichte und Grauwert	42
4.20	Flussdichteverlauf Radiometer 1	43
4.21	Strahlungsanteile bei realer Bestrahlung einzelner Heliostatengruppen auf Mittel- wertbilder bezogen	46
4.22	Differenzbilder der Heliostatengruppen 10, 11 und 12; Diese sind in Graustufen dargestellt und auf einen maximalen Grauwert von 2000 skaliert.....	46
4.23	Differenzbilder der Heliostatengruppen 4, 8 und 12 bei einer Skalierung von 2000 und Strahlungsanteile bei realer Bestrahlung einzelner Heliostatengruppen auf Mittelwertbilder bezogen.....	47
4.24	Differenzbilder der Heliostatengruppen 6, 11 und 8 bei einer Skalierung von 3000 und Strahlungsanteile bei realer Bestrahlung einzelner Heliostatengruppen auf Mittelwertbilder bezogen.....	48
4.25	Differenzbilder der Heliostatengruppen 6, 10 und 4 bei einer Skalierung von 4096 und Strahlungsanteile bei realer Bestrahlung einzelner Heliostatengruppen auf Mittelwertbilder bezogen.....	49
4.26	Fehler der Fokusverschiebung	50
5.1	Links: originale Darstellung der spezifischen Flussdichteverteilung der Heliostaten- gruppe 10 mit Markern. Rechts: korrigiertes, verschobenes spezifische Flussdichte- verteilung der Heliostatengruppe 10	51
5.2	Die händisch ausgewählten Receiver-Ecken im Vergleich zueinander. Links: Nachtmessung. Rechts: Fokusverschiebung.....	52
5.3	spezifische Flussdichteverteilungsbilder der Heliostatengruppen 10, 11 und 12 des ersten Rohbildes.....	53
5.4	Flussdichteverteilung des Rohbildes 1 der Heliostatengruppen 10, 11 und 12 als Mittelwertbild und als interpolierte Darstellung.....	53

5.5	spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppen 4, 8 und 12 und der tatsächlichen Flussdichteverteilung und deren Interpolation.....	54
5.6	spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppen 6, 11 und 8 und der tatsächlichen Flussdichteverteilung und deren Interpolation.....	55
5.7	spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppen 6, 10 und 4 und der tatsächlichen Flussdichteverteilung und deren Interpolation.....	55
5.8	Darstellung der Abschabung des Receivers. a) Maximalbild der Heliostatengruppe 11. b) spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppe 11 der Messung 3; c) Flussdichteverteilung der Messung 3.....	57
6.2	a) stark ausgeprägte Überbelichtung und Blooming-Effekt des Maximalbilds der Heliostatengruppe 6, b) normales Maximalbild der Heliostatengruppe 11.....	58
6.1	Darstellung der Kameraposition-Variation in der Zonierung der überbelichteten Bereiche.....	59
6.3	Übersicht der Maximalbilder bei 4000 μ s, skaliert 4000 μ s und 15000 μ s.....	60
6.4	Unkorrigierte Mittelwertbilder der fünf Scans 4000 μ s; 6500 μ s; 9000 μ s; 12500 μ s; 1500 μ s.....	61
6.5	Korrigierte Mittelwertbilder der fünf Scans 4000 μ s; 6500 μ s; 9000 μ s; 12500 μ s; 15000 μ s; zusätzlich werden die Grauwerte skaliert.....	61
6.6	Spezifische Ergebnisbilder der unterschiedlichen Belichtungszeiten.....	62
6.7	Nachweis des Blooming-Effekts durch Differenzbildung der Bestrahlungsbilder bei 15 ms und 4 ms.....	62
6.8	Maximalbilder bei Positionsvariation der Heliostatengruppe 6 um 3,6m und 7,3m.....	63
6.9	Spezifische Ergebnisbilder bei Positionsvariation der Heliostatengruppe 6 um 0m, 3,6m und 7,3m.....	63
6.10	Angepasste ROI-Ermittlung und Algorithmus zur Bestimmung der relevanten Bereiche in jedem Segment. a) Darstellung des entzerrten Maximalbildes der Heliostatengruppe 10. b) Teilausschnitt der ROI-Bereiche. c) Darstellung aller Pixel innerhalb eines Segmentes. d) Darstellung der ausgelassenen Pixel, die außerhalb der Bedingungsgrenzen liegen.	65
6.11	spezifische Ergebnisbilder der angepassten Maximal- und Rohbilder. a) Grenzwert 4096. b) Grenzwert 4090. c) Grenzwert 3500. d) Grenzwert 2430. Heliostatengruppe 10.....	66
6.12	Spezifisches Ergebnisbild bei oberem Grenzwert von 2430 und unteren Grenzwert von 1450. Aussparungsanteil 22,3%. Heliostatengruppe 10.....	66
6.13	Spezifisches Ergebnisbild der Heliostatengruppe 6 im Vergleich der alten und neuen ROI-bildung.....	67
6.14	Flussdichteverteilung der Heliostatgruppe 10 mit alter ROI und neuer ROI-Bestimmung.	68

1 Einleitung und Zielsetzung

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen unserer jetzigen Zeit. Die durch den Anstieg und die Emission von Treibhausgasen verursachten Veränderungen des Klimas haben massive Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft. Dies zeigt sich beispielsweise in Wetterextremen, dem Anstieg des Meeresspiegels, einem noch nie da gewesenen Artensterben und zunehmenden Ernteaussfällen in der Landwirtschaft. [1]

Treibhausgasemissionen sind ein bestimmender Faktor, der zum Klimawandel beiträgt. Nach Angaben des Umweltbundesamtes (UBA) war CO_2 im Jahr 2020 (Abbildung 1.1) für rund 66% der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich. Weitere belastende Treibhausgase, die in Deutschland emittiert werden, sind Methan (16%), Stickoxide (7%) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (8%). [2]

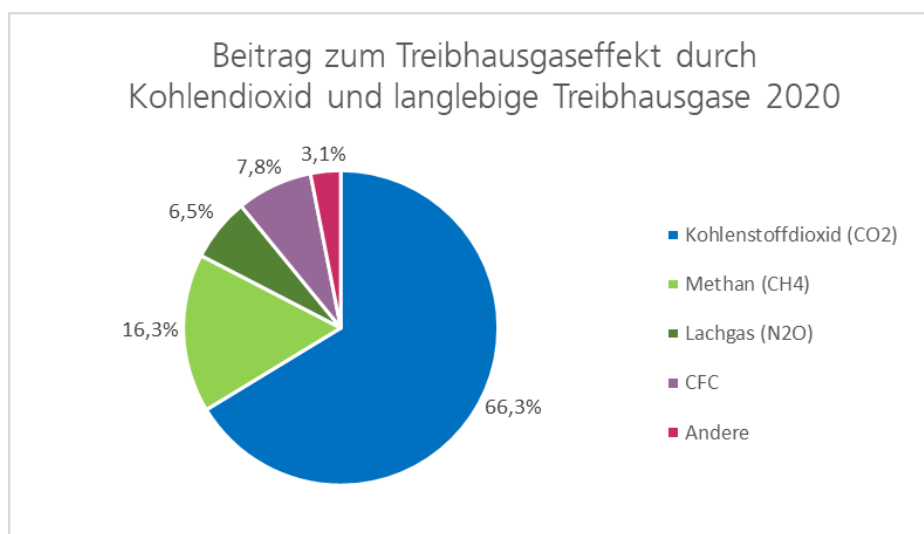


Abbildung 1.1 - Beitrag zum Treibhausgaseffekt durch Kohlendioxid und langlebige Treibhausgase 2020 [2]

Es wird erwartet, dass die weltweiten CO_2 -Emissionen in Zukunft weiter zunehmen werden, insbesondere in den Schwellen- und Entwicklungsländern. Nach Schätzungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) werden die CO_2 -Emissionen bis 2050 um etwa 50% gegenüber dem Stand von 2010 ansteigen, wenn keine nennenswerten Maßnahmen zur Emissionsenkung ergriffen werden. [3]

Dem Klimawandel wirksam entgegenzuwirken bedingt eine Verringerung der Treibhausgasemissionen. Ein wichtiger Ansatz hierfür ist die Nutzung erneuerbarer Energien wie Sonnenenergie, Windenergie, Wasserkraft und Biomasse.

Erneuerbare Energien haben in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und können bereits preislich mit fossilen Energieträgern konkurrieren. So betragen die Stromgestehungskosten für eine Megawattstunde (MWh) aus Photovoltaik im Jahr 2020 etwa 60€, während die Stromerzeugung aus Braunkohle etwa $130 \frac{\text{€}}{MWh}$ und die Erzeugung aus Gas und Dampf etwa $100 \frac{\text{€}}{MWh}$ kostet. [3]

Kohle und Gas bieten den Vorteil, dass diese Energieträger vor allem nachts und bei Windflaute konstant und planbar zur Verfügung stehen. Das europäische Stromnetz wird mit einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Kraftwerke, die diese Frequenz vorgeben können, sind in der Regel fossile

Brennstoff- oder Kernkraftwerke. Diese Kraftwerke verfügen über Generatoren, welche die erforderliche Leistung und Frequenz liefern, um das Netz stabil zu halten. Windkraftanlagen sind aufgrund ihrer Abhängigkeit von Wetterbedingungen und ihrer verhältnismäßig geringeren Leistung in der Regel noch nicht in der Lage, die Frequenz des Netzes eigenständig zu stabilisieren oder vorzugeben. [4]

In diesem Zusammenhang sind CSP-Kraftwerke (Concentrating Solar Power) zu erwähnen, welche potenziell schwarzstartfähig sind. Solare Kraftwerke wandeln die Sonnenenergie nicht direkt in Strom um, sondern nutzen diese zunächst zur Erzeugung von Wärmeenergie. Ein Receiver, auf welchen die Sonnenstrahlung durch eine Vielzahl von Spiegeln gebündelt wird, absorbiert die thermische Energie. Die so gewonnene Wärmeenergie ist für eine spätere Nutzung zwischenspeicherfähig. Beispielhaft kann durch die tagsüber erzeugte Wärme nachts durch den Antrieb einer Dampfturbine die generatorische Stromerzeugung erfolgen. Dies ermöglicht nicht nur eine Netzstabilisierung, sondern auch eine bessere Vorhersagbarkeit der Stromerzeugung der erneuerbaren Energien. [5]

Für die Beurteilung des Gesamtwirkungsgrades von CSP-Kraftwerken müssen Wirkungsgrad der Spiegel, auch Heliostaten genannt werden, und des Receivers separat bestimmt werden. Für den Wirkungsgrad des Receivers ist die flächenbezogene Strahlungsleistung, auch Strahlungsflussdichte bezeichnet, entscheidend. Ist diese bekannt, können Aussagen über den Wirkungsgrad der Energieumwandlung gemacht werden.

Zur optischen Bestimmung der Strahlungsflussdichte gibt es verschiedene Ansätze, die im Hinblick auf einen großindustriellen Einsatz noch in der Entwicklung sind. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Bestimmung und Optimierung der optischen Flussdichtebestimmung einer röhrenförmigen Receiver-Struktur. [6]

Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung eines optischen Messverfahrens, der sogenannten „Scan-Methode“ oder auch "Scan-Verfahren", zur Bestimmung der Flussdichteverteilung auf einem Receiver eines CSP-Kraftwerks mit dem Ziel, diese zu optimieren. Hierbei wird der HPMS-II Receiver des Institutes für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Jülich genutzt.

Durch die Bestimmung der Flussdichteverteilung kann die Effizienz des Receivers und des Heliostatenfeldes getrennt voneinander bestimmt werden. Die vom DLR patentierte Scan-Methode bietet darüber hinaus den Vorteil der Überwachung und Optimierung des Anlagenbetriebs sowie der Positionierung des Heliostatenfokus.

Die Methode basiert auf der Bestimmung der Reflexionseigenschaften, aus denen auf die Flussdichteverteilung geschlossen werden kann. In der Vergangenheit wurde das Verfahren bereits erfolgreich am DLR-Hauptreceiver von Gorzalka [7] sowie am Tube-Mon Testreceiver des DLR durch Meyer [8], Zöller [9] und Glinka [10] angewandt. Matthies [11] hat das Verfahren erstmals am röhrenförmigen HPMS-II Salz-Receiver durchgeführt.

Das Ziel der Arbeit ist es, die Scan-Methode durchzuführen, um die bei Matthies auftretenden Fehler nachzuvollziehen. Zusätzlich sollen Optimierungen hinsichtlich Hardware und Software durchgeführt werden, um die in Matthies Thesis ungewollten Messergebnisse zu reduzieren und die Effizienz des Verfahrens zu steigern.

2 Grundlagen

Dieser Abschnitt soll die notwendigen Grundlagen für das Verständnis dieser Arbeit schaffen. Neben der Definition allgemeiner Strahlungsgrößen, die für die Berechnung von Strahlungsflussdichten notwendig sind, wird auf den Einfluss der Sonne und deren Wirkung auf die Messungen eingegangen. Anschließend werden die grundlegenden Funktionen und Unterschiede zwischen CCD- und CMOS-Kamera-Sensoren erläutert. Weiterhin wird das Funktionsprinzip von Radiometern beschrieben, welche für die direkte Messung der Flussdichte eingesetzt werden. Abschließend wird die Technologie der konzentrierenden Solarkraftwerke (CSP) und das Solarkraftwerk in Jülich vorgestellt. Die in dieser Arbeit genutzte Scan-Methode wird separat in Abschnitt „3.4 Flussdichtemessung mittels Scan-Methode“ behandelt.

2.1 Strahlungsphysik

CSP-Kraftwerke nutzen die von der Sonne ausgesandten elektromagnetischen Wellen, durch deren Absorption die Umwandlung in Wärme erfolgt. Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Prozesse ist eine Erläuterung der Grundlagen der Strahlungsphysik notwendig. Im Folgenden werden alle relevanten physikalischen Größen dargestellt. Auf Pedrotti et al. [12], Baehr et al. [13] und den VDI -Wärmeatlas [14] wird in dieser Arbeit und in den folgenden Abschnitten Bezug genommen.

2.1.1 Strahlungsgrößen

Die Strahlungsleistung (Φ) beschreibt die Änderung der einfallenden Energie (Q), die von elektromagnetischen Wellen im Differenzial über die betrachtete Zeit (t) transportiert wird. Die Strahlungsenergie besteht aus der Gesamtheit aller Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums der Sonne (Formel F. 2.1).

$\Phi = \frac{dQ}{dt} \text{ [W]}$	F. 2.1
------------------------------------	--------

Wird von einer Strahlungsquelle aus betrachtet, kann die spezifische Ausstrahlung (M) bestimmt werden. Hierzu wird das Differential der ausgestrahlten Leistung (Φ_{aus}) gemäß Formel F. 2.2 über dessen Oberfläche (A_1) gebildet.

$M = \frac{d\Phi_{\text{aus}}}{dA_1} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$	F. 2.2
--	--------

Die Formel F. 2.3 zeigt, dass das Differenzial aus der auftreffenden Strahlungsleistung (Φ_{ein}) und einer definierten betrachteten Fläche (A_2) gebildet werden kann. Die Änderung entspricht der Bestrahlungsstärke (E). Die Bestrahlungsstärke wird im Folgenden als Strahlungsflussdichte bezeichnet und ist im Zuge dieser Arbeit von Wichtigkeit.

$E = \frac{d\Phi_{\text{ein}}}{dA_2} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$	F. 2.3
--	--------

2.1.2 Reale Körper

Jede Strahlung, welche auf einen realen Körper trifft, wird reflektiert, absorbiert und transmittiert (*Abbildung 2.1*). Nach Formel F. 2.4 wird beispielsweise der Reflexionsgrad durch das Verhältnis von Reflexionsleistung zu Einstrahlungsleistung ausgedrückt. Gleiches gilt für Absorption und Transmission.

$\rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi_{\text{ein}}}$	$\alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi_{\text{ein}}}$	$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi_{\text{ein}}}$	F. 2.4
--	--	--	--------

Die Summe aus Reflexion, Transmission und Absorption entspricht der Gesamtbestrahlung und ist anteilig daher nach Formel F. 2.5 gleich eins.

$1 = \rho + \alpha + \tau [-]$	F. 2.5
--------------------------------	--------

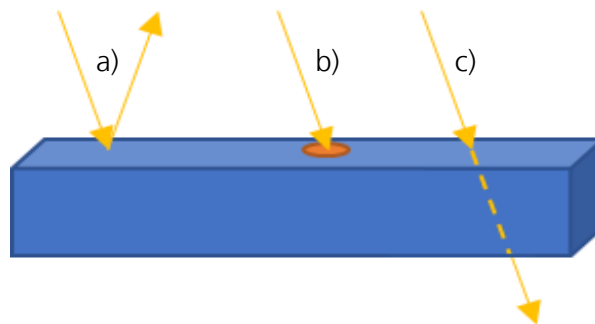


Abbildung 2.1 - a) Reflexion (ρ) der einfallenden Solarstrahlung; b) Absorption (α) und daraus resultierenden Erwärmung; c) Transmission (τ) durch das Objekt

Die Reflexionen eines Körpers sind nicht gleichmäßig und werden daher in zwei Grenzfälle unterteilt: die spiegelnde und die diffuse Reflexion. Im Falle spiegelnder Reflexion entspricht der Einfallswinkel dem Reflexionswinkel. Bei idealer diffuser Reflexion ist die Einstrahlungsrichtung unabhängig. Zudem ist keine eindeutige Reflexionsrichtung zu erkennen, die Reflexion erfolgt gleichmäßig in alle Richtungen. Auf dieses Verhalten, auch als Lambert'sches Gesetz bekannt, wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

Ein weiterer Teil der einfallende Strahlung wird bei der Absorption in Wärme umgewandelt.

Der Transmissionsgrad gibt an, welchen Anteil der Strahlungsenergie ein Material oder eine Struktur durchlässt, abhängig von der Wellenlänge des Lichts, der Materialstärke und den optischen Eigenschaften.

2.1.3 Schwarzkörper

Die Sonne wird als schwarzer Körper angesehen. Das Modell eines schwarzen Körpers beschreibt eine idealisierte Darstellung einer Wärmestrahlungsquelle. Neben der vollständigen Absorption des einfallenden elektromagnetischen Strahlungsbereichs besitzt der schwarze Körper weder Reflexion noch Transmission nach Formel F. 2.5.

Liegt die Temperatur des schwarzen Körpers über dem absoluten Nullpunkt 0 K (-273,15 °C), sendet er elektromagnetische Strahlung aus. Nach Lambert'schem Gesetz wird diese Strahlung in alle Richtungen gleichmäßig emittiert. Frequenz und Intensität sind ausschließlich von der Temperatur des Körpers abhängig. Die abgestrahlte Leistung (P_{Bolz}) kann mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (F. 2.6) berechnet werden. Dazu wird neben der vierten Potenz der Temperatur (T) sowohl die Fläche (A) als auch die Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,6034 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$) verwendet.

$P_{\text{Bolz}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \text{ [W]}$	F. 2.6
--	--------

2.1.4 Solarstrahlung

Unter Betrachtung der Sonne als schwarzen Körper kann mithilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes eine Oberflächentemperatur von ca. 5776 K berechnet werden. Zur Berechnung muss die Solarstrahlung außerhalb der Atmosphäre, der Durchmesser und die Entfernung der Sonne zur Erde bekannt sein. Die Temperatur wird durch ständige Kernfusion von Wasserstoffatomen zu Heliumatom im Inneren der Sonne erzeugt. Die Reaktionen senden elektromagnetische Wellen aus.

Die durchschnittliche Bestrahlungsstärke, die außerhalb der Erdatmosphäre gemessen wird, wird als Solarkonstante (E_0) ausgedrückt und kann der Formel F. 2.7 entnommen werden.

$E_0 = 1367 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \pm 1\%$	F. 2.7
---	--------

Erreicht die von der Sonne ausgesendete Strahlung die Erdatmosphäre, wird sie durch Absorption und Streuung an Gasmolekülen gemindert (Rayleigh- Streuung). Zusätzlich kommt es zu weiteren Streuungen durch Staub-, Wasser- und Nebeltröpfchen in der Atmosphäre. Diese Streuungsart wird auch Mie-Streuung genannt. Die reduzierte Solarstrahlung auf die Erdoberfläche wird in direkte Normalstrahlung (DNI) und Diffusstrahlung (E_{diff}) aufgeteilt. Die resultierende Globalstrahlung (E_{glob}) entspricht der Summe aus der nach Formel F. 2.8 berechneten DNI-Korrektur des Zenitwinkels (β) und der diffusen Strahlung.

$E_{\text{glob}} = \text{DNI} \cdot \cos(\beta) + E_{\text{diff}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$	F. 2.8
---	--------

Die spektrale Strahlung, sprich die Verteilung der Strahlungsintensität über dem gesamten Wellenlängenbereich eines schwarzen Körpers, ist von seiner Temperatur abhängig (Abbildung 2.2). Körper mit höherer Temperatur emittieren mehr elektromagnetische Strahlung, dabei werden die Maxima der dargestellten Spektren durch das Wiensche Verschiebungsgesetz beschrieben.

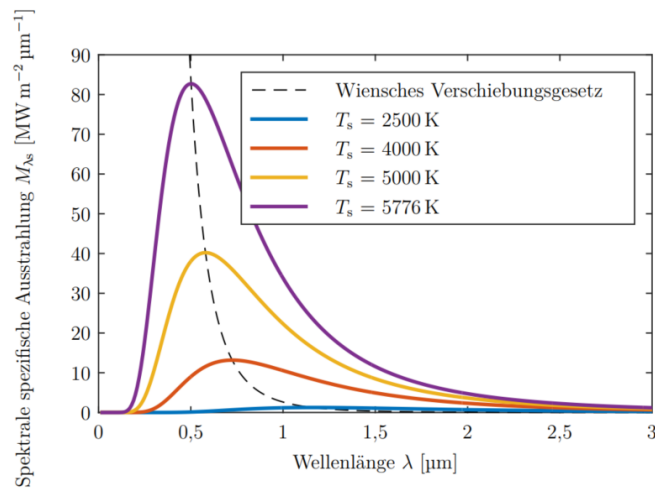


Abbildung 2.2– Darstellung der elektromagnetischen Spektren bei verschiedenen Temperaturen [7]

2.1.5 Air-Mass-Faktor

Der Air-Mass bzw. Air-Mass-Faktor (AM) beschreibt die Länge des Lichtweges im Verhältnis zu einem direkten vertikalen Lichteinfall in die Erdatmosphäre. Die Bestimmung dieses Faktors ist von Bedeutung, da die Wellen des Spektrums im Laufe des Tages von der Atmosphäre unterschiedlich gestreut und absorbiert werden. Je kürzer der Weg des Lichts durch die Atmosphäre ist, desto intensiver die Einstrahlung. Bei hohen Zenitwinkeln morgens bzw. abends und damit verbundenen höheren AM-Faktoren, wird die kurzwellige energiereiche Strahlung stärker absorbiert, was zu einem roten Himmel führt. Steht die Sonne im Zenit und der Faktor liegt nahe 1, wird der Blauanteil der Strahlung von der Atmosphäre öfter gestreut, folglich erscheint der Himmel blau. Der Air-Mass-Faktor ist abhängig von Standort, Jahreszeit und Uhrzeit (*Abbildung 2.3*). Für aussagekräftige Ergebnisse sind Mehrfachmessungen zu verschiedenen Tageszeiten erforderlich. Der Air-Mass-Faktor wird nach Formel *F. 2.9* bestimmt. Hierbei wird der Zenitwinkel (β) verwendet.

$AM = \frac{1}{\sin(90 - \beta)} [-]$	F. 2.9
---------------------------------------	--------

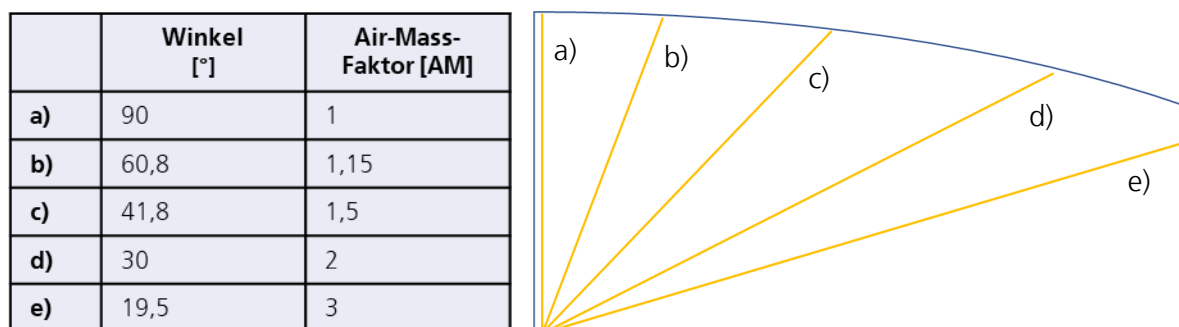


Abbildung 2.3 - Darstellung des Weges der Lichtphotonen nach Eintritt in die Erdatmosphäre. Direkter Vergleich der Air-Mass Faktoren und der dazugehörigen Zenitwinkeln

2.2 Konzentrierende Solarkraftwerke (CSP)

Konzentrierende Solarkraftwerke (CSP) sind eine Technologie zur Erzeugung elektrischer Energie aus Sonnenenergie, die auf der Konzentration der Sonneneinstrahlung mithilfe von Spiegeln und der Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärmeenergie beruht. Die thermische Energie wird zum Antrieb einer Dampfturbine verwendet, die wiederum einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Sie gehören zu den erneuerbaren Energiequellen und tragen somit zur Verringerung der Treibhausgasemissionen bei. Entscheidender Vorteil von CSP-Kraftwerken ist, dass sie die erzeugte Wärme speichern können, sodass sie auch dann Strom erzeugen können, wenn die Sonne nicht zur Verfügung steht. Diese Charakteristik macht sie für die Integration in das Stromnetz besonders attraktiv, da sie, anders als Windkraft und Photovoltaik, eine stabile und zuverlässige Energieversorgung bieten. Wenn nicht anders gekennzeichnet, wird auf Buck et al. [15] Bezug genommen.

2.2.1 Allgemeine Funktionsweise

Es gibt zwei wesentliche Ausführungen von CSP-Kraftwerken. Diese unterscheiden sich darin, wie das einfallende Sonnenlicht konzentriert und gespeichert wird.

Bei den linienfokussierten Systemen werden z.B. Parabolspiegeln verwendet, die das Sonnenlicht auf ein Absorber-Rohr in der Mitte des Parabolspiegels konzentrieren. Durch das Absorber-Rohr wird ein hitzebeständiges Medium z.B. Öl gepumpt. Das Wärmeträgerfluid gelangt anschließend in einen Wärmespeicher oder kann bei Bedarf direkt an die Dampfturbine weitergeleitet werden.

Solartürme, welche den punktfokussierten Systemen zuzuordnen sind, bündeln durch parabolisch gekrümmte Spiegel (Heliostaten) die Sonneneinstrahlung auf einem Empfänger (Receiver), stationiert in einer Solarturmanlage. Um dem Sonnenverlauf folgen zu können, sind die Heliostaten mit einer Zwei-Achsen-Elevation ausgestattet. Erstrebenswert ist eine Erzielung möglichst hoher Temperaturen, welche durch einen Konzentrationsfaktor von bis zu 1000 erreicht werden. Dieser Faktor ist abhängig von der Anzahl und Größe der verwendeten Heliostaten. Bei einer Position in Äquatornähe wird die Heliostatenanordnung kreisförmig um den Receiver installiert. Je weiter das CSP-Kraftwerk vom Äquator entfernt ist, desto lohnender ist die einseitige Heliostatenanordnung aufgrund des sich ändernden Winkels der Sonneneinstrahlung. Der Receiver absorbiert die Wärme der gebündelten Sonnenstrahlen und gibt diese an Öle, Keramiken oder flüssige Salze ab. In Abhängigkeit zu dem genutzten Wärmeträgerfluid werden verschiedene Receiver-Arten verbaut. Im Betrieb sind Leistungen von $1000 \frac{kW}{m^2}$ am Receiver nicht untypisch. Eine beispielhafte Darstellung eines Heliostatenfeld mit Solarturm ist der *Abbildung 2.2* dargestellt.

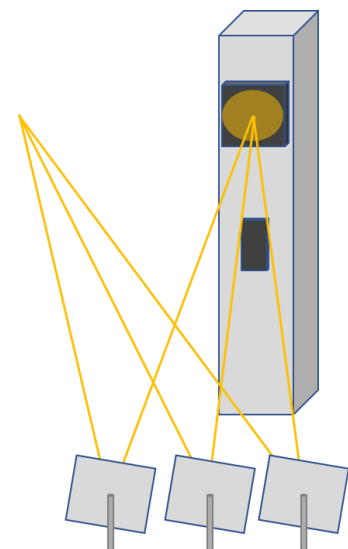


Abbildung 2.4 - Solarkraftwerk mit Heliostaten - Solarturm

Durch Fokussierung der Heliostaten und der damit eingehenden Bestrahlung der Solarturmanlagen müssen nachstehende Effekte und Verluste berücksichtigt werden. Ausschlaggebend für die Wärmeabsorption ist die DNI-Intensität. Sie gibt an, welche Strahlungsleistung ungehindert die Erdoberfläche erreicht. Diese wird neben dem Air-Mass-Faktor auch von der Wolkenbildung und der Luftqualität beeinflusst. Weiterer Faktor ist das Reflexionsvermö-

gen der Spiegelflächen in einer Bandbreite von 88% und 94%. Potenzielle Kosinus-Effekte können ebenfalls zur Leistungsminderung beitragen. In Abhängigkeit des Sonnenstandes können die Spiegelflächen voneinander abgeschattet liegen. Ausfallende oder vom Fokuspunkt abdriftende Heliostaten verringern ebenfalls den Wirkungsgrad. Wenn die Heliostaten falsch auf den Receiver fokussieren oder die Aperturfläche des Receivers kleiner als der Durchmesser des Lichtfokus des Heliostaten ist, spricht man von Spillage.

2.2.2 Solarkraftwerk Jülich

Folgend werden der Aufbau und die Funktionsweise von Solarkraftwerken näher erläutert. In dieser Arbeit wird ausschließlich auf die Energiegewinnung des Solarkraftwerks des Institutes für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Jülich Bezug genommen.



Abbildung 2.5 – Heliostatenfeld des Instituts für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) – Quelle: Ulrich Kieselbach [24]

Das im Jahr 2008 errichtete Solarkraftwerk in Jülich wird hauptsächlich für Forschungszwecke genutzt. Das Heliostatenfeld umfasst mehr als 2350 Heliostaten, die auf einer Fläche von 10 Hektar aufgestellt sind (Abbildung 2.5). Die gesamte installierte Spiegelfläche beträgt über 18000 m^2 . Neben dem 60 m hohen Hauptsolarturm wurde im Jahr 2020 ein weiterer Solarturm, der Multifokusturm, errichtet.

Der Hauptturm umfasst einen festen 22 m^2 großen Receiver (a), welcher an einem Dampfprozess angeschlossen ist und eine potenzielle Leistung von etwa $1,5 \text{ MW}$ erreichen kann (Abbildung 2.6). Es handelt sich um einen offenen, volumetrischen Receiver mit zylindrischer Struktur. Unterhalb des fest installierten Receivers befindet sich eine Forschungsebene, auf der weitere Receiver für Testzwecke installiert werden können. Der Multifokusturm ist für reine Forschungsarbeiten bestimmt und nicht an einen Dampfprozess angeschlossen. Er verfügt über drei Testebenen, die nach Belieben genutzt werden können. Die vorliegende Arbeit basiert auf dem am Multifokusturm eingesetzten HPMS-II Receiver (b), der in der ersten Versuchsebene installiert ist. Dieser Receiver nutzt als Medium geschmolzenes Salz, welches kontinuierlich durch 16 Absorptionsrohre transportiert wird. [15], [16]



Abbildung 2.6 – Die vom Institut für Solarforschung genutzten Solartürme. a): Hauptsolarturm mit Hauptreceiver
b): Multifokusturm inklusive HPMS-II-Receiver

2.3 Kamera-Sensorsysteme

Die in den Grundlagen gezeigten CSP-Kraftwerke können durch den Einsatz von kamerabasierten Messungen bezüglich Fokus-Positionierung und Wirkungsgradbestimmung auf den Receiver überprüft und optimiert werden. Nachstehend werden die relevanten Sensortypen sowie ihre Funktionsweise und ihr Aufbau erläutert. Zusätzlich werden auf Korrekturen und Fehler Bezug genommen.

2.3.1 Optische Kameratechnik

Optische Kameratechnik wird zur Abbildung sichtbarer Strahlung eingesetzt. Je nach genutztem Sensortyp und -qualität können ebenfalls Wellenlängenbereiche abgebildet werden, welche außerhalb des Bereichs des sichtbaren Spektrums liegen.

Neben dem verwendeten Objektiv ist der Sensor der wichtigste Bestandteil einer optischen Kamera. Die folgenden Abschnitte befassen sich mit CCD- und CMOS-Sensoren.

2.3.2 CCD-Sensor

Gängig sind Kameras mit einem CCD-Sensor (charge-coupled device). Es handelt sich dabei um einen Sensor, der aufgrund seiner Lichtempfindlichkeit oftmals für optische Messungen verwendet wird. Diese beruht auf dem inneren photoelektrischen Effekt. Wenn Energie in Form von Lichtphotonen auf die Oberfläche des CCD-Sensors fällt, werden in den speziell dotierten Zonen der Halbleiterschichten freie Elektronen generiert (2). Dies wird durch die geringe Bandlücke im p/n Übergang der Dotierschichten ermöglicht. Die von außen zugeführte Strahlungsenergie reicht aus, um Elektronen vom Valenz- in das Leitungsband zu heben. Dadurch kann sich die dort erzeugte Ladung in den durch Strahlung angeregten Zonen frei bewegen und sammelt sich in den Pixeln (1) in sogenannten Potentialtöpfen (3). Durch isolierte Elektroden in den Pixeln werden

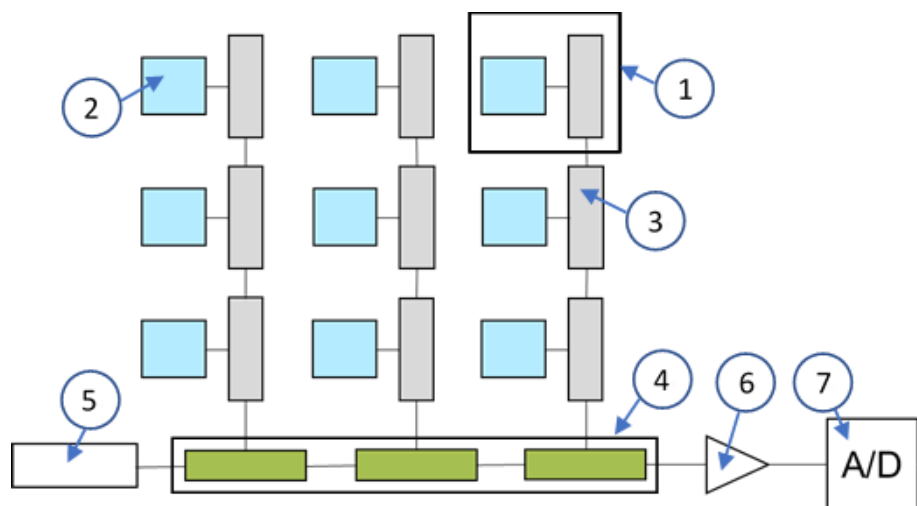


Abbildung 2.7 – Detaillierte Darstellung eines CCD-Sensors

elektrische Felder generiert, mit deren Hilfe die Ladung z.B. aller Pixel einer Zeile schrittweise zum Nachbarpixel verschoben werden kann. Die Ladung unter den Pixeln wird in Taktzyklen (5) schrittweise zeilenweise zum Nachbarpixel übertragen und gelangt über Transferregister (4) zu einem Ausleseverstärker (6). Dort generiert die Ladung während eines Taktes einen äquivalenten Signalwert zur eintreffenden Lichtstrahlung eines Pixels. Mittels AD-Wandler wird das Signal digitalisiert

und über die Taktsumme zu einem Digitalbild aufgebaut (7). Das digitalisierte Bild wird anschließend als Grauwertbild dargestellt. Durch die Bittiefe wird die Graustufung zueinander beeinflusst. Wird beispielsweise eine Kamera mit 8-Bit verwendet, können insgesamt 256 Grauwerte dargestellt werden (2^8). In der Forschung kommen oftmals 12-Bit Kameras mit insgesamt 4096 Grauwerten zum Einsatz (2^{12}). Wird ein Grauwert von null ausgegeben, hat keine Belichtung dieses Pixels stattgefunden – das digitalisierte Bild besitzt schwarze Pixel. Bei maximaler Belichtung, sprich einem Grauwert von 256 bzw. 4096 kommt es zu einer Überbelichtung und der Pixel wird weiß dargestellt. Die Graustufung der einzelnen Bittiefen kann mit Formel F. 2.10 beschrieben werden. [17]

$\text{Grauwerte} = 2^{\text{Bittiefe}}$	F. 2.10
--	---------

Ist der Potenzialtopf maximal geladen, kommt es zu einer Überbelichtung des Bildes. Zudem besteht die Gefahr, dass Elektronen aus einem Potenzialtopf in Nachbarpotenzialtöpfe wandern. Der ungewollte Effekt, welches dieses Prinzip beschreibt, nennt sich Blooming-Effekt. Um diesen zu minimieren, werden Anti-Blooming-Gates (ABG) eingesetzt, welche überschüssige Elektronen ableiten. Da dies aber eine Nichtlinearität der einfallenden Photonen und dem Ausgangssignal aufweisen, wird auf diese in wissenschaftlichen Messungen verzichtet. [18]

2.3.3 CMOS-Sensor

Der CMOS-Sensor basiert auf demselben Funktionsprinzip wie der CCD-Sensor. Dabei steht CMOS für ‚Complementary Metal-Oxide-Semiconductor‘. Wenn Photonen in bzw. auf die Sensorschicht treffen, werden analog zur CCD-Technologie Elektronen freigesetzt. Anders als bei dem CCD-Sensor wird die erzeugte Ladung von einem eigenen Verstärker pro Pixel ausgelesen und in einen Spannungswert umgewandelt (8). Dies soll verhindern, dass einzelne Elektronen in andere Pixel überspringen. Zusätzlich werden CMOS-Sensoren Pixel für Pixel ausgelesen, da es sowohl ein Zeilen- (9) als auch ein Spaltenregister (10) gibt. Somit müssen die Elektronen nicht mehr zeilenweise zum Sensorrand verschoben werden, höhere Auslesegeschwindigkeiten (Dynamiken) sind möglich (Abbildung 2.8). Dennoch kann der Blooming-Effekt nicht ausgeschlossen, sondern lediglich verringert werden. [17], [19]

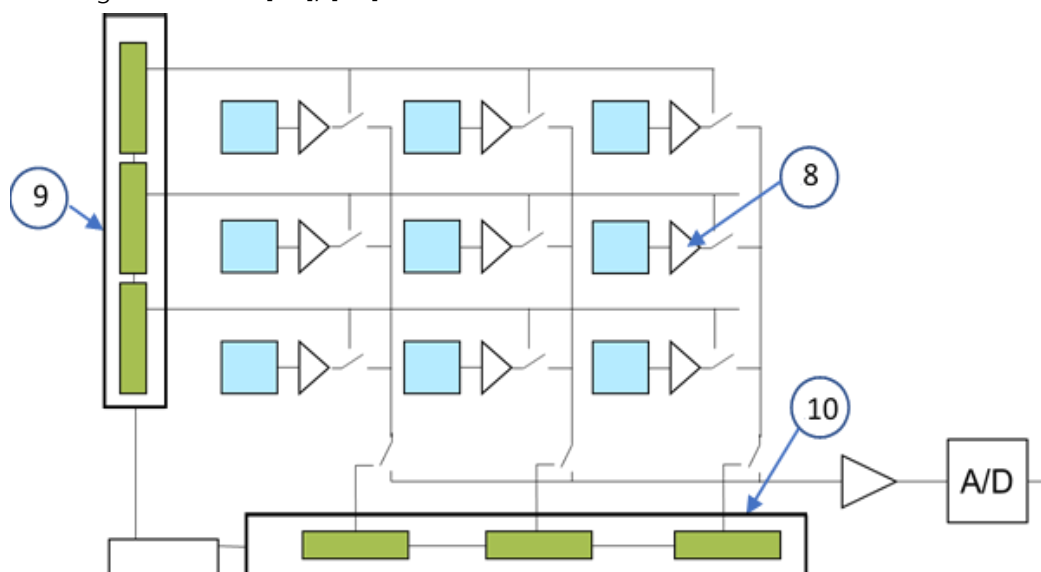


Abbildung 2.8 – Detaillierte Darstellung eines CMOS-Sensors

2.3.4 Weitere Kamera-Eigenschaften und Korrekturen

Neben der Wahl des Sensortyps ist die Bestimmung der Belichtungszeit von entscheidender Bedeutung. Diese gibt an wie lange Photonen auf den Sensor treffen. Bei dunklen Bedingungen werden längere Belichtungszeiten gewählt. Die Belichtungszeit einer Aufnahme ist auf den reziproken Wert der maximalen Bildrate begrenzt. Die Bildrate gibt an, wie viele Bilder pro Sekunde aufgenommen werden, und wird in "FPS" (Frames per Second) ausgedrückt.

Als Dunkelstrom wird das Rauschen eines jeden Sensors bezeichnet, welches durch die Thermik der Umgebung und der Eigentemperatur beeinflusst wird. Die Korrektur kann erfolgen, indem ein Kompensationsbild bei geschlossenem Objektiv, d.h. ohne Lichteinfall, aufgenommen wird. Des Weiteren kann der Aufnahme auch "tote Pixel" identifiziert werden, die durch Fehler innerhalb des Sensors entstehen und als weiße Punkte im Dunkelstrombild entstehen. Ein beispielhafter Ausschnitt des Totpixelbildes ist in *Abbildung 2.9* dargestellt. Zur Vereinfachung werden die toten Pixel in der Abbildung schwarz dargestellt, deren Wert nach der Belichtung ungleich eins sind. Die Aufnahme wird mit einer Belichtungszeit von 40 s aufgenommen.

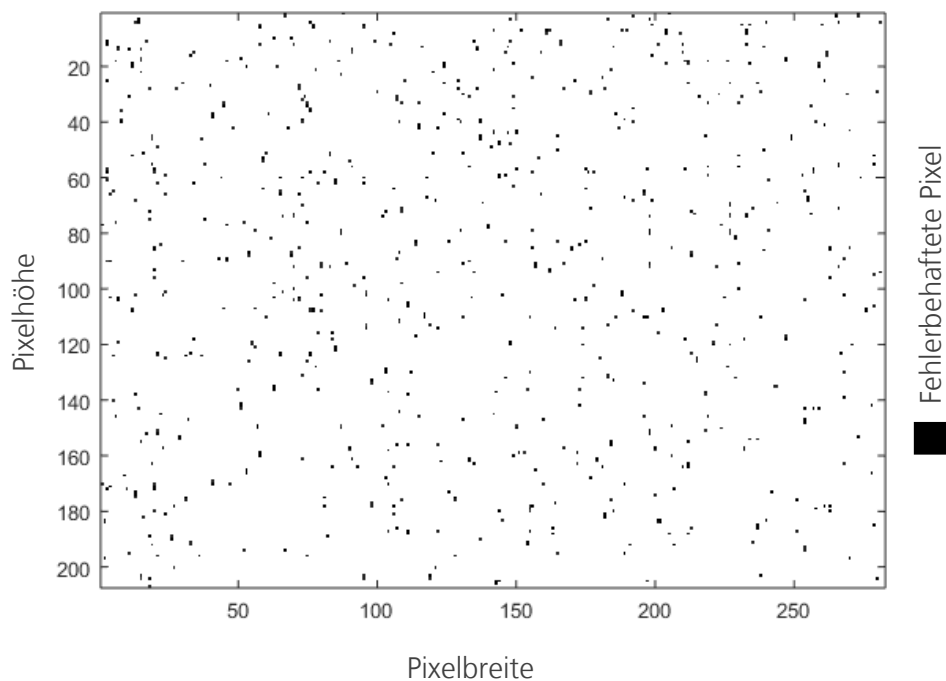


Abbildung 2.9 – Beispielhafter Ausschnitt des Totpixelbildes bei einer Belichtungszeit von 40 s

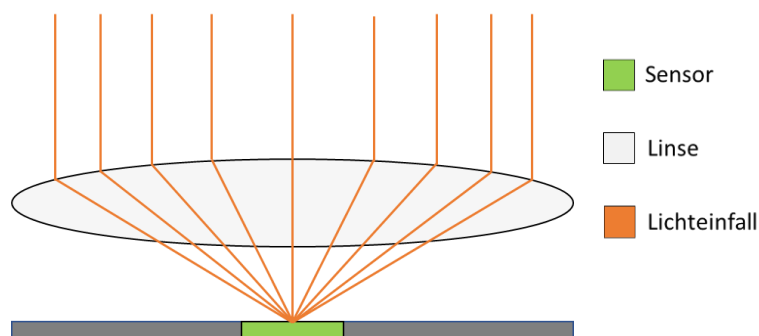


Abbildung 2.10 – Verhalten des Lichtes bei Aufnahme in einer Linse

Abhängig von dem verwendeten Objektiv tritt eine Vignettierung in unterschiedlichem Maße auf. Dieser messtechnisch unerwünschte Effekt ist das Ergebnis des natürlichen Randlichtsabfalls, resultierend aus der längeren Strecke, die das Licht durch die Linse des Objektivs an den Rändern zurücklegen muss (*Abbildung 2.10*). Dieser Effekt wird als "Shading" bezeichnet. Um diesen Messfehler auszugleichen, wird durch den Einsatz einer Ulbricht-Kugel ein sogenanntes Weißbild erzeugt. Die Ulbricht-Kugel -eine Hohlkugel- ist auf der Innenseite mit einer diffus reflektierenden Beschichtung, meist Bariumsulfat, versehen und verfügt über eine Lichteintrittsöffnung. Durch Mehrfachbrechung des Lichts in der Kugel entsteht eine homogene Strahlung zu welcher die Kamera im rechten Winkel positioniert wird. Durch Abschwenken der Lichtquelle und optionaler Nutzung eines diffus reflektierenden Einsatzes wird direkte Lichteinstrahlung auf Objektiv und Sensor vermieden. Bei der Aufnahme kann die Vignettierung per MATLAB genau bestimmt und später kompensiert werden. Shading tritt besonders bei Weitwinkelobjektiven auf. Eine Ausgleichsmatrix ist der *Abbildung 2.11* zu entnehmen. Dabei sind die dargestellten Bilder als Ausgleichsnormierung in Falschfarben und Grauwerten dargestellt. [17]

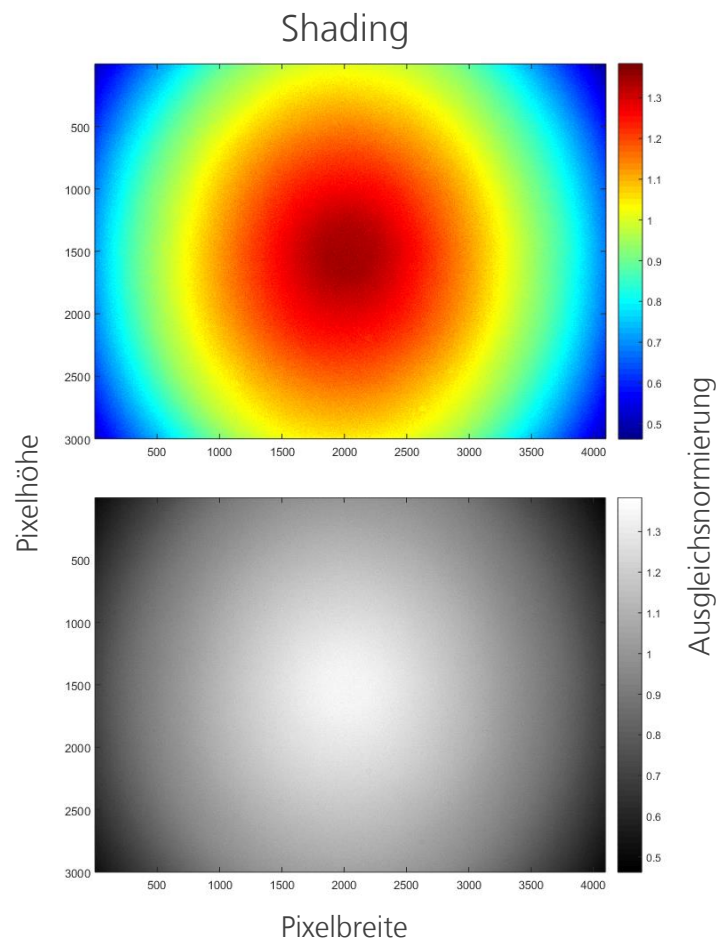


Abbildung 2.11 – Shading-Korrektur in Falschfarben (oben) und in Grauwerten (unten).

2.4 Radiometer

Das Radiometer Typ Gardon wird wegen seiner Widerstandsfähigkeit und Einfachheit häufig zur Messung der Flussdichte verwendet. Es handelt sich um ein punktuell Messsystem, welches eine Flussdichte in „ $\frac{W}{m^2}$ “ liefert. Der Kupferkörper (*Abbildung 2.12*) ist mit einem zylindrischen Bohrloch und einer aufgeschweißten Konstantanfolie versehen, die wegen des nahezu temperaturunabhängigen elektrischen Widerstands verwendet wird. Auf der mit spezieller, thermisch belastbarer Silizium-Spezialfarbe (Pyromark) beschichteten, mattschwarzen Konstantanfolie ist auf der Innenseite ein Kupferdraht angeschweißt. Der Kupferkörper ist in der Regel wassergekühlt und benötigt zum Betrieb keine elektrische Versorgung. Findet keine Bestrahlung statt, sind die Temperaturen des Konstantans und des Kupferkörpers identisch. Beide Spannungen sind gleich groß, sodass eine Spannungsdifferenz von 0V eintritt. Wird das Radiometer bestrahlt, absorbiert die Strahlung und die Konstantanfolie erwärmt sich. Die Wärme wird kontinuierlich über den Kupferkörper radial abgeleitet. Nachdem sich ein annähernd konstantes Temperaturgefälle eingestellt hat, kann die gleichbleibende Temperaturdifferenz erfasst werden. Die daraus resultierende thermoelektrische Spannungsdifferenz zwischen dem Kupferdraht und dem Kupferkörper wird gemessen. Diese Spannungsdifferenz ist auch als Seebeck-Spannung bekannt. Diese ist proportional zur Strahlungsflussdichte.

Gardon-Radiometer können so hergestellt werden, dass sie hohen Strahlungsbelastungen standhalten. Vor Nutzung muss die Strahlungsempfindlichkeit des Gardon-Sensors mithilfe eines Kendall-Radiometers als Referenz bestimmt werden. Der sich daraus ergebende Kalibrierfaktor wird mit der Spannung multipliziert.

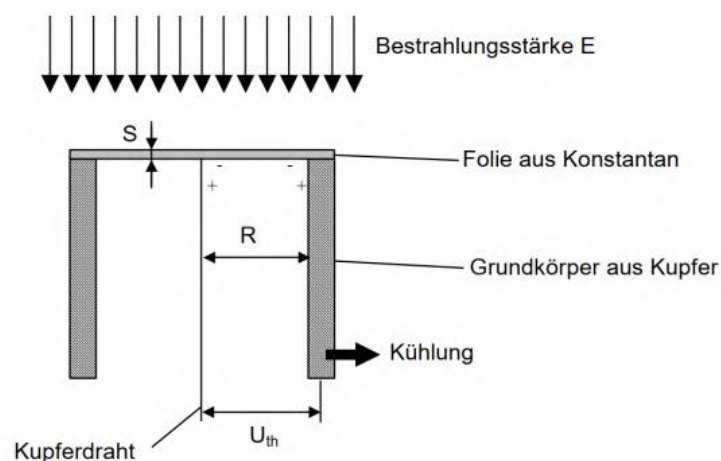


Abbildung 2.12 – Aufbau eines Radiometers des Typs Gardon [25]

Radiometer werden üblicherweise in Solarturmanlagen genutzt, zur Kalibrierung optischer Messsysteme oder zur Bestimmung der direkten Flussdichteverteilung. Neben der Kalibration von Kamerasystemen ist ebenfalls eine Fokuso Optimierung von Heliostaten möglich. Radiometer haben vorteilweise sehr kurze Ansprechzeiten. Nachteilig ist der regelmäßige Wartungszyklus durch die starke Belastung an Solarturm-Receivern. So wird beispielhaft einmal jährlich das Radiometer am Sonnenofen des DLR kalibriert. [20], [21]

3 Stand von Wissenschaft und Technik

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Technik behandelt. Er gibt einen Überblick von Ansätzen und Verfahren zur Bestimmung von Flussdichtemessungen an Receivern von CSP-Anlagen. Mit der Flussdichte kann neben dem Receiverwirkungsgrad auch die Ausrichtung des Heliostatenfeldes auf den Receiver überwacht und optimiert werden. Das Ergebnis ist eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades und die damit verbundene Steigerung der Wirtschaftlichkeit.

Zuerst werden Messverfahren mit Sensoren zur Messung der Flussdichte mit Hilfe von Radiometern beschrieben. Anschließend wird auf den Einsatz von kamerabasierten Messsystemen eingegangen. Das in dieser Arbeit eingesetzte Messverfahren wird als Scan-Methode bezeichnet und ist in Kapitel „3.4 Flussdichtemessung mittels Scan-Methode“ detailliert beschrieben. Wenn nicht anders gekennzeichnet wird auf Röger et al. [6] Bezug genommen.

3.1 Flussdichtemessung - Allgemein

Auf Basis der Flussdichtemessung kann die auf den Receiver treffende Strahlungsleistung gemäß Formel F. 3.1 bestimmt werden. Dazu wird die Flussdichte über die Receiver-Fläche integriert.

$\dot{Q}_{\text{rad}} = \int_A E \cdot dA \quad [\text{W}]$	F. 3.1
---	--------

Durch die gemessene Enthalpiedifferenz (Δh) und dem Massenstrom ($\dot{m}$) ergibt sich die an das Wärmeträgerfluid übergebene thermische Leistung. Diese ist gemäß Formel F. 3.2 definiert. Alternativ ist diese über die Temperaturdifferenz (ΔT) und die spezifische Wärmekapazität (cp) zu bestimmen.

$\dot{Q}_{\text{use}} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot cp \cdot \Delta T \quad [\text{W}]$	F. 3.2
--	--------

Der Quotient von einfallender Leistung und generierten Leistung entspricht dem Receiverwirkungsgrad (Formel F. 3.3).

$\eta_{\text{Receiver}} = \frac{\dot{Q}_{\text{use}}}{\dot{Q}_{\text{rad}}} \quad [-]$	F. 3.3
--	--------

3.2 Flussdichtemessung mittels Radiometer

Im Folgenden wird auf den HPMS-II-Receiver des Solarforschungszentrums des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Jülich Bezug genommen. Wie in „2.4 Radiometer“ beschrieben, können Radiometer die lokale Strahlungsleistung, also die Flussdichte, direkt messen. Durch eine Verschiebung des Bestrahlungsfokus der Heliostaten auf ein oder mehrere Radiometer ermöglichen diese die Bestimmung der Flussdichte an verschiedenen Positionen, wodurch eine Flussdichteverteilung berechnet werden kann.

Idealerweise sollten Radiometer innerhalb eines Receivers installiert werden, um die Flussdichteverteilung kontinuierlich bei Realbestrahlung messen zu können. Hinzu kommt der Vorteil ortsfester Messstellen, welche die Automatisierung einer Interpolations- bzw. Extrapolationsrechnung

stark vereinfacht. Mit einer auf das Receiver-Design optimierten Anordnung von wenigen Radiometern kann bereits ein optimales Ergebnis erzielt werden. Nachteilig neben der Leistungsreduzierung durch die Installation innerhalb des Receivers und der damit verbundenen Verringerung der Wirtschaftlichkeit ist auch eine sehr begrenzte Lebensdauer der Radiometer bei permanenter Volllast-Bestrahlung die Folge. Nach Röger et al. [6] ist mit einer Lebensdauer bei kontinuierlicher Strahlungsbelastung von etwa sechs Monaten zu rechnen. Aufgrund der dünnen Sensorschicht des Radiometers, die durch häufige Bestrahlung stark beansprucht wird, ist es sinnvoll, die Radiometer neben dem Receiver zu installieren, wodurch die Lebensdauer bis zur Revision des Sensors deutlich erhöht werden kann. Dies ist insbesondere bei großen CSP-Anlagen praktikabel. Darüber hinaus bedeutet ein regelmäßiger Austausch die Beeinträchtigung des laufenden Betriebs. Auch der steigende Bedarf an Radiometern mit zunehmender Receiver-Größe ist zu berücksichtigen. Mögliche Messalternativen bezüglich der fest installierten Radiometer werden im Folgenden beleuchtet.

3.2.1 Radiometer Moving-Bar

Die Moving-Bar-Methode beschreibt einen beweglichen, wassergekühlten und möglichst diffus reflektierenden Balken, in welchem Radiometer verbaut sind. Dieser wird schrittweise über die Oberfläche des Receivers bewegt und tastet die gewünschten Messpositionen ab. Die in *Abbildung 3.1* verwendeten Gardon-Radiometer (a) sind kontinuierlich Wasserkühlung. Neben der Kühlung der Radiometer muss für den Einsatz an großen Receivern und leistungsstarken Kraftwerken zusätzlich auch der Balken selbst aktiv gekühlt werden. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Messung während des Betriebs durchgeführt werden muss. Dabei wird kurzzeitig der Receiver verdeckt, was die Attraktivität der Methode mindert.

3.2.2 Radiometer – Ortsfeste Installation außerhalb des Receivers

Der Messaufwand bei einer mit Radiometern bestückten Moving-Bar ist verhältnismäßig aufwendig. Bei dem ortsfesten gezeigten Verfahren der *Abbildung 3.1* (b,c) können die Radiometer ne-

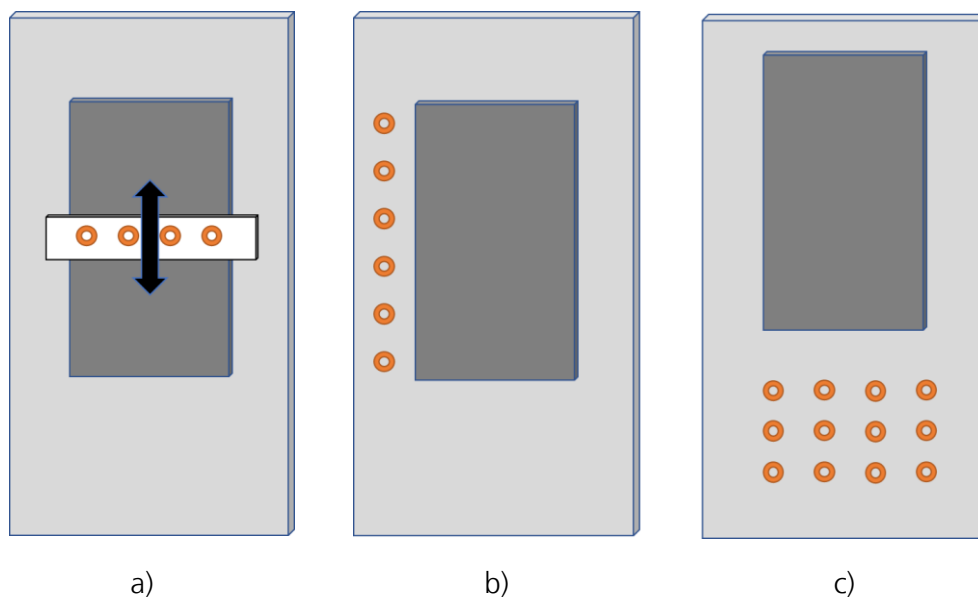


Abbildung 3.1 - Ausführungsarten der Flussdichtemessung mittels Radiometer; a) Moving-Bar mit eingebauten Radiometern ohne aktive Wasserkühlung; b) Ortsfeste Radiometer neben der Receiver-Fläche mit aktiver Wasserkühlung; c) Ortsfeste Radiometer auf einer separaten Fläche mit aktiver Wasserkühlung

ben dem Receiver oder an einer separaten Messstelle positioniert werden. Es findet eine Fokusverschiebung statt, indem der Bestrahlungsfokus schrittweise über die Radiometer bewegt wird. Parallel zu diesem Vorgang werden die Flussdichten eines jeden Radiometers aufgenommen. Um die Flussdichteverteilung zu bestimmen, werden die Stützstellen inter- bzw. extrapoliert. Nachteilig ist auch hier die Notwendigkeit einer realen Einstrahlung während des Tages, welche durch die Defokussierung des Receivers in den Kraftwerksbetrieb eingreift.

3.3 Flussdichtemessung mit optischem Kamerasystem

Anders als die Messung mit Radiometern kann bei der kamerabasierten Messung lediglich durch den vom Receiver zur Kamera reflektierten Strahlungsanteil ein Rückschluss auf die Flussdichte erfolgen. Dazu gibt es verschiedene Ansätze, welche im Folgenden genauer behandelt werden. Wenn nicht anders gekennzeichnet wird Bezug auf Röger et al. [6] genommen.

Generell werden die Messungen in zwei Gruppen kategorisiert. Es kann sowohl mit einem zusätzlichen, diffus reflektierenden Target oder mit einem fest installierten Receiver gearbeitet werden. In diesem Abschnitt werden die Methoden mit einem diffus reflektierenden Target erläutert. Eine ausführliche Beschreibung der speziellen Receiver-Messung, welche für die kombinierte Messung mittels Kamera und Radiometern erforderlich ist, wird im Kapitel „3.4 Flussdichtemessung mittels Scan-Methode“ behandelt.

3.3.1 Lambert'sche Moving-Bar – Bewegtes Target

Zur Reflexionsbestimmung wird beim Moving-Bar-Verfahren mit einem annähernd lambert'schen Target gearbeitet (b). Die Moving-Bar wird knapp vor dem eigentlichen Receiver (a) platziert. Nachdem eine Realbestrahlung durch die Heliostaten auf den Receiver positioniert wird, verfährt das Target gemäß *Abbildung 3.2* über den Receiver. Dabei kann es sich um eine gradlinige Vertikale-, Horizontale- oder eine Rotation-Bewegung handeln. Parallel zu der Verschiebung des lambert'schen Targets wird eine Serienbildaufnahme erstellt, welche im späteren durch eine Software die einzelnen Bildsegmente zu einem Reflexionsbild zusammengesetzt. Aus diesen kann auf die Flussdichte geschlossen werden. Die aktive Wasserkühlung der Moving-Bar-Komponenten ermöglicht die Bestrahlung mit vielen Heliostaten bei hoher Strahlungsleistung.

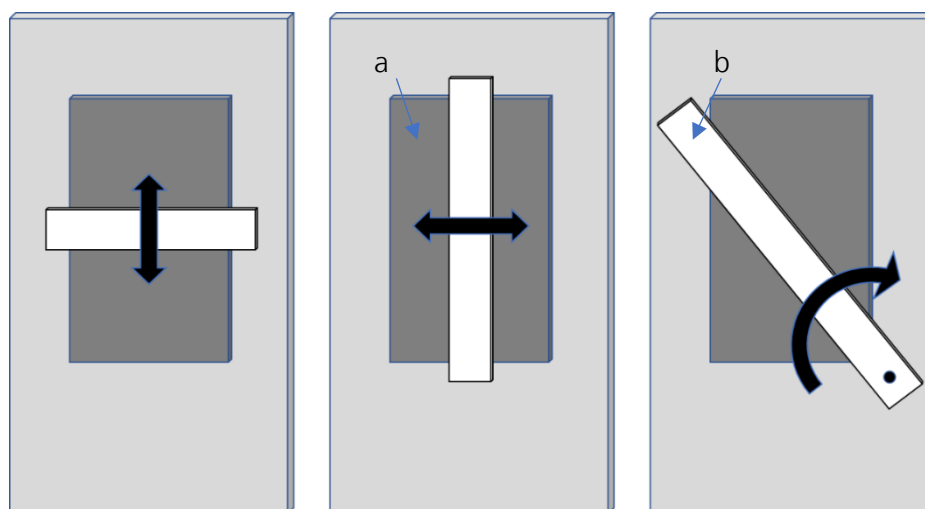


Abbildung 3.2 - Darstellung der Moving-Bar und mögliche Ausführungen.

3.3.2 Fokusverschiebung mittels ortsfestem Target

Da die Moving-Bar-Methoden oftmals mit einem nicht unerheblichen konstruktiven Mehraufwand verbunden sind, kann alternativ ein sich in der Nähe des Receivers befindendes Target eingesetzt werden. Anders als bei der lambert'schen Moving-Bar handelt es sich bei der Fokusverschiebung um ein fest installiertes lambert'sches Target. Der Strahlenfokus wird nicht auf den Receiver, sondern auf das Target schrittweise verschoben. Parallel wird eine Serienbildaufnahme erstellt, welche die Aufnahmen anschließend in einer Software zu einer Reflexionsbild zusammensetzt (Abbildung 3.3). Von diesem kann auf die Flussdichte geschlossen werden.

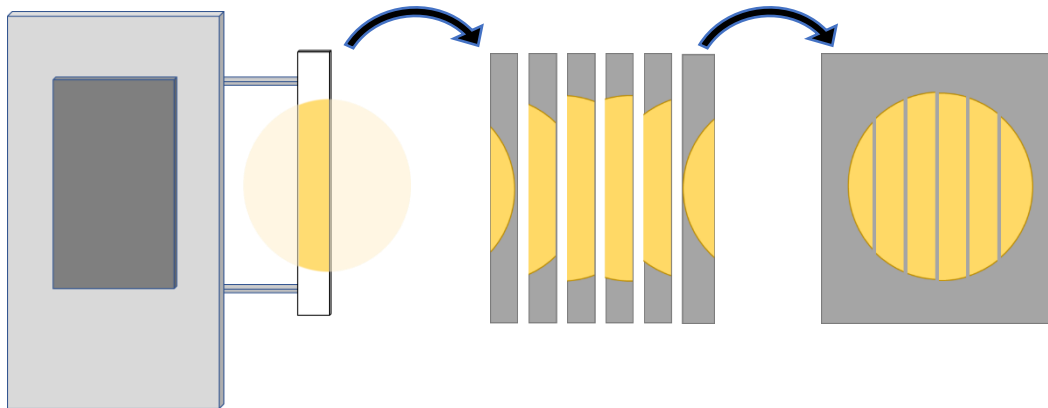


Abbildung 3.3 - Flussdichtemessung mittels Fokusverschiebung auf ein ortsfestes Target; Erstellte Bildausschnitte und das zusammengesetzte Flussdichtebild

3.4 Flussdichtemessung mittels Scan-Methode

Die Scan-Methode ist ein von Offergeld et al. [22] entwickeltes und vom DLR patentiertes Verfahren [23]. Dieses wird genutzt, um im ersten Schritt auf die Reflexionseigenschaften eines Receivers zu schließen zwecks anschließender Bestimmung der Strahlungsflussdichteverteilung. Wenn nicht anders gekennzeichnet basieren die folgenden Erläuterungen auf Offergeld et al. [22].

Ähnlich zu den vorher beschriebenen Flussdichtemessungen wird im ersten Schritt ein Strahlenfokus auf den Receiver positioniert. Dabei erfolgt parallel die Kameraaufzeichnung der Bestrahlung. Die Kamerasensor nimmt die Reflexionen des bestrahlten Receivers auf. Diese Reflexionsgrade (ρ_i) sind abhängig von der Flussdichte (E_i), welche auf den Receiver trifft. Die durch die Belichtungszeit begrenzten Sensordaten werden anschließend mit einem Kamerafaktor (k) verstärkt und in digitale Informationen, sprich der Bildaufnahme, gewandelt. Dabei wird die Aufnahme gemäß Formel F. 3.4 in einem Grauwertbild (g_i) dargestellt. Da je nach genutztem Receiver-Typ einzelne Receiver-Bereiche unterschiedlich stark reflektieren, wird eine segmentweise Reflexion mit dem Index „i“ eingeführt.

$E_i \cdot \rho_i \cdot k = g_i \quad [-]$	<i>F. 3.4</i>
--	---------------

Erfolgt eine Bestrahlung aus verschiedenen Positionen, so muss eine Richtungsabhängigkeit einbezogen werden (Formel F. 3.5). Dabei steht „j“ für die unterschiedlichen Bestrahlungsrichtungen.

$\sum_j E_{i,j} \cdot \rho_{i,j} \cdot k = g_i \quad [-]$	<i>F. 3.5</i>
---	---------------

Da der Receiver in mehrere Segmente unterteilt wird, muss das Verhältnis der Flussdichte aus Bestrahlungsrichtung j und der gesamten Flussdichte segmentweise beschrieben werden. Daraus leitet sich „ $x_{i,j}$ “ nach Formel F. 3.6 ab.

$x_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{E_i} \quad [-]$	<i>F. 3.6</i>
---	---------------

Wird Formel F. 3.6 in F. 3.5 eingesetzt, kann nach der Flussdichte aufgelöst werden (F. 3.7). Diese Umformung ermöglicht es alleine aus dem Grauwertbild der Reflexionen auf die Flussdichte zu schließen.

$E_i = g_i \cdot \underbrace{\frac{1}{\sum_j x_{i,j} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}}}}_{\text{Korrektur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho} \cdot k}}_{\text{Kalibrierung}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$	<i>F. 3.7</i>
---	---------------

Der in dem Korrekturterm dargestellte Quotient $\frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}}$ beschreibt den relativen Reflexionsgrad. Der gemittelte Grauwert ($\bar{\rho}$) im Korrektur- und Kalibrierungsterm ließe sich mathematisch gesehen zwar herauskürzen, ist hier zur Beschreibung des tatsächlichen durchgeführten Messverfahrens

von Bedeutung. Das Verfahren der Scan-Methode erlaubt die Ermittlung von **relativen** statt **absoluten** Reflexionsgraden, was in der Formel durch Bezug auf den mittleren Reflexionsgrad „ $\bar{\rho}$ “ zum Ausdruck kommt.

Der relative Reflexionsgrad wird während einer Nacht- oder Tagmessung bestimmt. Dabei wird ein Lichtfleck auf den Receiver gerichtet, der anschließend in einem engen, mäanderförmigen Muster von diesem abgescannt wird (*Abbildung 3.4*). Gleichzeitig nimmt eine Kamera den Receiver mit einer hohen Bildrate auf.

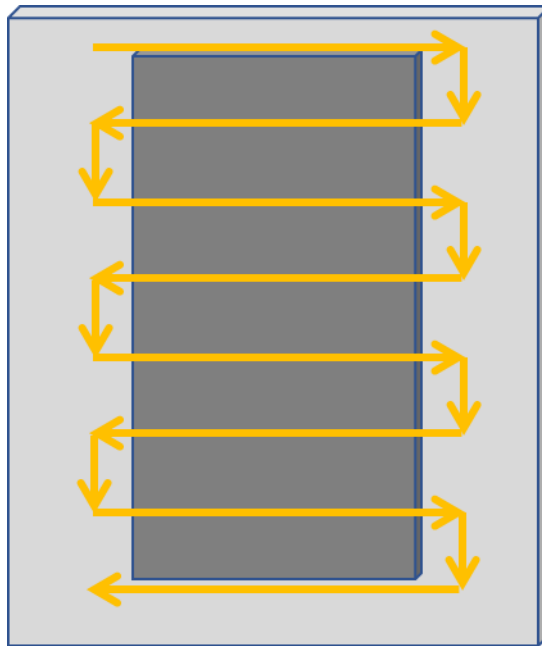


Abbildung 3.4 - Darstellung des mäanderförmigen Scans des Lichtkegels

Aus den Bildmessungen wird im Anschluss ein Maximalbild ($f_{j,max}$) erstellt. Dieses simuliert eine vollständige ideale Bestrahlung des Receivers und gibt Aufschluss über die oberflächenabhängigen Reflexionseigenschaften. Für das Maximalbild wird für jeden Pixel aus der Gesamtheit aller Aufnahmen der Pixel mit dem höchsten Grauwert ausgewählt und zu einem neuen Bild zusammengesetzt.

Da es sich bei dem Ergebnis des Maximalbildes nicht um absolute Grauwerte handelt, müssen die Ergebnisse (Grauwerte) in Relation gesetzt werden. Dies geschieht durch die Quotienten-Bildung von absolutem Reflexionsgrad ($\rho_{i,j}$) zu dem Mittelwert der Reflexionsgrade ($\bar{\rho}$). Die Reflexionsgrade sind mit den Grauwerten der Maximalbilder gleichzusetzen. Es ergeben sich die relativen Reflexionsgrade „ $\frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}}$ “.

Ein weiterer Bestandteil der Korrektur ist die Richtungszusammensetzung der Strahlung ($x_{i,j}$). Diese kann durch verschiedene Verfahren ermittelt werden. Zum einen kann sie mittels einer Raytracing-Simulation geschätzt werden, wobei nur ein idealisiertes Ergebnis entsteht, da z.B. reale Ausrichtungsfehler und geometrische Unterschiede der Heliostaten unberücksichtigt bleiben. Alternativ werden während einer realen Bestrahlung Heliostatengruppen nacheinander auf bzw. von dem Receiver fokussiert oder defokussiert. Eine Heliostatengruppe besteht aus vielen einzelnen Heliostaten, welche zur Vereinfachung zusammengefasst werden. Im Folgenden wird auf das

Beispiel der Defokussierung eingegangen. Wenn nach jeder Defokussierung einer Heliostatengruppe ein Bild aufgenommen und anschließend Differenzbilder berechnet werden, kann auf diese Weise ermittelt werden, aus welchen Heliostatgruppen wie viel Strahlung auf die Receiver-Segmente trifft. Somit ergeben sich die Anteile „ $x_{i,j}$ “, d.h. die Richtungszusammensetzung der Strahlung. In Abschnitt „4.3 Rohbildaufnahme und Richtungszusammensetzung der Flussdichte durch Defokussierung“ wird näher auf die Bestimmung der Richtungszusammensetzung eingegangen.

Der mit „Kalibrierung“ gekennzeichnete Term in Formel F. 3.7 entspricht dem Kamerafaktor (k), mit welchem von einem Grauwert auf die zugehörige Flussdichte geschlossen werden kann. Zur messtechnischen Ermittlung des Faktors wird in den meisten Fällen eine Fokusverschiebung und Radiometermessung angewendet. In Abschnitt „4.2 Kalibrierung mittels Fokusverschiebung“ wird auf diese Methodik genauer eingegangen.

4 Versuche am HPMS-II-Receiver

Der HPMS-II-Receiver ist 2,23 m hoch und ca. 0,6 m breit. Über die Breite sind 16 Absorberrohre verteilt, in welchem flüssiges Salz zirkuliert. Zwischen den Rohren besteht ein Abstand von ca. 1 cm (*Abbildung 4.1*).

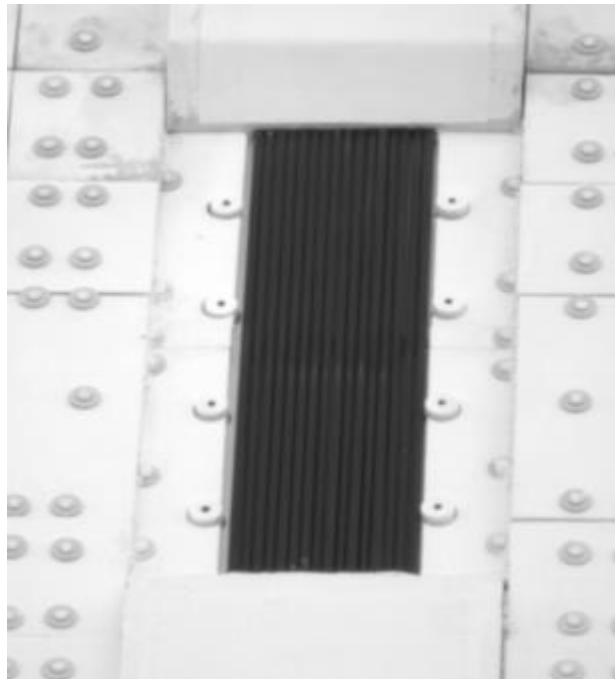


Abbildung 4.1 – HPMS-II-Receiver in Nahdarstellung

Die Einteilung der Positionen in Heliostatengruppen wird im folgenden Abschnitt „4.1 Ermittlung der Reflexionseigenschaften“ erläutert.

Matthies [11] beschreibt in seiner Arbeit, dass es beim Scannen aus bestimmten Positionen des Heliostatenfeldes zu fehlerhaften Aufhellungen der Zwischenbereiche der Rohre innerhalb des Receivers kommt, wodurch die Bestimmung der Flussdichte aus diesen Richtungen erschwert und verfälscht wird. Es ist davon auszugehen, dass der Blooming-Effekt diese überdimensionierten Aufhellungen hervorruft. Blooming entsteht durch einen Übersprung von Elektronen in andere Pixelbereiche und führt zu einer Zunahme der Überbelichtung (2.3.2 CCD-Sensor).

Die *Abbildung 4.2.a* zeigt beispielhaft das Maximalbild der Heliostatengruppe 6. Unter b) ist zu erkennen, dass sich nach Verrechnung der Korrekturen in der Darstellung der Heliostatengruppe 10 eine fehlerhafte Streifenbildung einstellt.

Durch die Verwendung einer CMOS-Sensorkamera anstelle einer CCD-Sensorkamera wird eine Verringerung der Auswirkungen des Blooming-Effekts in den Messergebnissen der Scankorrektur erwartet. Der CMOS-Sensor verspricht eine Verringerung des Blooming-Effekts aufgrund der pixelweisen Verstärkung und einer besseren Isolierung einzelner benachbarter Pixel.

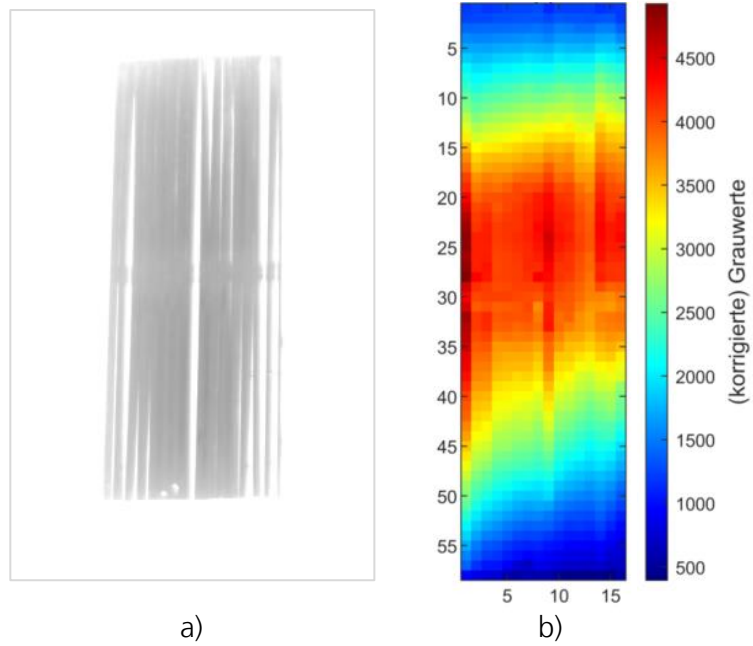


Abbildung 4.2.– a) Maximalbild Heliostatengruppe 6 aufgenommen mit einer CCD-Kamera. b) Spezifisches Ergebnisbild der Heliostatengruppe 10 mit Streifenbildung [11]

Im Folgenden wird die Scan-Methode angewendet, wobei jeder Abschnitt einem Term der Formel $F. 3.7$ entspricht. Die Terme setzen sich aus den Ergebnissen einer Vielzahl von Messungen zusammen.

4.1 Ermittlung der Reflexionseigenschaften

Ziel dieses Abschnittes „4.1“ ist es, einen Teil der Reflexionskorrektur des Receivers zu ermitteln. Die Ergebnisse entsprechen den relativen Reflexionsgrad-Werten ($\frac{\rho_{ij}}{\bar{\rho}}$) der Formel F. 3.7 zur Berechnung der Flussdichteverteilung.

Zur Bestimmung der Flussdichte des HPMS-II-Receivers wird das Heliostatenfeld zunächst in Gruppen unterteilt. Diese Unterteilung ist notwendig, da die Reflexionseigenschaften nicht nur von der Oberfläche des Receivers, sondern auch von der Kameraposition (Beobachtungsposition) und der Einfallsrichtung der Bestrahlung aus dem Heliostatenfeld abhängen. Die Einteilung in Gruppen fasst daher Bereiche des Heliostatenfeldes zusammen und legt einen charakteristischen Heliostaten pro Gruppe fest (Abbildung 4.3).

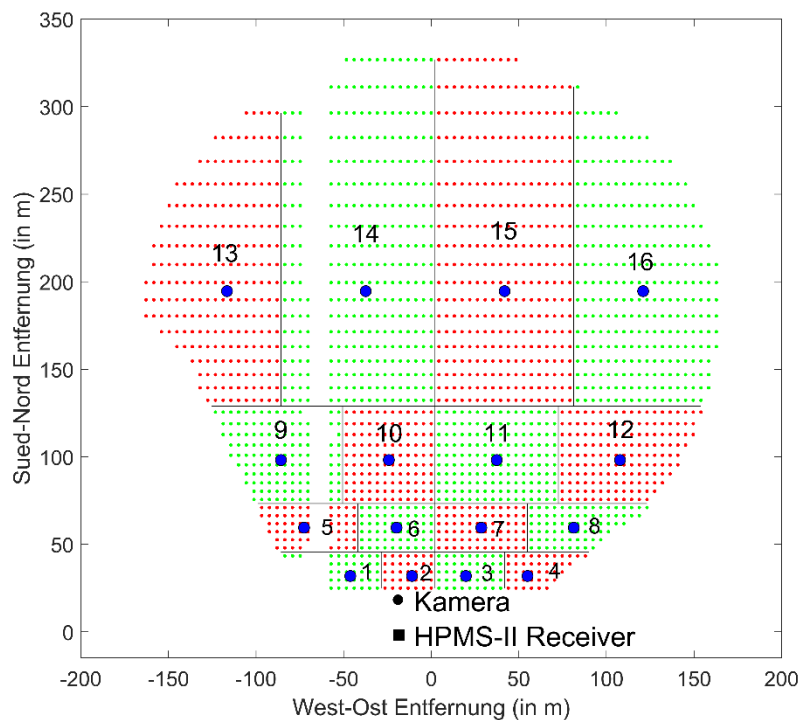


Abbildung 4.3 – Heliostatenfeld in Jülich und Einteilung der Heliostatengruppen [9]

Die Gruppen sind so angeordnet, dass die Zenitwinkel-Differenzen auf dem Receiver von der vorderen zur hinteren Reihe etwa gleich groß sind.

Oberflächenfehler, Verschleiß, Verschmutzung und die Oberflächengeometrie sowie mögliche Materialfehler des Receivers führen zur Inhomogenität der Reflexion. Auswirkung ist, dass von der aufgenommenen Reflexion des Receivers nicht unmittelbar auf die Strahlungsdichteverteilung geschlossen werden kann. Die Anwendung der Scan-Methode ermöglicht eine Korrektur dieses ungleichmäßigen Reflexionsverhaltens für Bilder des bestrahlten Receivers.

Bei Scan-Messungen am Tag müssen neben Cosinus-Effekten auch die schwankende DNI berücksichtigt und korrigiert werden. Während der Tagesmessung kann der laufende Betrieb beeinträchtigt werden und es entsteht ein erheblicher Mehraufwand bei der Auswertung. Im Folgenden konzentrieren sich die Ausführungen auf die Scan-Messungen bei Nacht. Auf Tagesmessungen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Wird eine Nachtmessung durchgeführt, erfolgt die Bestrahlung mit einem Scheinwerfer.

4.1.1 Durchführung – Korrektur der Reflexionseigenschaft

Bei der Durchführung der Messreihe wird der genutzte Scheinwerfer in den in *Abbildung 4.3* dargestellten Positionen der Heliostatengruppen 4, 6, 8, 10, 11 und 12 platziert. Aufgrund der Ergebnisse von Zöller [9] wird entschieden, die Heliostatengruppen 4, 8 und 12 zu berücksichtigen, da diese zu einer Streifenbildung in der Flusssdichteverteilung führen, dessen Ursache bekannt ist. Wie Matthies zeigt, tritt bei den Gruppen 6 und 10 ein Durchscheinen des weißen Strahlenschutzes zwischen den einzelnen Receiver-Rohren auf. Dies führt zu einer Überbelichtung innerhalb des Receivers [11]. Die Heliostatengruppe 11 wird gewählt, um eine Referenzgruppe zu erhalten, welche bei Matthies die besten Ergebnisse liefert. Eine Übersicht zu den Auswahlkriterien ist in *Tabelle 4.1* zu finden.

Tabelle 4.1 - Übersicht der Messaufnahmen und der dazu gehörigen Belichtungszeiten

Heliostatenposition	Auswahlkriterium	Messnummer	Belichtungszeit [μ s]
4	Streifenbildung (Zöller)	1	30000
8	Streifenbildung (Zöller)	2	45000
6	Überbelichtung im Receiver (Matthies)	3	15000
10	Überbelichtung im Receiver (Matthies)	4	40000
11	Referenz Optimum	5	50000
12	Streifenbildung (Zöller)	6	55000

Die Scanposition findet in dem Zentrum einer jeder Gruppe statt (*Abbildung 4.3*).

In den nachfolgend beschriebenen Messreihen wird erstmals eine CMOS-Kamera zur Bestimmung der Flusssdichte eingesetzt.

Vorbereitend wird das Stativ mit der CMOS-Kamera mittig vor dem HPMS-II-Receiver positioniert. Die Serienbildaufnahme der Kamera erfolgt bei größter Blendenöffnung. Beginnend mit Heliostatengruppe 4, jeweils wiederholend für die weiteren Gruppen, wird der Scheinwerfer mittig an die jeweilige repräsentative Stelle einer Heliostatengruppe aufgestellt. Anschließend wird der genutzte Lichtfokus mittig auf dem Receiver positioniert, um die ideale Belichtungszeit für die CMOS-Kamera zu wählen. Ist dies absolviert, beginnt der Strahler eine mäanderförmige Bewegung von der Start- zur Endposition. Gleichzeitig wird eine Bildaufnahmeserie des Receivers manuell gestartet.

Da die Gruppen verschiedene Distanzen zu dem Receiver aufweisen und damit unterschiedliche Lichtintensität an dem Receiver hervorrufen, ist eine Intensitäten-Korrektur für jede Gruppe erforderlich. Ein diffus reflektierendes Target oder alternativ ein Teil des Strahlenschutzes ermöglicht eine Verrechnung auf ein Helligkeits-Niveau. Diese sind lambert'sch und damit in ihrer Reflexion richtungsunabhängig. Ähnlich wie der Receiver wird die Referenzfläche mäanderförmig abgetastet und von der Kamera aufgenommen. Anschließend wird daraus ebenfalls ein Maximalbild erstellt. Anhand des mittleren Grauwertes des diffus reflektierenden Targets lassen sich die Gruppen miteinander später vergleichen.

Die Bestimmung der Intensitäten-Korrektur (IK_j) wird nach Formel *F. 4.1* berechnet. Diese wird aus dem Quotienten der jeweiligen Belichtungszeit ($t_{\text{exp},j}$) und dem mittleren Grauwert ($\overline{g}_j$), sowie dem Mittelwert aller Grauwert über dessen Belichtungszeiten gebildet.

$IK_j = \frac{t_{\text{exp},j}}{\bar{g}_j} \cdot \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n \frac{\bar{g}_e}{t_{\text{exp},e}}$	F. 4.1
---	--------

Nach Ermittlung der Helligkeitskorrektur wird das relative Maximalbild ($\frac{f_{i,j}}{\bar{f}_{i,j}}$) mit der Belichtungszeit und der Korrektur nach Formel F. 4.2 bestimmt. Das Ergebnis ist von der Belichtungszeit unabhängig und stellt die relativen Reflexionseigenschaften ($\frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}}$) jeder Heliostatengruppe dar.

$\frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}} = \frac{f_{i,j}}{\bar{f}_{i,j}} \cdot \frac{1}{t_{\text{exp},j}} * IK_j$	F. 4.2
---	--------

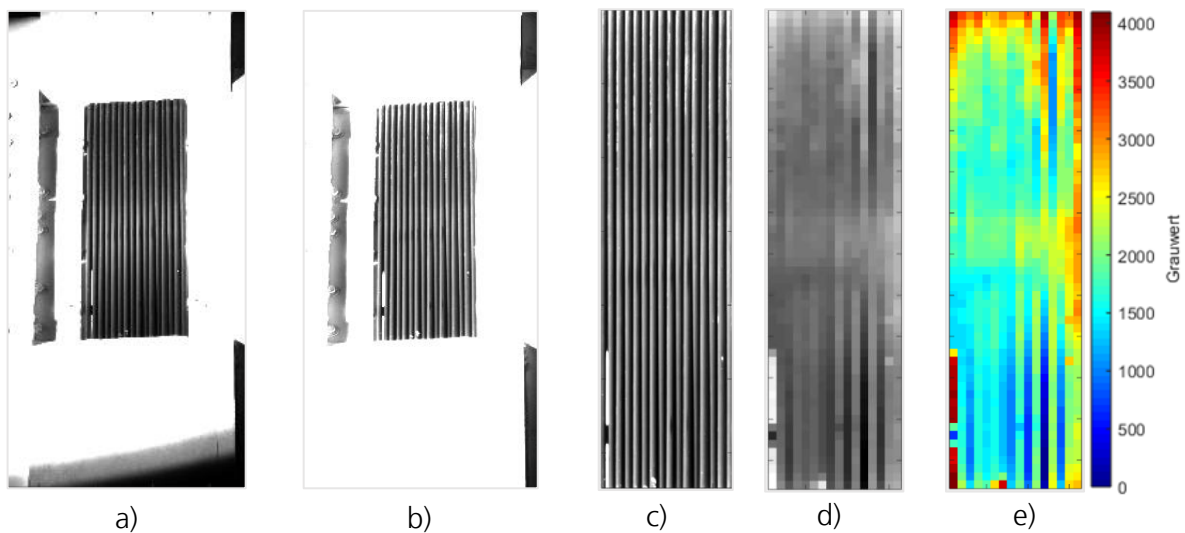


Abbildung 4.4 – a) Bildaufnahme der Heliostatengruppe 8 während der Scanmessung, b) Maximalbild der Heliostatengruppe 8; c) Entzerrtes Maximalbild der Heliostatengruppe 8, nur auf den relevanten Receiverbereich begrenzt; d) Mittelwertbild in Grauwerten e) Mittelwertbild in Farben

Die *Abbildung 4.4* stellt den Arbeitsablauf bis zum Mittelwertbild dar. Dabei entspricht die Darstellung a) einer einzelnen Aufnahme während des mäanderförmigen Abfahrens. Unter b) ist das Maximalbild des Scans dargestellt. Unter c) zeigt sich die Entzerrung des Receivers. Nach der Aussparung der irrelevanten Bereiche ergibt sich das Mittelwertbild in Bildabschnitt d). Zur besseren Veranschaulichung werden die Grauwerte in Falschfarben überführt, wobei dunkelrot dem Maximum und dunkelblau dem Minimum entspricht (e).

Auswertung der Messdaten:

Mit einer in MATLAB implementierten Auswertungssoftware wird für jede Heliostatengruppe ein Maximalbild erzeugt. Auf das Maximalbild werden Kompensationsberechnungen bezüglich Hintergrundbild, Shading und Dunkelstrom angewendet. Um von dem jeweiligen Maximalbild zu einem entzerrten Bild zu gelangen, wird ein in der Auswertung-Software implementiertes Entzerrungswerkzeug verwendet. Hiermit werden die Ecken des Receivers manuell ausgewählt. Die resultierende Receiver-Maske kann anschließend für alle anderen Heliostaten-Gruppen bei gleichbleibender Kameraposition verwendet werden.

Wie beispielhaft in *Abbildung 4.5* zu sehen, entspricht das Bild a) einem Ausschnitt des nicht entzerrten Maximalbildes. Hingegen ist das Bild b) bereits entzerrt und zugeschnitten. Erforderlich ist eine Darstellung aller 16 Receiver-Rohre, welche vertikal und zueinander parallel ausgerichtet sind.

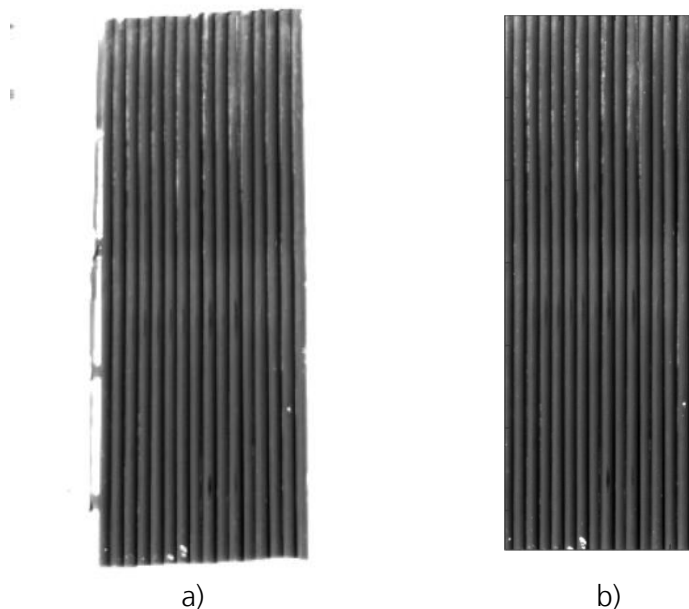


Abbildung 4.5 – Abbildung a) entspricht dem Maximalbild, welches unkorrigiert ist. Ein ungewollter Schattenwurf ist am linken Bildrand zu erkennen.; Abbildung b) zeigt den vollständig entzerrten Receiver

Durch die zentrale Positionierung der Aufnahme ist der Einfluss von Shading der Kamera zu vernachlässigen. Wie der *Abbildung 2.11* in „2.3.4 Weitere Kamera-Eigenschaften und Korrekturen“ gezeigt, tritt dieser Effekt hauptsächlich im Randbereich auf.

Die Bildung der Region of Interest (ROI) aus einem entzerrten Maximalbild konzentriert sich ausschließlich auf den Receiver. Alle anderen Bereiche werden weggeschnitten. Ein Beispiel für diesen Prozess ist in *Abbildung 4.6* zu sehen. In *4.6.a)* ist der Receiver vollständig dargestellt, während die blauen Bereiche an den Rändern (links und rechts) die Randaussparungen zeigen, welche in *4.6.b)* genauer zu erkennen sind. Auch zwischen den Receiver-Rohren werden Bereiche ausgeschnitten, da diese Zwischenbereiche keine Reflexionen der aktiven Receiver-Röhrenoberfläche darstellen. Dies ist notwendig, um Fehler bei der Berechnung der Flussdichte zu vermeiden. Anschließend wird der Mittelwert der Grauwerte aller Pixel innerhalb einer ROI-Grenze berechnet, um einen charakteristischen Grauwert zu erhalten. Die ROI-Mittelwerte werden folgend in eine

neue Matrix, dem Mittelwertbild (c), übertragen. Die Einführung von einer ROI ist notwendig, um nur die für die Reflexion relevanten Receiverbereich zu erfassen. Zusätzlich ist die Gefahr bei einer pixelweisen Verrechnung hoch, dass sich Versatzsprünge einstellen.

Das Maximalbild wird auf ein Matrixformat von 16 x 58 Einträgen komprimiert. Die horizontale Einteilung von 16 Spalten ist auf die Anzahl an Receiver-Rohren zurückzuführen. In der Vertikale werden 58 Zeilen definiert, um Verzerrungen zu vermeiden und die ursprüngliche Skalierung zu erhalten.

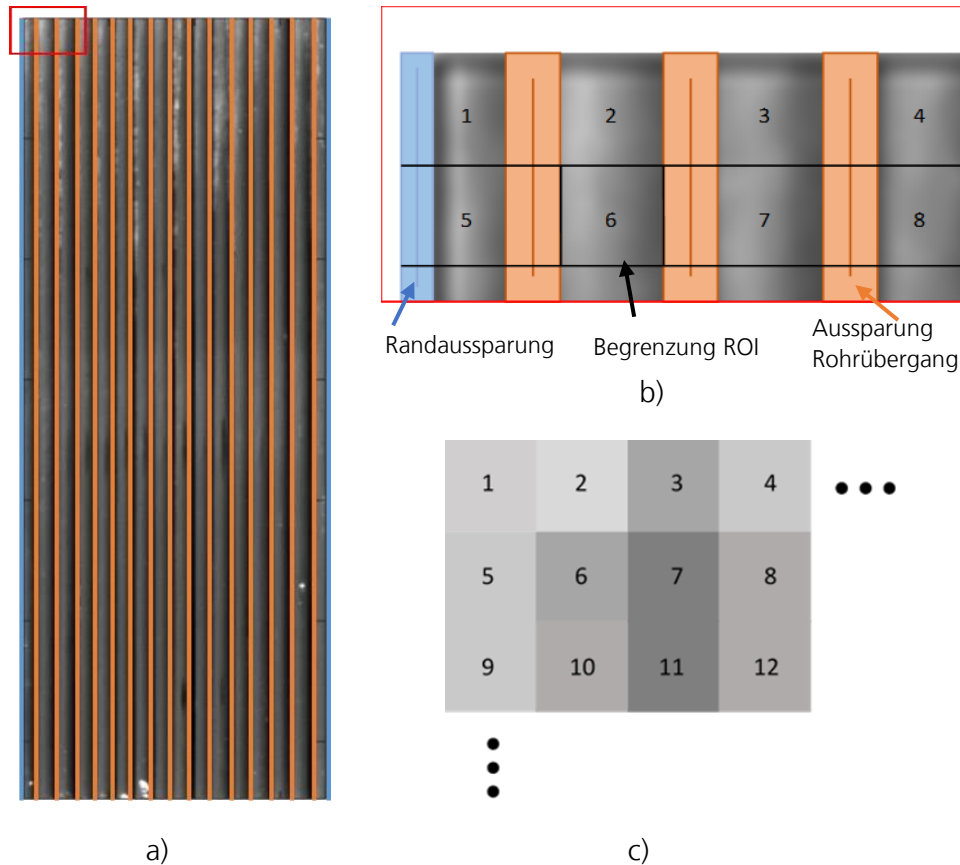


Abbildung 4.6 – a) Allgemeine Übersicht über die Ausparungen innerhalb des entzerrten Maximalbildes; b) Detaillierte Darstellung der ausgesparten Bereiche; c) Darstellung des Verfahrens zur Bestimmung des Mittelwertbilds (Dargestellte Grauwerte beispielhaft)

Dieses Mittelwertbild wird anschließend als Teil der Reflexionseigenschaften ($\rho_{i,j}$) betrachtet.

Für eine Plausibilitätsprüfung wird ein gruppenspezifisches Ergebnisbild erstellt. Eine Aufnahme der Scheinwerferscan-Serienbilder wird ausgewählt, bei welchem der Strahlenfokus mittig auf dem Receiver positioniert ist (b_i). Die Scan-Aufnahme wird mit der reziproken Reflexions-Korrektur der jeweiligen Heliostatengruppe multipliziert (F. 4.3). Das Ergebnis zeigt im Idealfall eine homogene Einstrahlung.

$$\text{spezifisches Ergebnisbild}_i = b_i \cdot \frac{\bar{\rho}}{\rho_i}$$

F. 4.3

4.1.2 Ergebnis – Korrektur der Reflexionseigenschaft

Insgesamt werden die Scheinwerfermessungen von sechs Heliostatengruppen für die anschließende Korrektur berücksichtigt. Zur besseren Übersichtlichkeit ist im Folgenden und in *Abbildung 4.7* jeweils ein Maximalbild pro Kriterien-Gruppen (*Tabelle 4.1*) dargestellt, welche in *Tabelle 4.2* erläutert werden. Dabei entstehen fehlerhafte Aufhellungen der Zwischenbereiche innerhalb des Receivers für die Heliostatengruppen 6 und 10. Die Gruppen 4, 8 und 12 weisen erst bei der Erstellung der Mittelwertbilder eine Streifenbildung auf. Heliostatengruppe 11 fungiert als Referenzgruppe.

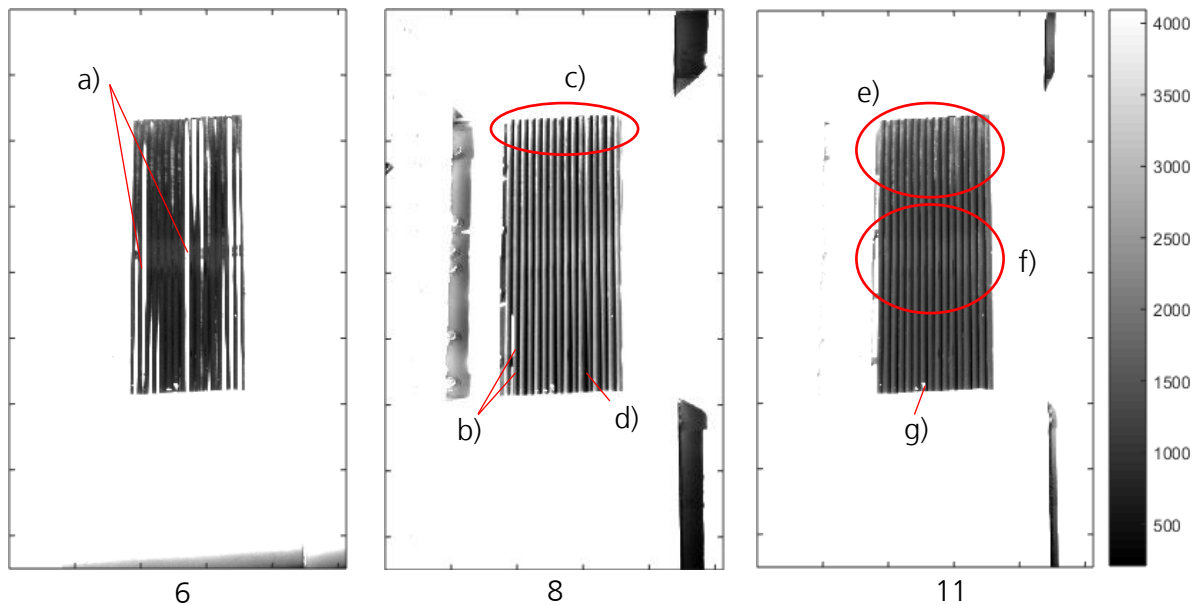


Abbildung 4.7 – Darstellung der Maximalbilder der Heliostatengruppen 6, 8 und 11. Nur eine Darstellung pro Kriterium, soweit sie innerhalb eines Kriteriums ähnlich sind

Tabelle 4.2 – Beschreibung der gezeigten Marker der Abbildung 4.7

a)	Gruppe 6 zeigt innerhalb des Receivers eine Überbelichtung, die zu einer Streifenbildung führt. Diese ist vor allem in der Mitte sowie an den Rändern stark ausgeprägt. Die nicht überbelichteten Bereiche sind verhältnismäßig homogen.
b)	In Gruppe 8 sind leichte Überbelichtungen auf den Receiverrohren zu sehen.
c)	Es kommt im oberen Bereich zu einer stärkeren Reflexion als in den mittleren und unteren Bereichen.
d)	Im unteren Bereich kann ein Versatz der Receiver-Rohre durch einen Schattenwurf erkannt werden.
e)	Referenzscan der Gruppe 11 zeigt wenig Auffälligkeiten. Es sind lediglich leichte Grauwertsteigerungen im oberen Receiverbereich zu erkennen.
f)	Alle Scans weisen in der Horizontale einen leichten Streifen auf, welcher heller als andere Bereiche des Receivers dargestellt wird.
g)	Am unteren Ende zweier Rohre ist die Beschichtung entfernt, wodurch die lokale Reflexion erhöht wird.

Der unter dem Receiver genutzte Strahlungsschutz, welcher näherungsweise als diffus reflektierendes Target fungiert, ist in *Abbildung 4.8* dargestellt. Die mittleren Grauwerte, die genutzte Belichtungszeit und die Korrekturen sind in der *Tabelle 4.3* aufgelistet. Die Scans der diffus reflektierenden Targets der Gruppen 4 und 12 sind nicht verwendbar.

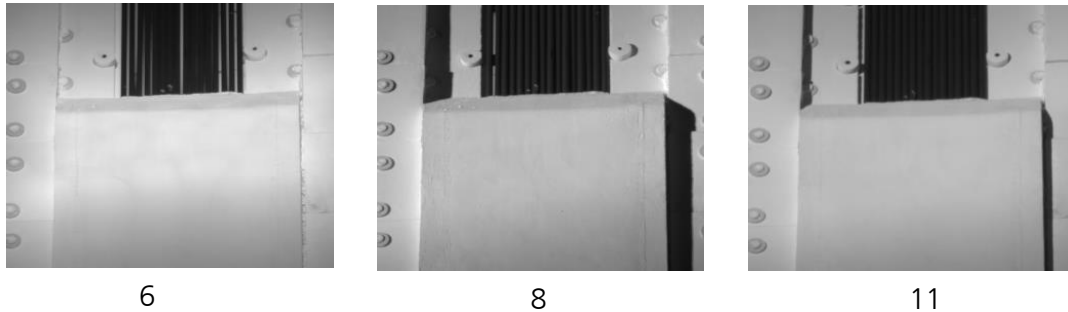


Abbildung 4.8 – Referenztargets bei unterschiedlichen Scans der Gruppen 6, 8 und 11.

Tabelle 4.3 - mittlerer Grauwert, Belichtungszeit und Korrektur einer jeden Gruppe

Gruppe	Mittlerer Grauwert [-]	Belichtungszeit [μs]	Korrektur [-]
6	3104	600	2,22
8	2216	3000	0,32
11	2514	2000	0,54

In *Abbildung 4.9* sind die erstellten Mittelwertbilder der Scans aus den Heliostatengruppen 6, 8 und 11 dargestellt und werden in *Tabelle 4.4* näher beschrieben.

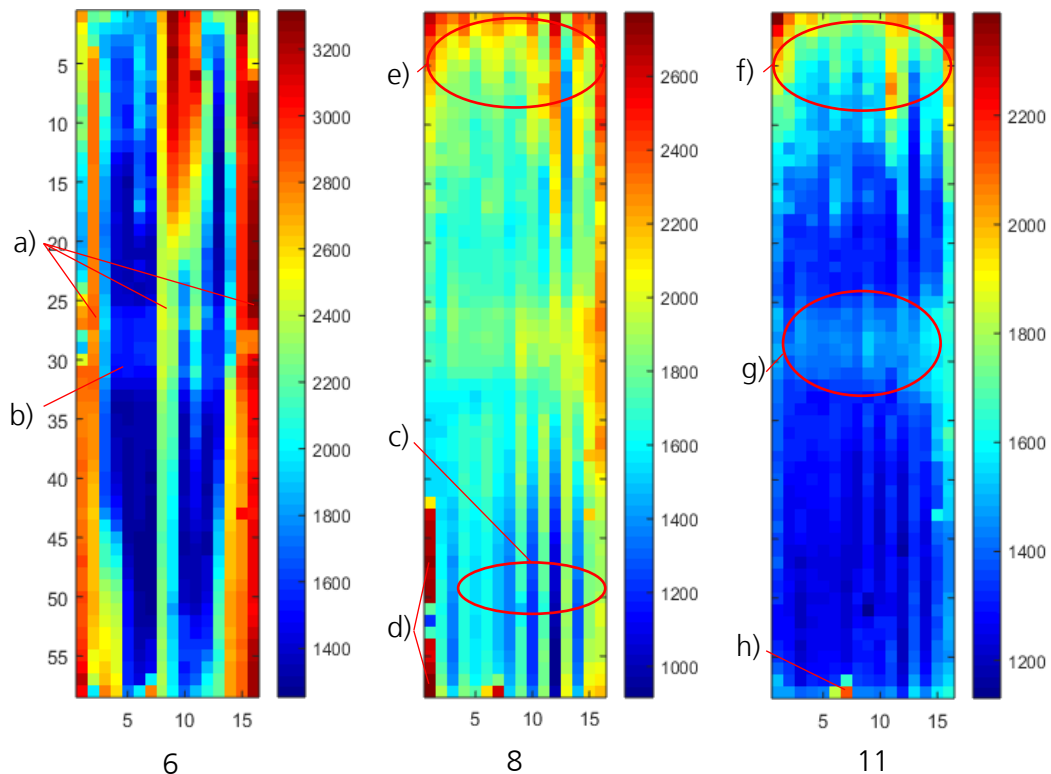


Abbildung 4.9 – Darstellung der Mittelwertbilder der in der Nachtmessung aufgenommenen Heliostatengruppen 4, 6, 8, 10, 11, 12

Tabelle 4.4 – Beschreibung der Marker der Abbildung 4.9

a)	Dem Mittelwertbild der Heliostatengruppe 6 kann entnommen werden, dass es an den Rändern und in der Mitte zu starken Anstiegen der Grauwerte kommt. Dies ist deutlich an der rechten Seite zu erkennen
b)	Im Grauwertebereich von etwa 1300 bis 1600 sind in der Darstellung weniger Sprünge im Farbverlauf zu sehen.
c)	Das Mittelwertbild der Gruppe 8 weist eine starke Streifenbildung auf.
d)	Unten links ist ein hoher Grauwert festzustellen.
e)	Am oberen Rand kommt es zu einer Grauwertsteigerung.
f)	Ähnlich wie in Abbildung 5.6 ist der Gruppe 11 eine Gleichmäßigkeit der Grauwerte entnehmbar. Am oberen Rand findet eine Zunahme der Grauwertigkeit statt
g)	Ein Anstieg in dem Bereich ist klar erkenntlich.
h)	Der im vorherigen Teil beschriebene präparierte Bereich für hohe Reflexivität kann ebenfalls auf allen Mittelwertbildern erkannt werden.

Um die Messreihe auf Plausibilität zu prüfen, werden im Folgenden nach Formel F. 4.3 die spezifischen Ergebnisbilder bestimmt.

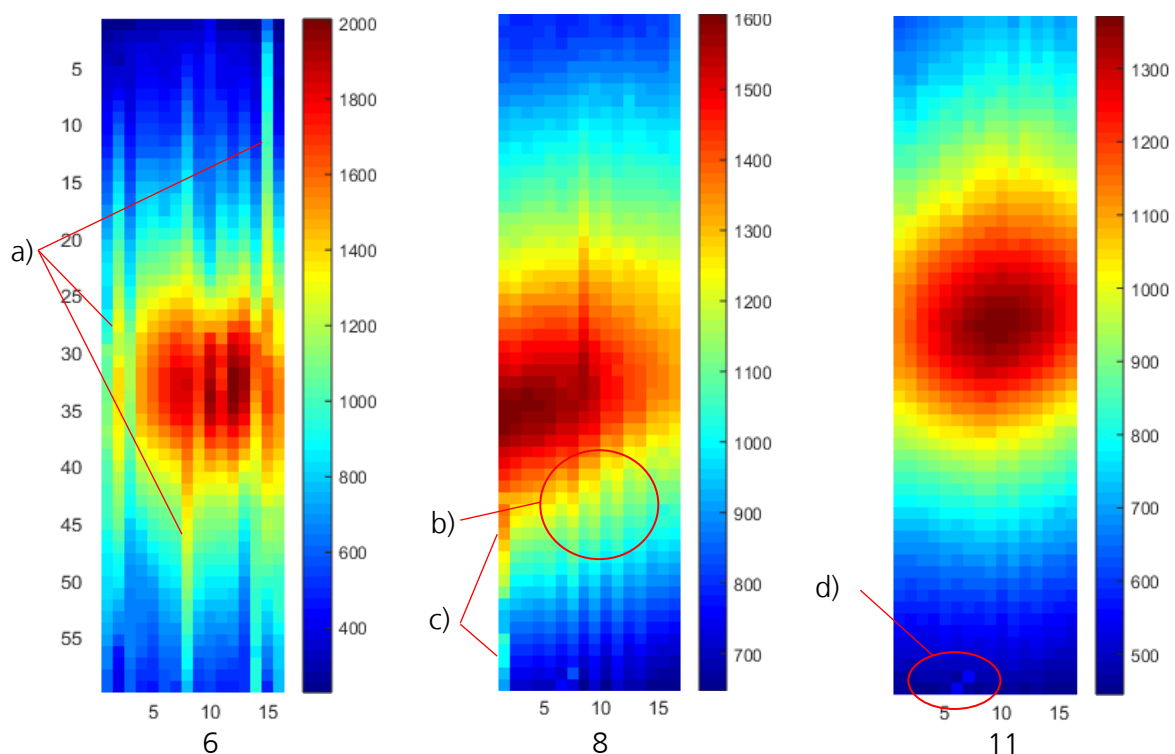


Abbildung 4.10 - Darstellung der spezifischen Ergebnisbilder der in der Nachtmessung aufgenommenen Heliostatengruppen 6, 8, 11

In der Abbildung 4.10 sind die spezifischen Ergebnisbilder dargestellt. In Heliostatengruppe 6 sind unter a) mehrere durchgehende Streifen auszumachen. b) - Im unteren Bereich der Abbildung der Gruppe 8 ist eine klare, wechselnde Schraffierung zu erkennen. c) - Zusätzlich unterscheidet sich die linke Pixelspalte klar von den umgebenden Pixelwerten. d) - Der Gruppe 11 sind keine Auffälligkeiten zu entnehmen. Im unteren Bereich des Bildes ist auszumachen, dass die Bildkorrektur in

der Lage ist, die intensiven Kontrastsprünge in den präparierten Bereichen (Fehlen der Absorptionsbeschichtung) fast vollständig zu kompensieren.

Der relative Reflexionsgrad „ $\frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}}$ “ bildet einen Term der Formel F. 3.7, welche für die Bestimmung der Flussdichte genutzt wird. Unter Abschnitt „5 Flussdichteverteilung am HPMS-II-Receiver“ wird die dargestellte Reflexionskorrektur erneut aufgegriffen und genutzt.

4.1.3 Diskussion – Korrektur der Reflexionseigenschaft

Aufnahmen:

Die erste Nachtmessung zeigt klaren Optimierungsbedarf bezüglich Blooming-Effekts trotz Einsatz des CMOS-Sensors. Die dadurch vorgerufenen Überbelichtungen innerhalb des Receivers können nicht korrigiert werden. Dies hat zur Folge, dass die weitere Auswertung der Gruppen fehleranfälliger ist als jene, bei denen keine Überbelichtung vorliegt.

Strahlungsschutz hinter dem Receiver:

Die überbelichteten Bereiche der Heliostatengruppe 6 sind auf den hinter dem Receiver montierten nahezu diffusen Strahlungsschutz zurückzuführen. Dieser reflektiert das Scheinwerferlicht direkt in den Sensor. Zusätzlich wird die Überbelichtung durch eine Verbiegung einzelner Receiver-Rohre begünstigt. Diese Überbelichtungen sind prinzipiell korrigierbar. Sobald eine durch Blooming hervorgerufene Überbelichtung eintritt, ist die Korrektur fehlerbehaftet.

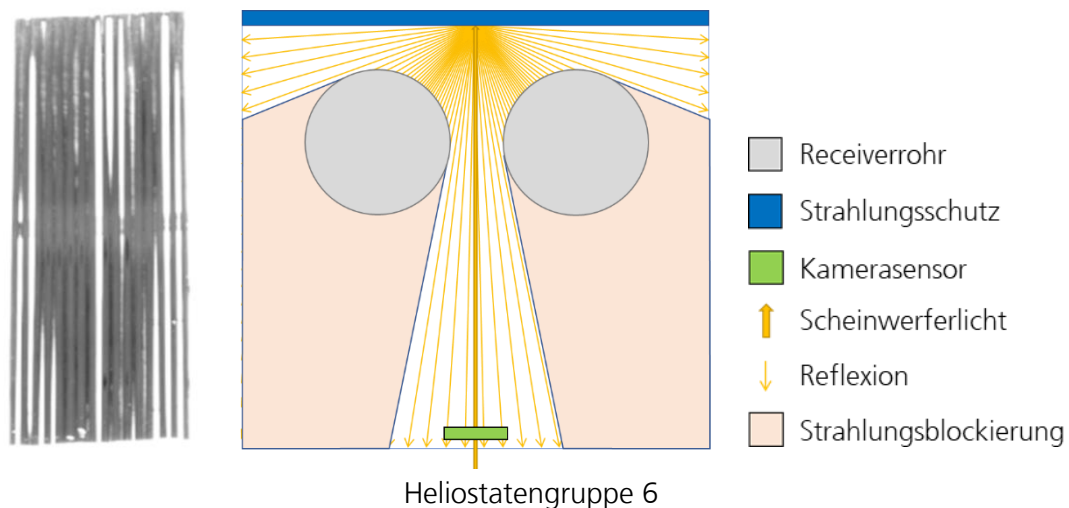
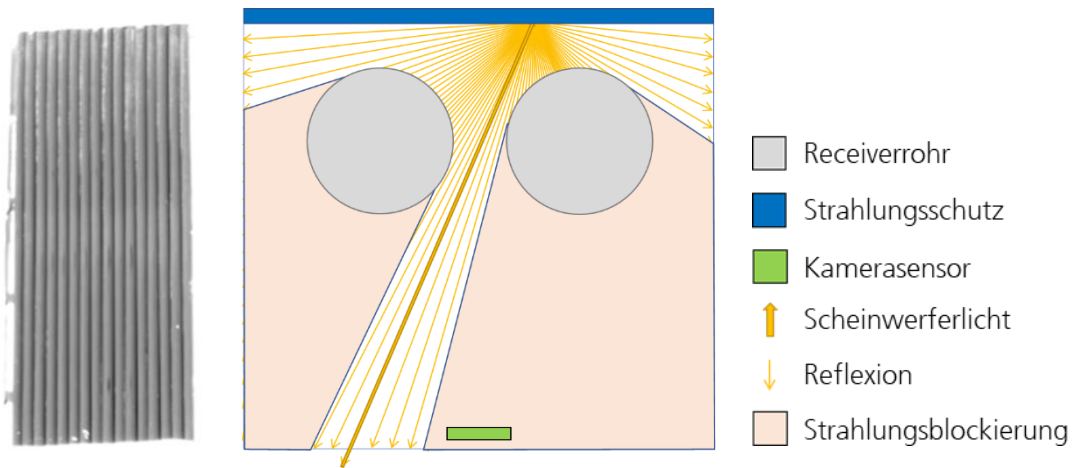


Abbildung 4.11– Reflexionsverhalten bei Scan-Aufnahme der Heliostatengruppe 6; Problematische (diffuse) Reflexion des Strahlungsschutzes

Wie in der vereinfachten Darstellung der *Abbildung 4.11* zu sehen ist, zeigen die Heliostatengruppen, bei denen die Position des Scheinwerfers und des Kamerasensors in der gleichen Flucht liegen, eine problembehaftete Reflexion des Strahlungsschutzes. In der Messreihe betrifft dies die Heliostatengruppen 6 und 10. Für die Bestimmung der Reflexionskorrektur sind nur die Reflexionen der Receiver-Rohre relevant.

Bei Heliostatengruppe 11 kommt es aufgrund der Strahlungsrichtung des Scheinwerfers zu keiner Überbelichtung. Die für den Fehler verantwortlichen Reflexionen des Strahlungsschutzes werden von den Receiver-Rohren blockiert, sodass es gemäß *Abbildung 4.13* zu keiner Überbelichtung in den Zwischenbereichen des Receivers kommen kann.



Heliostatengruppe 11

Abbildung 4.13 - Reflexionsverhalten bei Scan-Aufnahme der Heliostatengruppe 11; Unproblematische Reflexion von Strahlungsschutz

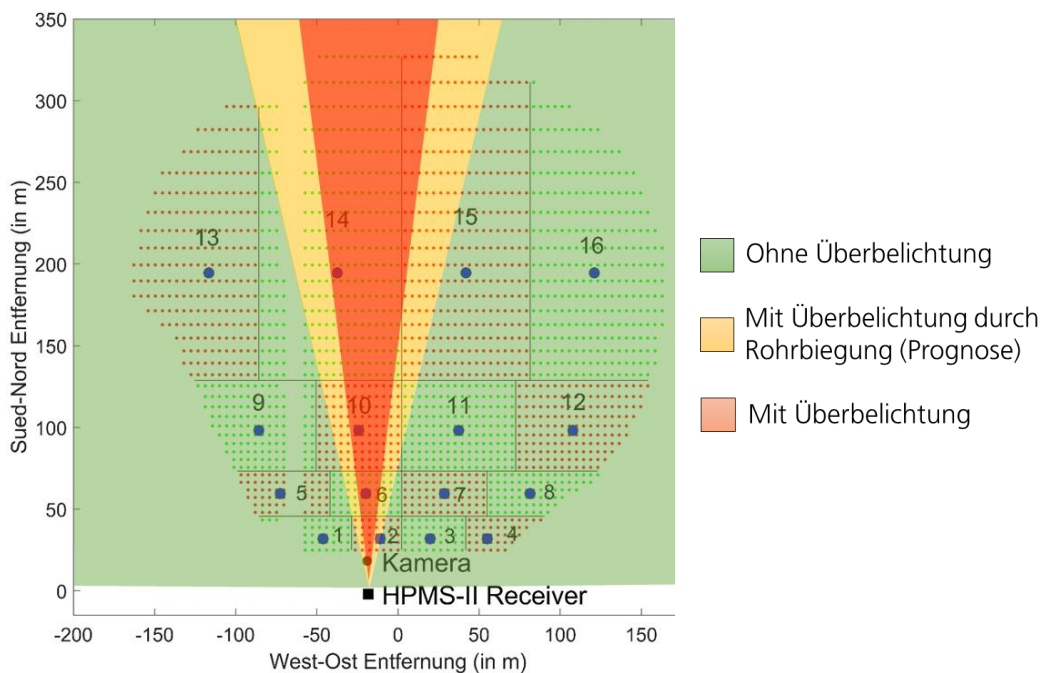


Abbildung 4.12 – Kategorisierung des Heliostatenfeldes bei Positionierung der Kamera vor dem HPMS-II Receiver

Durch die Geometriedaten des Receivers kann berechnet werden, welche Zonen im Heliostatenfeld beim Scannen und bei der realen Bestrahlung zu einer durch Blooming hervorgerufenen Überbelichtung führen (Abbildung 4.12). Eine zunehmende Verbiegung der Rohre beeinflusst die Receiver-Geometrie und vergrößert den problembedingten Bereich. Der gelb dargestellte Bereich ist nicht berechenbar und stellt nur eine Prognose dar. Finden die Scans innerhalb des grünen Bereichs statt, kommt es im Receiver zu **keiner** problembedingten Überbelichtung.

Im Mittelwertbild der *Abbildung 4.10* ist der Heliostatengruppe 11 zu entnehmen, dass es sich um eine leicht zu korrigierende Gruppe handelt. Eine vergleichbare Homogenität der Mittelwertbilder kann mit keiner der übrigen untersuchten Gruppen erreicht werden. Nach der Verrechnung mit dem Rohbild zeigt sich ein fast vollständig homogenes gruppenspezifisches Ergebnisbild

In *Abbildung 4.9* sind unter anderem die Mittelwertbilder der Heliostatengruppen 6 und 8 abgebildet. Diese gewinnen erst an Aussagekraft, nachdem Sie mit den jeweiligen Rohbildern verrechnet werden. Auffällig sind die starken Grauwertschwankungen des Mittelwertbildes der Gruppe 8, die zu einer Schraffur führen. Diese Schraffur könnte auf Ungenauigkeiten bei der händischen Auswahl der Entzerrungs-Eckpunkte zurückzuführen sein. Wie in *Abbildung 4.6* hat dies zur Folge, dass durch die statische ROI-Bestimmung fehlerhafte Bereiche mit einbezogen bzw. relevante Bereich ausgespart werden.

Weitere Fehlereinflüsse:

Die Folge thermischer Belastungen und damit einhergehende Veränderung der Rohrgeometrie, z.B. durch Biegung kann im bisherigen Stand der Bildverarbeitung nicht berücksichtigt werden. Erste Untersuchungen zur automatisierten Kompensation solcher Effekte in der Bildauswertung der Flusssdichtemessung werden im Rahmen dieser Arbeit erprobt und zur Bildauswertung erneut aufgegriffen und weiterentwickelt – „6.2 Softwareanpassungen – Reflexionskorrektur“.

Starker Wind führt dazu, dass es zu einer nicht stabilisierten Bilderzeugung des Maximalbildes kommt, welche nicht mit vertretbarem Aufwand kompensiert werden kann.

4.2 Kalibrierung mittels Fokusverschiebung

Der nächste Schritt zur Erstellung der Flussdichteverteilung besteht darin, die Grauwerte in Flussdichtewerte zu konvertieren. Für die Ermittlung des erforderlichen Umrechnungsfaktors, kommt eine Methode zur Anwendung, die als Fokusverschiebung bezeichnet wird. Damit ist es möglich, die Kalibrierung zu bestimmen, die dem Kamerafaktor " k " nach Formel $F. 3.7$ entspricht. Für die Messung ist mindestens ein Radiometer erforderlich. Der am DLR Standort Jülich verwendete HPMS-II Receiver verfügt über acht Radiometer, welche neben der Receiver-Oberfläche installiert sind (Abbildung 4.1). Durch Anwendung der Fokusverschiebung können die qualitativen Grauwertergebnisbilder in eine quantitative Flussdichteverteilung skaliert werden.

Durch die einmalige Bestimmung eines Kamerafaktors mittels Fokusverschiebung kann bei weiteren Messungen nur über die rein optische Messung und der sich daraus ergebenden Grauwerte eine Flussdichteverteilung bestimmt werden. Eine regelmäßige Überprüfung des Kalibrierfaktors ist dabei zu beachten.

4.2.1 Durchführung – Fokusverschiebung

Der Brennfleck der Heliostaten wird zuerst auf den Receiver gerichtet und anschließend schrittweise zu den daneben befindlichen Radiometern verschoben. Dabei sind die Versatzschritte gleichmäßig und vorher definiert. So werden die Messpunkte auf die Receiver-Fläche projiziert. Auf diese Weise kann eine Flussdichte für einen Grauwert bestimmt werden. Röger et al. [6] zeigt, dass der aufgezeichnete Grauwert proportional zur Flussdichte ansteigt. Eine Flussdichtebestimmung durch die Radiometer muss mit einer konstanten DNI-Intensität erfolgen.

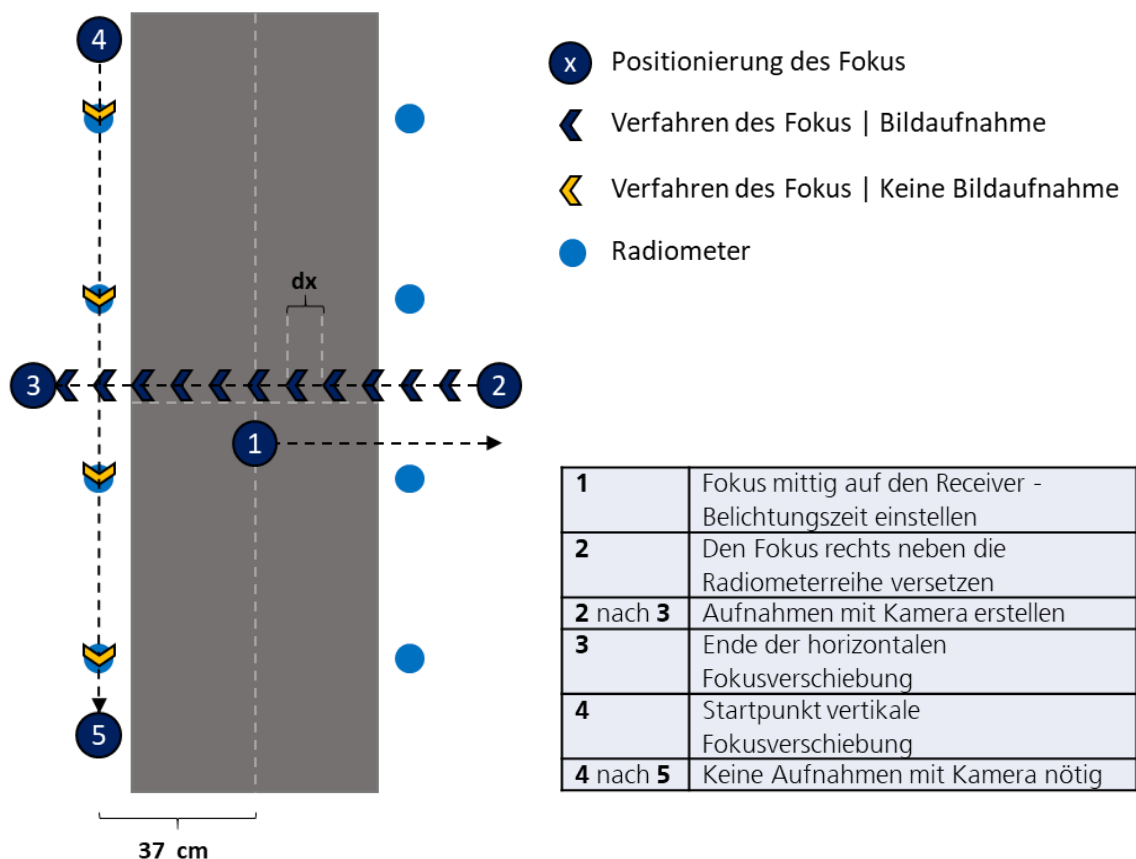
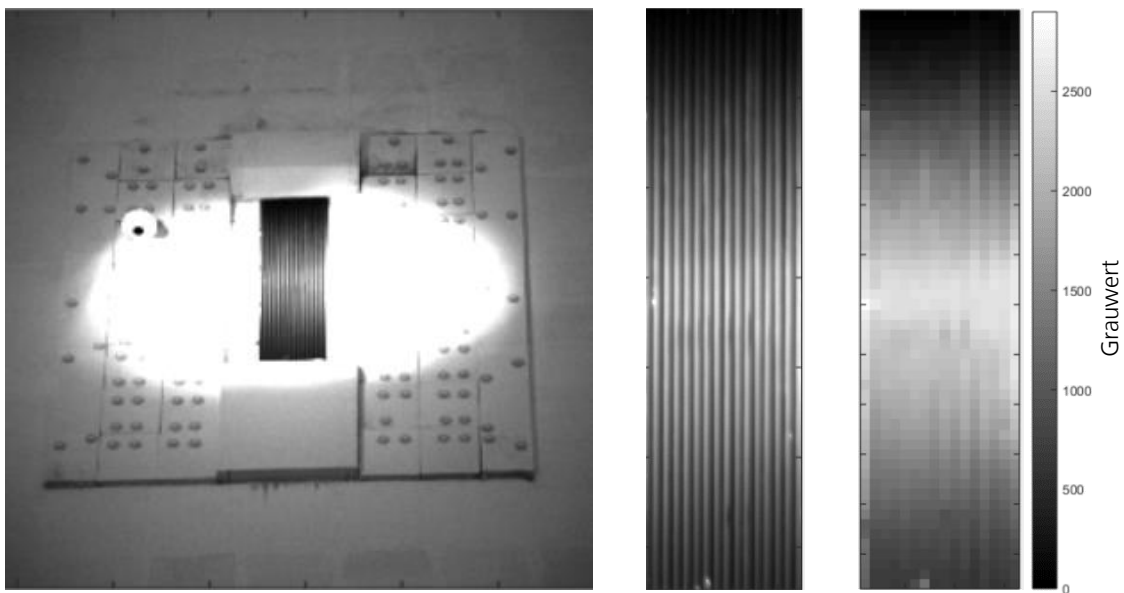


Abbildung 4.14 - Durchführungsplan für die Erstellung der Fokusverschiebung am HPMS-II Receivers

Die Messungen zu dieser Arbeit finden ausschließlich in den Wintermonaten statt und können maximal an drei Heliostaten realisiert werden. Dies muss berücksichtigt werden, da die Gefahr einer Überhitzung des Receivers durch das jahreszeitlich bedingte Herunterfahren der Salz-Speicheranlage besteht. Die Einstellungen und Verschiebungen der eingestellten Fokuspunkte über den Receiver werden aufgezeichnet. Vor Beginn der Durchführung wird die CMOS-Kamera auf einem Stativ, analog der Nachtmessung, vor dem Multifokusturm platziert.

Die verwendete Schrittweite pro Verschiebung beträgt 0,2 m. Da die Radiometer eine gewisse Zeit benötigen, um einen stationären Zustand zu erreichen, werden die Einzelbilder erst nach Eintreten dieses Zustandes erstellt. Ein Arbeitsablauf ist in *Abbildung 4.14* dargestellt. Sobald der Fokus vollständig horizontal über den Receiver versetzt ist, wird der Bestrahlungsfokus der Heliostaten nacheinander exakt auf jedem Radiometer nacheinander positioniert (Vertikalmessung). Auf diese Weise werden die Flussdichtewerte der einzelnen Radiometer im Verhältnis zueinander bestimmt. Zur Bestimmung der Flussdichte der untereinander angeordneten Radiometer wird die Kamera ausschließlich für die Visualisierung der präzisen Positionierung auf den Radiometern genutzt. Die Belichtungszeit wird so lange reduziert, bis der Bestrahlungsfokus auf einen Punkt schrumpft. Der resultierende Punkt entspricht dem Mittelpunkt der Bestrahlung. Die Mittelung der Radiometerflussdichte in einer vertikalen Reihe wird angestrebt.

Bildauswertung nach der Bestrahlung des Receivers mittels Fokusverschiebung:



*Abbildung 4.15 - Links: Mittige Positionierung des Fokus auf dem Receiver während der Fokusverschiebung
Mitte: Entzerrung der Aufnahme. Rechts: Überführung in ein Mittelwertbild*

Da die Messreihe tagsüber stattfindet, werden alle Aufnahmen mit einem Hintergrundbild bereinigt. Dieses zeigt den Receiver ohne Bestrahlung und sorgt dafür, dass nur die auftreffende Flussdichte ins Gewicht fällt. Die Einzelaufnahmen werden, wie in *Abbildung 4.15* zu sehen, entzerrt und anschließend in ein Mittelwertbild, ähnlich wie bei der Bestimmung der Reflexionseigenschaften (*Abschnitt 4.1 Ermittlung der Reflexionseigenschaften*), überführt.

Das in *Abbildung 4.16* dargestellte Raster zeigt, dass die mittlere Pixelreihe sich einen Pixel rechts neben der Mittelachse befindet. Ebenso sind die linke und rechte Pixelreihe um einen Pixel nach rechts verschoben. So kann ein Verfahren des Fokus und das Auswerten in einem 0,2 m Raster gewährleistet werden.

Jeder Bildaufnahme werden, wie in *Abbildung 4.16* dargestellt, insgesamt zwölf Grauwerte entnommen, wobei die linken und rechten Grauwerte der davor bzw. danach folgenden Verschiebung zugeordnet werden. So können für jede Verschiebung zwölf Kamera-Messwerte bestimmt werden.

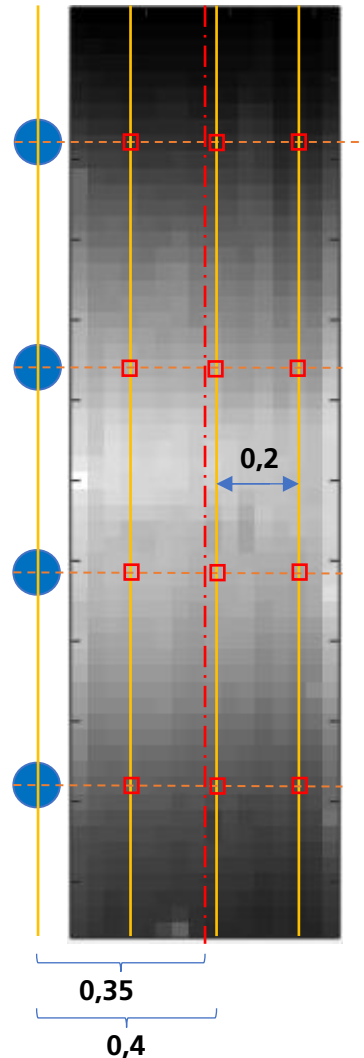


Abbildung 4.16 – Raster für die Fokusverschiebung

Unter a) der *Abbildung 4.17* wird ein Grauwert im Bereich des rot markierten Kreises entnommen. Ist dieser erfasst, wird der Fokus auf b) verschoben. Auch hier wird im Bereich des roten Kreises ein Grauwert bestimmt. Das Gleiche wird unter c) wiederholt. In *Abbildung d)* wird kein Grauwert mehr in diesem Bereich ermittelt, sondern die reale Flussdichte gemessen. Im Idealfall sind alle entnommenen Grauwerte aus den markierten Bereichen bei a), b) und c) identisch. Anschließend werden sie, um Unterschiede in der Reflexion des Receivers zu minimieren, gemittelt und mit der Flussdichte verrechnet.

Bei der Betrachtung des blauen Kreises erfolgt die Flussdichtebestimmung erst im imaginären Abschnitt e). Die Grauwerte werden von b) bis d) ermittelt.

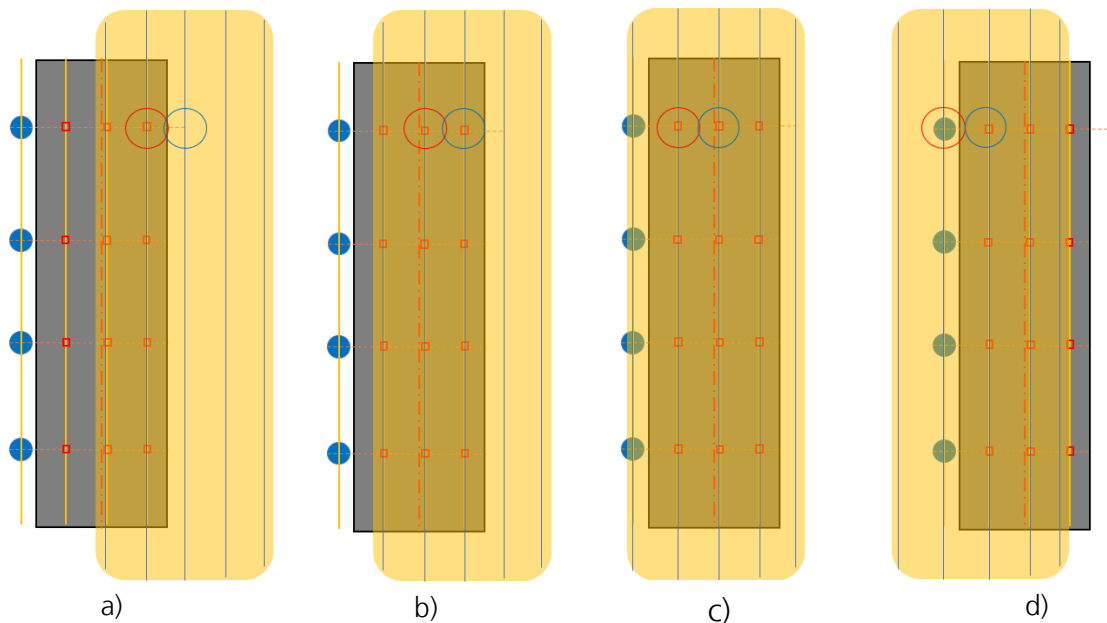


Abbildung 4.17 – vereinfachter Ablauf der Fokusverschiebung am HPMS-II Receiver

Radiometerauswertung:

Radiometer weisen im unteren Bereich ihres Ansteuerungsbereichs eine lineare Empfindlichkeit zwischen dem Sensorsignal und der Flussdichte auf. Da sie aber wie jeder reale Sensor mit einem Sensor-Offset belastet sind, muss dies gemäß Formel F. 4.4 kompensiert werden. Dieser Sensor-Offset wird zum besseren Verständnis im Folgenden Sensorgrundmesswert genannt. Nach der Bereinigung der DNI-Schwankung und des Sensorgrundmesswerts ergibt sich die tatsächliche Flussdichte bei Bestrahlung.

tatsächliche Bestrahlung = Rohmessung – Sensorgrundmesswert [W]	F. 4.4
---	--------

Die in F. 4.5 verwendete Formel gibt den spezifischen Umrechnungsfaktor jedes Radiometers (k_i) an. Der Zähler zeigt die jeweilige gemittelte Flussdichte jeder Verschiebung und im Nenner den dazugehörigen gemittelten Grauwert.

$k_i = \frac{\varnothing_{\text{flussdichte}_i}}{\varnothing_{\text{Grauwert}_i}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$	F. 4.5
---	--------

Anschließend wird das arithmetische Mittel aller Umrechnungsfaktoren gebildet. Das Ergebnis gibt den finalen Umrechnungsfaktor (k) an (F. 4.6). Dieser wird für Formel F. 3.7 genutzt, um von Grauwert auf Flussdichte zu schließen.

$k = \frac{1}{n} \sum_n^i k_i \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$	F. 4.6
---	--------

4.2.2 Ergebnis – Fokusverschiebung

Der Versatz des Strahlenfokus, welcher im Folgenden als Offset betitelt wird, gibt an, wie weit dieser von der Receiver-Mitte positioniert ist. Die Uhrzeiten der Aufnahmen, die DNI-Intensität der Horizontalmessungen, deren Normierung und die Offset-Verschiebung sind der *Tabelle 4.5* zu entnehmen. Die Intensität wird im Zeitraum von 10 Sekunden während der Bildaufnahme gemittelt. Wie in *Abbildung 4.18* zu sehen, nimmt die DNI-Intensität über den gesamten Messzeitraum kontinuierlich ab. Alle Daten sind auf die anfängliche DNI-Intensität von $575,10 \frac{W}{m^2}$ normiert. Wenn nicht anders gekennzeichnet, werden Bildaufnahmen bei einer Belichtungszeit von $600 \mu s$ erstellt.

Tabelle 4.5 – Übersicht der Messungen in Bezug auf Uhrzeit DNI-Intensität und Normierung während der Bildaufnahmen

Messung	Uhrzeit	DNI-Intensität [W/m²]	Normierung [-]	Offset [m]	Modus
1	10:49:09	575,10	1	-0,2	Horizontal
2	10:50:34	570,75	1,0076	0	Horizontal
3	10:51:44	563,58	1,0204	0,2	Horizontal
4	10:53:42	561,50	1,0242	0,4	Horizontal
5	10:55:01	542,89	1,0593	0,6	Horizontal
6	10:56:09	551,02	1,0437	0,8	Horizontal
7	10:57:33	542,92	1,0593	1	Horizontal
8	10:59:48	523,78	1,0980	1,2	Horizontal
9	11:01:38	524,67	1,0961	1,4	Horizontal
10	11:03:51	516,95	1,1125	1,6	Horizontal
11	11:06:12	490,93	1,1715	1,8	Horizontal
12	11:11:46	423,53	1,3579	2	Horizontal

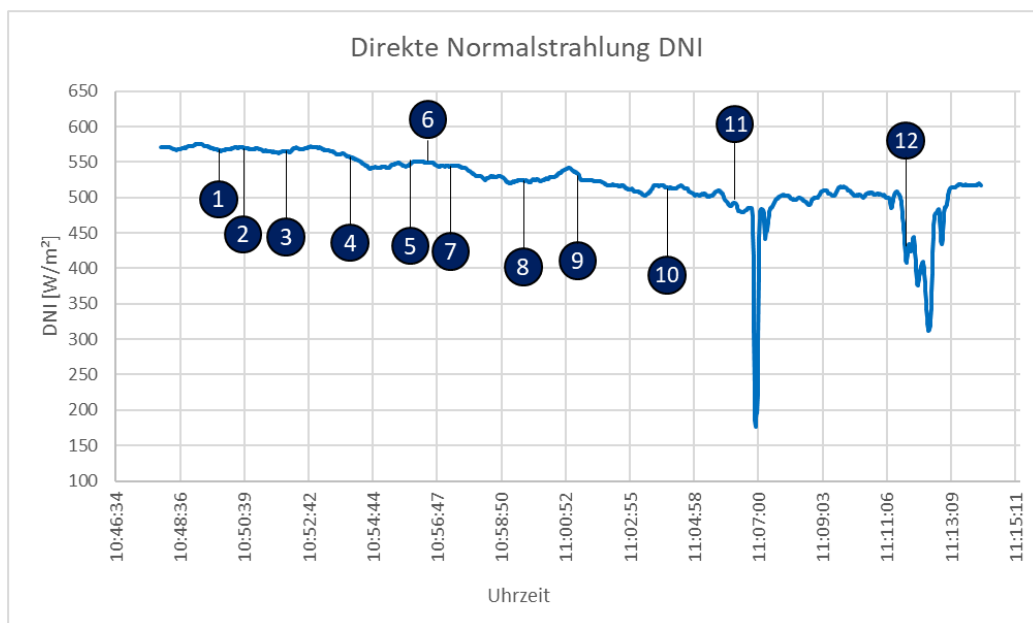


Abbildung 4.18 - DNI-Intensitätsverlauf während der Fokusverschiebung; Darstellung der einzelnen Startpunkte der Messaufnahmen.

Im Folgenden wird für die Auswertung ausschließlich die linke Radiometerreihe verwendet. Die Messungen 10, 11 und 12 beinhalten große Verschiebungen des Strahlenfokus. Je größer der Offset ist, desto geringer ist der Strahlenfokus auf den Radiometern. Ab einem Offset von 1,6 m, welcher der Messung 10 entspricht, wird eine so geringe Leistung aufgezeichnet, dass das eigentliche Signal optisch nicht mehr von dem anfänglichen Sensorgrundmesswert des Sensors zu unterscheiden ist. Daher werden die Messungen 10, 11 und 12 vollständig vernachlässigt. Die Messung 12 weist zudem durch starke DNI-Schwankungen eine hohe Kompensationsnormierung auf, die durch die geringe DNI-Intensität besonders fehleranfällig ist.

Die Zuordnung der Bereiche in *Tabelle 4.7* erfolgt anhand der Position der Fokusverschiebung, welche als „Off“ bezeichnet sind. Die Grauwerte werden manuell aus den Mittelwertbildern entsprechend dem zuvor beschriebenen Beispiel ausgelesen und arithmetisch gemittelt. Diese Rückgabewerte werden sequenziell in die entsprechenden Tabellenbereiche übertragen.

Tabelle 4.7 - Grauwerte nach Radiometern und Offset-Verschiebung sortiert und Bildung eines Arithmetischen-Mittels über die relevanten Pixel eines jeden Radiomeers

Gemittelte Grauwerte [-]									
Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Offset [m]	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
R1	648	791	861	880	825	704	541	438	323
R2	1623	1921	2137	2109	2005	1746	1392	1069	744
R3	1531	1843	2205	2257	2115	1842	1460	1121	845
R4	655	775	1153	1242	1174	1033	841	648	478

Tabelle 4.6 – Übersicht der Sensorgrundmesswerte der verwendeten Radiometer und deren Leistung bei gleichbleibenden Fokuspunkt. Differenzleistung der Radiometer.

	Rad. 1	Rad. 2	Rad. 3	Rad. 4
Sensorgrundmesswert [kW/m²]	2,58	2,54	1,15	0,60
Flussdichte bei gleichem Fokuspunkt [kW/m²]	5,56	5,68	4,33	4,02
Korrigierte Flussdichte bei gleichem Fokuspunkt [kW/m²]	2,98	3,14	3,18	3,42

Neben der Bestimmung der gemittelten Grauwerte jeder Offset-Verschiebung wird die am Radiometer gemessene Flussdichte aufgenommen.

Wie *Tabelle 4.6* zu entnehmen, zeigen die Radiometer in unbestrahltem Zustand einen individuellen Sensorgrundmesswert. Dieser wird vor als auch nach der Messung bestimmt und gemittelt. Nach Subtraktion des Sensorgrundmesswertes vom Rohsignalwert ergibt sich der Nutz-Signalwert, welcher als korrigierte Flussdichte bezeichnet wird. Radiometer 1 weist bei der Referenzmessung eine tatsächliche Flussdichte von $2,98 \frac{kW}{m^2}$ auf.

Den Offsets in der Fokusverschiebung werden die jeweiligen Flussdichteergebnisse, die mit den Radiometern bestimmt wurden, zugeordnet und können der *Tabelle 4.8* entnommen werden.

Tabelle 4.8 – Gemittelte korrigierte Flussdichte der Radiometer der Offsetmessungen

Gemittelte Flussdichte [W/m²]									
Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Offset [m]	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
R1	823	990	1206	1173	1125	971	831	771	716
R2	2618	3009	3275	3175	3131	2672	2251	1762	1359
R3	2816	3364	3544	3486	3401	2850	2336	1762	1275
R4	1343	1859	1857	1743	1663	1392	1114	820	542

Kalibrierung der Grauwerte:

Die Flussdichten werden durch die jeweiligen gemittelten Grauwerte dividiert und sind in der *Tabelle 4.9* dargestellt. Der Quotient gibt an, welche Flussdichtesteigerung einer Grauwertsteigerung entspricht. *Abbildung 4.19* zeigt beispielhaft den linearen Zusammenhang aus Flussdichte und Grauwert anhand der Daten des zweiten Radiometers.

Der finale Umrechnungsfaktor wird durch das arithmetische Mittel aller Quotienten von Flussdichte pro Grauwert der *Tabelle 4.9* gebildet. Steigt der Grauwert einer Messung um eins, so ergibt sich daraus eine Flussdichtesteigerung von $1,6 \frac{W}{m^2}$ unter Verwendung des 12-Bit CMOS-Sensors bei einer Belichtungszeit von 600 μs .

Tabelle 4.9 – Übersicht der gemittelten Grauwerte bzw. Leistungen und dem resultierenden Quotienten

Flussdichte/Grauwert [W/m²]									
Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Offset [m]	-0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
R1	1,27	1,26	1,40	1,33	1,36	1,38	1,54	1,76	2,22
R2	1,61	1,55	1,53	1,51	1,56	1,53	1,62	1,65	1,83
R3	1,84	1,76	1,61	1,55	1,61	1,55	1,60	1,57	1,51
R4	2,05	2,16	1,61	1,40	1,42	1,35	1,32	1,27	1,13

Radiometer 2 – Linearer Zusammenhang von Grauwert über Flussdichte

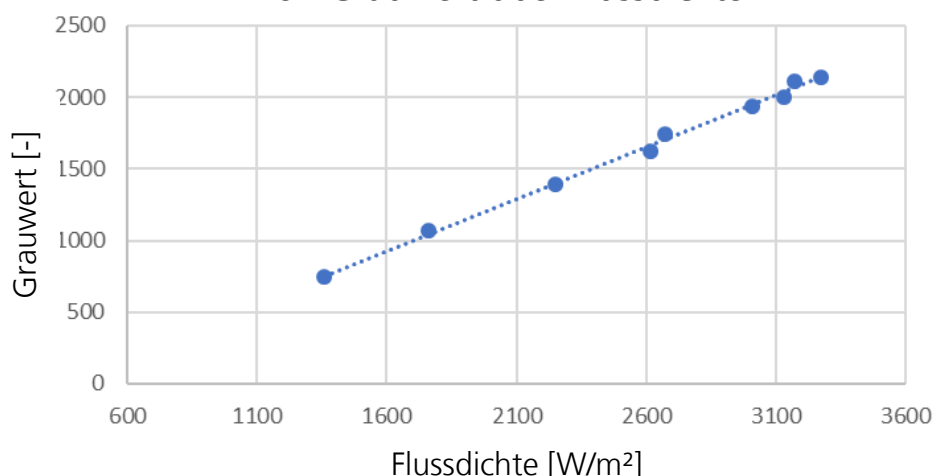


Abbildung 4.19 - Darstellung des linearen Zusammenhangs von Flussdichte zu Grauwert

4.2.3 Diskussion – Fokusverschiebung

Die Kamera-Aufnahmen zur Bestimmung der Grauwerte erfolgen erst, nachdem die Radiometer einen stationären Zustand eingenommen haben.

Für die Erstellung der mittleren Flussdichten ist der in *Abbildung 4.20* dargestellte Verlauf des „Radiometer 1“ beispielhaft. Die verwendeten Messwertbereiche sind durch Pfeile gekennzeichnet. Diese Bereiche sind grafisch bestimmt und sollten idealerweise gewählt werden, wenn eine Tendenz zum stationären Zustand der Radiometer eintritt. Die dargestellten Verläufe sind geglättet und DNI-bereinigt, weshalb es zu einer Verzerrung in der Darstellung des stationären Zustandes kommt. Der Sensorgrundmesswert ist nicht verrechnet. Die Messwerte während des stationären Zustandes werden gemittelt.

Nicht alle Verschiebungen erreichen bei der Flussdichtemessung einen stationären Zustand. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Messdauer durch die sehr kurze verfügbare Direktstrahlung stark begrenzt ist.

Flussdichtemessung Fokusverschiebung – Radiometer 1

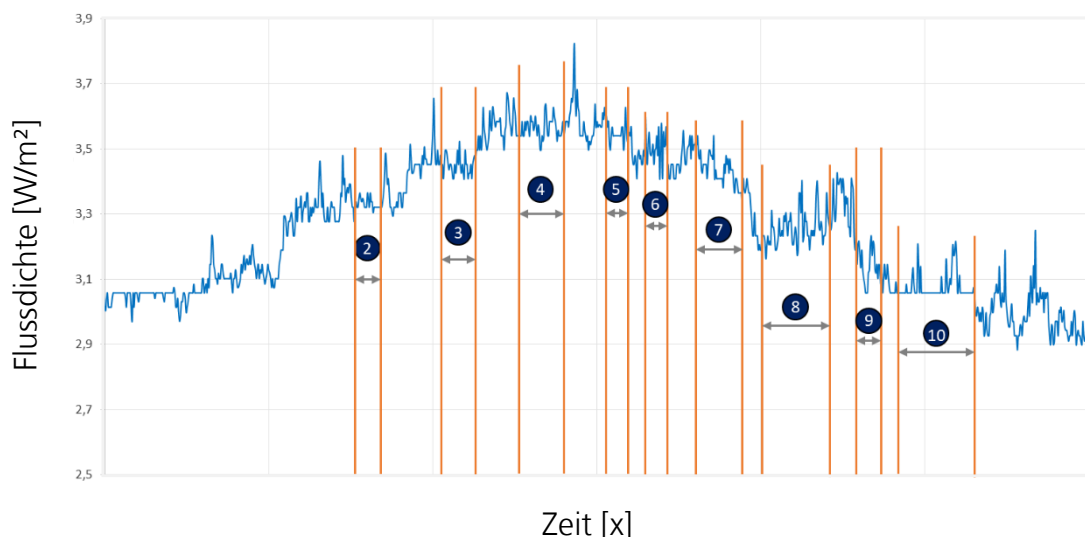


Abbildung 4.20 – Flussdichteverlauf Radiometer 1

Der errechnete Kalibrierfaktor von $1,6 \frac{W}{m^2}$ ist nicht allgemeingültig. Da dieser von der Belichtungszeit und dem Air-Mass-Faktor abhängt, ist dieser nur für den Messzeitraum gültig. Um einen Receiver vollständig zu charakterisieren, sind zusätzliche Messreihen bei unterschiedlichen Air-Mass-Faktoren erforderlich. Dies ist jedoch kein Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit.

Durch die geringe Strahlungsintensität besitzt der Sensorgrundmesswert einen verhältnismäßig hohen Anteil, wodurch die optische Bestimmung eines stationären Zustandes erschwert wird.

4.3 Rohbildaufnahme und Richtungszusammensetzung der Flussdichte durch Defokussierung

In der Messreihe werden neben den Rohbildern die Anteile jeder Gruppe an der Flussdichte bestimmt. Genau wie bei der Fokusverschiebung findet die Messung tagsüber bei Realbestrahlung statt. Es werden die Flussdichteanteile pro Heliostatengruppe und Receiver-Segment ($x_{i,j}$) und das genutzte Rohbild bei Realbestrahlung (g_i) für die Formel F. 3.7 aus der Messreihe generiert.

4.3.1 Durchführung – Rohbild und Defokussierung

Die Defokussierung ist notwendig, um die Bestrahlung anteilig den Heliostatgruppen segmentweise zuzuordnen, welche bei einer realen Bestrahlung verwendet werden. Während einer realen Messung kann so bei der Betrachtung des Rohbildes direkt zugeordnet werden, welcher Mittelwertpixel jeder Gruppe welchen Flussdichteanteil an der Gesamtbestrahlung ausmacht. Zur Durchführung der Defokussierung ist eine annähernd konstante DNI-Intensität erforderlich.

Zuerst werden alle genutzten Heliostaten auf dem Receiver positioniert. Danach wird ein entsprechendes Bild aufgezeichnet. Anschließend wird eine Heliostatengruppe vollständig vom Receiver entfernt und ein weiteres Bild aufgenommen. Die Differenz zwischen den Bildern entspricht der spezifischen Bestrahlung der defokussierten Gruppe ($g_{\text{spezifisch}_{i,j}}$). In allgemeiner Form ist dies in Formel F. 4.7 dargestellt. Dabei entspricht $g_{i,j-1}$ der vorherigen Bildaufnahme und $g_{i,j}$ dem Bild nach der Defokussierung der Heliostatengruppe. Eine Korrektur der Belichtungszeit wird im Folgenden nicht verwendet, da alle Bestrahlungsaufnahmen bei gleicher Belichtungszeit aufgenommen werden.

$g_{\text{spezifisch}_{i,j}} = g_{i,j-1} - g_{i,j}$	F. 4.7
---	--------

Ist die spezifische Bestrahlungsmenge pro Mittelwertsegment und Heliostatengruppe bestimmt, kann der Flussdichteanteil ($x_{i,j}$) gemäß Formel F. 4.8 kalkuliert werden. Nach Formel F. 3.7 wird der Anteil für die Bestimmung der Flussdichte benötigt.

$x_{i,j} = \frac{g_{\text{spezifisch}_{i,j}}}{g_{\rho_{i,j}}}$	F. 4.8
--	--------

Ein weiterer Vorteil der Messung ist, dass Rohbildaufnahmen (g_i) erstellt werden. Diese entsprechen der Differenz bei Bestrahlung aller Gruppen und einem vor der Bestrahlung erzeugten Hintergrundbild ($g_{\text{Hintergrund}}$), welches mit einem Belichtungsfaktor verrechnet wird (F. 4.9). Dieser setzt sich durch die Belichtungszeiten der Rohbildaufnahme ($t_{g,j,\max}$) und des Hintergrundbildes ($t_{\text{Hintergrund}}$) zusammen.

$g_i = g_{j,\max} - g_{\text{Hintergrund}} \cdot \frac{t_{g,j,\max}}{t_{\text{Hintergrund}}}$	F. 4.9
---	--------

Bei der Rohbildaufnahme und der Defokussierung werden die gleichen Heliostatgruppen wie bei der Scanmethode verwendet. Die repräsentativen Heliostaten der Gruppen 4, 6, 8, 10, 11 und 12

werden in verschiedenen Konstellationen jeweils zu dritt auf den Receiver fokussiert. Aufgrund des bereit eingenommenen Sicherheitszustandes des Receivers während der Winterzeit darf maximal mit drei Heliostaten gleichzeitig bestrahlt werden, um eine Überhitzung des Receivers zu verhindern. Insgesamt werden vier Defokussierung-Messungen durchgeführt. Diese sind der *Tabelle 4.11* zu entnehmen. Ziel ist es, dass jede der Gruppen in mindestens zwei Messungen vorkommt. Ein beispielhafter Ablaufplan der Heliostatengruppen 10, 11 und 12 ist in *Tabelle 4.10* dargestellt.

Die CMOS-Kamera wird mittig vor dem HPMS-II Receiver positioniert.

Tabelle 4.10 – Arbeitsablaufplan während einer Messreihe und deren Grund zur Durchführung

Schritt	Grund
1. Aufnahme ohne Bestrahlung	Hintergrundbild ²
2. Aufnahme Bestrahlung 10 11 12	Rohbild
3. Aufnahme Bestrahlung 10 11 12	Bestimmung Anteil 10
4. Aufnahme Bestrahlung 10 11 12	Bestimmung Anteil 11
5. Aufnahme ohne Bestrahlung	Bestimmung Anteil 12 Hintergrund ²

Tabelle 4.11 – Darstellung der vier Messreihen und die dabei verwendeten Heliostaten

Messung	Verwendete Heliostatengruppen
1.	Heliostatengruppen 10, 11, 12
2.	Heliostatengruppen 4, 8, 12
3.	Heliostatengruppen 6, 11, 8
4.	Heliostatengruppen 6, 10, 4

4.3.2 Ergebnis – Rohbild und Defokussierung

Heliostatengruppe 10, 11 und 12:

Der *Abbildung 4.21* sind entzerrte Receiver-Bestrahlungsbilder zu entnehmen. Das Rohbild zeigt ein hintergrundbereinigtes Bestrahlungsbild durch die Heliostatengruppen 10, 11 und 12. Durch das Erstellen von Differenzbildern lassen sich die jeweiligen spezifischen Bestrahlungsbilder erzielen. Diese werden in Grauwerten angegeben und werden zur besseren Vergleichbarkeit auf einen maximalen Wert von 2000 skaliert.

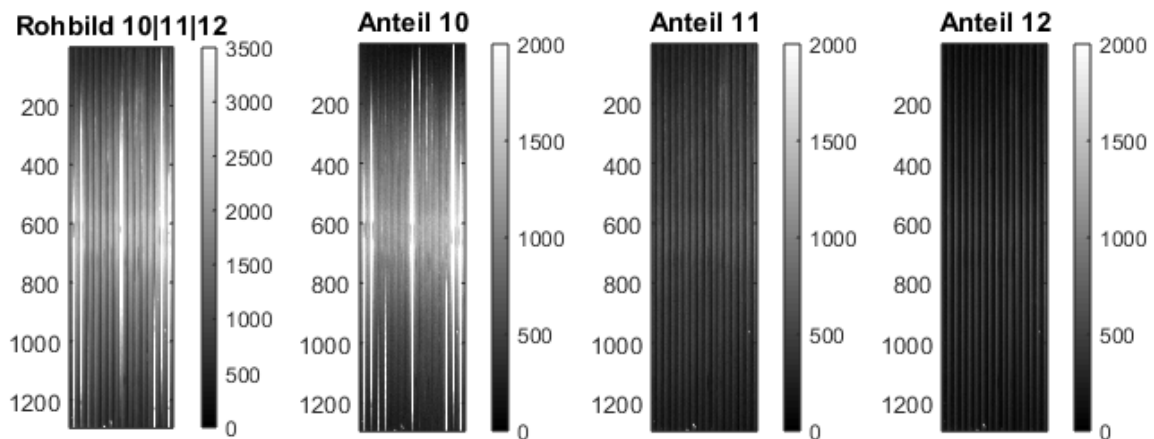


Abbildung 4.21 – Differenzbilder der Heliostatengruppen 10, 11 und 12; Diese sind in Graustufen dargestellt und auf einen maximalen Grauwert von 2000 skaliert

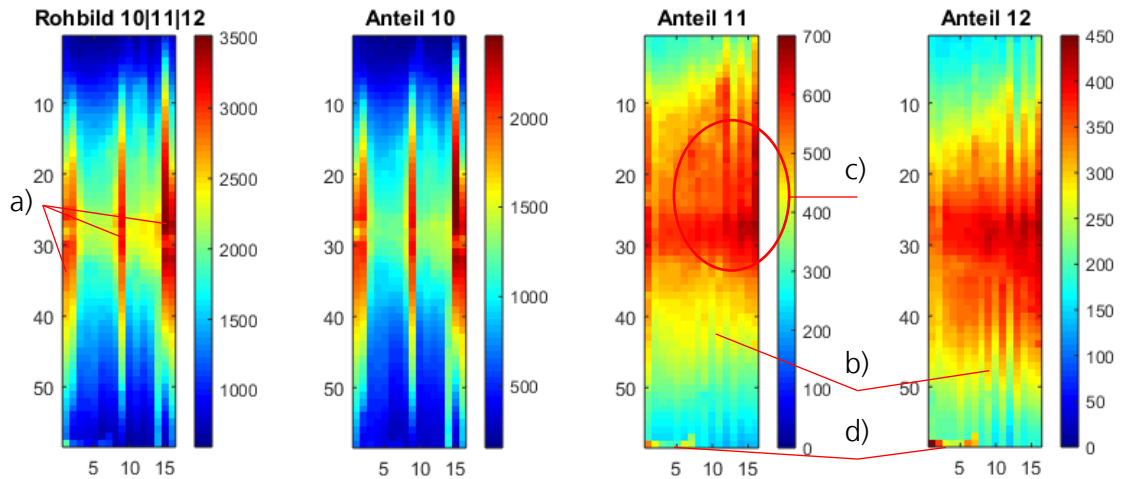


Abbildung 4.22 – Strahlungsanteile bei realer Bestrahlung einzelner Heliostatengruppen auf Mittelwertbilder bezogen

Werden die Differenzbilder in Mittelwertbilder überführt, ergibt sich *Abbildung 4.22*.

a) - Das Rohbild weist eine starke Überbelichtung innerhalb des Receivers auf bedingt durch Gruppe 10. Dies führt dazu, dass der tatsächliche Bestrahlungsanteil fehlerbehaftet ist und es zu Problemen bei der Bestimmung homogener Grauwerte kommt. b) - Sowohl Gruppe 11 als auch Gruppe 12 können Schraffuren zugeordnet werden. c) - In Gruppe 11 ist zu erkennen, dass der Fokus des Heliostaten leicht nach rechts versetzt ist. d) - Die Gruppen 11 und 12 besitzen am unteren Receiver-Rand erhöhte Grauwerte. Das Hintergrundbild wird mit einer Belichtungszeit von 1500 μs aufgenommen. Die Bestimmung der Segmente einer Gruppe erfolgt hingegen bei 500 μs .

Heliostatengruppe 4, 8 und 12:

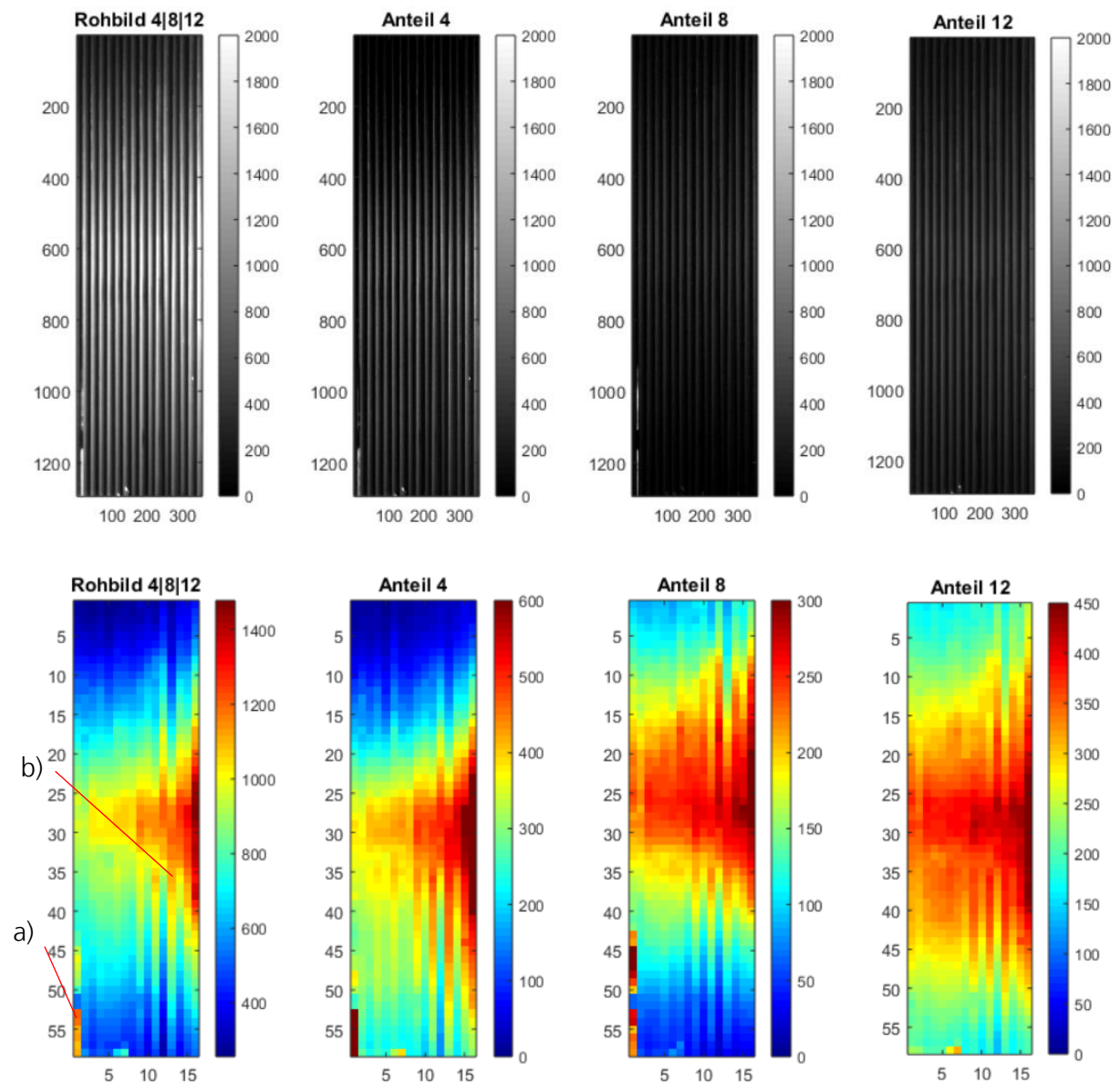


Abbildung 4.23 - Differenzbilder der Heliostatengruppen 4, 8 und 12 bei einer Skalierung von 2000 und Strahlungsanteile bei realer Bestrahlung einzelner Heliostatengruppen auf Mittelwertbilder bezogen

Das Rohbild der Gruppen 4, 8 und 12 zeigt unter a) am unteren linken Rand erhöhte Grauwerte, die im Mittelwertbild zu einer Grauwertigkeit von ca. 1100 führen. Diese lassen sich unter Berücksichtigung der entzerrten Flussdichteanteile der Heliostatengruppe 4 bzw. 8 zuordnen. Alle Gruppen zeigen eine Rechtsverschiebung der jeweiligen Fokussierungen. b) - Das Rohbild weist ebenfalls eine Bildung von Schraffuren auf (Abbildung 4.23).

Heliostatengruppe 6, 11 und 8:

Eine Skalierung von 3000 bezüglich der Grauwerte ist für das Rohbild der *Abbildung 4.24* gewählt. a) – Dem Rohbild sind Überbelichtungen innerhalb des Receivers zu entnehmen, welche der Heliostatengruppe 6 zuzuordnen sind. Die Gruppe 11 ist annähernd homogen und weist keine Unstimmigkeiten auf. b) - Am unteren linken Rand der Gruppe 8 sind auffällige helle Pixel des entzerrten Grauwertbildes zu erkennen. Diese sind im Mittelwertbild c) deutlicher zu erkennen. d) – In der Heliostatengruppe 8 sind Schraffuren zu erkennen. Eine genaue Skalierung des Mittelwertbildes der Heliostatengruppe 6 ist nicht möglich, da die überbelichteten Bereiche das Maximum bestimmen.

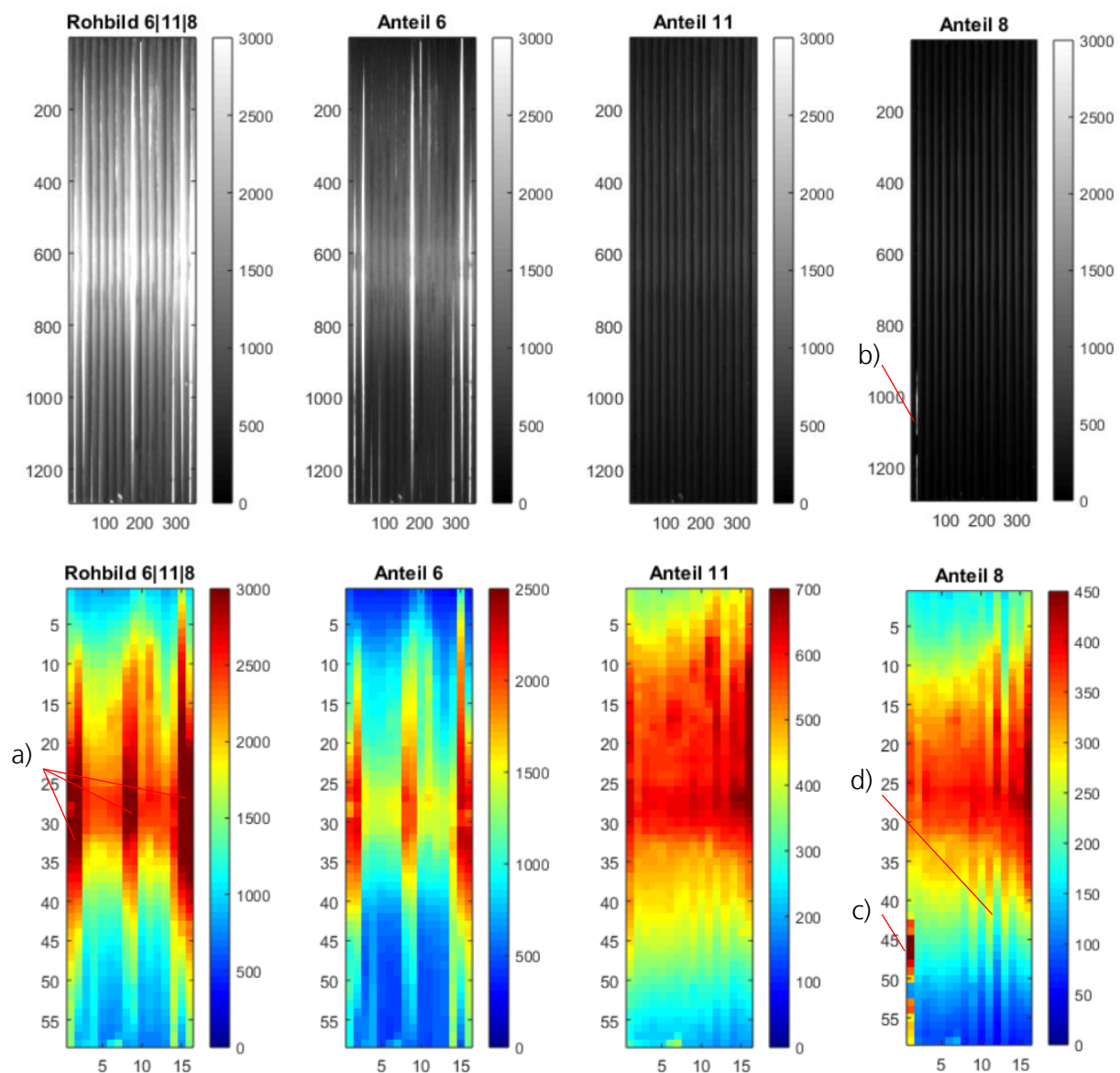


Abbildung 4.24 - Differenzbilder der Heliostatengruppen 6, 11 und 8 bei einer Skalierung von 3000 und Strahlungsanteile bei realer Bestrahlung einzelner Heliostatengruppen auf Mittelwertbilder bezogen

Heliostatengruppe 6, 10 und 4:

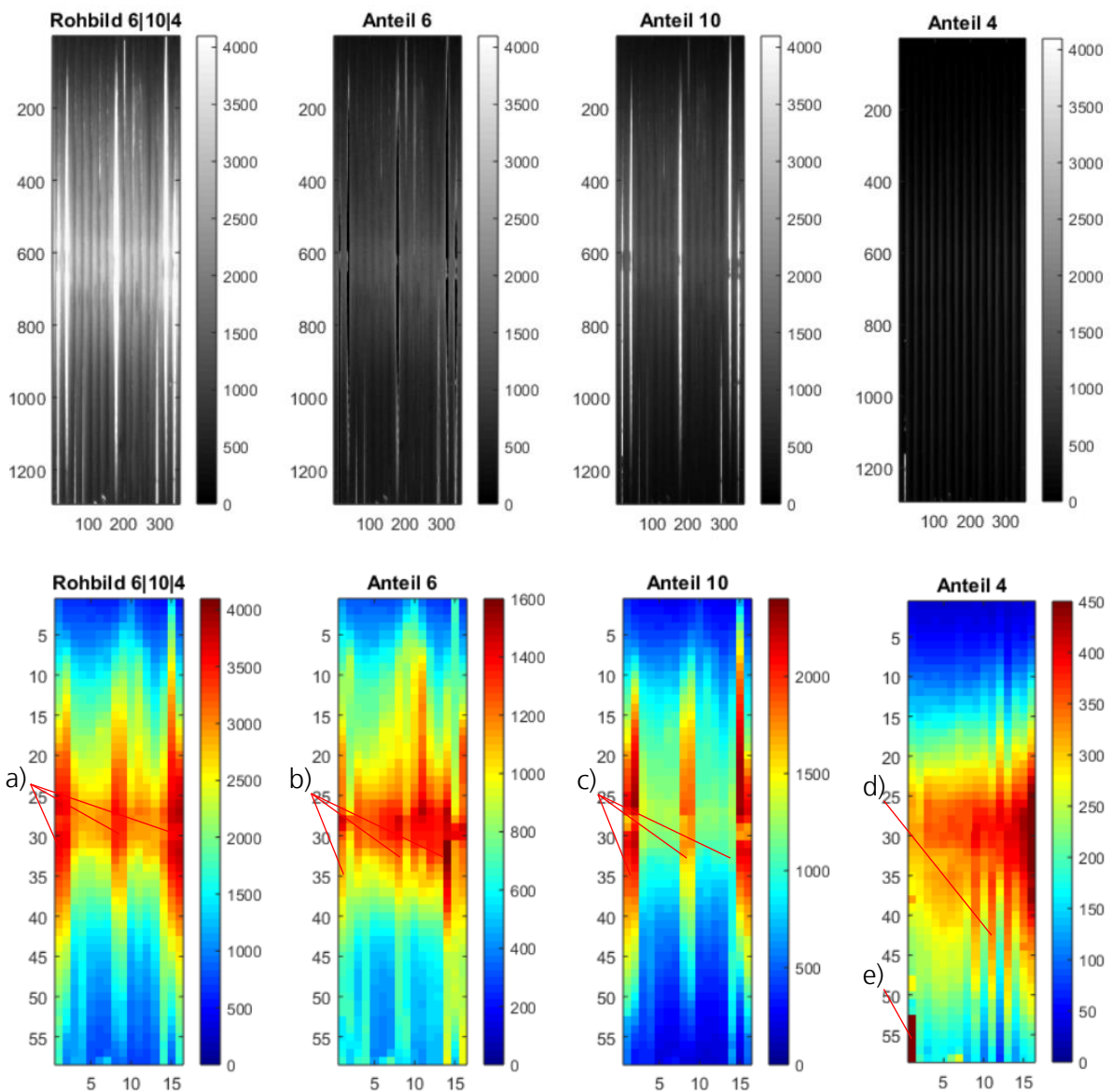


Abbildung 4.25 - Differenzbilder der Heliostatengruppen 6, 10 und 4 bei einer Skalierung von 4096 und Strahlungsanteile bei realer Bestrahlung einzelner Heliostatengruppen auf Mittelwertbilder bezogen

Das Rohbild wird u.a. aus zwei problematischen Heliostatengruppen erstellt (Abbildung 4.25). a) – Eine Überbelichtung des Rohbildes ist zu vermerken. b,c) - Diese können der Heliostatengruppe 6 und 10 zugeordnet werden. Bei der Skalierung wird ein maximaler Grauwert von 4096 gewählt. Dies führt zu starken Überbelichtungen im Receiver. d) – Die Heliostatengruppe 4 weist eine Schraffur auf. e) – Der Anteil 4 besitzt ebenfalls eine Grauerhöhung in der unteren linken Ecke.

4.3.3 Diskussion – Rohbild und Defokussierung

Bedingt durch Schwankungen der DNI-Intensität werden die Messungen insgesamt viermal durchgeführt. Die erste Messreihe weist starke Schwankungen auf. Diese Schwankungen lassen sich nur bedingt durch einen Kompensationsfaktor ausgleichen. Grund ist, dass zwischen der DNI-Intensität und dem resultierenden Grauwert des Bildes nur ein begrenzter linearer Zusammenhang besteht. Die Messreihen drei und vier werden um 11 Uhr bzw. 13 Uhr aufgezeichnet. Die Ergebnisse werden gemittelt, um mögliche Cosinus-Effekte auszugleichen. Außerdem weisen beide Messungen nahezu konstante DNI-Intensitäten auf, sodass sich ein maximaler Kompensationsfaktor von 1,019 ergibt.

Die aufgenommenen Rohbilder von jeweils drei Heliostaten, werden als Rohbild der Flussdichteverteilung gewählt. Problematische Bereiche der Einstrahlung auf dem Rohbild lassen sich durch Defokussierung leicht einer Heliostatengruppe zuordnen.

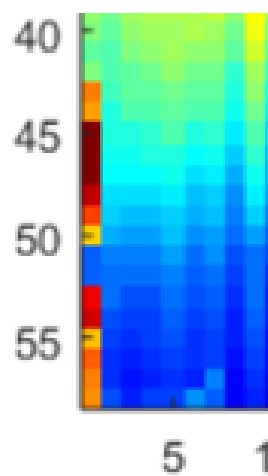


Abbildung 4.26 – Fehler der Fokusverschiebung

Die ausgeprägteren Grauwerte im unteren Receiver-Bereich sind beispielhaft für Heliostaten-Gruppe 8 (Abbildung 4.26). Diese sind auf die ROI-Berechnung zurückzuführen. Da der ROI statisch die spezifischen Mittelwerte berechnet, besteht die Gefahr das relevante Pixel ausgelassen werden. Irrelevante Pixel fallen dann in die ROI. Dies führt zu einer Verfälschung und Informationsminderung des Mittelwertbildes. Darüber hinaus beeinflusst die ROI auch die Schraffur. Da der Receiver durch die Einstrahlung und die daraus resultierende thermische Belastung verformt wird, sitzt das ROI-Raster nicht über den eigentlichen Receiver-Rohren. Entscheidend für das resultierende Bild ist zusätzlich die manuelle Bestimmung der Ecken des Receivers, von welchen aus die Entzerrung vorgenommen wird.

5 Flussdichteverteilung am HPMS-II-Receiver

Die Flussdichteverteilung setzt sich aus den vorherigen Ergebnissen der Abschnitte zusammen und wird im Folgenden gemäß Formel F. 3.7, des Abschnitts „3.4 Flussdichtemessung mittels Scan-Methode“ verrechnet.

$E_i = g_i \cdot \underbrace{\frac{1}{\sum_j x_{i,j} \cdot \frac{\rho_{i,j}}{\bar{\rho}}}}_{\text{Korrektur}} \cdot \underbrace{\frac{1}{\bar{\rho} \cdot k}}_{\text{Kalibrierung}}$	F.3.7
--	-------

Die Grauwerte im Rohbild (g_i) sowie der spezifische Flussdichteanteil ($x_{i,j}$) ergeben sich aus dem Abschnitt „4.3 Rohbilddaufnahme und Richtungszusammensetzung der Flussdichte durch Defokussierung“ und werden bei einer Realbestrahlung bestimmt. Die Reflexions-Korrektur ergeben sich durch die Aufnahmen der Nachtmessung des Abschnitts „4.1 Ermittlung der Reflexionseigenschaften“. Für die Kalibrierung der Flussdichte (k) wird die Messreihe der Fokusverschiebung des Kapitels „4.2 Kalibrierung mittels Fokusverschiebung“ genutzt. Alle Berechnungen erfolgen innerhalb einer MATLAB-Umgebung.

Um die Receiver-Entzerrungspunkte der verschiedenen Messreihen zu prüfen, wird in *Abbildung 5.1* die Wichtigkeit der ROI-Bildung gezeigt. Der Versatz der dargestellte Flussdichteverteilung der problembehafteten Heliostatengruppe 10 kann in der Abbildung entnommen werden.

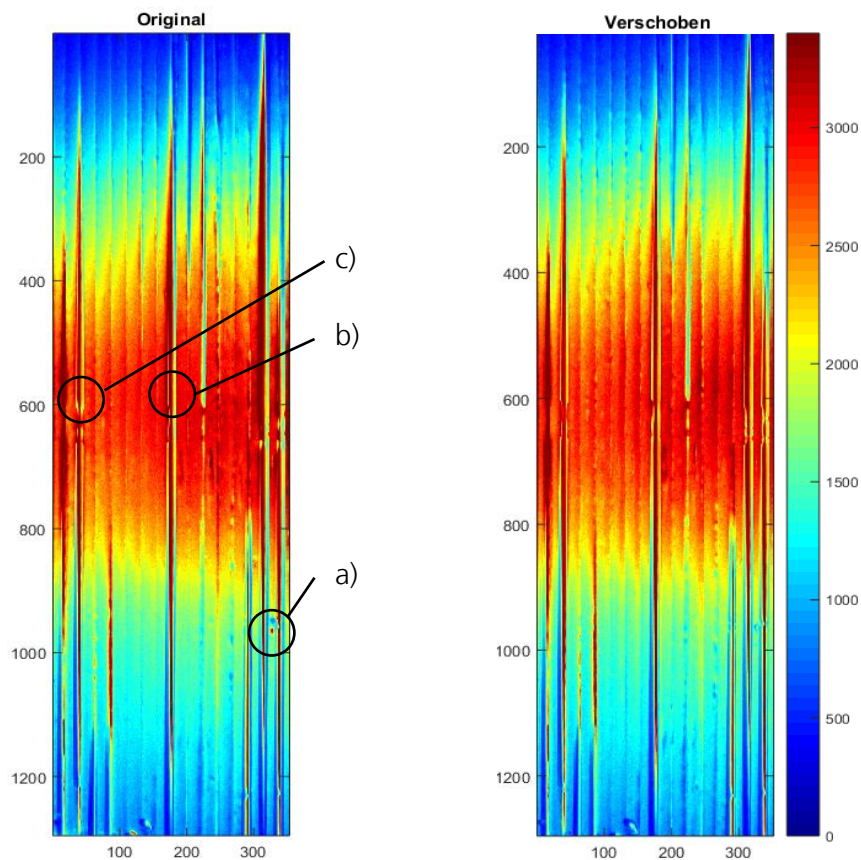


Abbildung 5.1 – Links: originale Darstellung der spezifischen Flussdichteverteilung der Heliostatengruppe 10 mit Markern. Rechts: korrigiertes, verschobenes spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppe 10

Es kommt es zur Korrektur. Auffällige Bereiche zeigen einen horizontalen bzw. vertikalen Versatz der verrechnenden Matrizen, wodurch die Bildkorrektur bei der Berechnung der Flussdichte Berechnungsfehler im Ergebnisbild generiert. Die Markierung a) liegt unterhalb der zu korrigierenden Koordinaten. In der verschobenen Aufnahme wird das Bild so korrigiert, dass die Markierung nicht mehr zu erkennen ist. Das Gleiche ist bei Punkt b) und c) zu beobachten.

Als Ursache des Fehlers ist die händische Positionierung der Kamera auszumachen. Anders als bei Matthies, ist die Kamera nicht fest installiert und wird bei jeder Messung auf einem Stativ manuell neu positioniert. Die Auswahl der Receiver-Ecken kann daher nicht für alle erstellten Bilder verwendet werden und muss für jede Messreihe separat bestimmt werden. Wie in *Abbildung 5.2* zu sehen, werden für die Entzerrung der Maximalbilder der Nachtmessung andere Receiver-Eckpunkt bestimmt als für eine Realbestrahlung. In Rot sind die Eckenauswahl der Nachtmessung und in Grün der Realbestrahlung markiert. Dadurch werden die Maximalbilder unterschiedlich entzerrt und es kommt zu Verschiebungen zueinander.

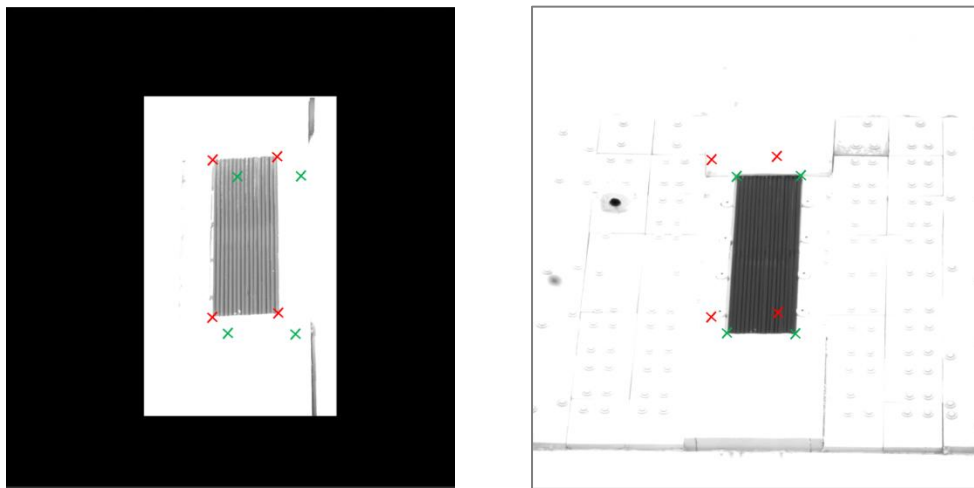


Abbildung 5.2 – Die händisch ausgewählten Receiver-Ecken im Vergleich zueinander. Links: Nachtmessung. Rechts: Fokusverschiebung

Auf die Berechnung der Flussdichteverteilung **nicht** ROI-bereinigter Aufnahmen wird im Folgenden nicht mehr eingegangen.

5.1 Flussdichteverteilung

5.1.1 Heliostatengruppe 10, 11 und 12

Der *Abbildung 5.3* sind die korrigierten gruppenspezifischen Flussdichteverteilungen der Realbestrahlung zu entnehmen. Diese sind gemäß Formel 3.7 berechnet.

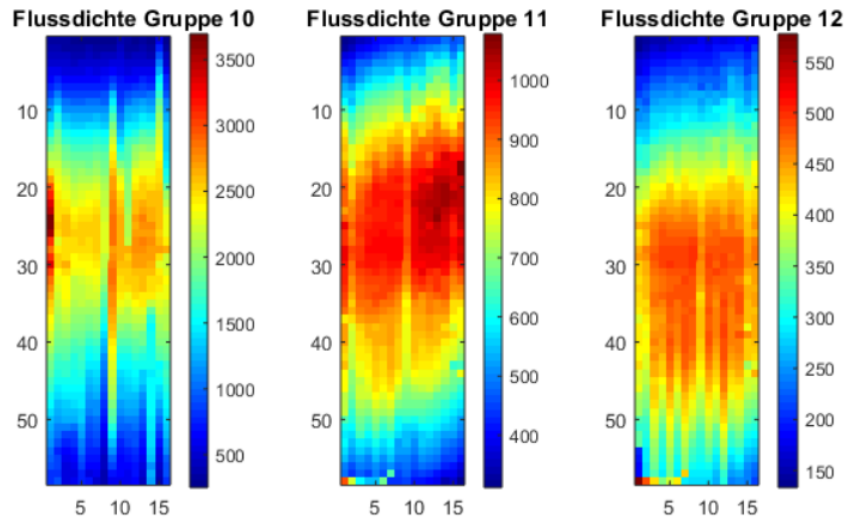


Abbildung 5.3 – spezifische Flussdichteverteilungsbilder der Heliostatengruppen 10, 11 und 12 des ersten Rohbildes

Um die tatsächliche Flussdichteverteilung zu erhalten, werden die gezeigten Ergebnisse summiert (*Abbildung 5.4*) und anschließend interpoliert. Durch die Darstellung der spezifischen Flussdichten kann die Überbelichtung der Heliostatengruppe 10 zugeordnet werden. Idealerweise sollte die Überbelichtung so kompensiert werden, dass sich eine homogene Flussdichteverteilung ergibt. Die Grauerwerthöhungen im unteren Bereich der spezifischen Flussdichten der Heliostatengruppen 11 und 12 sind in der tatsächlichen Flussdichteverteilung minimal und in der interpolierten Darstellung kaum sichtbar. Auch die Schraffur ist weniger stark ausgeprägt.

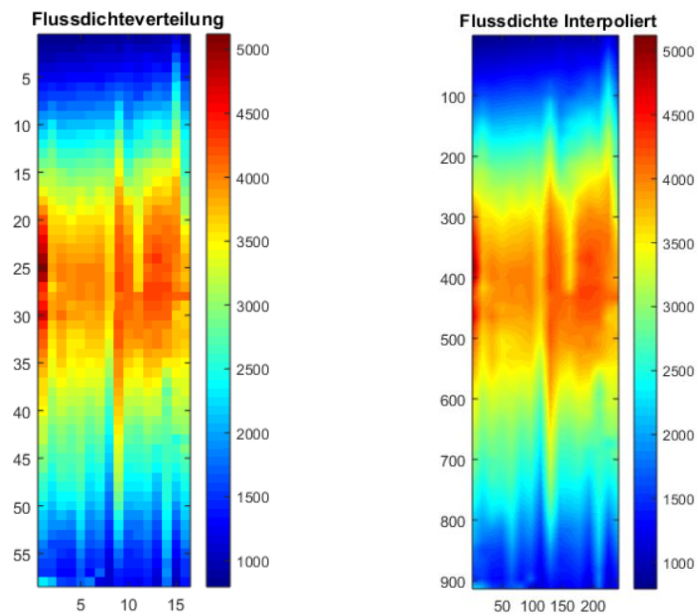


Abbildung 5.4 – Flussdichteverteilung des Rohbildes 1 der Heliostatengruppen 10, 11 und 12 als Mittelwertbild und als interpolierte Darstellung

Dennoch lassen sich drei Streifen in der Aufsummierung erkennen. Der rot dargestellte Teil am linken Rand der Gruppe 10 wird durch die Interpolation ebenfalls deutlich reduziert. Insgesamt kann der interpolierten Darstellung eine maximale Flussdichte von ca. $4000 \frac{W}{m^2}$ entnommen werden. Durchschnittlich wird eine Flussdichte von $2795 \frac{W}{m^2}$ errechnet.

5.1.2 Heliostatengruppe 4, 8 und 12

Abbildung 5.5 zeigt, dass die Flussdichteverteilung annähernd homogen ist. Es gibt keine Überbelichtung innerhalb des Receivers. Stattdessen ist die Schraffur der Flussdichteverteilung

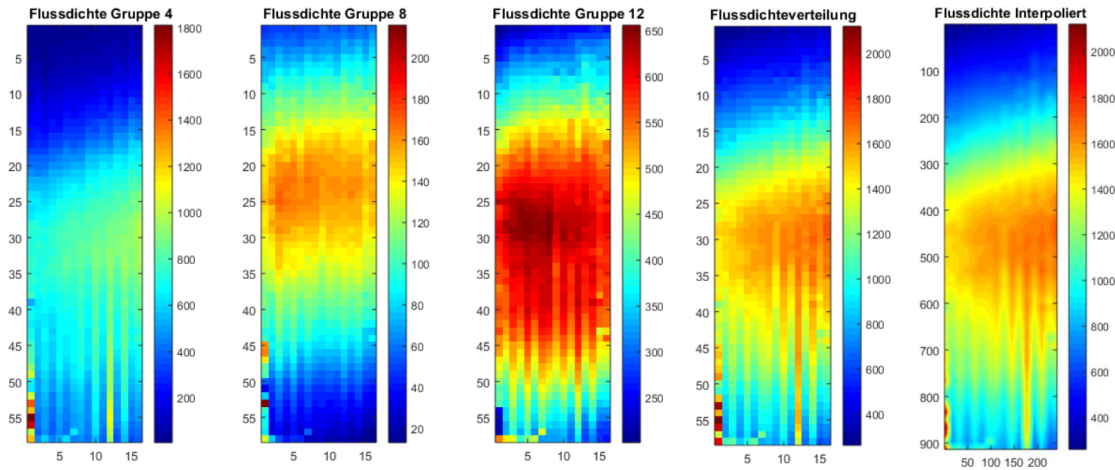


Abbildung 5.5 - spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppen 4, 8 und 12 und der tatsächlichen Flussdichteverteilung und deren Interpolation

deutlich sichtbar. Zusätzlich ist am unteren linken Rand ein starker Anstieg der Grauwerte zu erkennen. Dieser resultiert aus der Heliostatengruppe 4 und ist in *Abbildung 4.23* des Abschnitts „4.2.2 Ergebnis – Fokusverschiebung“ zu erkennen. Mit ca. $1500 \frac{W}{m^2}$ wird das Maximum der Flussdichte errechnet. Über die gesamte Receiver-Fläche gemittelt ergibt sich eine Flussdichte von $1142 \frac{W}{m^2}$.

5.1.3 Heliostatengruppe 6, 11 und 8

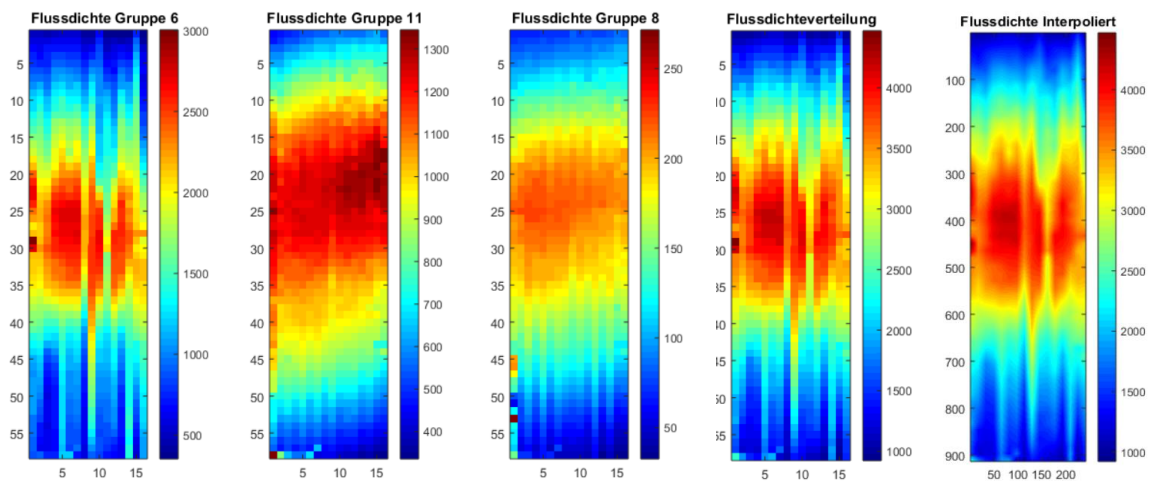


Abbildung 5.6 - spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppen 6, 11 und 8 und der tatsächlichen Flussdichteverteilung und deren Interpolation

Die Heliostatengruppen 11 und 8 zeigen fast völlig homogene Einstrahlungen (Abbildung 5.6). Nur der untere und der linke Rand der Gruppe 11 weisen erhöhte Grauwerte auf. Gruppe 8 zeigt eine Schraffur. Auch im unteren linken Bereich ist eine Zunahme der Grauwerte zu erkennen. Das spezifische Flussdichtebild der Heliostatengruppe 6 ist durch die Reflexionskorrektur so korrigiert, dass die überbelichteten Bereiche weniger stark ausgeprägt sind, aber dennoch ist die Flussdichteverteilung inhomogen. Das ist auch in der tatsächlichen Flussdichteverteilung zu erkennen. Hier hat die Gruppe 6 den größten Einfluss. Die problematischen Bereiche der Gruppen 11 und 8 sind in der realen Flussdichteverteilung nicht mehr sichtbar. Das Maximum der interpolierten Flussdichte liegt bei ca. $4200 \frac{W}{m^2}$. Im Mittel liegt sie bei $2630 \frac{W}{m^2}$.

5.1.4 Heliostatengruppe 6, 10 und 4

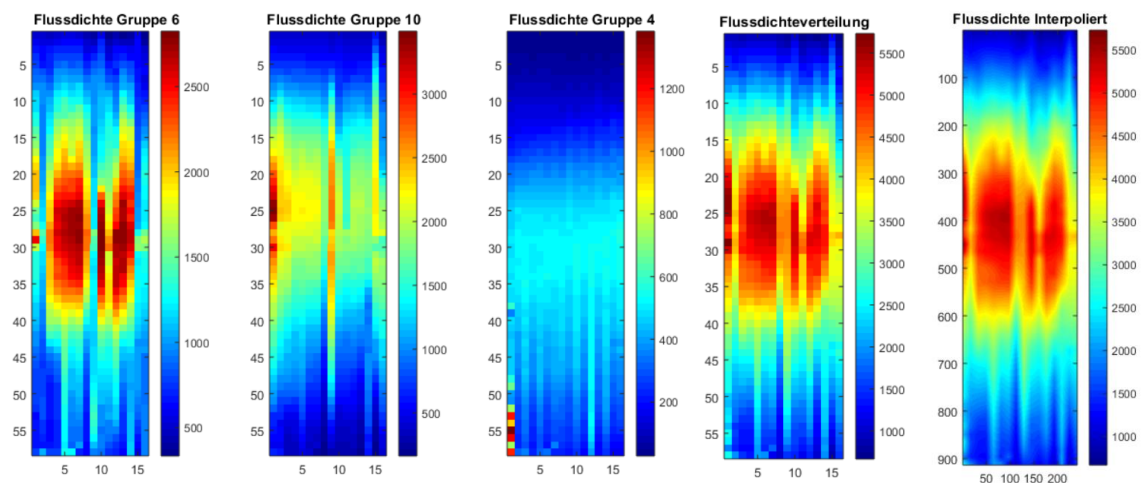


Abbildung 5.7 - spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppen 6, 10 und 4 und der tatsächlichen Flussdichteverteilung und deren Interpolation

Abbildung 5.7 zeigt die spezifischen Flussdichteverteilungen der Heliostatengruppen 6, 10 und 4. Dabei weisen die Gruppen 6 und 10 jeweils Überbelichtungen innerhalb des Receivers auf. Die Heliostatengruppe 6 wird wiederum durch die Reflexionseigenschaften so korrigiert, dass die überbelichteten Bereiche eliminiert werden. In diesem Fall sind sie jedoch zu stark korrigiert. Ähn-

liches lässt sich aus Gruppe 10 entnehmen. Hier werden zwei ausgeprägtere Streifen herausgenommen. Gruppe 4 hat einen sehr geringen Anteil an der gesamten Flussdichteverteilung. Am linken Rand ist eine starke Grauwertzunahme zu erkennen. Dies hat jedoch kaum Einfluss auf die eigentliche Flussdichteverteilung. Eine gewisse Homogenität ist zu erkennen, was sich nach der Interpolation verstärkt. Die Streifung ist trotz der Interpolation deutlich sichtbar. Es wird eine maximale Flussdichte von ca. $5500 \frac{W}{m^2}$ festgestellt. Im Durchschnitt liegt sie bei $3074 \frac{W}{m^2}$.

5.2 Diskussion – Flussdichteverteilung

Die Überbelichtung, die durch den Strahlenschutz innerhalb des Receivers verursacht wird, verhindert die Erzeugung einer homogenen Flussdichteverteilung durch die Reflexionskorrektur. Die maximale Grauwertkapazität von 4096, die in den überbelichteten Bereichen erreicht wird, ist ein Resultat des Einsatzes eines 12-Bit-Sensors. Die Überbelichtung verhindert die Bildung eines notwendigen Gradienten für eine Korrektur. Es ist daher wichtig durch den Blooming-Effekt entstehende Überbelichtungen zu vermeiden.

Es gilt zu beachten, dass die Generation von Mittelwertbildern, die abhängig von der Region of Interest (ROI) sind, mit einem systematischen Fehler verbunden sind. Die thermische Belastung der Receiver-Rohre führt zu deren Verformungen, wodurch relevante Pixel aus dem statischen ROI-Raster ausgeschlossen und irrelevante Pixel in die Berechnung einbezogen werden. Dies führt zu einer Verfälschung der Reflexionskorrektur.

Die häufig an den Rändern beobachteten Anstiege von Grauwerten sind ein Resultat der Entzerrung des Receivers, welche bei jeder Messung manuell durchgeführt werden muss. Dies führt zu einem Versatz der zu verrechnenden Matrizen und kann auch an der Abschabung des Receivers erkannt werden, wie in *Abbildung 5.8* demonstriert. Obwohl diese durch Interpolation reduziert werden, bleiben sie sichtbar. Dieser Fehler könnte durch die Implementierung einer fest installierten Kamera reduziert werden.

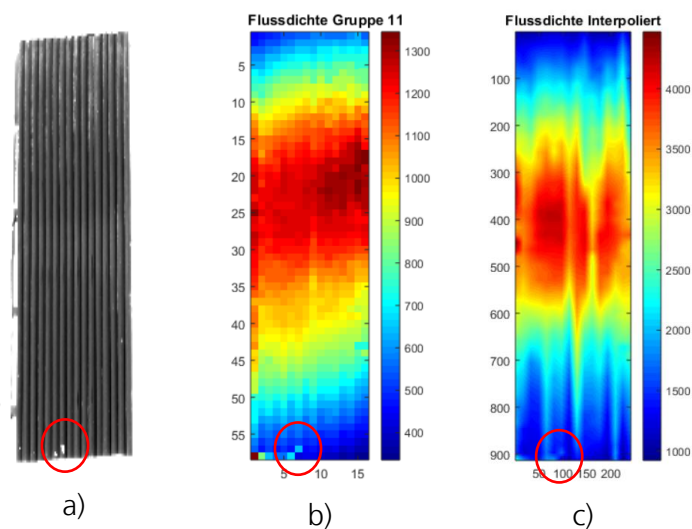


Abbildung 5.8 – Darstellung der Abschabung des Receivers. a) Maximalbild der Heliostatengruppe 11. b) spezifische Flussdichteverteilung der Heliostatengruppe 11 der Messung 3; c) Flussdichteverteilung der Messung 3

6 Verbesserung von Hard- und Software

Wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt, kommt es bei der Berechnung der Flussdichteverteilung der Gruppen 6 und 10 zu starker Überbelichtung innerhalb des Receivers. Dieser Abschnitt befasst sich mit der Anpassung von Hard- und Software, um die Überbelichtungen zu kompensieren. Zusätzlich wird die Ausprägung des Blooming-Effektes bei der Scannung untersucht. Das größte Potenzial wird in der Bestimmung der relativen Reflexionseigenschaften ($\frac{\rho_{i,j}}{\rho}$) gesehen.

6.1 Hardwareanpassung - Reflexionskorrektur

Um Methoden zur Verringerung der Überbelichtung innerhalb des Receivers zu erproben wurden weitere Nachtmessungen durchgeführt. Die Scans werden von nur einer Heliostatengruppe aufgenommen, um einen Vergleich zu ermöglichen. Die Messungen erfolgen durch die Scheinwerferbestrahlung aus der Heliostatengruppe 6, aufgrund der ausgeprägten Überbelichtung in der ersten Nachtmessung.

6.1.1 Durchführung – Hardwareanpassung

Die Scannung aus nur einer Position erfolgt, um einen Vergleich der getroffenen Maßnahmen zueinander bewerten zu können. Die Vorbereitungen entsprechen genau denen der ersten Nachtmessung. In *Abbildung 6.1* ist dieser Effekt des Receivers sowie ein annähernd ideales Maximalbild der Gruppe 11 dargestellt. Zwei Ansätze werden verfolgt.

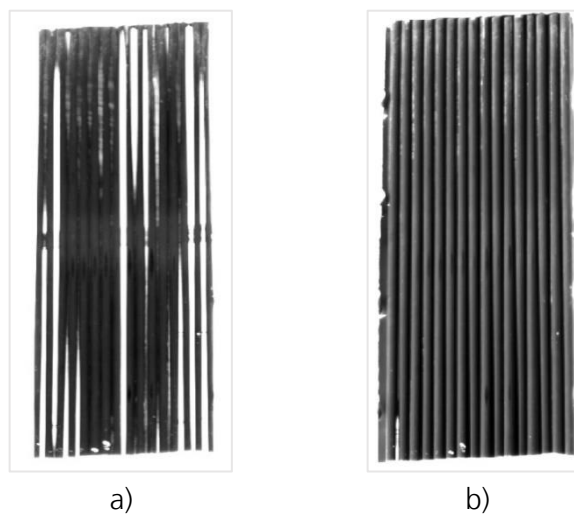


Abbildung 6.1 – a) stark ausgeprägte Überbelichtung und Blooming-Effekt des Maximalbilds der Heliostatengruppe 6, b) normales Maximalbild der Heliostatengruppe 11

Belichtungsvariation

Zuerst werden Scans bei unterschiedlichen Belichtungszeiten erstellt. Bei dem Bild mit der geringsten Belichtungszeit muss sichergestellt sein, dass es zu **keiner Unterbelichtung** der Receiver-Rohre kommt, sodass die minimalen Grauwerte über 100 liegen. Bei der Aufnahme mit der höchsten Belichtungszeit muss eine gerade so eintretende **Überbelichtung** erfolgen, einem Grauwert von 4096 entsprechend. Eine weitere Belichtung muss so gewählt werden, dass gerade **keine Überbelichtung** innerhalb des Receivers durch den Strahlungsschutz erfolgt. Nachdem die Maximalbilder erstellt sind, werden sie in Mittelwertbilder gewandelt und wie in Abschnitt „4.1.1 – Korrektur der Reflexionseigenschaften“ nach Formel F. 4.3 verrechnet, um ein spezifisches Ergebnisbild zu erhalten.

Für den Vergleich der resultierenden Mittelwertbilder untereinander, muss der jeweilige Belichtungsfaktor (bf_x) mit dem Scan multipliziert werden. Dieser Faktor ergibt sich durch die Formel F. 6.1 und bezieht sich auf die kürzeste Belichtungszeit (bt_1).

$bf_x = \frac{bt_1}{bt_x} [-]$	F. 6.1
--------------------------------	--------

Für den Nachweis des Blooming-Effektes wird mittels eines MATLAB-Programmes bei dem Bild mit der geringsten Belichtungszeit klar definiert, welche starkbelichteten Bereiche innerhalb des Receivers nicht zu diesem, sondern zum Strahlungsschutz, gehören. Mit dem Bild der höchsten Belichtungszeit wird gleich verfahren. Anschließend werden die Bereiche voneinander subtrahiert. Somit ist der Zuwachs der irrelevanten Pixel bestimmbar. Idealerweise stimmen die Bereiche exakt überein, sodass kein Zuwachs vermerkt werden kann. Die zusätzlich entstandenen Überbelichtungen beweisen und zeigen den Blooming-Effekt.

Positionsvariation

Als zweiter Ansatz der Hardwareoptimierung wird die Geometrie des Receivers genutzt, um eine Überbelichtung innerhalb des Receivers zu verhindern. Der Receiver besteht aus insgesamt 16 Receiver-Rohren mit einem freien Zwischenraum von 1 cm der Rohre zueinander. Es kommt daher bei einer Bestrahlung der Reihen mit niedrigem Zenitwinkel zu einer Überbelichtung innerhalb des Receivers. Der Lichtstrahl trifft auf den Strahlenschutz zwischen den Receiver-Rohren, welche das einfallende Licht diffus reflektieren. Fällt die Strahlenschutz-Reflexion auf den Sensor der Kamera, kommt es zu einer Blooming-bedingten Überbelichtung innerhalb des Receivers. Wie in *Abbildung 6.2* zu sehen, wird durch den parallelen Versatz der Kamera die kritische rote Zone verlassen. In dem grünen Bereich kommt es zu keiner Überbelichtung. Der gelbe Bereich ist eine Prognose, in welchem es durch thermische Verformung der Receiver-Rohre ebenfalls zu einer Überbelichtung kommen kann. Einen möglichen Kameraversatz betrifft die Heliostatengruppen 2, 6, 10 und 14 (*Abbildung 4.12*).

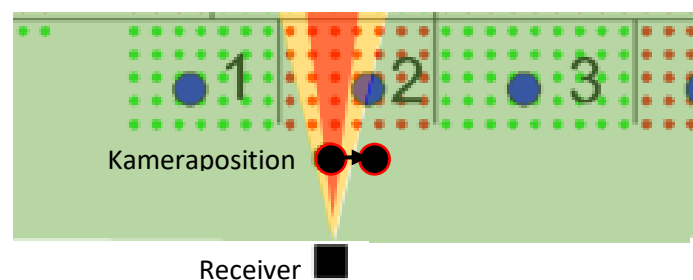


Abbildung 6.2 – Darstellung der Kameraposition-Variation in der Zonierung der überbelichteten Bereiche

6.1.2 Ergebnisse – Hardwareanpassung – Belichtungsvariation

Es werden für die Belichtungsvariationen die in *Tabelle 6.1* dargestellten Belichtungszeiten gewählt. Zusätzlich sind die Auswahlkriterien der jeweiligen Belichtungszeit und die sich errechnenden Belichtungsfaktoren aufgelistet.

Tabelle 6.1 – Übersicht der Messreihe zu Belichtungsvariation mit der jeweiligen Belichtungszeit, Auswahlkriterium und spezifischen Belichtungsfaktor

Messung	Belichtungszeit [μs]	Auswahlkriterium	Belichtungsfaktor
1	4000	Keine Unterbelichtung	1
2	6500	-	0,62
3	9000	-	0,44
4	12500	Keine Überbelichtung	0,32
5	15000	Überbelichtung	0,27

Wie der *Abbildung 6.3* zu entnehmen, werden alle Scans mit dem Belichtungsfaktor verrechnet und so skaliert, dass Sie optisch besser erkennbar sind. Das Bild a) zeigt das Maximalbild bei einer Belichtungszeit von 4000 μs und wird unter b) hochskaliert. Unter c) ist das überbelichtete Maximalbild dargestellt. Optisch ist kaum ein Unterschied zwischen dem hochskalierten und dem überbelichteten Maximalbild zu erkennen.

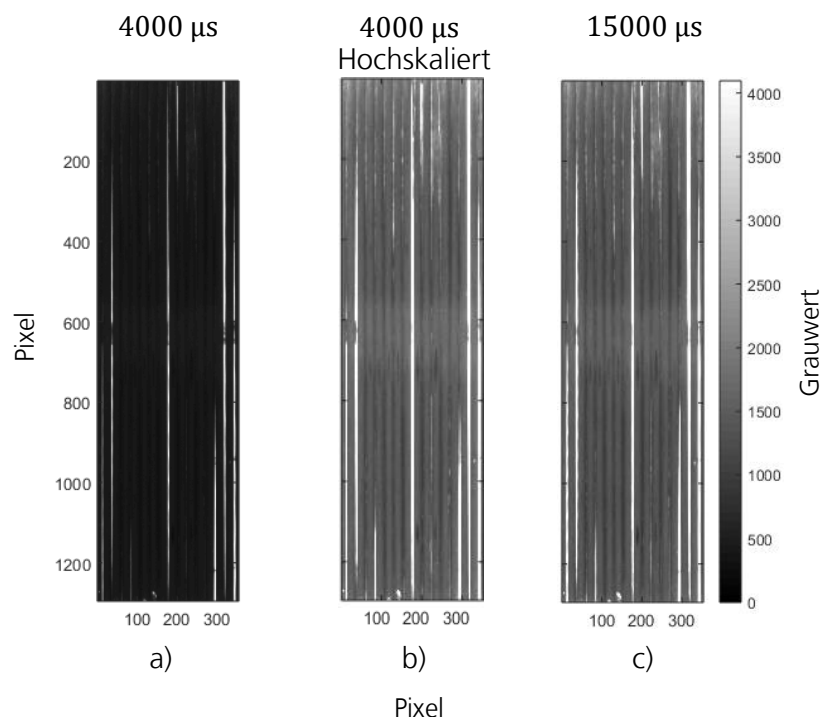


Abbildung 6.3– Übersicht der Maximalbilder bei 4000 μs , skaliert 4000 μs und 15000 μs

Die Maximalbilder werden zur besseren Veranschaulichung unkorrigiert, sprich ohne einen Belichtungsfaktor, in ein Mittelwertbild verrechnet. Die in *Abbildung 6.4* dargestellten Mittelwertbilder sind in Falschfarben dargestellt. Die Graustufen nehmen mit steigendem Belichtungsfaktor zu. Die in der Mitte befindende Abnutzung des Receivers kann am deutlichsten der Belichtungszeit von 15000 μs entnommen werden. Alle Mittelwertbilder weisen Streifenbildung auf.

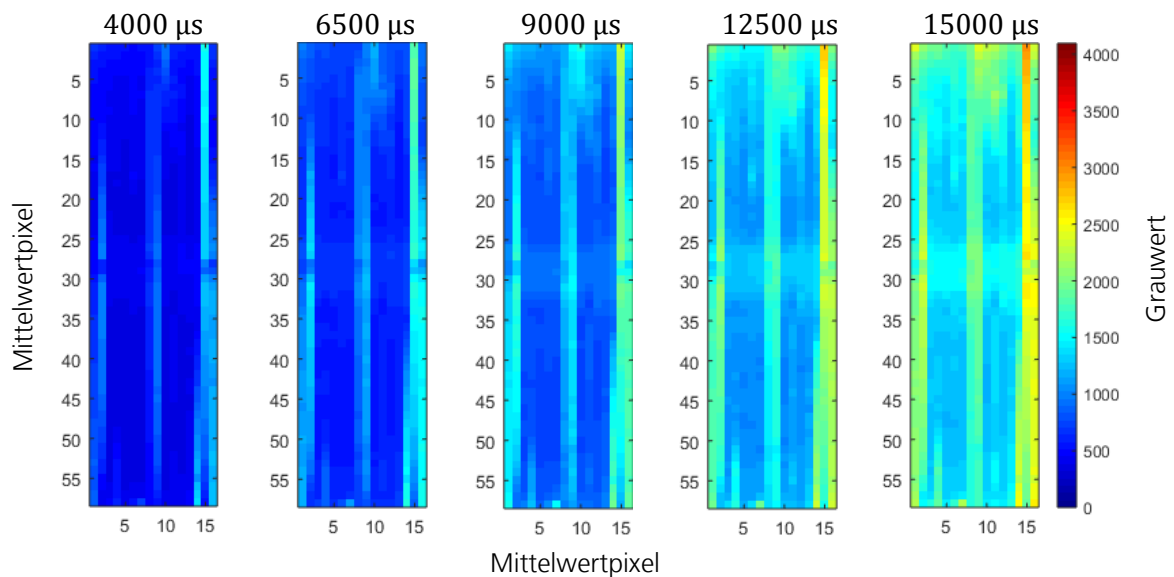


Abbildung 6.4 – Unkorrigierte Mittelwertbilder der fünf Scans 4000 μs ; 6500 μs ; 9000 μs ; 12500 μs ; 15000 μs

Bei der Verrechnung der Belichtungsfaktoren und einer Skalierung der Grauwertskala der *Abbildung 6.5* ist klar ersichtlich, dass die Überbelichtung bei einer Belichtungszeit von 4000 μs den größten Einfluss auf das Mittelwertbild und somit auf die Reflexionskorrektur hat. Mit steigender Belichtungszeit nimmt die Differenz von minimalen und maximalen Mittelwertpixel einer Belichtung ab.

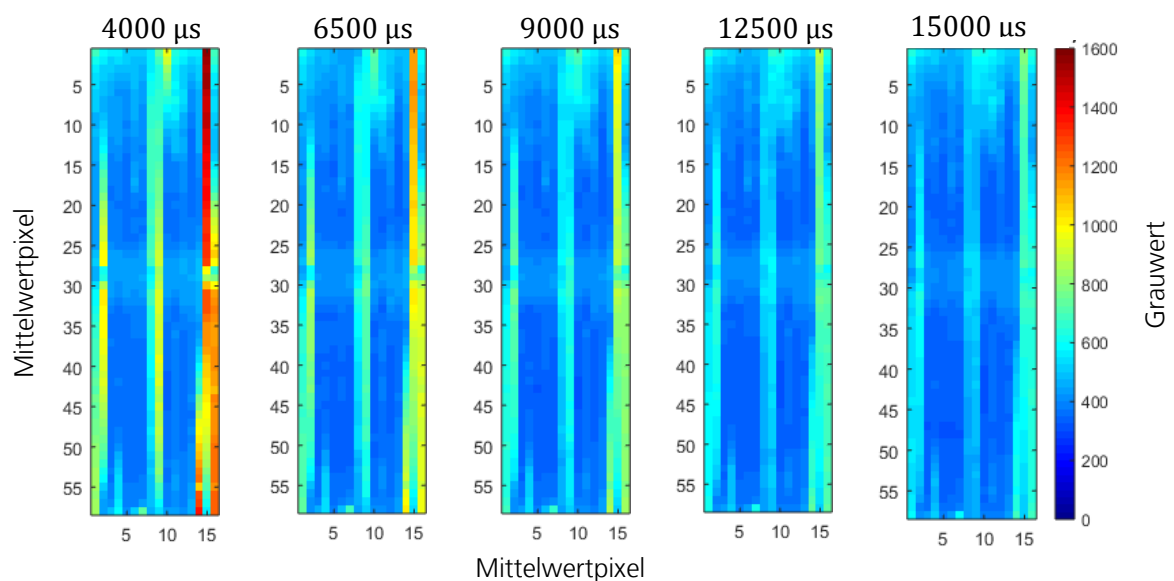


Abbildung 6.5 – Korrigierte Mittelwertbilder der fünf Scans 4000 μs ; 6500 μs ; 9000 μs ; 12500 μs ; 15000 μs ; zusätzlich werden die Grauwerte skaliert

Werden die Mittelwertbilder mit den jeweiligen Rohbildern verrechnet, ergibt sich die Veränderungen gemäß *Abbildung 6.6*. Das Ergebnisbild der kleinsten Belichtungsstufe zeigt im Vergleich zu allen anderen Belichtungszeiten die homogenste Darstellung. Eine vollständige Bereinigung der überbelichteten Bereiche ist durch die Belichtungsvariation aktuell nicht umsetzbar.

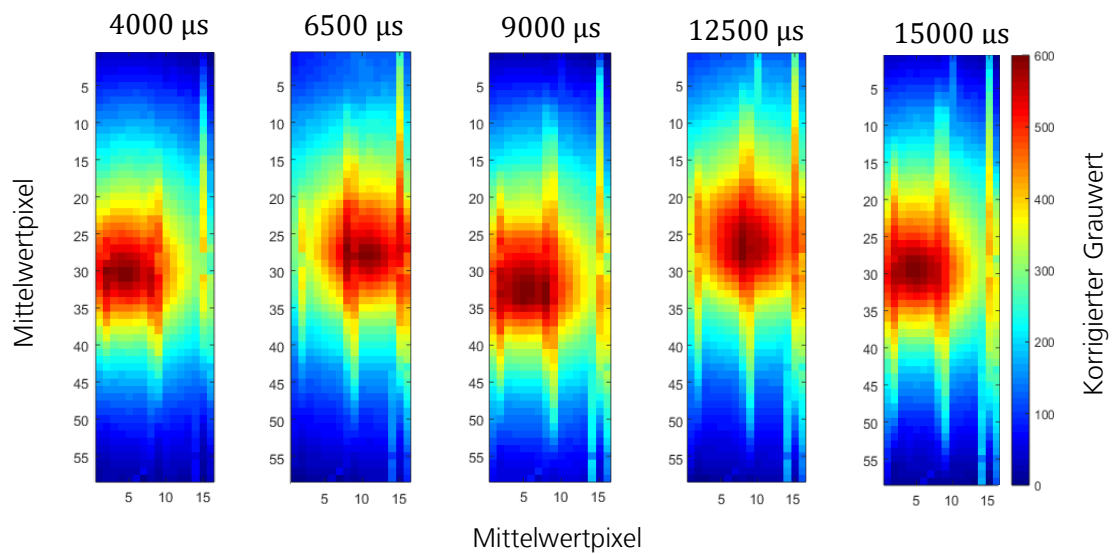


Abbildung 6.6 – Spezifische Ergebnisbilder der unterschiedlichen Belichtungszeiten

Die *Abbildung 6.7* zeigt den Nachweis, dass es trotz des CMOS-Sensors zum Blooming kommt. Dargestellt ist der Zuwachs der überbelichteten Pixel von kleinster zu größter Belichtungszeit. Die Pixel der Maximalbilder, welche über einem Schwellenwert von 3900 liegen, werden einbezogen. Pixel-Bereiche der längsten und kürzesten Belichtungszeit werden anschließend subtrahiert. In den roten Bereichen bleibt der Überbelichtungszuwachs erhalten, folglich kann der Blooming-Effekt nachgewiesen werden.

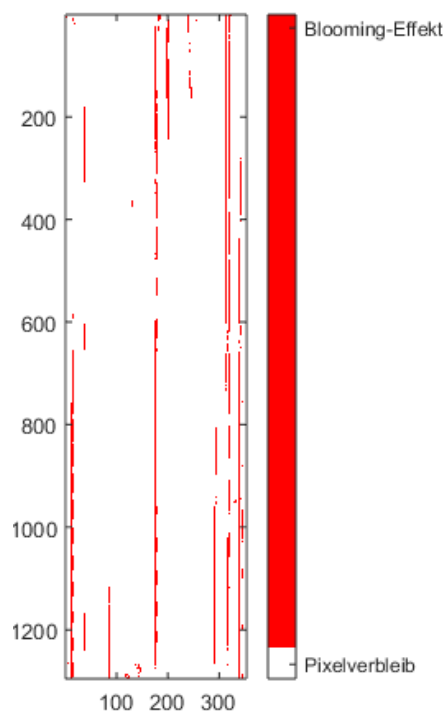


Abbildung 6.7 - Nachweis des Blooming-Effekts durch Differenzbildung der Bestrahlungsbilder bei 15 ms und 4 ms

6.1.3 Ergebnisse – Hardwareanpassung – Positionsvariation

Durch die parallele Verschiebung der Kamera zu dem Receiver ergeben sich die in *Abbildung 6.8* dargestellten Maximalbilder. Unter a) ist das Maximalbild der Heliostatengruppe 6 in der ursprünglichen Kameraposition zu sehen. Bild b) zeigt eine Verschiebung der Kamera um 3,6 m. Bei c) ist die Kamera um 7,3 m versetzt. Mit steigendem Versatz nimmt der Verzerrungsgrad zu.

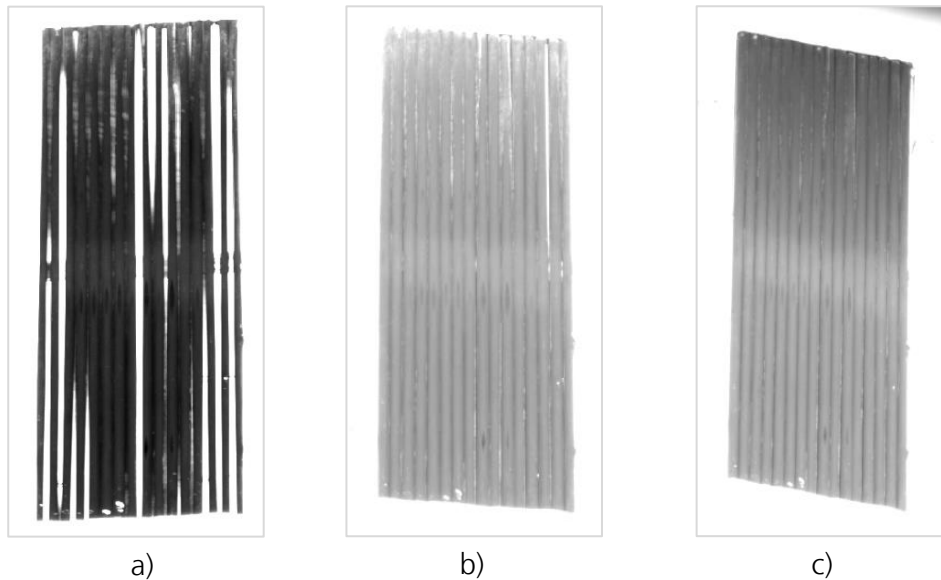


Abbildung 6.8 – Maximalbilder bei Positionsvariation der Heliostatengruppe 6 um 3,6m und 7,3m

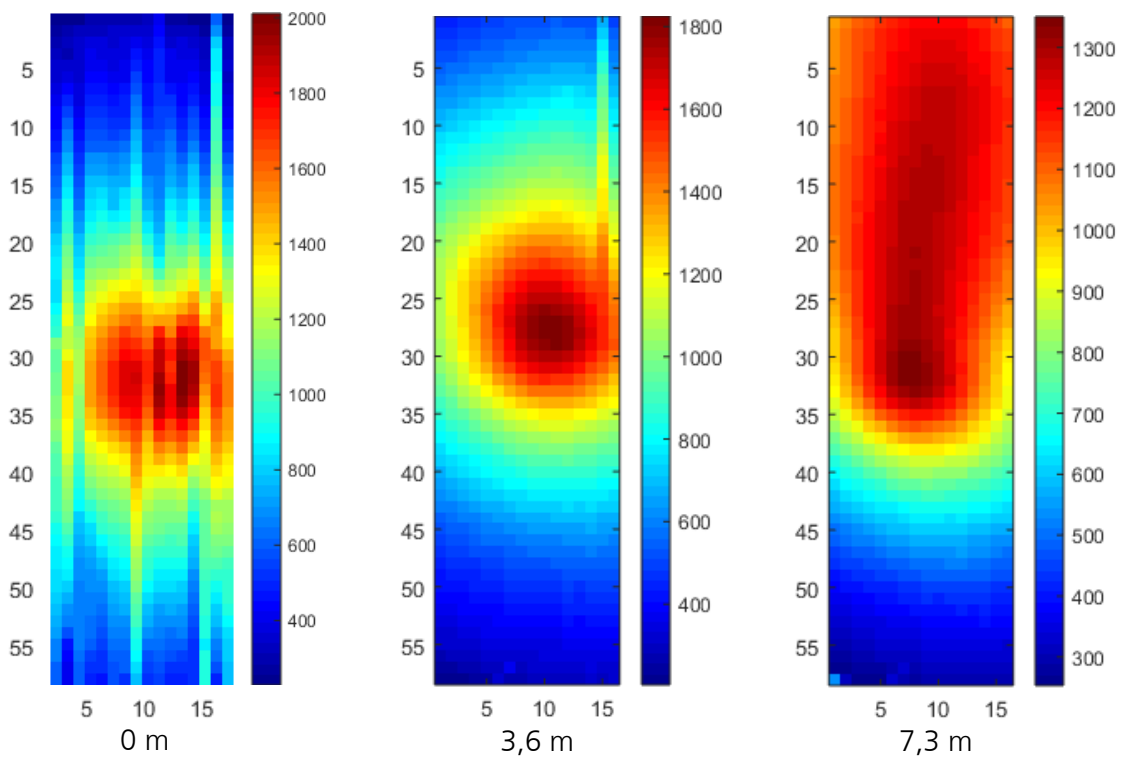


Abbildung 6.9 – Spezifische Ergebnisbilder bei Positionsvariation der Heliostatengruppe 6 um 0m, 3,6m und 7,3m

Abbildung 6.9 zeigt die spezifischen Ergebnisbilder. Im linken Ergebnis sind sehr ausgeprägte, überbelichtete Bereiche zu vernehmen. Diese treten an den Rändern als auch mittig auf. Die mittlere Abbildung zeigt das zum Versatz von 3,6 m gehörende spezifische Ergebnisbild. Erkennbar ist eine deutliche Minderung der Streifenbildung. Lediglich im oberen rechten Randbereich findet eine unkorrigierte Reflexion des Strahlenschutzes statt. In der rechten Darstellung ist das Ergebnis bei einem Versatz von 7,3 m abgebildet. Im oberen Bereich findet eine Zunahme der Grauwertigkeit statt. Diese resultiert aus einem unbemerkten Aufnahmeabbruch während der Scannung. Es können keine Fehler des Strahlenschutzes festgestellt werden. Die aus den Maximalbildern erstellten spezifischen Ergebnisbilder zeigen, dass die Streifenbildung der Scans mit steigendem Versatz abnimmt. Der ursprünglichen Position können die überbelichteten Bereiche nicht berichtigt werden. Der Versatz um 3,6 m zeigt, dass das spezifische Ergebnisbild nahezu homogen ist. Dem Maximalbild bei einem Versatz von 7,3 m ist trotz fehlender Aufnahme eine verbesserte Homogenität zuzuschreiben.

6.1.4 Diskussion – Hardwareanpassung

Belichtungsvariation

Die Optimierung der Scanning-Methode zur Minimierung der Reflexion durch den Strahlenschutz auf den Sensor hat entscheidende Bedeutung, da bei Aufnahmen nachweislich der Blooming-Effekt auftritt. Dies kann durch zwei Methoden während des Scannens verhindert bzw. reduziert werden. Die Variation der Belichtungszeit bietet einen Ansatz, um die Überbelichtung innerhalb des Receivers zu reduzieren. Eine vollständige Kompensation kann nicht bestimmt werden. Dabei ist jedoch darauf zu achten, die Belichtungszeit so zu wählen, dass es nicht zu einer Unterbelichtung der Grauwerte im Bereich der Receiver-Rohre kommt.

Positionsvariation

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Überbelichtung vollständig zu kompensieren, indem die Position beim Scannen kritischer Heliostatgruppen verändert wird. Eine Änderung der Kameraposition um 3,6 m seitlich zum Receiver führt bereits zu einem brauchbaren Ergebnisbild. Ein Versatz von 7,3 m ergibt ein vollständig homogenes Ergebnisbild, indem nur aktive Receiver-Bereiche ohne Reflexionen des Strahlenschutzes dargestellt werden. Dies eignet sich ideal zur Kompensation.

Der notwendige Versatz ist dabei aufgrund von zunehmender thermisch bedingter Verformung des Receivers vor Messungen zu überprüfen.

Zu beachten ist, dass durch die Veränderung der Kameraposition ein Reflexionsfehler entsteht, da Bilder mit und ohne Kameraversatz verrechnet werden.

6.2 Softwareanpassungen – Reflexionskorrektur

Weitergehend soll durch einen in MATLAB geschriebenen Algorithmus die Überbelichtung innerhalb des Receivers egalisiert werden, mit dem Ziel, dass die Heliostatengruppen 6 und 10 eine homogene Flussdichteverteilung aufweisen. Es werden hierfür neue ROI-Bereiche definiert, welche in Abhängigkeit zu den zu verarbeitenden entzerrten Maximalbildern stehen. Zusätzlich wird mit einem Maximalgrenzwert und Minimalgrenzwert für die Grauwerte gearbeitet. Alle Bereiche werden unbeschnitten betrachtet, um das entzerrte Bild anschließend in gleichmäßige Segmente zu unterteilen. Dabei wird die Segmentbreite und -höhe so gewählt, dass final ein Format mit 16 x 58 Pixeln aufgebaut wird. Der Ablauf ist *Abbildung 6.10* zu entnehmen.

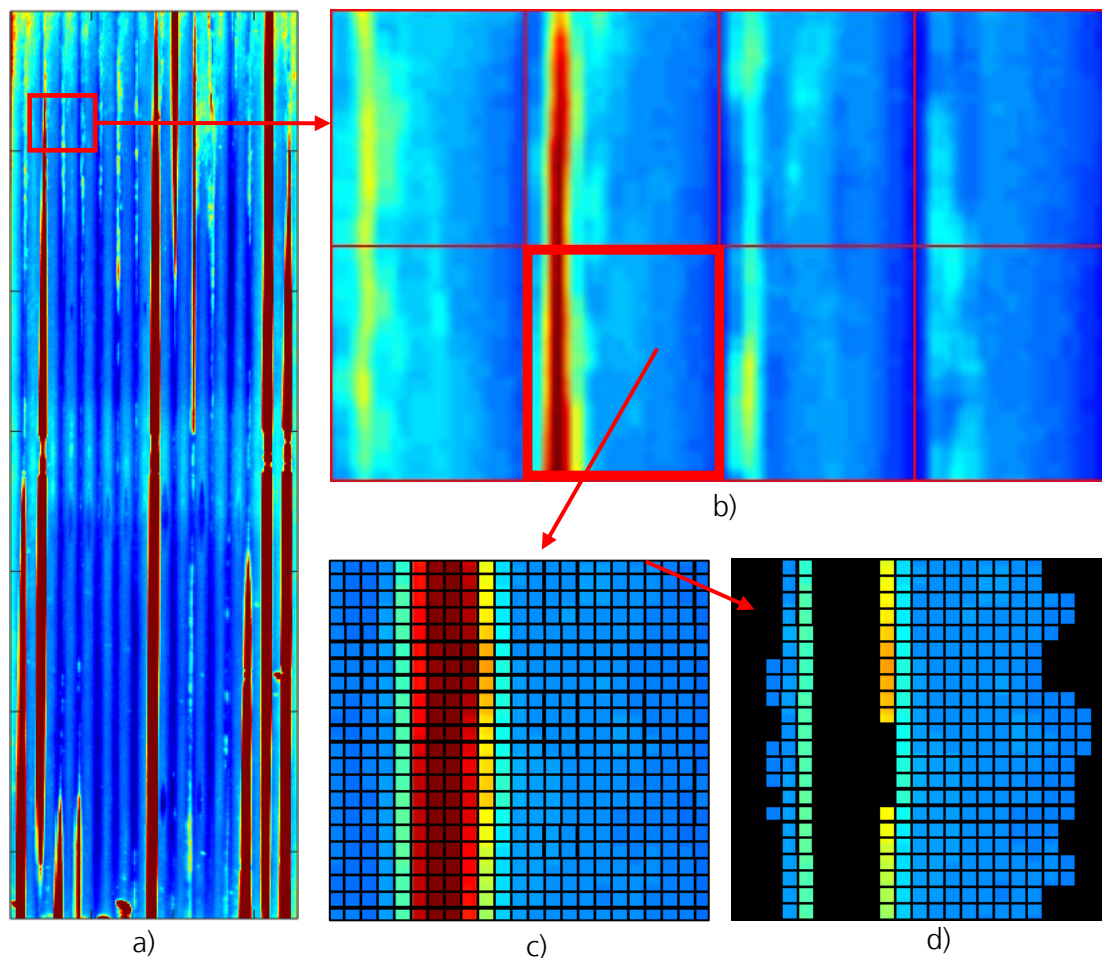


Abbildung 6.10 – Angepasste ROI-Ermittlung und Algorithmus zur Bestimmung der relevanten Bereiche in jedem Segment. a) Darstellung des entzerrten Maximalbildes der Heliostatengruppe 10. b) Teilausschnitt der ROI-Bereiche. c) Darstellung aller Pixel innerhalb eines Segmentes. d) Darstellung der ausgelassenen Pixel, die außerhalb der Bedingungsgrenzen liegen.

Das entzerrte, in falschfarben dargestellte Maximalbild wird mit einem ROI Raster versehen. Bei näherer Betrachtung unter c) können die einzelnen Pixel eines Segmentes erkannt werden. Liegt der betrachtete Pixelwert in *Abbildung 6.10* dargestellt innerhalb der maximal- bzw. minimalgrenze, wird dieser übernommen. Liegen ein Pixel außerhalb der Grenzen, wird dieser vernachlässigt, wie unter d) zu erkennen. Um den finalen Wert des Segmentes zu erhalten, werden alle relevanten Pixel aufsummiert und durch deren Menge geteilt. Das Resultat ist ein von den Grenzwerten abhängiges Mittelwertbild.

6.2.1 Ergebnisse – Softwareanpassung

In der *Abbildung 6.11* wird sich zunächst nur mit der Einführung eines oberen Grenzwertes der Grauwertigkeit beschäftigt. Die Darstellung bezieht sich auf die Heliostatengruppe 10.

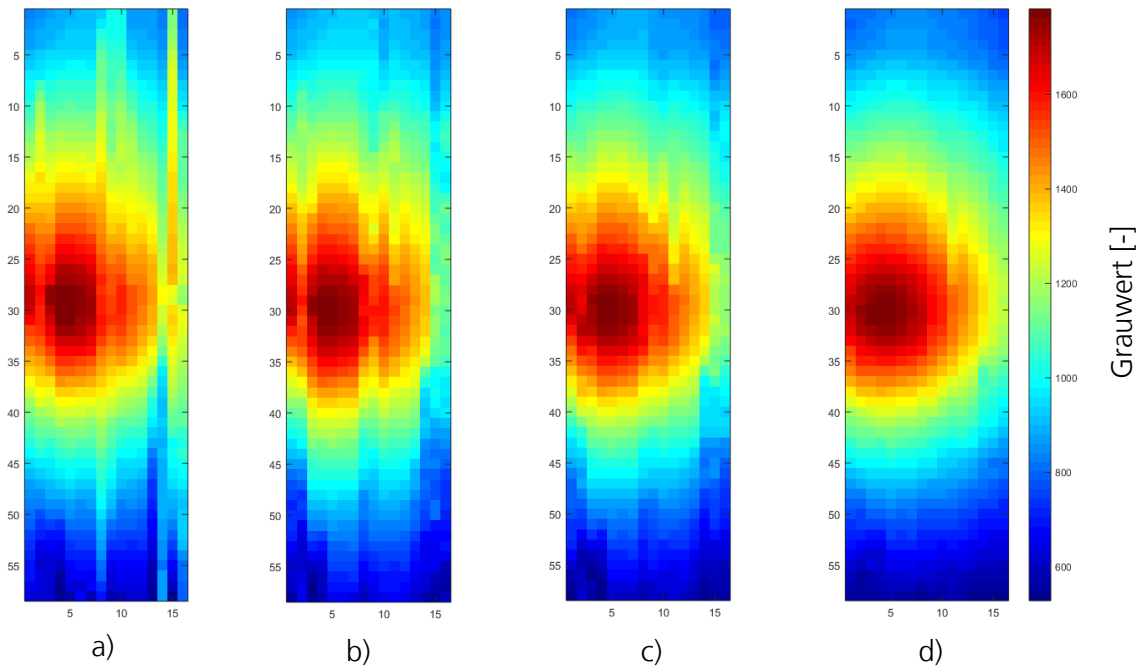


Abbildung 6.11 – spezifische Ergebnisbilder der angepassten Maximal- und Rohbilder. a) Grenzwert 4096. b) Grenzwert 4090. c) Grenzwert 3500. d) Grenzwert 2430. Heliostatengruppe 10

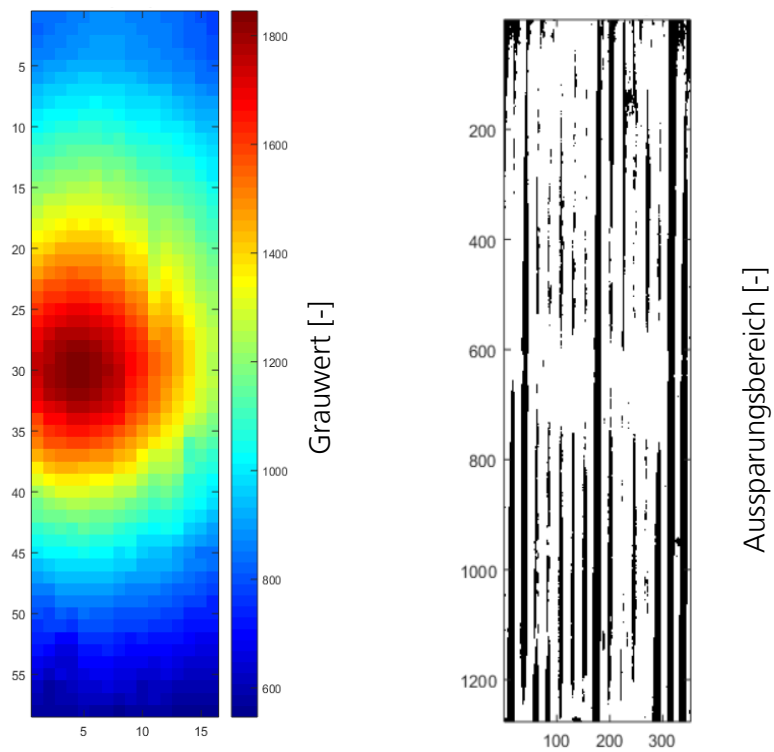


Abbildung 6.12 – Spezifisches Ergebnisbild bei oberem Grenzwert von 2430 und unterem Grenzwert von 1450. Aussparungsanteil 22,3%. Heliostatengruppe 10

a) - Das ursprüngliche spezifische Ergebnisbild weist starke Streifen auf, welche sich teilweise über die gesamte Receiver-Höhe erstrecken. Werden keine Grenzen definiert, besitzt das Bild eine Ausparung von 0%. b) - Durch die Einstellung eines oberen Grenzwertes von 4090 werden insgesamt 11,9% aller Pixel in dem Maximalwertbild ausgespart. Dem Ergebnis kann eine Verbesserung entnommen werden. c) – Bei der Verwendung einer oberen Grenze von 3500 kann eine weitere Verbesserung der Homogenität erzielt werden. Der Anteil ausgesparter Pixel beläuft sich auf ca. 14%. d) - Mit einer oberen Grenze von 2430 werden 18,1% der Pixel vernachlässigt. Es ergibt sich das homogenste Ergebnis.

Abbildung 6.12 zeigt: Durch die Erstellung eines unteren Grenzwertes von 1650 steigt der Ausparungsanteil auf 22,3% und die Skalierung nimmt zu.

Gleiche Ergebnisse werden bei der Betrachtung der Heliostatengruppe 6 erzielt (*Abbildung 6.13*). Dem Mittelwertbild ohne die Verrechnung des Algorithmus sind erneut starke Streifenbildungen innerhalb der Bilder zu entnehmen. Die Homogenität ist annähernd vollständig bei optimaler Einstellung. Es ist keine Streifenbildung mehr zu erkennen. Die Anpassung besitzt einen ausgesparten Pixelanteil von 28,5%. Die Skala fällt vom Maximum von ca. 2050 auf einen Wert von 1550.

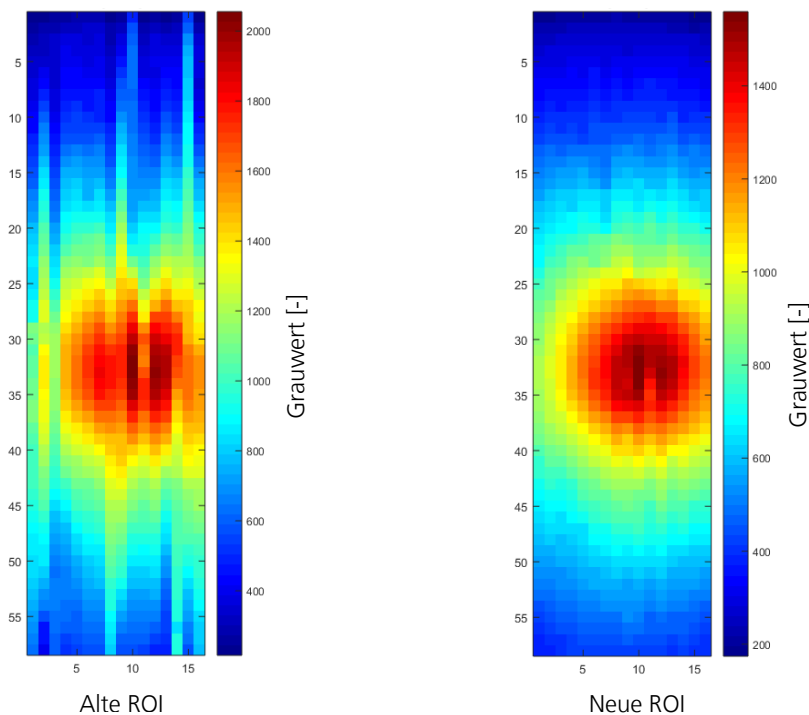


Abbildung 6.13 – Spezifisches Ergebnisbild der Heliostatengruppe 6 im Vergleich der alten und neuen ROI-Bildung

Bei Betrachtung der *Abbildung 6.14*, in welcher beispielhaft die Flussdichteverteilung der Heliostatengruppe 10 bestimmt wurde, kann eine Verbesserung im Vergleich zu der vorher genutzten ROI-Bildung erkennbar. Die neue Methode ermöglicht eine homogenere Berechnung der Flussdichte. Durch deren Einsatz kann eine deutliche Reduzierung der Streifenbildung, die sich bisher über den gesamten Receiver erstreckte, erreicht werden. Die tatsächliche Skalierung der Flussdichte wird beibehalten. In der neuen ROI-Berechnung sind die Streifen zwar immer noch erkenn-

bar, jedoch in einem geringeren Ausmaß als zuvor. Zusätzlich zu der Verbesserung der überbelichteten Bereiche ist dadurch eine Zunahme der Homogenität in den bisher schlecht ermittelten Bereichen erreichbar.

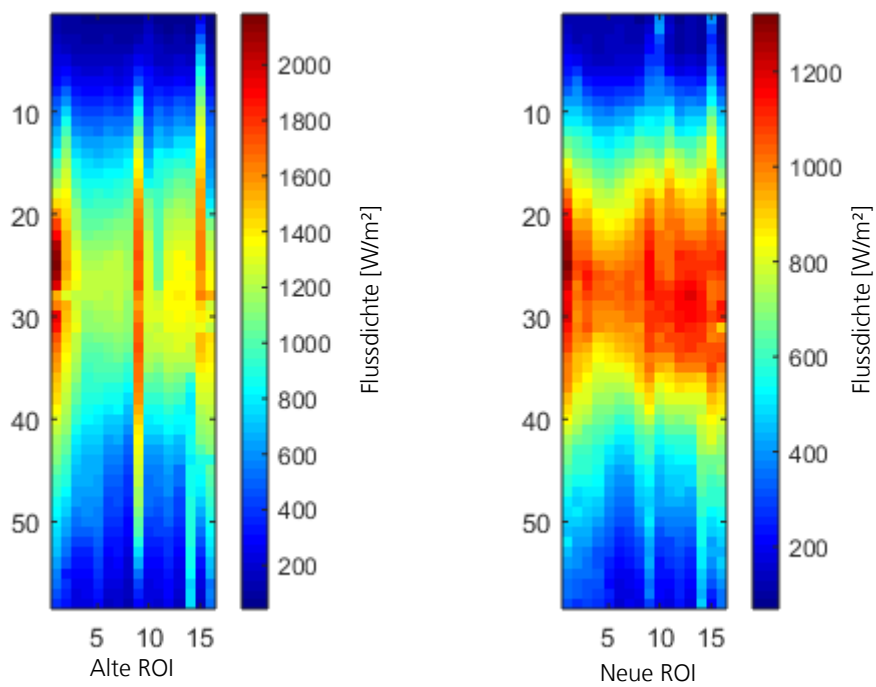


Abbildung 6.14 – Flussdichteverteilung der kritischen Heliostatgruppe 10 mit alter ROI und neuer ROI-Bestimmung.

6.2.2 Diskussion – Softwareanpassung

Der in Kapitel „6.2“ beschriebene Algorithmus zielt darauf ab, die Überbelichtung innerhalb des Receivers zu kompensieren, indem neue ROI-Segmente definiert und Maximal- und Minimalwerte zur Bestimmung der Reflexionseigenschaften verwendet werden. Dies führt zu einem verbesserten Ergebnis der Flussdichteverteilung für die Heliostatgruppen 10.

Abbildung 6.13 zeigt eine deutliche Verbesserung der Homogenität im Vergleich zum ursprünglichen Ausgangsbild, welches zuvor noch starke Streifenbildungen aufwies. Eine Reduzierung des maximalen Grenzwertes um 10 Grauwerte führt bereits zu einer deutlichen Verbesserung. Zusätzlich ermöglicht der Algorithmus eine Kompensation des Blooming-Effekts.

Die spezifischen Ergebnisbilder zeigen, dass eine Eliminierung möglich ist und durch entsprechende Weiterentwicklung vollständig behoben werden kann. Es ist anzunehmen, dass die Entzerrung aller aufgenommenen Bilder im Laufe kommender Entwicklungsschritte weiteren positiven Einfluss auf die messtechnische Bildverarbeitung nehmen wird. Da bei der Flussdichteberechnung zwei Messreihen mit jeweils unterschiedlicher Receiver-Eckenauswahl verrechnet werden, kommt es im aktuellen Entwicklungsstand zu unvermeidbaren Ungenauigkeiten in der Bildverarbeitung der Messdaten. Es ist begründet anzunehmen, dass dieser Algorithmus künftig bei einer fest installierten Kamera noch homogenere Ergebnisse liefert.

Finale Grenzwerte sind nicht Anwendungsübergreifend definierbar und müssen in anwendungsbezogenen Folgeuntersuchungen erneut bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Aussparungsanteil zwischen 22% bzw. 29% zu einer deutlichen Verbesserung der betrachteten Berechnungen führt.

Die vorgestellte Möglichkeit zur Aussparung kritischer Bereiche kann bei schlecht gewählten Messvoraussetzungen an Informationsgehalt verlieren, was in Folge dessen zu einer Verfälschung des Ergebnisses führt. Durch den nur marginalen Fehlereinfluss ist dieser Umstand durch die Verbesserung des Gesamtergebnisses vertretbar.

Eine Anwendung des Algorithmus bei Heliostatengruppen, bei denen es während des Scans zu keiner Gefahr des Blooming-Effektes kommt, ist nicht notwendig und führt nur zu einer geringen Veränderung des Gesamtergebnisses.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein kamerabasiertes Messverfahren zur Bestimmung der Flusssdichteverteilung am HPMS-II Flüssigsalzröhren-Receiver des Instituts für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Jülich erprobt, weiter automatisiert und optimiert. Es haben umfangreiche Messungen zur Bestimmung der Flusssdichteverteilung stattgefunden. Diese wurden erstmalig mit einer CMOS-Kamera durchgeführt. Weitere Optimierungsansätze wurden sowohl hardwaretechnisch sowie softwaretechnisch umgesetzt. So wurde eine Hardwareanpassung in Belichtungszeit- und Kamerapositionsvariierungen durchgeführt. Softwaretechnisch wurde ein Algorithmus programmiert, welcher den Blooming-Effekt egalisiert.

Die Bestimmung der Flusssdichteverteilung nach der Scan-Methode ist ein vielversprechendes Verfahren. Sie ermöglicht die optische Bestimmung der Flusssdichte allein durch die Aufnahmen der Reflexion des Receivers. Radiometerbasierende Messverfahren beeinträchtigen hingegen den Kraftwerksbetrieb. Die genutzte CMOS-Kamera liefert Grauwerte, die durch verschiedene Korrektur- und Kalibrierungsrechnungen in Flusssdichte umgerechnet werden. Dabei spielt die Reflexionskorrektur eine entscheidende Rolle, welche durch das mäanderförmige Abscannen des Receivers bei Nacht und die parallele Serienaufnahme bestimmt wird. Aus den gewonnenen Daten lässt sich ein Maximalbild erstellen, welches eine vollflächige Receiver-Bestrahlung simuliert, durch die die Reflexionseigenschaften und deren Korrektur ermöglicht wird. Für die Umrechnung von Grauwert in Flusssdichte wird die Fokusverschiebung eingesetzt. Diese ermöglicht allein durch die Grauwert-Aufnahme eines Bildes, während Realbestrahlung des Receivers, auf die Flusssdichte zu schließen. Ebenso wie die Fokusverschiebung werden auch die Defokussierung und die Rohbildaufnahme bei einer realen Bestrahlung durchgeführt. Die Defokussierung ermöglicht eine weitere Korrektur, indem genau bestimmt werden kann, welche Heliostatgruppe welchen Anteil pro Receiver-Segment an der Gesamtflusssdichte hat. Das Rohbild entspricht der späteren Bestrahlung im konventionellen Betrieb.

Durch die Berechnung spezifischer Ergebnisbilder, basierend ausschließlich auf den Nacht-Scans, kann festgestellt werden, dass die Fehlerquellen der Reflexionskorrektur vergleichsweise gering sind.

Die Durchführung der Fokusverschiebung im Winter mit nur drei Heliostaten schränkt das Messzeitfenster ein und führt aufgrund der geringen Anzahl von Heliostaten zu einem hohen Anteil an Sensorausfällen. Die Messungen erfolgen unter Zeit-enge, sodass die Einstellung von stationären Zuständen der Flusssdichte auf die Radiometer nicht immer gewährleistet werden können, bedingt durch geringe Verfügbarkeit von Direktstrahlung.

Rohbild- und Defokussierungsaufnahmen erfolgen ebenfalls mit drei Heliostaten. Es werden insgesamt vier Messreihen erstellt, welche sich nur geringfügig voneinander unterscheiden. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit der direkten Globalstrahlung liegen diese Messreihen zeitlich dicht beieinander, was eine Kompensation des Air-Mass-Faktors nicht erlaubt.

Die unterschiedlichen Receiver-Eckpunktbestimmungen der Messreihen führen zu einer Verschiebung der zu verarbeitenden Matrizen. Während die Flusssdichteverteilungen der nicht betroffenen Heliostatengruppen homogen sind, zeigen die in der kritischen Zone liegenden Heliostatengruppen eine starke Streifenbildung, die durch eine Verschiebung der zu verarbeitenden Matrizen nur geringfügig kompensiert werden kann.

Ein Optimierungsansatz durch die Einführung variierender Belichtungszeiten kann Überbelichtung in der Flussdichteverteilung reduzieren. Zur Bestimmung der optimalen Belichtung erfolgen mehrere Scan-Aufnahmen. Durch die Variation der Belichtung kann der Blooming-Effekt auch bei der Verwendung einer CMOS-Kamera nachgewiesen werden.

Durch den parallelen Versatz der Kameraposition zum Receiver werden die störenden Reflexionen des Strahlenschutzes durch die Receiver-Rohre blockiert. Die optimale Kameraposition ist dabei in Abhängigkeit der Verformung der Receiver-Rohre zu treffen. Zu berücksichtigen ist ein durch den Kameraversatz einstellender Positionsfehler der Reflexion, welcher im Verhältnis zu der Überbelichtung aber als verhältnismäßig gering eingestuft wird.

Softwareoptimierung durch Verwendung eines programmierten Algorithmus erzielen die besten Ergebnisse. Wie zu sehen, können gruppenspezifische Ergebnisbilder eine homogene Verteilung trotz Überbelichtungen innerhalb des Receivers und Beibehaltung einer zentrierten Kameraposition erreichen. Für die Flussdichteverteilung ist jedoch wichtig, dass die Kamera bei allen Messungen an der gleichen Position fest installiert ist, damit die Auswahl der Eckpunkte für die Entzerrungen für alle Bilder gleichbleibt. Nachteilig ist der Teilverlust von Informationen durch das Aussparen einzelner Pixel. Der Algorithmus ist hauptsächlich für die Erfassung kritischer Heliostatgruppen gedacht.

Ausblick

Die Automatisierung und damit verbundene Optimierung der Receiver-Entzerrung der Messaufnahmen sollte Schwerpunkt künftiger Arbeiten sein. Die bisherige händische Bestimmung der Entzerrungspunkte ist fehleranfällig und mit einem nicht unerheblichen Zeitaufwand verknüpft. Die Implementierung eines Algorithmus, welcher automatisiert Ecken des Receivers erkennt und darauf basierend die Entzerrung durchführt, bietet enormes Potenzial. Besondere Bedeutung kommt dem bei wechselnden Kamerapositionen zu.

Die Installation eines diffus reflektierenden Targets in Receiver-Nähe ermöglicht eine exaktere Helligkeitskorrektur der Scan-Aufnahmen zueinander. Der bisher genutzte Strahlenschutz ist für die exakte Bestimmung der Flussdichte vermutlich nicht ausreichend.

Eine Durchführung von Defokussierung und Fokusverschiebung bei realen Bedingungen wird unter Validierungsbetrachtungen angeraten. In der beschriebenen Arbeit konnten jahreszeitlich bedingt nur drei Heliostaten verwendet werden. Weitere Messungen mit einer höheren Anzahl an Heliostaten bieten zudem eine Absicherung der bisherigen Ergebnisse. Darüber hinaus sind mehrere Messreihen zu unterschiedlichen Zeiten und entsprechenden Air-Mass-Faktoren durchzuführen, um weitere ausreichende Defokussierung-Daten zu erhalten.

Der programmierte Algorithmus sollte um eine Funktion für eine eigenständige Bestimmung der Maximal- und Minimalgrauwert erweitert werden, um eine weitere Automatisierung zu ermöglichen.

Die vorgestellten Hardwareanpassungen sollten kombiniert und weiter getestet werden, um eine optimale Messdurchführung zu bestimmen.

Literaturverzeichnis

- [1] **H.-O. Pörtner et al.**, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: IPCC, 2022. Accessed: Jan. 30, **2023**. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Sina-Ayanlade/publication/362431678_Climate_Change_2022_Impacts_Adaptation_and_Vulnerability_Working_Group_II_Contribution_to_the_Sixth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change/links/62ea52343c0ea87887793180/Climate-Change-2022-Impacts-Adaptation-and-Vulnerability-Working-Group-II-Contribution-to-the-Sixth-Assessment-Report-of-the-Intergovernmental-Panel-on-Climate-Change.pdf
- [2] **Umweltbundesamt (UBA)**, 'Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen', *Umweltbundesamt (UBA)*, May 23, **2022**. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#beitrag-langlebiger-treibhausgase-zum-treibhauseffekt> (accessed Jan. 30, 2023).
- [3] **P.R. Shukla et al.**, 'Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change', Cambridge, UK and New York, NY, USA., **2022**. Accessed: Jan. 30, 2023. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
- [4] **D. Pagnani, Ł. Kocewiak, J. Hjerrild, F. Blaabjerg, and C. L. Bak**, 'Integrating black start capabilities into offshore wind farms by grid-forming batteries', *IET Renewable Power Generation*, Jan. **2023**, doi: 10.1049/rpg2.12667.
- [5] **Hogrefe Jürgen**, *Concentrated Solar Power | CSP - Solar power around the clock*. Berlin, Germany: German Association for Concentrated Solar Power (DCSP), **2021**.
- [6] **M. Röger, P. Herrmann, S. Ulmer, M. Ebert, C. Prah, and F. Göhring**, 'Techniques to measure solar flux density distribution on large-scale receivers', *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 136, no. 3, **2014**, doi: 10.1115/1.4027261.
- [7] **P. Gorzalka**, 'Messung der Reflexionseigenschaften von Absorbern für die Strahlungsflussdichtemessung an Solarturmreceivern', Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Jülich, **2017**.
- [8] **D. Meyer**, 'Software Engineering für die Strahlungsflussdichtemessung an Rohrreceivern von Solarturmanlagen', Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Aachen, **2021**.
- [9] **J. Zöller**, 'Strahlungsflussdichtemessung mittels Reflexion an Solarturm-Rohrreceivern – Bildaufnahme und softwarebasierte Bildverarbeitung', Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Aachen, **2021**.
- [10] **M. Glinka**, 'Strahlungsflussdichtemessung mittels Reflexion an Solartürmen-Inbetriebnahme und Nutzung eines wassergekühlten Rohrreceivers', Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Aachen, **2021**.
- [11] **J. Matthies**, 'Strahlungsflussdichtemessung an Flüssigsalzreceivern in Solarturmkraftwerken mittels Scan-Verfahren', Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Aachen, **2022**.
- [12] **F. Pedrotti, L. Pedrotti, and W. Bausch**, *Optik für Ingenieure - Grundlagen*, vol. 2. Berlin: Springer Berlin, **2001**.

- [13] **H. D. Baehr and K. Stephan**, *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, **2016**. doi: 10.1007/978-3-662-49677-0.
- [14] **Verein Deutscher Ingenieure (VDI)**, *VDI-Wärmeatlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, **2013**. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3.
- [15] **Dr.-Ing. Reiner Buck et al.**, 'Institute of Solar Research Status Report 2011 – 2019', Cologne, Germany, Dec. **2019**.
- [16] **Cluster EnergieForschung.NRW**, 'Solarthermische Kraftwerke - Know-how aus Nordrhein-Westfalen'. [https://www.dlr.de/sf/PortalData/73/Resources/dokumente/publikationen_medien/energieagentur_nrw/Solarthermische_Kraftwerke._Know-how_aus_NRW._\(NRW_EnergieAgentur_12-2012\).pdf](https://www.dlr.de/sf/PortalData/73/Resources/dokumente/publikationen_medien/energieagentur_nrw/Solarthermische_Kraftwerke._Know-how_aus_NRW._(NRW_EnergieAgentur_12-2012).pdf) (accessed Jan. 30, 2023).
- [17] **E. Hering and G. Schönfelder**, *Sensoren in Wissenschaft und Technik - Funktionsweise und Einsatzgebiete*, vol. 1. Heubach und Dresden: Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, **2012**.
- [18] **P. Antilogus, P. Astier, P. Doherty, A. Guyonnet, and N. Regnault**, 'The brighter-fatter effect and pixel correlations in CCD sensors', *Journal of Instrumentation*, vol. 9, no. 3, 2014, doi: 10.1088/1748-0221/9/03/C03048.
- [19] **J. Ohta**, *Smart CMOS Image Sensors and Applications*. CRC Press, **2017**. doi: 10.1201/9781420019155.
- [20] **J. Ballestrín et al.**, 'Simplifying the measurement of high solar irradiance on receivers. Application to solar tower plants', *Renew Energy*, vol. 138, pp. 551–561, Aug. **2019**, doi: 10.1016/j.renene.2019.01.131.
- [21] **P. Herrmann**, 'Untersuchung und Weiterentwicklung von Methoden zur Messung der Strahlungsflussdichteverteilung an solaren Turmkraftwerken', Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, **2011**.
- [22] **M. Offergeld, M. Röger, H. Stadler, P. Gorzalka, and 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.
- [23] **M. Offergeld, M. Röger and H. Stadler**, German Patent No.10 2016 226 033 (23 November **2016**)
- [24] **Ulrich Kieselbach**, 'Heliostatenfeld des Instituts für Solarforschung'.
- [25] **S. Ulmer**, 'Messung der Strahlungsflussdichte-Verteilung von punktkonzentrierenden solarthermischen Kraftwerken', Universität Stuttgart, Stuttgart, **2003**.