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

Strahlungsflussdichtemessung an Flüssigsalzreceivern in Solarturmkraftwerken mittels Scan-Verfahren

Flux Density Measurement on Liquid Salt Receivers in Solar Tower Power Plants using a Scanning Method

Bachelorarbeit

vorgelegt von
Jonas Matthies
Matrikelnummer: 398505

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

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

Aachen, 10.11.2022

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung **1**

2 Grundlagen **3**
2.1 Strahlungsgrößen . . . 3
2.1.1 Definitionen . . . 3
2.1.2 Arten strahlungsphysikalischer Größen . . . 5
2.1.3 Strahlungseigenschaften realer Körper . . . 5
2.1.4 Solarstrahlung . . . 7
2.2 Funktionsweise von Radiometern . . . 9
2.2.1 Seebeck-Effekt . . . 9
2.2.2 Gardon-Radiometer . . . 9
2.3 Optische Kameras . . . 10
2.3.1 Funktionsweise . . . 10
2.3.2 Fehlerquellen . . . 12
2.4 Solarturmkraftwerke . . . 14
2.4.1 Allgemein . . . 14
2.4.2 Anlage in Jülich . . . 16

3 Stand der Technik **19**
3.1 Flussdichtemessung mit Radiometern . . . 19
3.1.1 Fest verbaute Radiometer . . . 19
3.1.2 Movingbar mit Radiometern . . . 19
3.1.3 Fokusverschiebung . . . 20
3.2 Optische Flussdichtemessung . . . 20
3.2.1 Diffus reflektierendes Target . . . 21
3.2.2 Movingbarmethode . . . 21
3.3 Flussdichtemessung mit Strahlungssimulation . . . 22

4 Scan-Verfahren **25**
4.1 Reflexionseigenschaften des Receivers . . . 25
4.2 Richtungszusammensetzung der Strahlung . . . 26
4.2.1 Abschätzung . . . 26
4.2.2 Strahlungssimulation . . . 26
4.2.3 Ermittlung durch Defokussierung . . . 27
4.3 Erstellung der Strahlungsflussdichteverteilung . . . 27
4.4 Skalierung der Strahlungsflussdichtewerte . . . 29

5 Versuchsdurchführung **31**
5.1 Scan-Versuche 31
5.1.1 Vorbereitung 31
5.1.2 Ablauf 33
5.1.3 Auswertung 35
5.2 Messung der Flussdichteverteilung 42
5.2.1 Versuche aus einzelnen Richtungen 42
5.2.2 Vorwärmversuch 44
5.2.3 Fokusverschiebung 47

6 Zusammenfassung und Ausblick **49**

Literaturverzeichnis **55**

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AM	Air-Mass-Faktor
BRDF	Bidirectional Reflactance Distribution Function
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CSP	Concentrated Solar Power
DLR	Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNI	Direct Normal Irradiance
GUI	Graphical User Interface
HPMS-II	High Perfomance Molten Salt Tower Receiver System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ROI	Regions of Interest
STRAL	Solar Tower Raytracing Laboratory

Abbildungsverzeichnis

1.1 Mögliche Treibhausgas-Emmisionspfade [Umw22] 1

2.1 Sphärisches Koordinatensystem (1) [BS16] 4
2.2 Sphärisches Koordinatensystem (2) [BS16] 4
2.3 Zusammenhänge zwischen vier Strahlungsgrößen der Ausstrahlung [BS16] 6
2.4 Spektrale spezifische Ausstrahlung schwarzer Körper verschiedener Temperaturen [Gor17] 8
2.5 Air-Mass-Faktoren verschiedener Einstrahlwinkel [SH12] 8
2.6 Prinzipskizze eines Gardon Radiometers [Ulm03] 10
2.7 Schema eines CCD-Sensors [DSAS11] 11
2.8 Betriebsmodi eines CCD-Sensors [DSAS11] 12
2.9 Schema eines CMOS-Sensors [DSAS11] 13
2.10 Aufbau zur Bestimmung des Shadingbilds [Wei00] 14
2.11 Schema eines Solarturmkraftwerks mit offenen volumetrischem Receiver [KSW13] 16
2.12 Schema eines Solarturmkraftwerks mit Flüssigsalz-Receiver [KSW13] . 17
2.13 Heliostatenfeld des Versuchskraftwerks in Jülich (Quelle: DLR) 17
2.14 Solarturm Jülich und Multifokusturm (Quelle: DLR) 18

3.1 Schema der Messung mit diffus reflektierendem Target [RHU+14] . . . 22
3.2 Schema des Movingbar-Verfahrens [Wit14] 23

4.1 Graphical User Interface für die Strahlungsflussdichtemessung 28

5.1 Gruppenaufteiling und Scan-Positionen 32
5.2 Positionierung des Targets 33
5.3 Versuchsaufbau des Scheinwerfers 34
5.4 Scanversuch 34
5.5 Unbearbeitetes Maximalbild von Gruppe 16 35
5.6 Entzerrte Maximalbilder der Gruppen 1 (a), 10 (b) und 16 (c) in Falschfarben 36
5.7 Nahaufnahme des Receivers bei Tag 37
5.8 Auswertung des Scans aus Gruppe 1 38
5.9 Maximalbilder von zwei Target-Scan in Falschfarben dargestellt 39
5.10 Versuchsaufbau für die Shading-Korrektur 39
5.11 Repräsentatives Shading-Bild 40
5.12 Shading Korrigierte Maximalbilder von zwei Target-Scan in Falschfarben dargestellt 40

5.13 Verteilung der Reflexionseigenschaften einzelner Punkte: rechts (a), mittig (b), links (c) 41
5.14 Auswertung der Aufnahme aus Gruppe 11; entzerrtes Bild (a), gemittelt und ausgesparte Randbereiche (b), korrigiert mit Scan Ergebnis (c), interpoliertes Ergebnis (d) 43
5.15 Auswertung der Aufnahme aus Gruppe 8; entzerrtes Bild (a), gemittelt und ausgesparte Randbereiche (b), korrigiert mit Scan Ergebnis (c), interpoliertes Ergebnis (d) 44
5.16 Auswertung der Aufnahme aus Gruppe 10; entzerrtes Bild (a), gemittelt und ausgesparte Randbereiche (b), korrigiert mit Scan Ergebnis (c), interpoliertes Ergebnis (d) 45
5.17 STRAL Modell vom Versuchskraftwerk in Jülich 45
5.18 Zielpunktverteilung auf dem Receiver (links) und Verteilung der Heliostaten auf den Zielpunkten (rechts) 46
5.19 Auswertung der Aufnahme beim Vorwärmen; (a) entzerrtes Bild, (b) gemittelt und ausgesparte Randbereiche, (c) korrigiert mit Scan Ergebnis, (d) interpoliertes Ergebnis 47
5.20 Ablauf der Fokusverschiebung am HPMS-II Receiver für die Skalierung (links) und die Vergleichsmessung (rechts) 48

6.1 Langzeitaufnahme von einem Receiver-Scan 50

1 Einleitung und Zielsetzung

Der 6. Bericht des Weltklimarats IPCC (**I**ntergovernmental **P**anel on **C**limate **C**hange), der 2022 vollständig veröffentlicht wurde, besagt, dass durch Reduktion der Treibhausgasemissionen die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5° bis 2100 noch theoretisch möglich ist. Um dies zu erreichen, müssen die Emissionen rasch gesenkt und weitreichende Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden. Zu den wichtigsten Punkten zählen dabei die Nutzung von Sonnen- und Windenergie. Abbildung 1.1 zeigt mögliche Szenarien der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und deren Auswirkung auf die Erderwärmung. [Umw22]

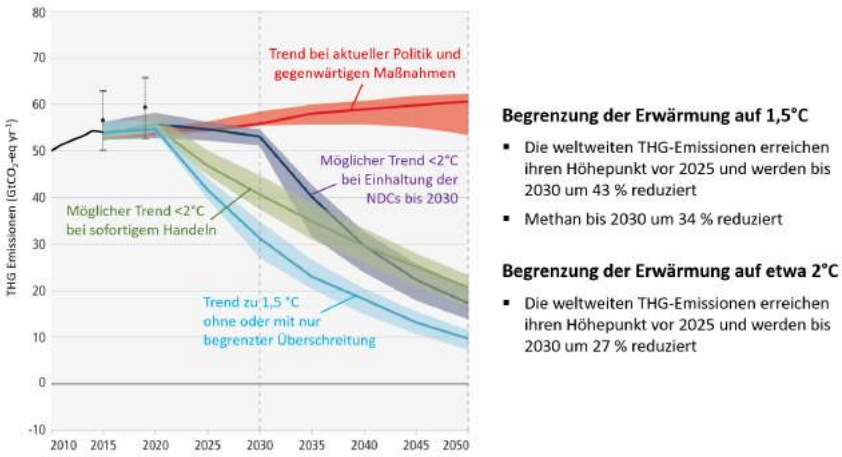

Abbildung 1.1: Mögliche Treibhausgas-Emmisionspfade [Umw22]

Die größten Vertreter bei der Nutzung von solarer Strahlungsenergie sind die Photovoltaikkraftwerke und die solarthermischen Kraftwerke. Bei der Photovoltaik wird durch die Ausnutzung des photovoltaischen Effekts die solare Strahlung direkt in elektrische Energie umgewandelt. Die am meisten verbreiteten Photovoltaikzellen aus Silizium haben ein theoretisches Wirkungsgradlimit von 29,4%. Einerseits ist die direkte Umwandlung in elektrische Energie ein Vorteil, da sie weitere Umwandlungsschritte und damit Verluste vermeidet. Andererseits ist die Speicherung elektrischer Energie sehr kosten- und platzintensiv, was die Speicherung meist unwirtschaftlich macht. Bei solarthermischen Kraftwerken hingegen wird die solare Strahlungsenergie zunächst durch ein Wärmeträgermedium absorbiert. Diese gespeicherte Energie kann dann entweder zwischengespeichert werden oder durch einen nachgeschalteten Kraftwerks-prozess in elektrische Energie umgewandelt werden. Die Speicherung von

Wärme in einem Medium, wie zum Beispiel einer Salzschmelze, lässt sich kostengünstiger realisieren als die Speicherung von elektrischer Energie. Systeme mit hohen Temperaturen bieten die höchsten Wirkungsgrade in einem Wärme-Kraft-Prozess. Um bei Solaranwendungen hohe Temperaturen zu erreichen, wird die Strahlung konzentriert. Diese Systeme werden als konzentrierende Solarethermie bzw. CSP (**C**oncentrated **S**olar **P**ower) bezeichnet. Sie werden in linienfokussierende und punktfokussierende Systeme unterteilt. Linienfokussierende Systeme, wie Parabolrinnenkraftwerke, erreichen aufgrund von geringerer Konzentration niedrigere Temperaturen als punktfokussierende Systeme, wie z.B. Solartürme. [KSW13]

In dieser Arbeit wird ein Messverfahren zur Bestimmung der Strahlungsflussdichteverteilung auf einem Flüssigsalz-Solarturmreceiver erprobt. Die Messung der Strahlungsflussdichte bietet verschiedene Möglichkeiten der Optimierung von Solarturmanlagen. Zum einen kann durch die Messung der Leistung an der Receiveroberfläche eine Unterscheidung bei der Wirkungsgradbestimmung zwischen Konzentrator (Heliostatfeld) und Receiver getroffen werden. Diese Unterscheidung ermöglicht die gezielte Ermittlung von Verbesserungspotentialen. Zum anderen kann durch die Messung der Verteilung der Strahlungsflussdichte auf dem Receiver die Zielpunktverteilung des Heliostatfelds geändert und optimiert werden, um die gewünschte Verteilung zu erreichen.
Ziel dieser Arbeit ist es, ein optisches Messverfahren, das die Reflexionseigenschaften des Receivers berücksichtigt, auf einen Rohrreceiver anzuwenden und dabei Probleme und Herausforderungen aufzuzeigen, die zur Verbesserung des Verfahrens beitragen. Zur Ermittlung der Reflexionseigenschaften ist die Durchführung von 16 Scan-Versuchen aus verschiedenen Positionen des Heliostatfelds ein Hauptbestandteil der Arbeit. Aus der Auswertung dieser Versuche werden dann Korrekturmatrizen erstellt, die im solaren Betrieb zur Messung der Strahlungsflussdichteverteilung angewandt werden. Zur qualitativen Überprüfung der Korrekturmatrizen wurden zusätzlich Versuche mit Bestrahlung aus einzelnen Heliostatgruppen, sowie einer Bestrahlung mit mehreren Heliostatgruppen durchgeführt.
Das verwendete Messverfahren ist vom Deutschen-Zentrum für Luft und Raumfahrt patentiert [ORS18]. Dieses Verfahrens wurde bereits von Gorzalka [Gor17] am Hauptreceiver des Solarturm Jülichs angewandt. Erste Versuche an einem Rohreceiver wurden von Meyer [Mey21], Zöller [Zöl21] und Glinka [Gli21] im Rahmen des Projekts TubeMon durchgeführt.
Diese Arbeit entstand im Projekt HPMS-II (High Performance Molten Salt Tower Receiver System), bei dem es sich um eine mit Flüssigsalz betriebene Anlage im Multifokusturm in Jülich handelt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden verschiedene theoretische Grundlagen erläutert. Zunächst werden allgemeine Strahlungsgrößen definiert, die zum Verständnis und zur Berechnung von Strahlungsflussdichten nötig sind. Außerdem wird das Grundprinzip von Radiometern erklärt, mit denen Strahlungsflussdichte direkt gemessen werden kann. Anschließenden folgt die Vorstellung von CCD-Kameras zur Bildaufnahme und eine allgemeine Vorstellung von Solarturmkraftwerken sowie der Anlage in Jülich.

2.1 Strahlungsgrößen

Um die Zusammenhänge von Strahlungsflussdichtemessung und Solarturmreceiver im Allgemeinen zu verstehen, ist es sinnvoll, einige Strahlungsgrößen zu definieren und zu erläutern. Wenn nicht anders gekennzeichnet beziehen sich die Aussagen in diesem Abschnitt auf das Lehrbuch „Wärme- und Stoffübertragung“[BS16].

2.1.1 Definitionen

Der Strahlungsfluss ϕ beschreibt die zeitliche Änderung der Strahlungsenergie Q.

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad [W] \tag{2.1}$$

Der auf die Fläche bezogene spezifische Strahlungsfluss eines Strahlers wird als spezifische Ausstrahlung M bezeichnet.

$$M = \frac{d\phi_{aus}}{dA} \quad [W/m^2] \tag{2.2}$$

Die Bestrahlungsstärke E hingegen ist der auf einen Körper auftreffende Strahlungsfluss bezogen auf die Fläche. Die Bestrahlungsstärke wird im Zusammenhang mit Solarturmreceivern und im Verlauf dieser Arbeit als Strahlungsflussdichte bezeichnet.

$$E = \frac{d\phi_{ein}}{dA} \quad [W/m^2] \tag{2.3}$$

Neben dem kartesischen Koordinatensystem ist es bei Betrachtung von Strahlungsgrößen sinnvoll ein sogenanntes sphärisches Koordinatensystem einzuführen. Bei diesem

Koordinatensystem wird von einer vordefinierten Ebene und einem Nullpunkt auf dieser Ebene ausgegangen. Ein Punkt P wird dann über zwei Winkel und einen Abstand definiert. Der Zenitwinkel β ist der von der Ebenennormalen ausgehende Winkel. Der Azimutwinkel φ ist der Abstand von der angenommenen Nulllage. Der Abstand des Punktes P zum Nullpunkt wird mit r definiert. (siehe Abbildung 2.1)

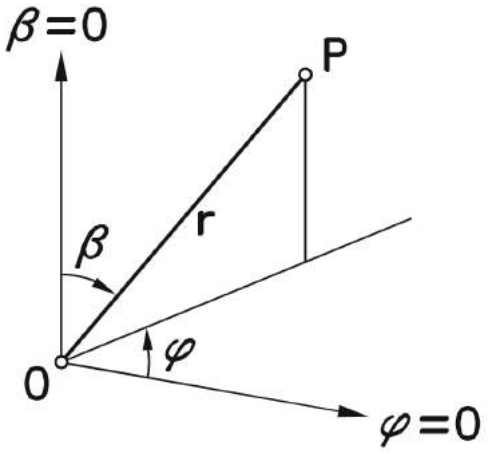

Abbildung 2.1: Sphärisches Koordinatensystem (1) [BS16]

Ein Raumwinkelelement folgt dabei zu:

$$d\Omega = sin(\beta)d\beta d\varphi \quad [sr] \tag{2.4}$$

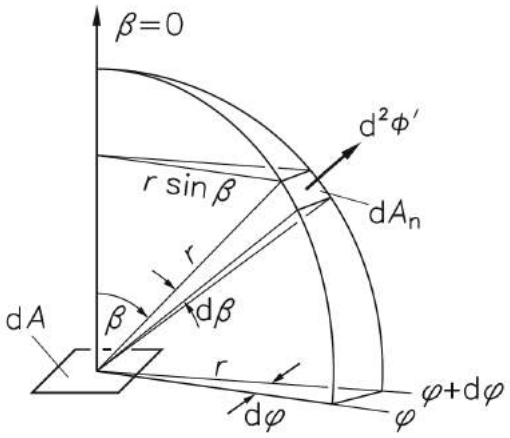

Abbildung 2.2: Sphärisches Koordinatensystem (2) [BS16]

Die Einheit des Raumwinkels wird als Steradiant (sr) bezeichnet, welche durch die Zahl 1 ersetzt werden kann.

Mit der Definition des Raumwinkelelements folgt die Strahlstärke I als auf den Raumwinkel ω bezogener Strahlungsfluss.

$$I = \frac{d\phi_{aus}}{d\Omega} \tag{2.5}$$

Außerdem kann die Strahldichte L definiert werden. Diese beschreibt den Energiestrom, der von der in Strahlrichtung projizierten Fläche dA $\cos(\varphi)$ pro Raumwinkeleinheit dΩ abgestrahlt wird. [Kne20]

$$d\dot{Q} = L\, d\Omega\, dA\, cos(\varphi) \tag{2.6}$$

Bei diffus reflektierenden Oberflächen ist die Strahldichte konstant und damit der abgestrahlte Energiestrom proportional zur Projektionsfläche [Kne20].

2.1.2 Arten strahlungsphysikalischer Größen

Zur Beschreibung von strahlungsphysikalischen Vorgängen werden verschiedene Arten definiert.
Die detaillierteste Beschreibung sind die gerichteten, spektralen Größen. Bei diesen werden die Richtungs- und Wellenlängenverteilung von Strahlungsenergie detailliert beschrieben. Da diese Beschreibung sehr komplex ist, werden meist Vereinfachungen getroffen. Hemisphärische spektrale Größen hängen nur von der Wellenlänge ab und fassen alle Strahlungsrichtungen des Halbraums über ein Flächenelement zusammen. Gerichtete Gesamtgrößen hingegen fassen alle Wellenlängen der Strahlung zusammen und hängen nur von den Richtungen der Strahlung ab. Außerdem fassen die hemisphärischen Gesamtgrößen die Strahlung aller Wellenlängen und Richtungen zusammen. Dies ist die stärkste Vereinfachung, welche allerdings häufig zur Betrachtung der Wärmeübertragung ausreicht.

2.1.3 Strahlungseigenschaften realer Körper

Trifft Strahlung auf einen Körper bzw. eine Oberfläche, so wird diese an der Oberfläche reflektiert, vom Körper absorbiert oder strahlt durch den Körper hindurch. Unter Vernachlässigung der Richtungsabhängigkeit lassen sich der spektrale Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$, der spektrale Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$ und der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ definieren [Kne20].

$$\rho(\lambda) = \frac{\ddot{q}''_{\lambda\rho}}{\ddot{q}''_{\lambda 0}}\ ;\ \alpha(\lambda) = \frac{\ddot{q}''_{\lambda\alpha}}{\ddot{q}''_{\lambda 0}}\ ;\ \tau(\lambda) = \frac{\ddot{q}''_{\lambda\tau}}{\ddot{q}''_{\lambda 0}} \tag{2.7}$$

Daraus folgt:

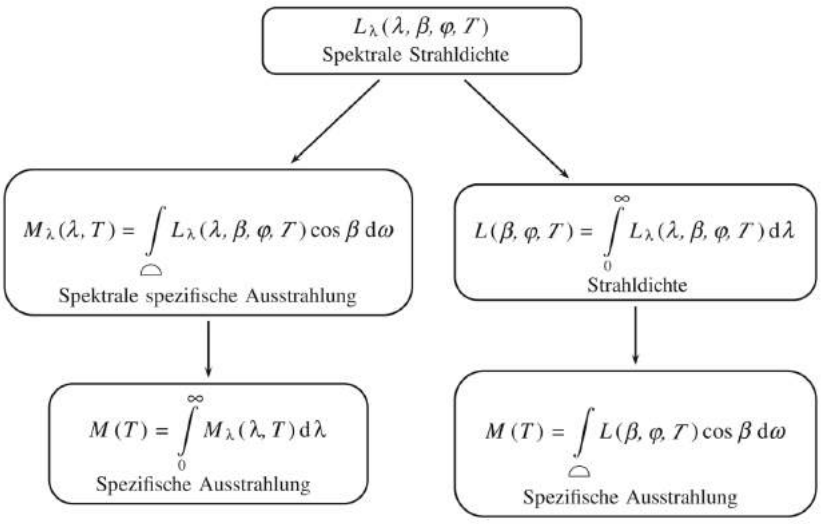

Abbildung 2.3: Zusammenhänge zwischen vier Strahlungsgrößen der Ausstrahlung [BS16]

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \tag{2.8}$$

Da in der Praxis selten die genauen Informationen zur Wellenlängenabhängigkeit vorliegen, wird in der Regel mit konstanten Mittelwerten gerechnet. Für strahlungsundurchlässige Festkörper folgt damit [Kne20]:

$$1 = \rho + \alpha \tag{2.9}$$

Die Reflexionseigenschaften von realen Körpern sind richtungsabhängig. Bei theoretischen Betrachtungen wird zwischen den Grenzfällen der diffusen Reflexion und der spiegelnden Reflexion unterschieden. Bei der diffusen Reflexion wird die Strahlung in alle Raumrichtungen gleichermaßen reflektiert, was einem sogenannten Lambert'schen Strahler entspricht. Bei der spiegelnden Reflexion entspricht der Ausfallswinkel der Strahlung dem Einfallswinkel. Reale Körper besitzen beide Eigenschaften zu einem gewissen Anteil. Zur Beschreibung der Richtungsabhängigkeit des Reflexionsgrades wird die bidirektionale Reflektanzverteilung f_r eingesetzt. Diese wird mit BRDF abgekürzt (engl. **b**idirectional **r**eflectance **d**istribution **f**unction). Diese wird aus dem Verhältnis von reflektierter Strahldichte L_r zur Bestrahlungsstärke E_{ein} bestimmt [NRH$^+$].

$$f_r(\theta_{ein}, \varphi_{ein}, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_{ein}(\theta_{ein}, \varphi_{ein})} = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dL_{ein}(\theta_{ein}, \varphi_{ein}) \, cos(\varphi_{ein} \, d\Omega_{ein})} \tag{2.10}$$

2.1.4 Solarstrahlung

Im Folgenden werden charakteristische Eigenschaften der Solarstrahlung erläutert.

Sonne

Die Strahlungsenergie der Sonne wird aus der Fusion von Wasserstoffkernen geschöpft. Dies geschieht als mehrstufiger Fusionsprozess von Wasserstoff zu Helium im Sonnenkern. Die Strahlungsleistung beträgt dabei $4{\cdot}10^{26}$ W, wobei davon nur $2{\cdot}10^{17}$ W auf die Erde treffen. Aus der Kenntnis der Strahlungsleistung und der Oberfläche der Sonne, diese sei ein schwarzer Körper, kann eine Oberflächentemperatur von $T_{Sonne} = 5776$ K mithilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnet werden. [SH12]
Die Solarkonstante E_0 beschreibt die mittlere Bestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre. Diese beträgt:

$$E_0 = 1367\frac{W}{m^2} \pm 1\% \tag{2.11}$$

Mit dem Eintritt in die Atmosphäre wird Strahlung kontinuierlich absorbiert und gestreut. Durch die Streuung der Strahlung verringert sich die gerichtete Bestrahlungsstärke. Dadurch ergibt sich die sogenannte Direktnormalstrahlung DNI und die Diffusstrahlung E_{diff}. Die Globalstrahlung, die auf den Boden trifft ist dann die Summe aus der Diffusstrahlung und der durch den Kosinus des Zenitwinkels β korrigierten DNI.

$$E_{glob} = DNI \cdot cos(\beta) + E_{diff} \tag{2.12}$$

Die Spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung ist in Abbildung 2.4 ($T_s = 5776$ K) zu sehen. Dabei ist der Bereich von 380 nm - 780 nm für das menschliche Auge sichtbar. Wellenlängen $<$380 nm fallen in den ultravioletten Bereich und Wellenlängen $>$780 nm in den infraroten Bereich. [SH12]

Air-Mass-Faktor

Die Einstrahlung der Sonne wird durch verschiedene Effekte während des Weges durch die Atmosphäre abgeschwächt. Umso länger der Weg durch die Atmosphäre, desto größer die Abschwächung. Diese Beziehung wird durch den sogenannten Air-Mass-Faktor AM beschrieben. Dieser ist vom Sonnenhöhenwinkel h abhängig, welcher komplementär zum Zenitwinkel β ist. [SH12]

$$AM = \frac{1}{sin(h)} = \frac{1}{sin(90 - \beta)} \tag{2.13}$$

Bei einer senkrechten Einstrahlung (h ungefähr 90°) ist AM demnach ungefähr 1. Der AM steigt mit abnehmendem Winkel. (siehe Abbildung 2.5)

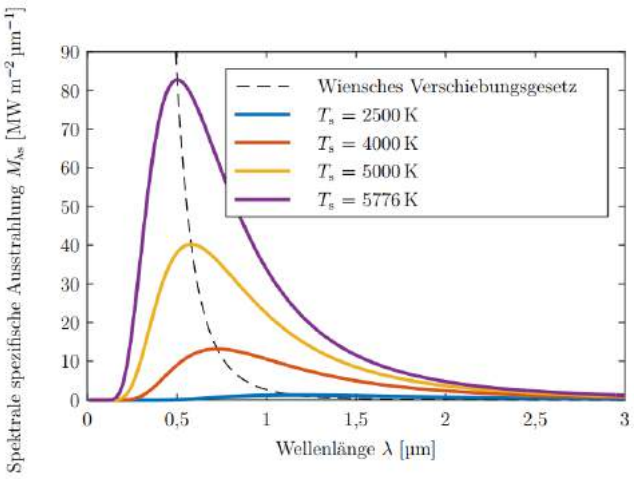

Abbildung 2.4: Spektrale spezifische Ausstrahlung schwarzer Körper verschiedener Temperaturen [Gor17]

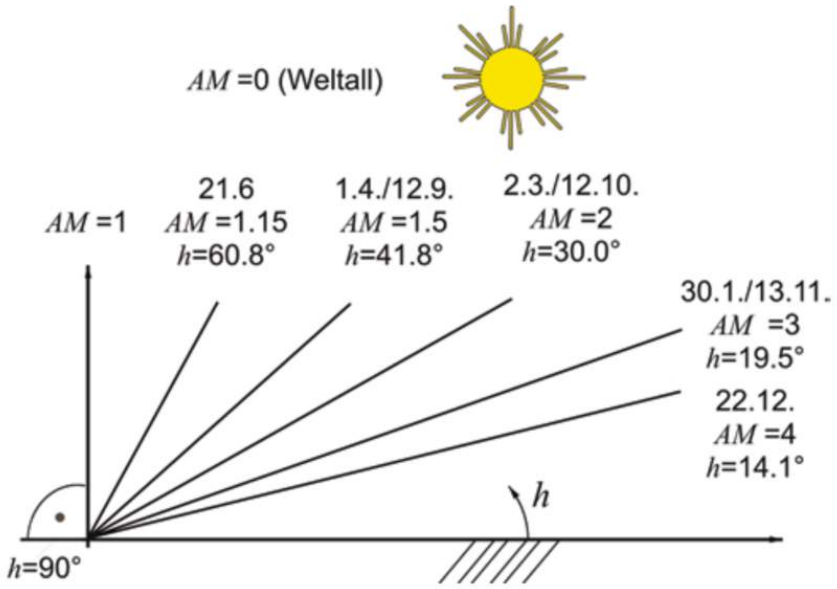

Abbildung 2.5: Air-Mass-Faktoren verschiedener Einstrahlwinkel [SH12]

2.2 Funktionsweise von Radiometern

Radiometer sind Messinstrumente, mit denen die Strahlungsflussdichte bestimmt wird. Bei Flussdichtemessungen an Solartürmen werden in der Regel Gardon Radiometer verwendet. Diese Radiometer nutzen den Seebeck-Effekt zur Bestimmung der Flussdichte. Dieser Effekt, sowie die allgemeine Funktionsweise von diesen Radiometern werden im Folgenden erläutert.

2.2.1 Seebeck-Effekt

Der Seebeck-Effekt beschreibt den physikalischen Vorgang, dass eine Spannung gemessen werden kann, die durch einen Temperaturgradienten hervorgerufen wird. Dieser Effekt wurde von Thomas Johann Seebeck entdeckt. Ein Temperaturgradient innerhalb eines Materials bewirkt einen Wärmefluss, um diesen Gradienten auszugleichen. Dieser Wärmefluss wird bei elektrisch leitenden Materialien vor allem durch die Bewegung von Elektronen hervorgerufen. Dementsprechend wird durch einen Temperaturgradienten auch ein Ladungsstrom erzeugt, welcher eine Thermospannung bewirkt. Dieses Phänomen ruft nur sehr kleine Ströme hervor, kann allerdings messbare Spannungen erzeugen. Maßgeblich dafür ist der Seebeck-Koeffizient, der in der Einheit mV/K angegeben wird. Dabei sind 0,01 mV/K bei Metallen bis 1mV/K bei Halbleitern typische Werte dieses Koeffizienten. [MT12]

2.2.2 Gardon-Radiometer

Gängige Messinstrumente zur Bestimmung der Strahlungsflussdichte bei Solarturmreceivern sind die Gardon-Radiometer. Diese wurden 1953 vom namensgebenden Robert Gardon entwickelt. Ein Gardon Radiometer umfasst drei Hauptbestandteile (siehe Abbildung 2.6). Der größte Teil ist der formgebende Kupferkörper, der gekühlt wird und eine zylindrische Bohrung besitzt. Die Kühlung kann mithilfe von Kühlflüssigkeit, aber auch mit Wasser realisiert werden. Wichtig ist, dass der Kupferkörper bei Bestrahlung eine konstante Temperatur aufweist. Auf der Vorderseite des Radiometers ist eine dünne Folie aus schwarz beschichtetem Konstantan geschweißt. Im Zentrum der Bohrung wird ein Kupferdraht ebenfalls mit der Konstantan-Folie verschweißt. Somit entstehen zwei Thermoelemente: Kupferdraht-Konstantanfolie (innen) und Kupferkörper-Konstantanfolie (außen). Es wird der Seebeck-Effekt genutzt, um die Bestrahlungsstärke zu bestimmen. Sind die Temperaturen von Zentrum und Innenrand der Folie gleich, so gleichen sich die beiden Thermospannungen aus und die gemessene Spannung zwischen Kupferdraht und -körper ist Null. Bei Bestrahlung der Folie mit der Bestrahlungsstärke E entsteht über den Radius r der Folie ein Temperaturgefälle, wodurch sich unterschiedliche Thermospannungen an Draht und Körper ausbilden. Die zwischen Draht und Körper gemessene Thermospannung U_{th} ist proportional zur Bestrahlungsstärke E mit einem Kalibrierungsfaktor K, der in der Regel vom Hersteller bestimmt wird. [Ulm03]

$$E = K \cdot U_{th} \tag{2.14}$$

Die beim Bestimmen des Kalibrierungsfaktors auftretenden Unsicherheiten wirken sich auf die Messunsicherheit mit ca. ±3% aus. Die Radiometer haben eine Zeitkonstante von ca. 0,1 s.

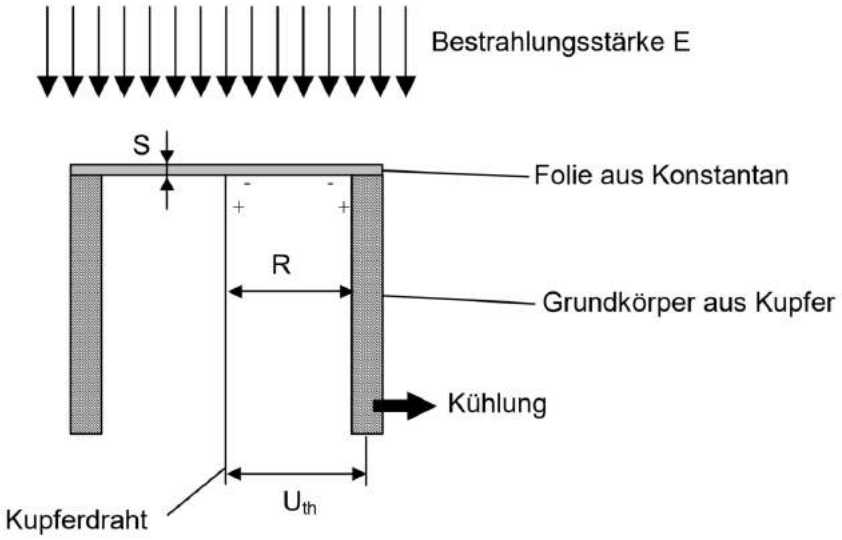

Abbildung 2.6: Prinzipskizze eines Gardon Radiometers [Ulm03]

2.3 Optische Kameras

Für verschiedene Methoden der Strahlungsflussdichtemessung (siehe Kapitel 3) werden Helligkeitswerte von reflektierenden Oberflächen ausgewertet. Zur Bestimmung dieser Helligkeitswerte werden CCD oder CMOS-Kameras eingesetzt. Die Funktionsweise dieser Kameras sowie Fehlerursachen werden im Folgenden erläutert. Wenn nicht anders gekennzeichnet, beziehen sich die Inhalte dieses Abschnitts auf das Buch Industrielle Bildverarbeitung [DSAS11].

2.3.1 Funktionsweise

Die beiden größten Vertreter von Halbleitersensoren sind Charge Coupled Device (CCD) und Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) Sensoren. Beide basieren auf dem gleichen Grundprinzip. Im Falle einer Bildaufnahme fällt Licht auf den jeweiligen Sensor. Dieses Licht ist ein Photonenstrom, der im lichtempfindlichen Teil des Halbleitersensors (Fotodioden) Elektronen zu freien Elektronen anregt. Diese

angeregten Elektronen werden über die Belichtungszeit gesammelt. Die Belichtungszeit wird auch Integrationszeit genannt, da es sich um eine zeitliche Integration der Elektronen handelt. Ist die Integrationszeit abgelaufen, wird die gesammelte Ladungsmenge zu Wandlungsstufen transportiert und proportional in Spannungen umgewandelt, die in numerische Werte umgesetzt werden können. Diese numerischen Werte sind dann die jeweiligen Helligkeitswerte der Pixel. CCD und CMOS-Sensoren unterscheiden sich in der Auslesung der gesammelten Ladungen.

CCD-Sensoren

Bei CCD-Sensoren werden, wie beschrieben, die Ladungen während der Integrationszeit gesammelt. Neben jedem Pixel bzw. jeder Fotodiode befindet sich ein Transportregister. Nach Ablauf der Integrationszeit werden die Ladungen in diese Register verschoben. Die Register sind lichtgeschützt, daher werden in der Regel keine Ladungen mehr erzeugt. Die Ladungen können nun pixelweise aus den Transportregistern verschoben und ausgelesen werden. Dabei kommt die namensgebende „Charge Couple“ Methode zum Einsatz. Die Ladungen werden zeilenweise aus den vertikalen Transportregistern in das horizontale Transportregister verschoben. Aus diesem werden die einzelnen Ladungen dann als Folge ausgelesen und mit einem Ladungsverstärker in eine Spannung umgewandelt und digitalisiert. Das Sensorschema ist in Abbildung 2.7 abgebildet.

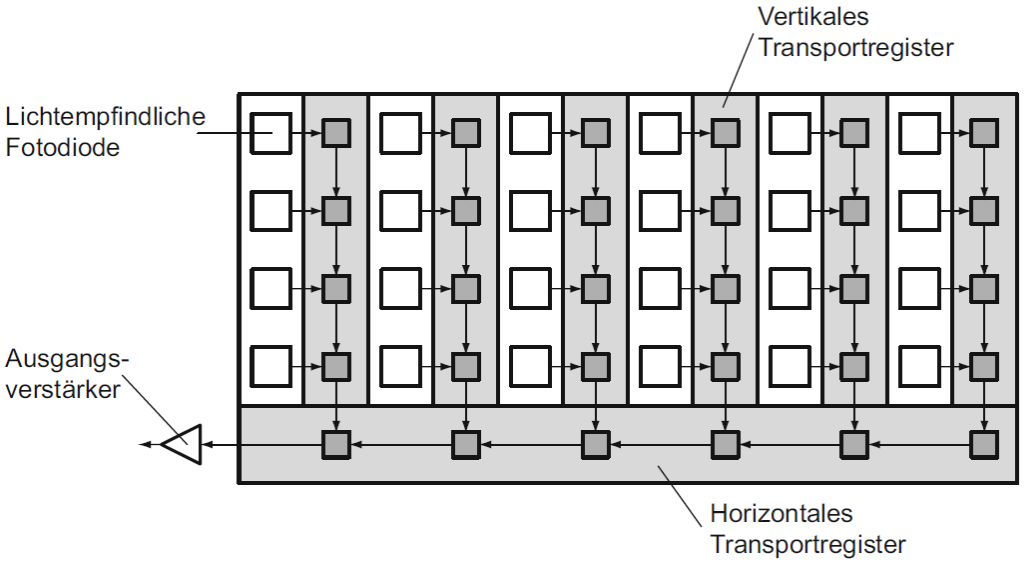

Abbildung 2.7: Schema eines CCD-Sensors [DSAS11]

Da die Auslesung der Ladungswerte und die Integration der Elektronen getrennt voneinander abläuft, können diese Vorgänge parallel zueinander verlaufen, was den Unterschied vom „sequenziellem Modus“ zum „Overlapped Modus“ ausmacht. Durch diese Parallelisierung, die in Abbildung 2.8 zu sehen ist, kann die Bildrate des Sensors

gesteigert werden.

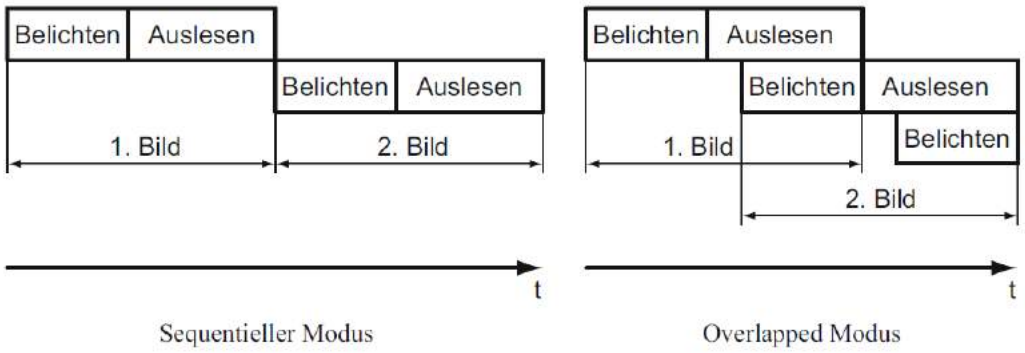

Abbildung 2.8: Betriebsmodi eines CCD-Sensors [DSAS11]

CMOS-Sensoren

Der ausschlaggebende Unterschied von CMOS-Sensoren zu CCD-Sensoren besteht darin, dass bei CCD-Sensoren in der Regel nur ein Ladungsverstärker pro Sensor verbaut wird. Bei CMOS-Sensoren hingegen besitzt jeder Pixel einen eigenen Ladungsverstärker. Daher werden schon während der Belichtungszeit Ladungen in Spannungen umgewandelt. Diese Sensoren werden auch als „Active Pixel Sensoren“ bezeichnet. Der Aufbau von CMOS-Sensoren ist in Abbildung 2.9 gezeigt.

2.3.2 Fehlerquellen

Im Folgenden werden ausgewählte Fehlerquellen der Kamerasysteme erläutert und ggf. in Bezug zu den Sensoren gebracht.

Blooming

Der Effekt des Bloomings entsteht, wenn auf einen Pixel mehr Licht fällt, als Ladungsträger gespeichert werden können. Dies tritt im überbelichteten Bildausschnitt auf. Die überschüssigen Ladungsträger fließen dann, nach dem Prinzip des geringsten Widerstands, auf die benachbarten Pixel über. Dadurch werden benachbarte Pixel von überbelichteten Pixeln fälschlicherweise zu hell dargestellt. In CCD-Sensoren wird über Anti-Blooming-Drains versucht diese Ladungsträger abzuführen. CMOS haben aufgrund der kontinuierlichen Auslesung der Fotodioden eine geringere Anfälligkeit für Blooming Fehler.

Linearität

Die Ladung eines Pixels steigt linear mit der Anzahl der einfallenden Photonen bis zum Erreichen seiner Kapazität. Allerdings kann es zu Nichtlinearitäten innerhalb des

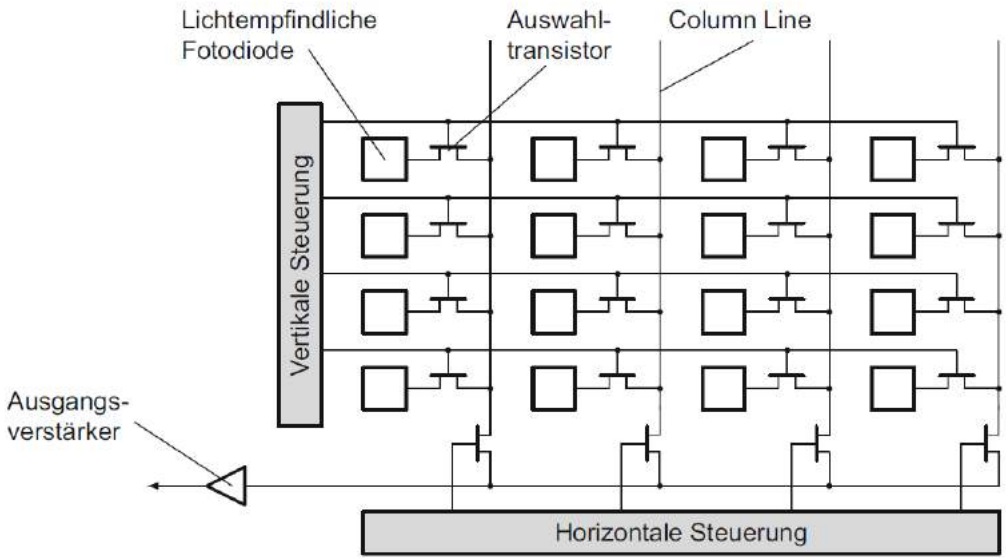

Abbildung 2.9: Schema eines CMOS-Sensors [DSAS11]

Ladungsverstärkers kommen. Diese Fehler sind aber relativ gering und in den meisten Anwendungen zu vernachlässigen.

Shading

Beim sogenannten Shading tritt ein systematischer Helligkeitsfehler auf. Dieser Fehler tritt vor allem durch Randabschattungen auf. Charakteristisch ist, dass vom Bildzentrum zum Bildrand die Helligkeit abnimmt. Es sei g_i der Grauwert eines Pixels des aufgenommenen Bildes, b_i der reale Helligkeitswert und f_i ein Korrekturfaktor für einen Pixel, so gilt:

$$g_i = f_i b_i \tag{2.15}$$

Zur Bestimmung der Werte f_i für jeden Pixel kann ein Bild bekannter homogener Helligkeit b aufgenommen werden. Dann gilt mit den Referenzgrauwerten $g_{r,i}$:

$$f_i = \frac{g_{r,i}}{b} \tag{2.16}$$

Mit diesen bestimmten Werten für f_i wird das aufgenommene Bild korrigiert.
Zur Erstellung eines homogenen Bildes kann eine Ulbricht-Kugel verwendet werden. Diese besteht aus einer innen diffus reflektierenden Hohlkugel. Bei einem solchen Versuchsaufbau wird die Kamera mit entsprechender Blendeneinstellung in die Öffnung der Ulbrichtkugel positioniert, sodass kein Licht von außerhalb der Kugel auf den

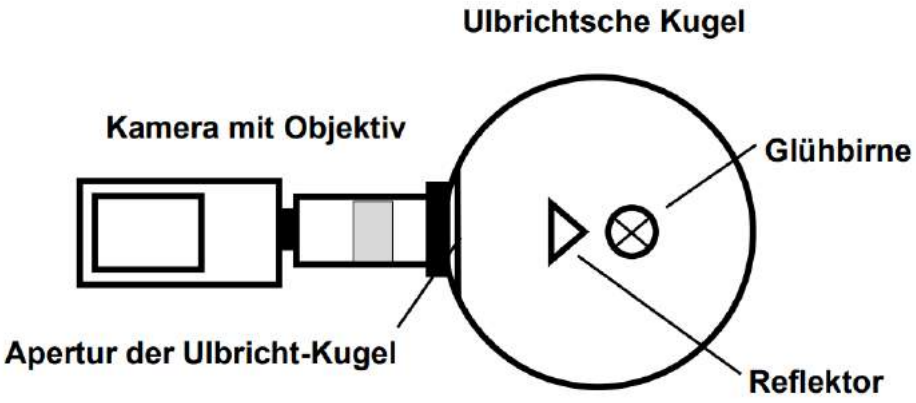

Abbildung 2.10: Aufbau zur Bestimmung des Shadingbilds [Wei00]

Sensor gelangen kann. In der Ulbricht-Kugel befindet sich ein Leuchtmittel, das gegen einen Reflektor strahlt, sodass auf den Sensor nur diffuses Licht gelangt, welches eine homogene Helligkeitsverteilung besitzt. Der Aufbau einer Ulbrichtkugel ist in Abbildung 2.10 zu sehen. [Wei00]

2.4 Solarturmkraftwerke

Die in dieser Arbeit angewendete Methode zur Strahlungsflussdichtemessung wird für Solarturmreceiver entwickelt. Durch das Verfahren sollen Solarturmkraftwerke optimal betrieben und Wirkungsgrade bestimmt werden. Im Folgenden werden Solarturmanlagen und verschiedene Betriebsmodi erläutert. Außerdem wird das Versuchskraftwerk in Jülich beschrieben.

2.4.1 Allgemein

Solarturmkraftwerke gehören zu den punktfokussierenden Systemen. Dabei wird die solare Einstrahlung mit Hilfe von vielen Spiegeln, den Heliostaten, auf einen oder mehrere Punkte fokussiert. Im Fokuspunkt liegt ein Receiver, der meistens mit möglichst hohen Temperaturen betrieben wird. Das Heliostatfeld besteht aus hunderten bis tausenden einzelnen Heliostaten, die einzeln in zwei Achsen ausgerichtet werden können. Dadurch werden Konzentrationsfaktoren von 500 bis 1000 erzielt. Der Konzentrationsfaktor KF lässt sich mit Hilfe der Anzahl der Spiegel n, der Fläche eines Heliostaten A_{hel} und der Fläche des Receivers A_{rec} berechnen:

$$KF = \frac{n \cdot A_{hel}}{A_{rec}} \tag{2.17}$$

Heliostaten gibt es in verschiedenen Ausführungen. Die Oberfläche von Heliostaten ist leicht gekrümmt, wodurch jeder Heliostat konzentrierend ist.
Heliostatfelder werden aufgrund des Sonnenverlaufs auf der Nordhalbkugel entweder als Nordfeld oder als Rundumfeld ausgelegt.
Bei Bestrahlung des Receivers mit dem Heliostatfeld treten verschiedene Verlust auf. Zum einen durch die Reflektivität der Spiegel, die je nach Material zwischen 0,88 und 0,94 liegt. Zum anderen wird die Strahlung zwischen Heliostaten und Receiver von der Atmosphäre abgeschwächt (siehe Abschnitt 2.1.4). Dieser Verlust hängt von der Trübung der Atmosphäre und von der Länge des Weges, den die Strahlung nehmen muss, ab. Außerdem treten, je nach Einfallswinkel auf den Receiver, Kosinusverluste auf. Da die Heliostaten relativ dicht aneinander stehen, kann es zudem zu Verschattung einzelner Heliostaten kommen. Des Weiteren tritt sogenanntes Spillage auf, was Verluste sind, die durch unpräzise Ausrichtung der Heliostaten auftreten.
Wie beschrieben trifft die konzentrierte Solarstrahlung mit einer Konzentration von 500-1000 auf den Receiver. Dabei treten Strahlungsflussdichten von bis zu 1000 kW/m^2 und Temperaturen von bis zu 1000 °C auf. Der Receiver hat die Funktion, diese Einstrahlung auf ein Wärmeträgermedium zu übertragen. Für verschiedene Wärmeträgermedien gibt es entsprechend auch verschiedene Receiver-Bauweisen. [KSW13]

Offen-volumetrischer Receiver

Für das Wärmeträgermedium Luft wird in der Regel ein offen-volumetrischer Receiver verwendet. Dabei absorbiert eine poröse Receiverstruktur die Solarstrahlung. Umgebungsluft wird mit einem Gebläse durch diese Receiverstruktur gesaugt und kann dabei auf Temperaturen von bis zu 850 °C erhitzt werden. Diese Luft erwärmt, verdampft und überhitzt in einem Wärmeübertrager Wasser, welches in einem nachgeschaltetem Dampfprozess Strom erzeugen kann. Vorteile dieser Bauart sind vor allem die Unbedenklichkeit bei der Verwendung des Wärmeträgermediums Luft. Des Weiteren kann nach der solaren Erwärmung auch noch ein fossiler Brenner nachgeschaltet werden, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Ein Schema einer solchen Anlage ist in Abbildung 2.11 gezeigt. [KSW13]

Flüssigsalz-Receiver

Kommerzielle Kraftwerke sind heutzutage fast ausschließlich mit Flüssigsalz-Receivern ausgestattet. Wie der Name bereits verrät, ist das Wärmeträgermedium dieser Receiver aufgeschmolzenes Salz. Der Vorteil dieser Bauart ist, dass sich das erhitzte Salz direkt speichern lässt. Bei Bedarf kann dann mit dem gespeicherten Salz Wasser verdampft werden, um mit diesem dann Strom zu generieren. Diese Möglichkeit ist ein entscheidener Vorteil gegenüber einer Photovoltaik-Anlage, da die Speicherung von Strom wesentlich teurer ist, als die Speicherung von thermischer Energie in Form einer Salzschmelze. In Abbildung 2.12 ist ein schematischer Aufbau eines Solarturmkraftwerks mit Flüssigsalz-Receiver und nachgeschaltetem Dampfkreislauf gezeigt. In der Regel werden solche Kraftwerke mit einem Rohreceiver betrieben, in dessen Roh-

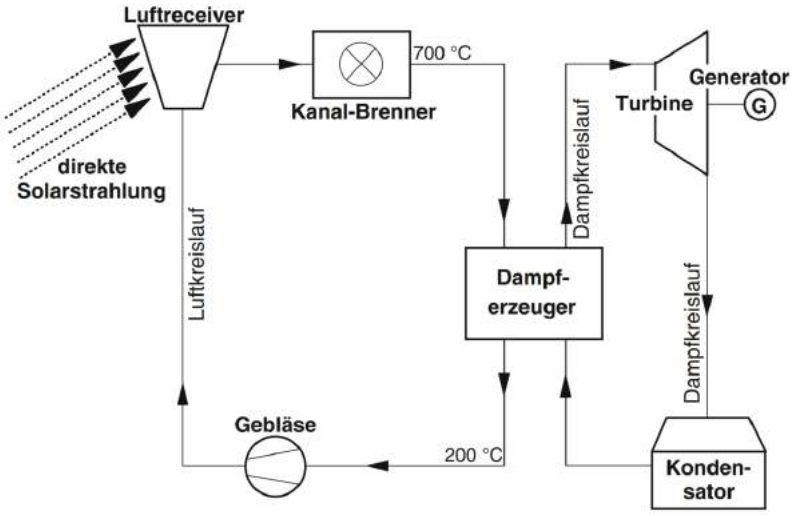

Abbildung 2.11: Schema eines Solarturmkraftwerks mit offenen volumetrischem Receiver [KSW13]

re das flüssige Salz beim durchfließen erhitzt wird. Die Eintrittstemperatur liegt bei ca. 300 °C und die Austrittstemperatur bei über 550 °C. Eine typische Salzschmelze besteht aus 60 % (auf die Masse bezogen) Natriumnitrat ($NaNO_3$) und 40 % Kaliumnitrat (KNO_3). Da die Kristallisation der Schmelze bei etwas unter 250 °C einsetzt, müssen alle durchströmten Komponenten des Salzkreislaufs beheizbar sein. [Nie18]

2.4.2 Anlage in Jülich

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt betreibt in Jülich ein solarthermisches Versuchskraftwerk. Es handelt sich um ein Solarturmkraftwerk mit einem Nordfeld. Das Nordfeld umfasst 2153 Heliostaten, die mit der am DLR entwickelten Software HeliOS gesteuert werden (siehe Abbildung 2.13). Das Kraftwerk wurde 2008 mit einem 60 Meter hohen Turm erbaut, in dem sich ein offen volumetrischer Receiver befindet (siehe Abbildung 2.14 links). Dieser Receiver hat eine Fläche von 22 Quadratmetern und kann Luft auf etwa 700 °C erhitzen. Dem Receiver ist ein Wasser-Dampfkreislauf nachgeschaltet, der über einen Generator Strom produziert. Dabei hat das Kraftwerk eine elektrische Spitzenleistung von 1,5 Megawatt. [Deu]
2019-2020 wurde neben dem schon bestehenden Solarturm Jülich der Multifokusturm errichtet. Dieser erhöht die Testkapazitäten für solarthermische Technologien. Insgesamt verfügt der Turm, siehe Abbildung 2.14, über drei Versuchsebenen, auf denen parallel Versuchsstände aufgebaut werden können. [Deu22]
In diesem Multifokusturm befindet sich auf der ersten Versuchsebene ein im Projekt HPMS-II erbauter Rohrreceiver, der mit Flüssigsalz betrieben wird. Der Receiver besteht aus acht seriellen Strängen mit je 2 parallelen Rohren. Die Receiverauslasstemperatur beträgt hierbei bis zu 600° C. Der Receiver soll eine thermische Leistung von einem Megawatt bereitstellen. [Ebe19]

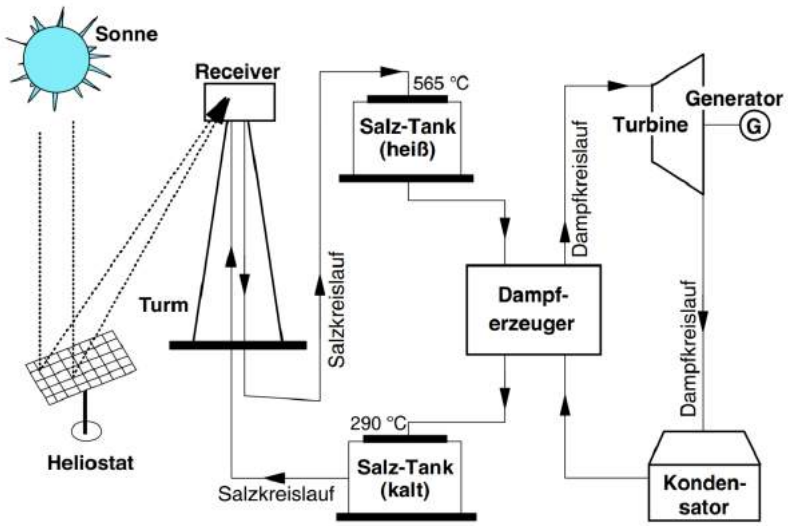

Abbildung 2.12: Schema eines Solarturmkraftwerks mit Flüssigsalz-Receiver [KSW13]

Abbildung 2.13: Heliostatenfeld des Versuchskraftwerks in Jülich (Quelle: DLR)

Abbildung 2.14: Solarturm Jülich und Multifokusturm (Quelle: DLR)

3 Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über mögliche Verfahren zur Strahlungsflussdichtemessung an Solarturmreceivern. Es werden Verfahren vorgestellt, bei denen ausschließlich mit Radiometern gemessen wird sowie solche, bei denen eine Kamera die Verteilung der Strahlungsflussdichte ermittelt. Zusätzlich wird eine Einführung in die Strahlungsimulation gegeben.

3.1 Flussdichtemessung mit Radiometern

Die Strahlungsflussdichte an einem spezifischen Punkt kann mithilfe von Radiometern, wie in Abschnitt 2.2 erläutert, direkt bestimmt werden. Um von spezifischen Punkten eine Flussdichteverteilung zu bestimmen, können verschiedene Verfahren verwendet werden. Eine Auswahl wird im Folgenden erläutert.

3.1.1 Fest verbaute Radiometer

Eine Möglichkeit besteht darin, mehrere Radiometer auf der Receiveroberfläche anzuordnen. Dies bietet die Möglichkeit kontinuierlich Strahlungsflussdichtewerte an diskreten Punkten zu messen. Um diese in eine Strahlungsflussdichteverteilung zu überführen, werden die Werte zwischen den Radiometern interpoliert und Werte zwischen den äußersten Radiometern und dem Receiverrand extrapoliert. Eine ungleichmäßige Anordnung der Radiometer auf der Receiveroberfläche ermöglicht eine genaue Messung bei einer geringeren Anzahl an Radiometern. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in den genauen Messwerten der Radiometer. Jedoch werden je nach Größe des Receivers auch eine hohe Anzahl an Radiometern benötigt und die Auflösung der Messung ist durch diese Anzahl zudem begrenzt. Durch die hohen Temperaturen auf der Receiveroberfläche und die hohen Strahlungsflussdichten, die kontinuierlich auf diese Radiometer gerichtet sind, verringert sich die Lebensdauer der Messinstrumente auf ungefähr sechs Monate. Die dadurch entstehenden Kosten und die Unterbrechung des Betriebs zum Austausch sind erhebliche Nachteile des Verfahrens. [RHU+14]

3.1.2 Movingbar mit Radiometern

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Radiometer an einem beweglichen Balken zu befestigen. Dieser Balken wird dann mit geringem Abstand zur Receiveroberfläche über diese bewegt und an verschiedenen Punkten angehalten. Zur Messung benötigen die Radiometer eine gewisse Verweilzeit, um genaue Messergebnisse zu erzielen. Vorteil dieses Verfahren ist, dass im Gegensatz zu fest verbauten Radiometern (siehe

Abschnitt 3.1.1) diese der Strahlung nicht kontinuierlich ausgesetzt sind. Die Lebensdauer ist daher signifikant höher. Allerdings müssen Radiometer aktiv, beispielsweise mit Wasser, gekühlt werden. Zusätzlich muss auch die Movingbar gekühlt werden. Die Kühlung in Kombination mit der Verfahrbarkeit der Messoberfläche stellt einen großen Aufwand und Kostenfaktor dar. Daher sind diese Art der Messungen nur im kleinen Rahmen, beispielsweise für Forschungsreceiver, sinnvoll. [RHU+14]

3.1.3 Fokusverschiebung

Ein weiteres Verfahren, welches auch im Rahmen dieser Arbeit angewendet wird, ist die sogenannte Fokusverschiebung mit Radiometern. Hierbei sind Radiometer in der Nähe des Receivers angeordnet, allerdings nicht auf dem Receiver und sind daher nicht der maximalen Strahlung ausgesetzt. Soll eine Messung der Strahlungsflussdichte bzw. -verteilung durchgeführt werden, so wird der gesamte Strahlungsfokus mithilfe der Heliostatensteuerungssoftware verschoben. Diese Verschiebung wird je nach Anordnung der Radiometer einige Male mit unterschiedlichen Offsets wiederholt und die jeweiligen gemessenen Strahlungsflussdichewerte aufgezeichnet. Da die Entfernung der Heliostaten zum Receiver viel größer ist, als der Abstand der Fokusverschiebung, kann näherungsweise angenommen werden, dass die einzelnen Werte der Verschiebungen denen der projizierten Punkte auf dem Receiver entsprechen. Auch bei diesem Verfahren ist die erhöhte Lebensdauer der Radiometer aufgrund der schonenden Positionierung von Vorteil. Allerdings muss für jede Messung der Betrieb unterbrochen werden und auch die Gegebenheiten des Receivers schränken die Positionierung von Radiometern neben diesem ein. Außerdem kann es durch die Verschiebung des gesamten Strahlungsfokus zu hohen Temperaturgradienten kommen, was Anforderungen an das Material des Receivers stellt. [Gli21]

3.2 Optische Flussdichtemessung

Bei optischen Messverfahren handelt es sich in der Regel um Verfahren, bei denen mit Hilfe von Kamerabildern ein Flussdichtebild erstellt wird. Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben gilt für Absorption, Reflexion und Transmission von Strahlung, die auf ein Objekt trifft, folgende Formel:

$$1 = \alpha + \tau + \rho \tag{3.18}$$

Da Receiver in Solartürmen in der Regel nicht lichtdurchlässig sind gilt $\tau = 0$ und damit:

$$1 = \alpha + \rho \tag{3.19}$$

Dementsprechend hängt die absorbierte Strahlung von der reflektierten Strahlung ab. Die Reflexionseigenschaften realer Objekte sind allerdings immer abhängig vom Einfalls- und Beobachtungswinkel, sowie von der Oberflächenbeschaffenheit. Diese

Nichtlinearität sollte zur Bestimmung der Strahlungsflussdichteverteilung einbezogen werden. Um von einem relativen Strahlungsflussdichtebild, welches mit der Helligkeitsverteilung erstellt wird, auf absolute Werte zu schließen, muss einem Helligkeitswert ein diskreter Stahlungsflussdichtewert zugeordnet werden. Dieser Vorgang nennt sich Skalierung und wird meistens mit Hilfe von einem oder mehreren Radiometern ausgeführt. Im Folgenden werden verschiedene Verfahren zur optischen Strahlungsflussdichtemessung vorgestellt und erläutert.

3.2.1 Diffus reflektierendes Target

Ein sogenanntes diffus reflektierendes Target sei eine Oberfläche, die das Lambert'sche Gesetz erfüllt (siehe Abschnitt 2.1.3). Es existiert kein Material, dass ausschließlich diffus strahlt. Jedoch können Oberflächen, die speziell beschichtet sind, diese Anforderung annähern. Es werden beispielsweise Targets mit Bariumsulfat-Beschichtungen hergestellt [Sph]. Mithilfe dieser Targets können die oben beschriebenen richtungs- und materialabhängigen Reflexionseigenschaften des Receivers vernachlässigt werden. Dazu wird in die Nähe des Receivers ein diffus reflektierendes Target positioniert. Wenn eine Messung vorgenommen werden soll, kann der Fokus für kurze Zeit auf das Target gerichtet werden. Während der Fokus auf dem Target liegt, wird ein Bild mit einer CCD-Kamera aufgenommen, welches eine Matrix an Grauwerten darstellt. Diese Grauwerte müssen dann mit einem Radiometerwert kalibriert werden. Dazu befindet sich innerhalb der diffus reflektierenden Fläche ein Radiometer. Durch dieses Verfahren kann mithilfe eines Bildes die Strahlungsflussdichteverteilung bestimmt werden. Sollte es nicht möglich sein, ein Target in der Größe des Receivers zu positionieren, so kann auch ein streifenförmiges Target montiert werden und wie in Abschnitt 3.1.3 der Fokus mehrfach verschoben werden. Die einzelnen Bilder können dann zu einer Verteilung zusammengefügt werden (siehe Abbildung 3.1). [Gli21]

3.2.2 Movingbarmethode

Eine Kombination der Verfahren aus Abschnitt 3.1.2 und Abschnitt 3.2.1 beschreibt die Movingbarmethode. Bei dieser wird ein diffus reflektierender Balken vor dem Receiver bewegt. In diesem Balken ist zusätzlich ein Radiometer zur Kalibrierung verbaut. Zunächst wird die Movingbar auf eine vordefinierte Position bewegt und dort ein Bild von dieser gemacht. Anhand dieses Bildes und dem Messwert des verbauten Radiometers kann das Verfahren kalibriert werden. Anschließend fährt die Movingbar den Receiver in vordefinierten Schritten ab. Es wird pro Schritt je ein Bild der Movingbar gemacht. Diese Bilder können im Anschluss zusammengefügt werden und mit der Kalibrierung in eine Strahlungsflussdichteverteilung gewandelt werden (siehe Abbildung 3.2). Die Nachteile bezüglich der Kühlung und der Beweglichkeit aus Abschnitt 3.1.2 bleiben bestehen. Allerdings hängt die Auflösung der Flussdichteverteilung bei diesem Verfahren von der Auflösung der Kamera ab. Somit lassen sich ohne größeren Aufwand hochauflösende Verteilungen erstellen. Eine solche Anlage

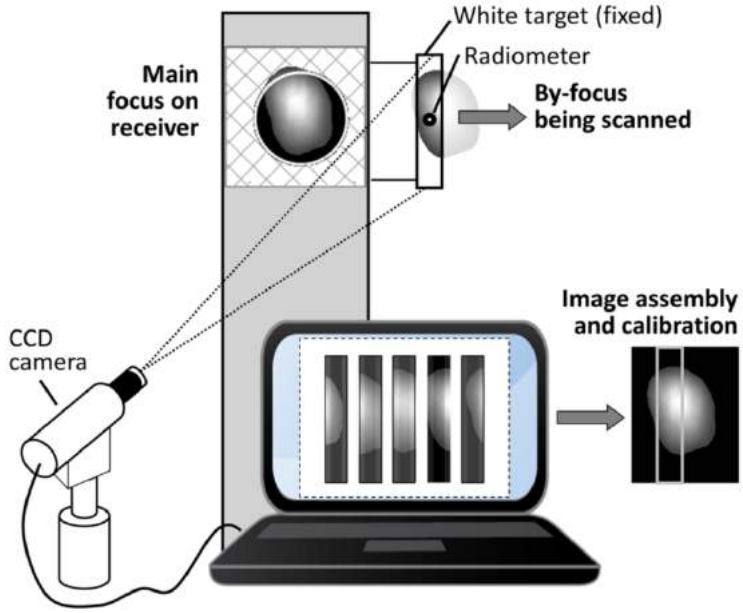

Abbildung 3.1: Schema der Messung mit diffus reflektierendem Target [RHU+14]

zur Flussdichtemessung wird auch vom Institut für Solarforschung in Jülich betrieben. [Wit14]

3.3 Flussdichtemessung mit Strahlungssimulation

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Strahlungsflussdichte auf Solarturmreceivern ist die sogenannte Strahlungssimulation. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt besitzt das eigens entwickelte Simulationsprogramm STRAL (**S**olar **T**ower **R**aytracing **L**aboratory), das genaue Ergebnisse liefert. In diesem Programm können Modelle für Solarturmanlagen implementiert werden, um die Zielpunktverteilung der Heliostaten zu optimieren. Außerdem sollen gesamte Kraftwerke simuliert werden, indem das in STRAL modellierte Heliostatfeld mit einem Receivermodell in der Simulationsumgebung Dymola gekoppelt wird. [BPPSU09]
Die Genauigkeit von Ergebnissen der Strahlungssimulation hängt vor allem von der Fehlertoleranz der Eingangsparameter ab. Zu den Eingansparametern gehören Konzentratorkonturfehler, Heliostaten-Nachführfehler, Heliostatenpositionen und -geometrie, Turmgeometrie und die Receiverposition. Die Heliostaten sowie die Solartürme können Verschattungen von aktiven Heliostaten verursachen, was in die Simulation einbezogen werden muss. Außerdem müssen die atmoshpärischen Bedingungen getrackt werden. Dazu gehören die DNI, die Sonnenform (engl. Sunshape) und die atmosphärische Dämpfung. [RHU+14]

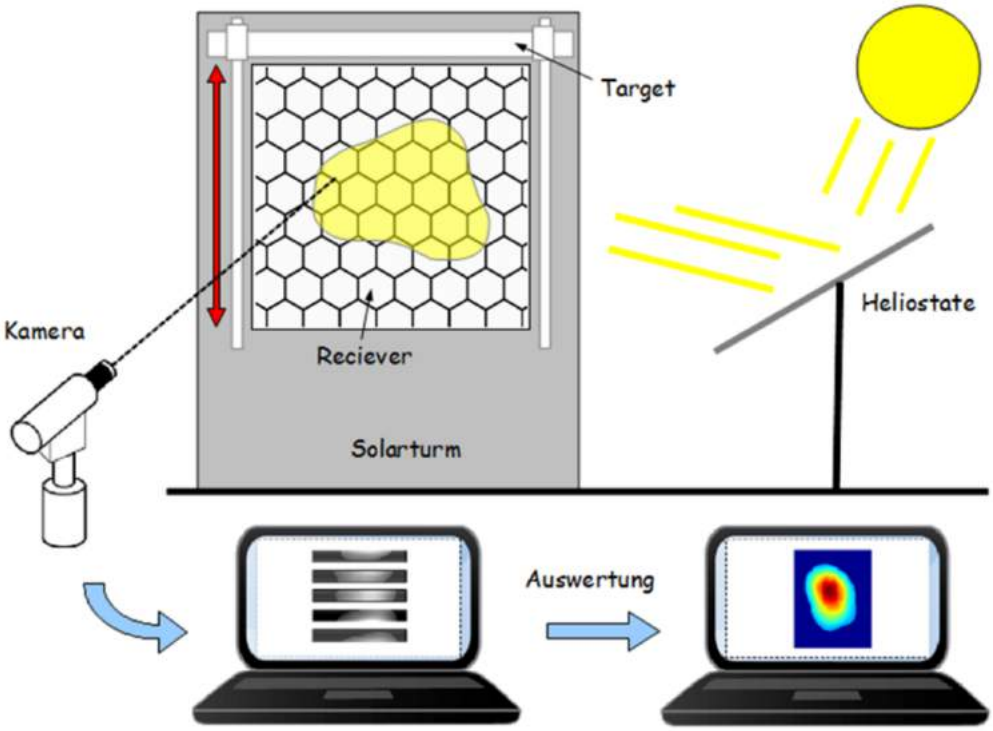

Abbildung 3.2: Schema des Movingbar-Verfahrens [Wit14]

4 Scan-Verfahren

Mit dem Scan-Verfahren werden die Reflexionseigenschaften der Receiveroberfläche bestimmt, um mit diesen ein Strahlungsflussdichtebild aus einer optischen Aufnahme des Receivers zu erstellen. In den folgenden Abschnitten werden die Schritte dieses Verfahrens einzeln erläutert. Das Verfahren wurde von Gorzalka 2017 angewendet und in seiner Masterarbeit näher erläutert. Die folgenden Abschnitte orientieren sich an dieser Arbeit, wenn nicht anders gekennzeichnet [Gor17]. Diese Arbeit beschäftigt sich vor allem mit der Anwendung des Scan-Verfahrens für die anschließende Flussdichtemessung an einem Flüssigsalzreceiver.

4.1 Reflexionseigenschaften des Receivers

Um von einer Bildaufname eines Receivers auf die Strahlungsflussdichte zu schließen, wurde von Offergeld et al ein Scan-Verfahren entwickelt und patentiert, um die Reflexionseigenschaften des Receivers zu bestimmen [ORS18]. Diesem Verfahren liegt zugrunde, dass die Reflexionseigenschaften eines Receivers von der Oberflächenbeschaffenheit sowie vom Einfalls- und Beobachtungswinkel abhängig sind. Durch Inhomogenitäten der Receiveroberfläche ist die materialabhängige Reflexion nicht konstant über die gesamte Fläche. Abnutzungen und Verschmutzungen des Receivers beeinflussen die Absorptionseigenschaften und damit auch die Reflexionseigenschaften. Bei gleicher Flussdichte liefern daher verschiedene Regionen des Receivers unterschiedliche Helligkeitswerte bei der Bildaufnahme. Um diese zu korrigieren wird ein sogenannter Receiver-Scan eingesetzt. Bei diesem wird der Fokus eines Heliostats mäanderförmig über den Receiver gefahren. Dabei werden kontinuierlich, mit hoher Bildrate, Bilder des Receivers aufgenommen. Aus der Gesamtheit der aufgenommenen Bilder wird im Nachhinein ein sogenanntes Maximalbild erstellt. Die Grauwerte des Maximalbildes setzen sich aus den Maximalwerten der einzelnen Pixel zusammen:

$$g_{max,i} = max(g_{i,1}, ..., g_{i,k}) \text{ mit k = Anzahl der aufgenommenen Bilder} \tag{4.20}$$

Dieses Maximalbild simuliert eine homogene Bestrahlung des Receivers und gibt daher Auskunft über die materialabhängigen Reflexionseigenschaften aus einer Richtung. Betrachtet man nun eine Bestrahlung des Receivers aus dieser Richtung, kann das aufgenommene Bild dieser Bestrahlung mithilfe des Maximalbilds korrigiert werden und eine unkalibrierte (siehe Abschnitt 4.4) Flussdichteverteilung erstellt werden. Dazu wird das Maximalbild invertiert und mit dem Mittelwert dieser invertierten Matrix normiert. Diese Matrix bildet dann eine Korrekturmatrix k_{korr} mit der die

Grauwerte des aufgenommenen Bildes korrigiert werden.

$$g_{korr,i} = k_{korr,i} \cdot g_{aufg,i} \tag{4.21}$$

Da bei Solartürmen die Heliostaten in einem großen Feld angeordnet sind, wirken sich auch die Einfalls- und Beobachtungswinkelabhängigkeit der Reflexionseigenschaften auf die Helligkeitswerte aus. Daher wird das Scan-Verfahren aus verschiedenen Punkten des Heliostatenfelds wiederholt. Außerdem wird zusätzlich ein Scan eines diffus reflektierendes Targets erstellt. Dieser wird genutzt, um die einzelnen Scans der verschiedenen Gruppen miteinander zu vergleichen. Aus der Kombination der einzelnen Scans werden diskrete Werte der BRDF innerhalb des Feldes bestimmt. Das Heliostatenfeld wird in mehrere Gruppen eingeteilt, für die jeweils ein Scan erstellt wurde. Näherungsweise wird bei diesem Verfahren die BRDF über eine Gruppe als konstant angenommen, um den Aufwand zu begrenzen.
Dieses Scan-Verfahren wurde von Gorzalka [Gor17] mit Heliostaten bei Tag angewandt, wobei die Aufnahmen jeweils mit der zur Aufnahme vorliegenden DNI normiert werden müssen. Meyer [Mey21] und Zöller [Zöl21] verwendeten erstmalig einen Scheinwerfer bei Nacht, um die Maximalbilder zu erstellen. Dies hat den Vorteil, dass der Betrieb des Kraftwerks tagsüber nicht gestört wird und die Versuche unabhängig von Bewölkung durchgeführt werden können. Diese Methode findet auch in dieser Arbeit Anwendung.

4.2 Richtungszusammensetzung der Strahlung

Um die in Abschnitt 4.1 bestimmte BRDF auf ein aufgenommenes Bild bei Bestrahlung anwenden zu können, muss zunächst die Strahlungszusammensetzung bestimmt werden. Dazu können verschiedene Methoden verwendet werden, die sich in ihrem Aufwand und ihrer Genauigkeit unterscheiden.

4.2.1 Abschätzung

Die einfachste, aber auch ungenauste Methode ist die einfache Abschätzung durch Anzahl der fokussierenden Heliostaten. Dabei werden die Heliostaten die aus einer Gruppe auf den Receiver strahlen gezählt und auf die Anzahl der insgesamt fokussierenden Heliostaten bezogen. Diese Methode hat weder einen hohen Rechen- noch einen großen Zeitaufwand. Allerdings ist die Methode sehr ungenau, da weder die Abschwächung der Strahlung aus unterschiedlichen Positionen betrachtet wird, noch werden Heliostatenverschmutzungen oder unterschiedliche Fokuspunkte einbezogen.

4.2.2 Strahlungssimulation

Eine weitere Methode, die auch in dieser Arbeit angewandt wird, ist die Bestimmung der Richtungszusammensetzung über eine Ray-Tracing-Simulation. Dabei werden die benutzten Heliostaten sowie deren Fokuspunkte geloggt. Im Nachhinein können diese

mithilfe eines MATLAB-Skripts und der Simulationssoftware, in diesem Fall STRAL, ausgewertet werden. Dazu werden gruppenweise Simulationen durchgeführt und die so generierte Strahlungsflussdichteverteilung gespeichert. Die Addition der Verteilungen aller Gruppen ergibt die simulierte Gesamtverteilung. Mit diesen Informationen kann für jeden Pixel die zu den Gruppen gehörenden Anteile der Strahlung bestimmt werden. Diese Methode benötigt eine gewisse Rechenleistung, ist allerdings bedeutend genauer als die Abschätzung aus Abschnitt 4.2.1. Die Strahlungssimulation kann allerdings die Spiegelfehler, Verschmutzungen und Tracking-Fehler nur abschätzen.

4.2.3 Ermittlung durch Defokussierung

Die genauste Methode zur Bestimmung der Richtungszusammensetzung ist sehr zeitaufwendig und kann daher in der Regel nicht in einem kommerziellen Kraftwerk angewendet werden. Zur Forschung und Entwicklung, bei der möglichst genaue Strahlungsflussdichteverteilungen benötigt werden, ist die Methode allerdings empfehlenswert. Bei dieser Methode werden die Heliostaten nach der Aufnahme des Bestrahlungsbildes gruppenweise defokussiert. Nach jeder Defokussierung wird ein weiteres Bild aufgenommen. Mit der Subtraktion eines Bildes vom vorherigen Bild kann der Anteil der Strahlung pro Gruppe sehr genau bestimmt werden. Voraussetzungen zur Anwendung dieses Verfahrens sind eine Beständigkeit des Wetters über den Defokussierungsvorgang und die Robustheit des Receivermaterials gegenüber einer sprunghaften Defokussierung.

4.3 Erstellung der Strahlungsflussdichteverteilung

Zur Erstellung der Strahlungsflussdichteverteilung am DLR wurde ein Graphical User Interface (GUI) in der Programierumgebung MATLAB erstellt (siehe Abbildung 4.1). Im Folgenden wird schrittweise die Auswertung eines Bestrahlungsbildes in diesem GUI beschrieben.

1. **Subtraktion des Hintergrundbildes**
   Vor jeder Messreihe sollte ein sogenanntes Hintergrundbild aufgenommen werden. Dies ist eine Aufnahme ohne Bestrahlung des Receivers. Wenn möglich, sollte die Aufnahme bei diffusem Licht, also bei bewölktem Himmel, aufgenommen werden. Dieses Bild wird dann auf die Belichtungszeit der Bestrahlungsaufnahme normiert und von diesem abgezogen.

2. **Einrichtung der Auswertung**
   Zum Einrichten der Auswertung wird zunächst der Absorber-Modus gewählt. Außerdem wird eine Konfigurationsdatei geladen, in der verschiedene Receiverspezifische Parameter hinterlegt sind, die zur weiteren Auswertung nötig sind. In der Konfigurationsdatei ist zusätzlich ein Arbeitsordner hinterlegt, aus dem dann das entsprechende hintergrundkorrigierte Bestrahlungsbild ausgewählt werden kann. Außerdem werden die Matrizen des Scan-Ergebnisses sowie der Rich-

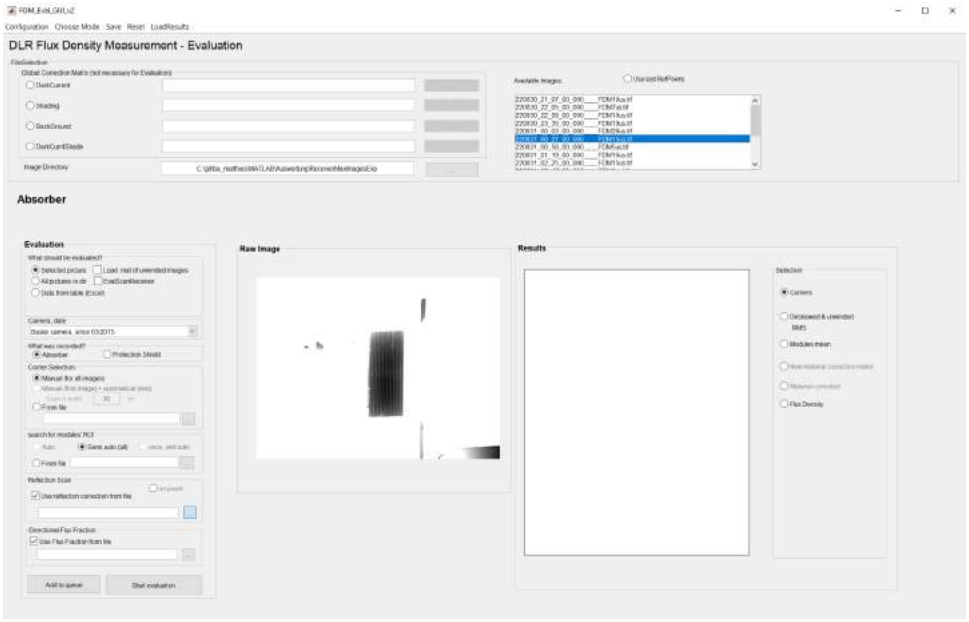

Abbildung 4.1: Graphical User Interface für die Strahlungsflussdichtemessung

tungszusammensetzung der Strahlung angegeben. Entweder ist die Belichtungszeit des Bestrahlungsbildes im Dateinamen angegeben oder diese wird nach Start der Auswertungsschleife manuell eingegeben.

3. **Entzerrung**
   Die Kamera, mit der die Bestrahlungsbilder aufgenommen werden, befindet sich ca. 30 m vom Turm entfernt auf einer Höhe von ca. 2,5 m. Daher wird der Receiver von schräg unten fotografiert. Der aufgenommene Receiver ist auf dem Bild somit zunächst verzerrt dargestellt. Ziel des Verfahrens ist es, die Flussdichteverteilung auf der Oberfläche des Receivers zu messen. Daher wird das Rohbild im ersten Schritt entzerrt. In der Konfigurationsdatei befinden sich die genauen Geometrie- und Raumdaten der Kamera sowie des Receivers. Die Ausrichtung der Kamera kann dabei nur grob bestimmt werden. Deswegen wird mithilfe von einer manuellen Eckenauswahl im Rohbild eine Optimierung durchgeführt. Anschließend wird die Kollinearitätsgleichung angewandt, um das entzerrte Bild zu erstellen. Eine detaillierte Erklärung dieses Verfahrens kann in der Bachelorarbeit von Judith Zöller nachgelesen werden [Zöl21].

4. **Erstellung des gemittelten Bildes**
   Um die Scanaufnahmen auf die Bestrahlungsaufnahmen anzuwenden, müssen die entzerrreten Bilder exakt übereinander liegen, da sonst Korrekturen auf die falschen Pixel angewendet werden. Um dies sicherzustellen, müsste die Kamera immer exakt gleich ausgerichtet sein. Da dies aufrund von Umwelteinflüssen nicht möglich ist, werden "Regions of Interest"(ROI) definiert. Innerhalb dieser

werden die Grauwerte des Scans und der Bestrahlungsaufnahme dann gemittelt und miteinander verrechnet. Für eine höhere Auflösung des Bilds können zwischen den gemittelten ROI Interpolationen angewendet werden. Wie die ROI definiert sind, hängt von der Receiverbauweise ab. Der Hauptreceiver des Solarturm Jülichs ist beispielsweise ein offen-volumetrischer Receiver mit ca. 1000 Receiver-Cups, die zur Heliostatfeldseite eine quadratische Form besitzen. Daher ist jeder Cup eine ROI. Um Korrekturfehler an den Rändern der Cups zu vermeiden, werden diese bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Bei Rohreceivern bietet es sich an, die ROI über die Rohrbreite zu definieren. Zwischen den Rohren kommt es meistens zu hohen Grauwerten, daher wird dieser Bereich, ähnlich wie beim Hauptreceiver, nicht berücksichtigt.

5. **Anwendung des Receiver-Scans**
   Bei der Anwendung des Receiver-Scans kommen die Ergebnisse aus den Abschnitten 4.1 und 4.2 zur Geltung. Die Scan-Ergebnisse liefern Aussagen über das Reflexionsverhalten aus den verschiedenen Gruppen und die Richtungszusammensetzung beschreibt die Anteile der Strahlung aus den verschiedenen Gruppen. Dementsprechend gewichtet die Richtungszusammensetzung die Scan-Ergebnisse. Dies geschieht für jeden Pixel getrennt voneinander, da durch die Wahl verschiedener Zielpunkte der Heliostaten, auf verschiedenen Teilen des Receivers eine unterschiedliche Richtungzusammensetzung der Strahlung vorliegt. Das daraus resultierende Ergebnis ist eine qualitative Strahlungsflussdichteverteilung, die noch in quantitative Werte umgewandelt werden muss.

4.4 Skalierung der Strahlungsflussdichtewerte

Die wie in Abschnitt 4.3 erstellte qualitative Strahlungsflussdichteverteilung wird im Anschluss skaliert. Dazu wird ein Skalierungsfaktor erstellt, der auf jeden Pixel angewandt werden kann. Sollte ein Radiometer auf der ausgewerteten Fläche verbaut sein, so kann der gemessene Radiometerwert den Grauwerten um das Messgerät herum zugeordnet werden und dadurch der Skalierungsfaktor erstellt werden. Dieses Vorgehen entspricht der Skalierung beim Movingbar-Verfahren aus Abschnitt 3.2.2 [Rau20].
Häufig sind Radiometer außerhalb der Receiverfläche angeordnet. Um diese dennoch für die Skalierung des Verfahrens zu nutzen, wird eine kleine Fokusverschiebung (siehe 3.1.3) durchgeführt. Der Fokus muss soweit verschoben werden, dass der projizierte Punkt, an dem das Radiometer misst, auf der Oberfläche des Receivers liegt. Sind mehrere Radiometer vorhanden, kann der so ermittelte Skalierungsfaktor noch gemittelt werden.
Ist kein Radiometer vorhanden, kann auch eine alternative Methode verwendet werden, die am Hauptreceiver des Solarturm Jülichs zum Einsatz kommt. Bei dieser Methode fokussieren mehrere nebeneinander stehende Heliostaten ohne auftretendes Spillage den Receiver. Während des Vorgangs werden die DNI, sowie der Reflexionsgrad der Heliostaten gemessen. Mithilfe einer Raytracing-Software wird die eintreffen-

de Strahlung berechnet. Mit Hilfe des Air-Mass Faktors (siehe Abschnitt 2.1.4) kann dann der Kalibrierfaktor erstellt werden. [Rau20]

5 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden die Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden konnten, erläutert.

5.1 Scan-Versuche

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Scan-Versuche aus 16 verschiedenen Positionen im Heliostatfeld durchgeführt. Diese wurden als Scheinwerferscans nachts ausgeführt. Es wurden zwei Nächte benötigt. Im Folgenden wird die Versuchsdurchführung erläutert.

5.1.1 Vorbereitung

Zur Vorbereitung war es zunächst notwendig die Positionen der einzelnen Scans zu definieren. Die Scans sollten jeweils mittig in den entsprechenden Heliostatfeldgruppen durchgeführt werden. Diese Gruppen wurden in Vorarbeiten ausgewählt und im Rahmen dieser Arbeit nicht verändert. Das Feld wurde in insgesamt 16 Gruppen eingeteilt, die auf vier Reihen aufgeteilt wurden. Dabei ist der Zenitwinkelunterschied auf den Hauptreceiver vom vordersten Heliostaten der Reihe zum hintersten Heliostaten der Reihe ungefähr gleich. Die Gruppenaufteilung sowie die Positionen, aus denen die Scans durchgeführt wurden, sind in Abbildung 5.1 zu sehen.

Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, werden bei mehreren Scans aus verschiedenen Positionen, Referenzscans eines diffus reflektierenden Targets benötigt. Dieses Target sollte in der Nähe des Receivers und zwingend im Kamerabild sein. Bei früheren Arbeiten konnte das Target entweder über eine Halterung am Turm befestigt werden oder es wurden Teile des Strahlungsschutzes, der um den Receiver angeordnet ist, entfernt und dort das Target montiert. Aufgrund der Gegebenheiten am HPMS-II Receiver entfallen beide Möglichkeiten. Daher wurde eine Teleskoparbeitsbühne genutzt, um das Target auf die Höhe des Receivers zu fahren. Da sich der Receiver auf 30 Metern Höhe befindet, wird die Arbeitsbühne schon von kleinen Windböen bewegt. Daher wurde die Bühne nur soweit herausgefahren, dass im Kamerabild eine repräsentative Fläche des Targets zu sehen ist. Der Aufbau des Targets ist in Abbildung 5.2 zu sehen.

Zur weiteren Vorbereitung wurden alle Lichter ausgeschaltet und ein geländefähiges Fahrzeug mit der nötigen Ausrüstung bestückt. Dazu gehören der ansteuerbare Scheinwerfer "RobE MegaPoint", ein Stromgenerator, um den Scheinwerfer zu betreiben sowie ein Maßband zur genauen Bestimmung der Position.

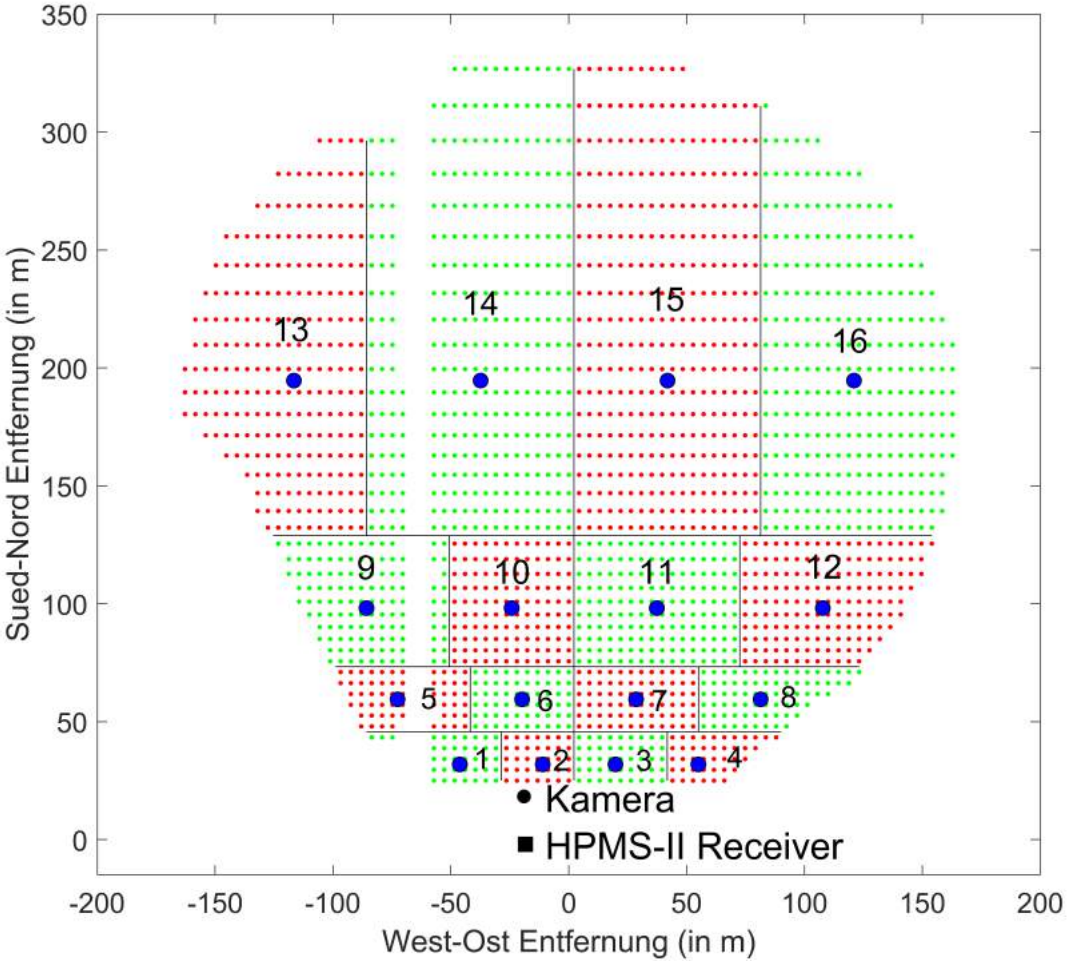

Abbildung 5.1: Gruppenaufteiling und Scan-Positionen

Abbildung 5.2: Positionierung des Targets

5.1.2 Ablauf

Die Versuche wurden zu dritt ausgeführt. Dabei war eine Person im Überwachungsraum zur Bedienung der Kamerasoftware und zwei Personen im Feld zur Positionierung und Steuerung des Scheinwerfers. Die Scan-Positionen wurden reihenweise abgefahren. Bei jeder Position wurde zunächst der Generator wenige Meter vom Scheinwerfer entfernt aufgebaut, um Vibrationen des Scheinwerfers zu vermeiden. Der Scheinwerfer wurde dann je nach örtlichen Gegebenheiten auf der Ladefläche des Fahrzeugs oder zusätzlich auf einem Tritt positioniert (siehe Abbildung 5.3). Es wurde sichergestellt, dass die anliegenden Heliostaten die Sicht des Scheinwerfers nicht behindern und dieser den Receiver sowie das Target abfahren konnte. Von dieser Position wurde dann, mithilfe eines Maßbandes, die Abstände zu einem ausgewählten Heliostaten sowie zum Boden notiert.

Zur Bedienung des Scheinwerfers wurde vom DLR ein Mikrocontroller programmiert, der den Scheinwerfer über ein DMX Protokoll steuert. Über WLAN kann sich mit dem Mikrocontroller verbunden werden. Der Scheinwerfer wurde dann in die sogenannte Spot Einstellung gebracht, welche einen möglichst homogenen Brennfleck erzeugt. Für einen Scan-Vorgang kann die Verfahrgeschwindigkeit, der Bahnabstand sowie Start- und Endpunkt eingestellt werden. Um einen Scan-Vorgang zu starten wurde zunächst eine Belichtungszeit ausgewählt und dann die Bildaufnahme mit 18 Bildern pro Sekunde gestartet. Ein Scanvorgang dauerte circa 5-10 Minuten.

Abbildung 5.3: Versuchsaufbau des Scheinwerfers

Abbildung 5.4: Scanversuch

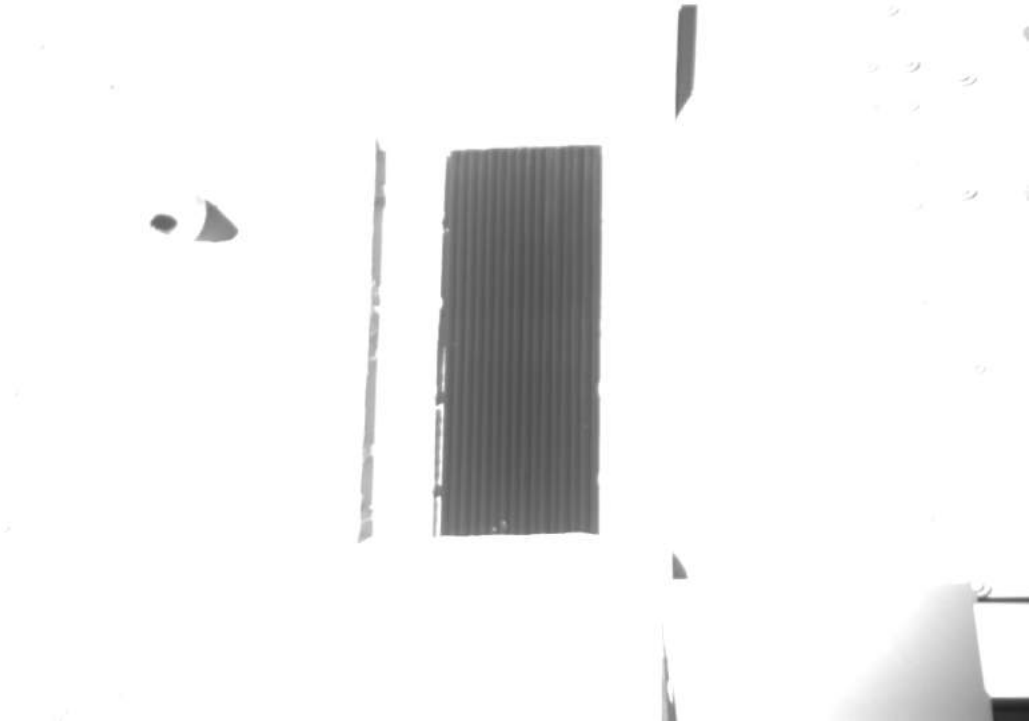

Abbildung 5.5: Unbearbeitetes Maximalbild von Gruppe 16

5.1.3 Auswertung

Aus den Bildreihen der unterschiedlichen Scans werden Maximalbilder erstellt und diese ausgewertet. Im Folgenden werden diese Auswertungen erläutert.

Receiver Scan

Zunächst können die Receiver Aufnahmen in Maximalbilder gewandelt werden. Ein Beispiel dieser Maximalbilder ist von Gruppe 16 in Abbildung 5.5 zu sehen.
Diese Maximalbilder werden nun entzerrt und abgewickelt. Zur besseren Beurteilung werden diese zusätzlich in Falschfarben dargestellt. Abbildung 5.6 zeigt die entzerrten Maximalbilder der Gruppen 1, 10 und 16.
Bei Betrachtung dieser Bilder fallen verschiedene Dinge auf, die im Folgenden erläutert werden.

1. Bei allen drei Bildern ist zu erkennen, dass die Helligkeitswerte oben und unten steigen. Zurückzuführen ist dies auf die Reflexion des Strahlungsschutzes oberhalb und unterhalb des Receivers, der an diesen Stellen in einem gewissen Winkel zur Receiveroberfläche ausgerichtet ist. Auffällig dabei ist, dass dieser Effekt unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Umso weiter der Scheinwerfer ent-

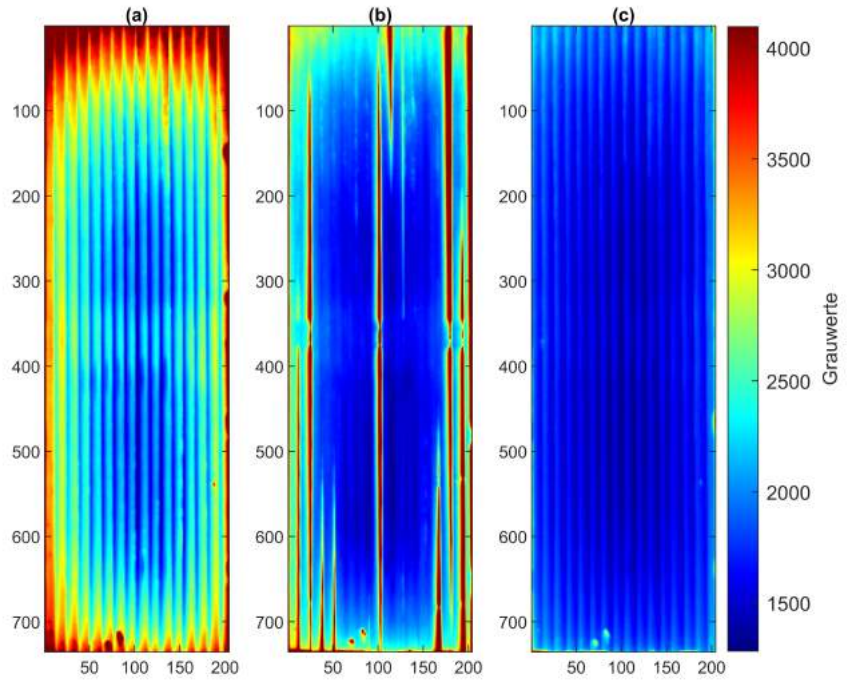

Abbildung 5.6: Entzerrte Maximalbilder der Gruppen 1 (a), 10 (b) und 16 (c) in Falschfarben

fernt ist, desto weniger stark ausgeprägt ist der Effekt. Dies hängt vermutlich mit dem Winkel, mit dem die Strahlung auf den schrägen Strahlungsschutz trifft, zusammen. Außerdem ist zu erkennen, dass bei der ersten Gruppe der Effekt so stark ist, dass es zu Überbelichtungen kommt. Die Belichtungszeit hätte demnach geringer gewählt werden müssen. Dieser Effekt tritt auch bei normaler Bestrahlung auf, daher kann er mithilfe des Scan-Verfahrens korrigiert werden

2. Bei der Gruppe 10 fallen überbelichtete vertikale Streifen auf. Diese treten bei Scans auf, die wie bei der Gruppe 10 ungefähr senkrecht zur Receiveroberfläche durchgeführt wurde (Gruppen 2, 6, 10, 14). Die Überbelichtungen treten auf, da sich die Receiverrohre während des Betriebs durch Temperatureinflüsse leicht verbogen haben, wie auf Abbildung 5.7 zu sehen ist. Der Scheinwerfer strahlt aus diesen Positionen in diese Lücken und der weiße Strahlungsschutz hinter dem Receiver reflektiert die Strahlung. Allerdings sind die Lücken zwischen den Rohren nicht so groß wie die überbelichteten Stellen im Bild. Dies hängt mit dem in Abschnitt 4.2.1 erläuterten Blooming Effekt zusammen, bei dem bei überbelichteten Pixeln eines CCD Sensors die Ladungen auf umliegende Pixel überspringen. Da CMOS Sensoren nicht so fehleranfällig in dieser Hinsicht sind, ist es empfehlenswert das Verfahren mit dieser Sensorart zu testen.

3. Es sind außerdem Materialinhomogenitäten zu erkennen. Neben zwei Flecken am unteren Receiverrand ist der Receiver auch in der Mitte abgenutzt. Ver-

Abbildung 5.7: Nahaufnahme des Receivers bei Tag

gleicht man an diesen Stellen die Abbildungen 5.6 und 5.7 miteinander, so erkennt man, dass diese Fehler durch den Scan korrigiert werden können.

4. Bei allen drei Maximalbildern sind die 16 Rohre zu erkennen. Dabei haben sie jeweils Minima und Maxima. Wenn die Scan-Ergebnisse auf Bestrahlungsbilder angewendet werden, dann müssen diese Minima und Maxima exakt aufeinander liegen, damit keine Fehler entstehen. Da die Kamera sich durch Umwelteinflüsse immer ein wenig bewegen wird, ist dies schwierig zu realisieren. Daher wurde von Zöller eine Methode zur Mittlung bei gleichzeitiger Aussparung bestimmter Bereiche eingeführt [Zöl21].

Abbildung 5.8 zeigt das Scan Ergebnis von Gruppe 1. Bildteil (b) zeigt dabei die ausgesparten Randbereiche und Bildteil (c) zeigt dann die Mittlung dieser Auswertung. Die Auflösung wurde so gewählt, dass pro Rohr eine Pixelreihe entsteht. Daraus folgt eine Auflösung von 16x58 Pixeln.

Referenz-Scan

Nach jedem Receiver-Scan wurde von der gleichen Position auch ein Referenz-Scan eines diffus reflektierenden Targets durchgeführt. Dieser Scan dient der Gewichtung der einzelnen Gruppen untereinander. Dazu wurde, wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, ein diffus reflektierendes Target an den Arbeitskorb einer Teleskoparbeitsbühne befestigt und auf Receiverhöhe positioniert. Das Target sollte so nah wie möglich am

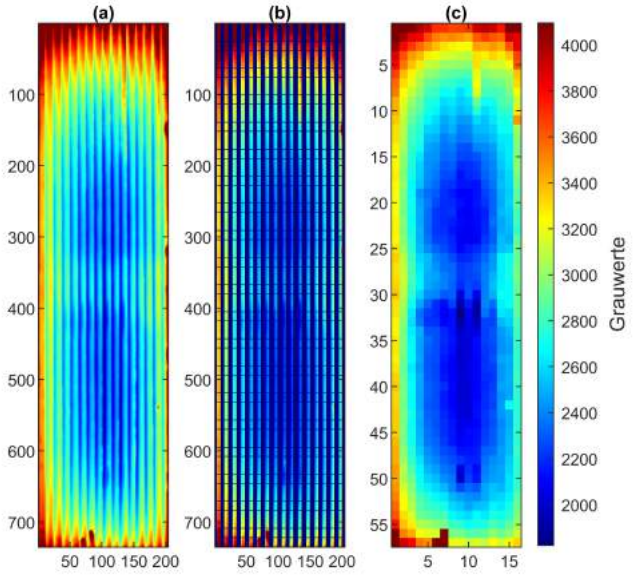

Abbildung 5.8: Auswertung des Scans aus Gruppe 1

Receiver sein, damit der Strahlungsweg näherungsweise als gleich angenommen werden kann. Durch den Einsatz der Teleskoparbeitsbühne musste das Target mit einem Sicherheitsabstand zu Turm und Receiver angeordnet werden. Durch Windeinflüsse bewegte sich der Arbeitskorb in 30 Meter Höhe und könnte ansonsten Beschädigungen hervorrufen. Außerdem wurde darauf geachtet, dass das Target beim Scan des Receivers keine Verschattung auf diesem verursacht. Aus diesen Gründen wurde das Target im rechten unteren Bildrand positioniert. Bei der Auswertung der Bildreihen ist aufgefallen, dass sich der Arm der Teleskoparbeitsbühne mit der Zeit bewegt hat und sich somit die Position des Targets im Kamerabild verändert hat (siehe Abbildung 5.9).

Auf diesen Bildern ist außerdem zu sehen, dass die Helligkeit des Targets inhomogen ist. Die Helligkeit nimmt zum Bildrand hin signifikant ab. Diese Eigenschaft ist allerdings nicht real, sondern kommt durch Shading-Fehler der Kamera zustande (siehe Abschnitt 2.3.2). Da dieser Effekt vor allem an den Bildrändern auftritt und sich der Receiver in der Bildmitte befindet, wird die Korrektur der Shading Fehler meistens vernachlässigt. Das Target wurde allerdings in der Bildecke positioniert. Aufgrund der Bewegung der Arbeitsbühne müssen außerdem verschiedene Pixel miteinander verglichen werden, die unterschiedlich stark vom Shading betroffen sind. Daher wurde mithilfe einer Ulbrichtkugel ein Bild zur Korrektur der Shading Fehler aufgenommen. Dazu wurde die Kamera mit einem Stativ in die Öffnung der Ulbrichtkugel gerichtet und die Leistung des Leuchtmittels in der Ulbrichtkugel mithilfe eines Labornetzteils eingestellt. Der Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 5.10 zu sehen.

Es wurden verschiedene Aufnahmen bei verschiedenen Belichtungszeiten und Hellig-

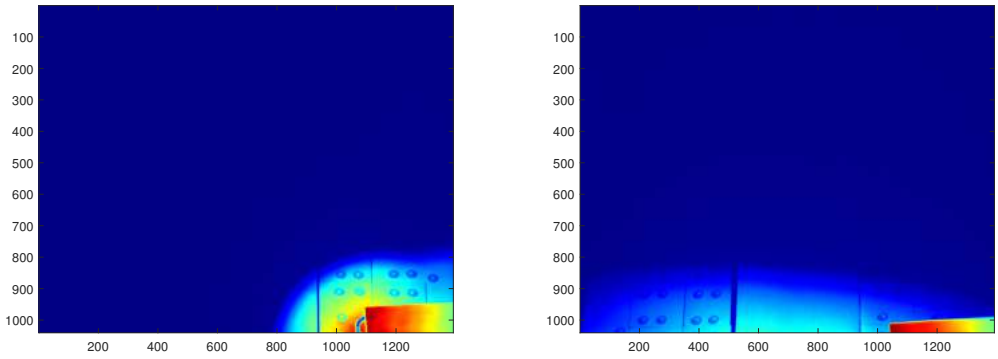

Abbildung 5.9: Maximalbilder von zwei Target-Scan in Falschfarben dargestellt

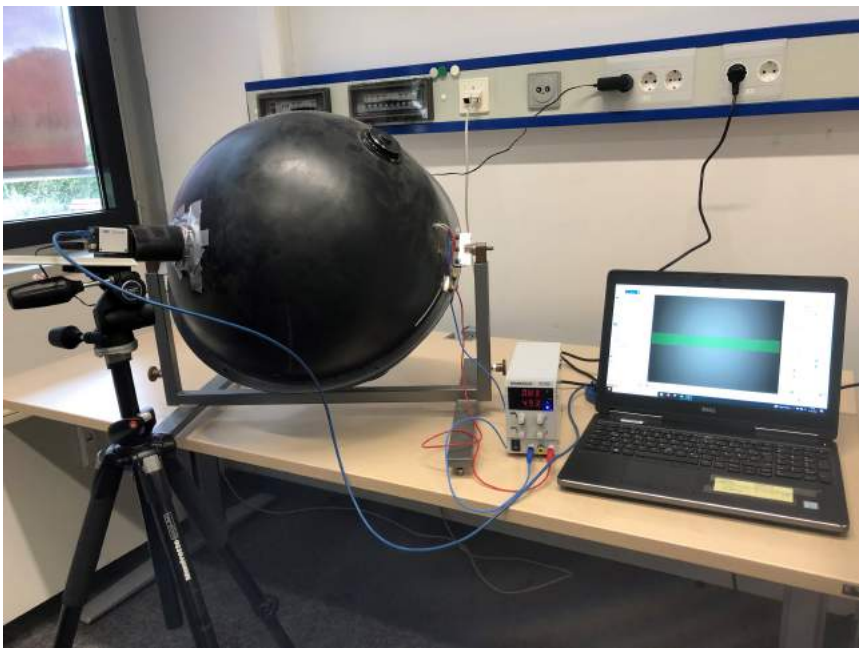

Abbildung 5.10: Versuchsaufbau für die Shading-Korrektur

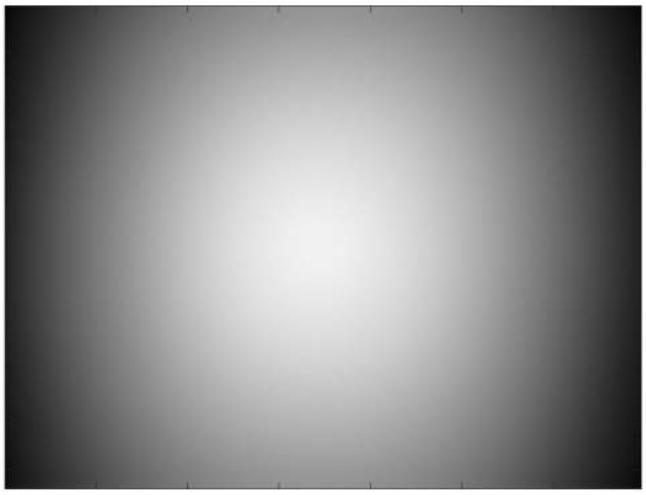

Abbildung 5.11: Repräsentatives Shading-Bild

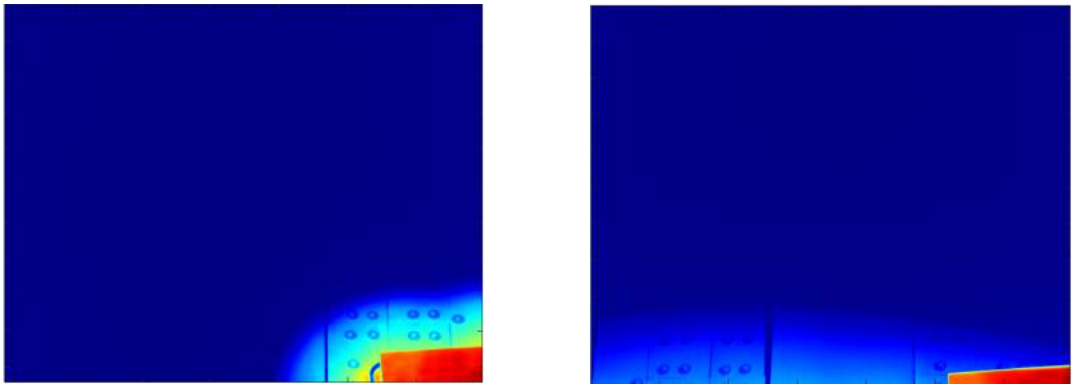

Abbildung 5.12: Shading Korrigierte Maximalbilder von zwei Target-Scan in Falschfarben dargestellt

keiten aufgenommen. Eine repräsentative Shading Aufnahme ist in Abbildung 5.11 zu sehen. Der Abfall der Helligkeit in Richtung der Ränder ist deutlich zu sehen.

Anschließend wurden die Aufnahmen auf eine Belichtungszeit normiert und eine Korrekturmatrix erstellt. Mit dieser Matrix werden dann die Maximalbilder des Targets korrigiert. Die korrigierten Bilder der Scans aus Abbildung 5.9 sind in Abbildung 5.12 zu sehen. Die Helligkeitsverteilung auf diesen Bildern ist deutlich homogener.

Anschließend wurde ein Bereich auf dem Target ausgewählt, der auf allen Maximalbildern zu sehen ist und über diesen Bereich die Helligkeitswerte gemittelt. Aus den jeweiligen Mittelwerten der Scans können dann die Vergleichsfaktoren für die einzelnen Gruppen bestimmt werden.

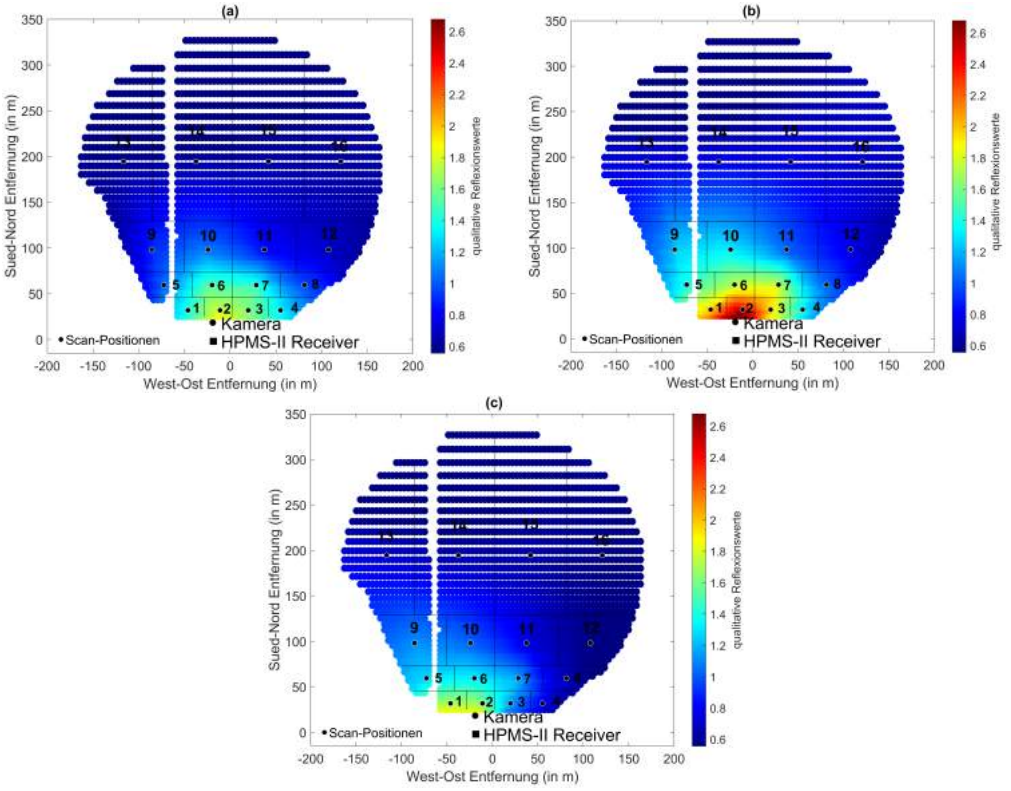

Abbildung 5.13: Verteilung der Reflexionseigenschaften einzelner Punkte: rechts (a), mittig (b), links (c)

Reflexionsverhalten des Receivers

Aus den entzerrten und gemittelten Maximalbildern kann dann mithilfe der Vergleichsfaktoren eine Scan-Matrix erstellt werden. Diese Scan-Matrix beschreibt das Reflexionsverhalten des Receivers bei Bestrahlung aus den jeweiligen Heliostatfeldgruppen. Bereiche, die überdurchschnittlich stark reflektieren, haben beispielsweise Werte unter eins, wodurch die der Helligkeitswert nach unten korrigiert wird.
Um das Reflexionsverhalten über das gesamte Feld zu visualisieren werden die Werte der einzelnen Gruppen den Heliostaten zugeordnet, an denen der Scheinwerfer beim Scan stand. Dabei beschreibt ein höherer Wert einen größeren Reflexionsgrad. Mit dem ungleichmäßig angeordneten Raster an diskreten Werten wird durch Interpolation für jeden Heliostaten eine eigene Reflexions-Matrix erstellt. In Abbildung 5.13 sind drei Reflexionsverteilungen für den Receiver zu sehen. Alle drei Verteilungen beziehen sich auf die mittlere Höhe des Receivers, jeweils der ganz rechte Pixel, der ganz linke Pixel und der mittlere Pixel.

Die Erstellung dieser Verteilungen dient vorwiegend zur Visualisierung. Außerdem kann durch Betrachtung der Verteilung die Sinnhaftigkeit der Auswahl der Heliostat-

feldgruppen bestätigt werden. Die vorderen Gruppen umfassen weniger Heliostaten als die hinteren, was sinnvoll ist, da in Abbildung 5.13 in den vorderen Gruppen viel größere Gradienten der Reflexionseigenschaften zu sehen sind als im hinteren Teil des Feldes. Außerdem ist zu erkennen, dass der linke Punkt des Receivers stärker reflektiert, wenn von der rechten Seite des Heliostatfelds bestrahlt wird und umgekehrt.

5.2 Messung der Flussdichteverteilung

Aufgrund von Betriebsverzögerungen an der Anlage konnten in dieser Arbeit noch keine Flussdichtemessungen mit einer Fokusverschiebung zur Skalierung der Werte im Betrieb durchgeführt werden. Im Folgenden werden Versuche vorgestellt, bei denen der Receiver mit wenigen Heliostaten aus einzelnen Gruppen bestrahlt wurde (Abschnitt 5.2.1). Außerdem wurden Momentaufnahmen während der Durchführung von Vorwärmtests festgehalten und aus diesen eine nicht skalierte Strahlungsflussdichteverteilung mit Bestrahlung aus verschiedenen Gruppen erstellt (Abschnitt 5.2.2). Im Abschnitt 5.2.3 wird abschließend das erarbeitete Konzept der Fokusverschiebung für den HPMS-II Receiver vorgestellt, mit dem in späteren Arbeiten das optische Verfahren validiert werden kann.

5.2.1 Versuche aus einzelnen Richtungen

Zur Überprüfung der Scan Ergebnisse wurde der Receiver mit je vier Heliostaten aus verschiedenen Richtungen bestrahlt. Diese Versuche konnten ohne Betrieb der Anlage durchgeführt werden. Die Auswertungen zeigen Probleme auf, die in nachfolgenden Arbeiten verbessert werden sollten. Die Bestrahlung wurde möglichst zentral auf den Receiver durchgeführt. Es wurden Heliostaten aus den Gruppen 1, 4, 6, 8, 10, 11, 12 und 16 durchgeführt. Im Folgenden werden Charakteristiken von ausgewählten Aufnahmen betrachtet.

Abbildung 5.14 zeigt die Auswertung einer Aufnahme aus Gruppe 11. Im Bildteil (a) ist das entzerrte, hintergrundkorrigierte Bild zu sehen. Auffällig dabei sind die Extrema an den Rändern. Diese sind vermutlich in der Realität nicht so hell, sondern entstehen durch den Blooming-Fehler der Kamera (siehe Abschnitt 2.3.2), da die angrenzenden Pixel überbelichtet sind. Dieser Fehler kann nicht durch die Anwendung der Scan-Ergebnisse korrigiert werden. Deutlich wird dies in den Bildteilen (c) und (d), bei denen die mittleren Pixel homogen korrigiert sind, allerdings treten außen immer noch sehr hohe Werte auf.
Neben der offensichtlichen Korrektur vom gemittelten Bild (b) auf das korrigierte Bild (c) in der Bildmitte wird außerdem auch die Korrektur von lokalen Materialfehlern deutlich. Am unteren Bildrand sind zwei Abnutzungen an den Receiverrohren sichtbar. Diese Abnutzungen werden in der Mittlung übertragen und durch den Scan korrigiert.
Da die Receiverrohre mit wenigen Zentimetern Durchmesser relativ klein sind und

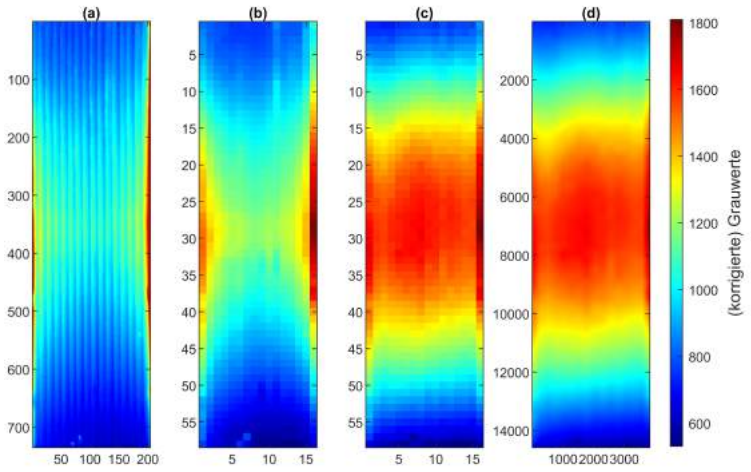

Abbildung 5.14: Auswertung der Aufnahme aus Gruppe 11; entzerrtes Bild (a), gemittelt und ausgesparte Randbereiche (b), korrigiert mit Scan Ergebnis (c), interpoliertes Ergebnis (d)

bei Bestrahlung die Maxima und Minima bestimmen, ist die genaue Entzerrung von großer Bedeutung für die Auswertung. Liegen die Rohre auf dem entzerrten Bild des Scans und die Rohre auf dem entzerrten Bild der Bestrahlung nicht exakt übereinander, kommt es zu Fehlern, wenn das Scan Ergebnis auf des Bestrahlungsbild angewandt wird. Durch die Mittlung über die Rohrbreite wird dieser Fehler verringert, jedoch nicht vermieden. In Abbildung 5.14 macht sich dies durch leichte Streifen im Bildteil (d) bemerkbar.

Größere Probleme bei der Überlagerung der entzerrten Bilder entstehen bei Aufnahmen von den äußeren Gruppen. Dies ist in Abbildung 5.15 zu sehen, bei der eine Auswertung der Bestrahlung von Gruppe 8 zu sehen ist. Auf die Entzerrung sollte in folgenden Arbeiten ein großes Augenmerk gelegt werden, um auch bei Rohreceivern die Strahlungsflussdichte bestimmen zu können.
Des Weiteren ist ein Maximum am linken unteren Rand des entzerrten Bilds zu erkennen. Hier kommt es erneut zu Blooming-Fehlern, die durch die Überbelichtung zwischen den Rohren zustande kommt. Durch das Blooming kann der Fehler nicht vollständig korrigiert werden. Zusätzlich war zum Zeitpunkt des Scans an dieser Stelle kein heller Streifen bei Bestrahlung zu sehen. Vermutlich haben sich die Rohre nach den Scans weiter verbogen. Dies unterschreibt die Annahme, dass die Scans regelmäßig erneuert werden müssen, damit neue Abnutzungen oder Veränderungen korrigiert werden können.

Bei der Auswertung von einer Bestrahlungsaufnahme aus Gruppe 10 werden erneut die Blooming-Fehler erkennbar. Bei Gruppe 10 ist der Azimutwinkel der Strahlung, die auf den Receiver tritt, ungefähr 0. Daraus folgt, dass viel Strahlung durch die Lücken zwischen den Receiver-Rohren auf den Strahlungsschutz dahinter trifft. Das daraus

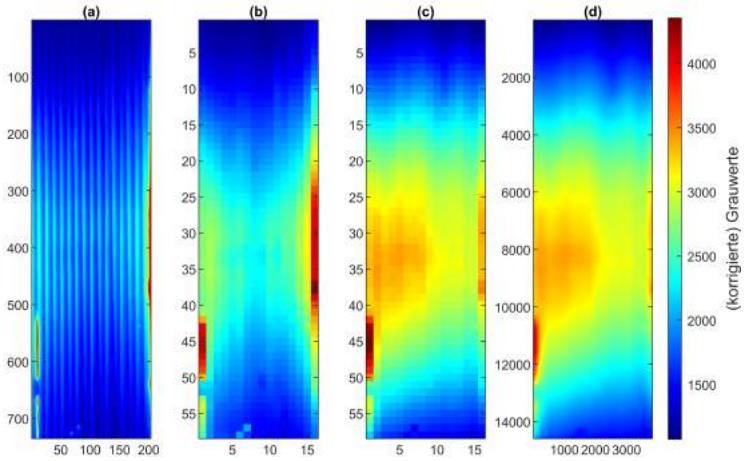

Abbildung 5.15: Auswertung der Aufnahme aus Gruppe 8; entzerrtes Bild (a), gemittelt und ausgesparte Randbereiche (b), korrigiert mit Scan Ergebnis (c), interpoliertes Ergebnis (d)

entstehende Blooming ist auch schon in Abbildung 5.4 erkennbar. In Abbildung 5.16 ist die Auswertung der Bestrahlung zu sehen. Auch wenn die Blooming Fehler beim Scan sowie bei der Bestrahlung auftreten, können diese nicht vollständig korrigiert werden. Zusätzlich ist auch bei Gruppe 10 eine leichte Versetzung der entzerrten Bilder erkennbar.

5.2.2 Vorwärmversuch

Der HPMS-II Receiver ist ein Flüssigsalzreceiver. Bevor dieser Receiver mit Salz durchstömt werden kann, müssen die Rohre vorgewärmt werden, damit das Salz nicht erstarrt. Dabei wird der Receiver auf eine möglichst homogene Temperatur von ca. 350° Celsius erwärmt. Um den Vorgang zu beschleunigen, wurden mehrfach Vorwärmversuche durchgeführt, bei dem der Receiver nur auf die entsprechende Temperatur gebracht und anschließend wieder abgekühlt wurde. Während dieser Versuche wurden im Rahmen dieser Arbeit Aufnahmen vom Receiver gemacht und diese ausgewertet. Beim Vorwärmen wurde keine Fokusverschiebung zur Skalierung der Flussdichtewerte durchgeführt, da sich auf die Verbesserung der Vorwärmung konzentriert wurde. Daher kann auch in dieser Auswertung nur auf die qualitative Strahlungsflussdichteverteilung eingegangen werden.

Während des Vorwärmens wurden mehrere Aufnahmen mit unterschiedlichen Heliostatenkonfigurationen erstellt. Die Erläuterung des Vorgehens wird in dieser Arbeit anhand eines Beispiels gezeigt. Die Aufnahme wurde am 22.09.2022 um 13:47 erstellt. Während die Bildaufnahme erstellt wurde, wurde zusätzlich eine Momentaufnahme in der Heliostaten-Steuerungs-Software HeliOS erstellt. Dadurch wird eine Datei erzeugt, die für alle aktiven Heliostaten den Zielpunkt ausgibt. Zur Bestimmung der Richtungsverteilung der Strahlung (siehe Abschnitt 4.2) wird eine Strahlungssimula-

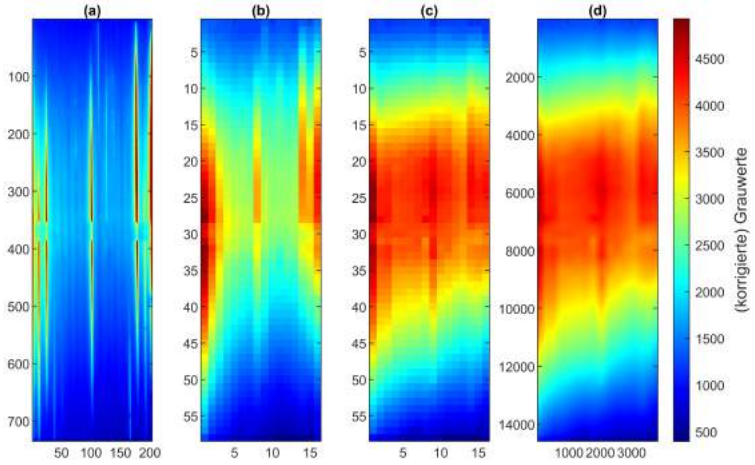

Abbildung 5.16: Auswertung der Aufnahme aus Gruppe 10; entzerrtes Bild (a), gemittelt und ausgesparte Randbereiche (b), korrigiert mit Scan Ergebnis (c), interpoliertes Ergebnis (d)

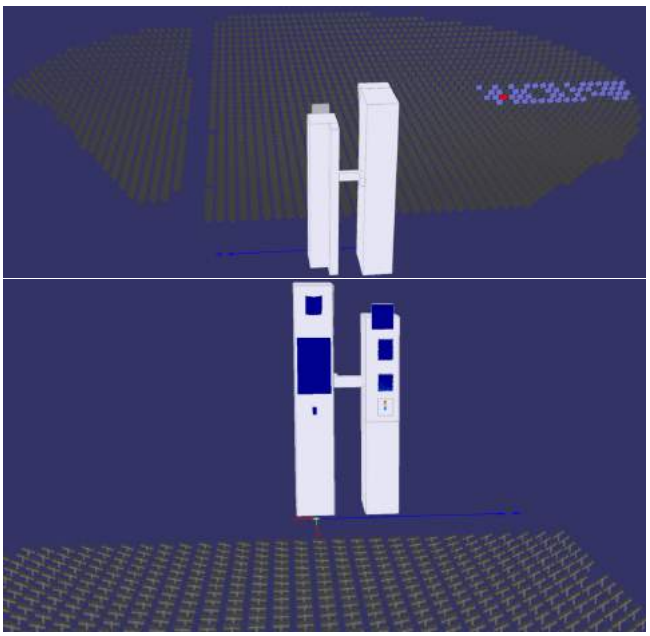

Abbildung 5.17: STRAL Modell vom Versuchskraftwerk in Jülich

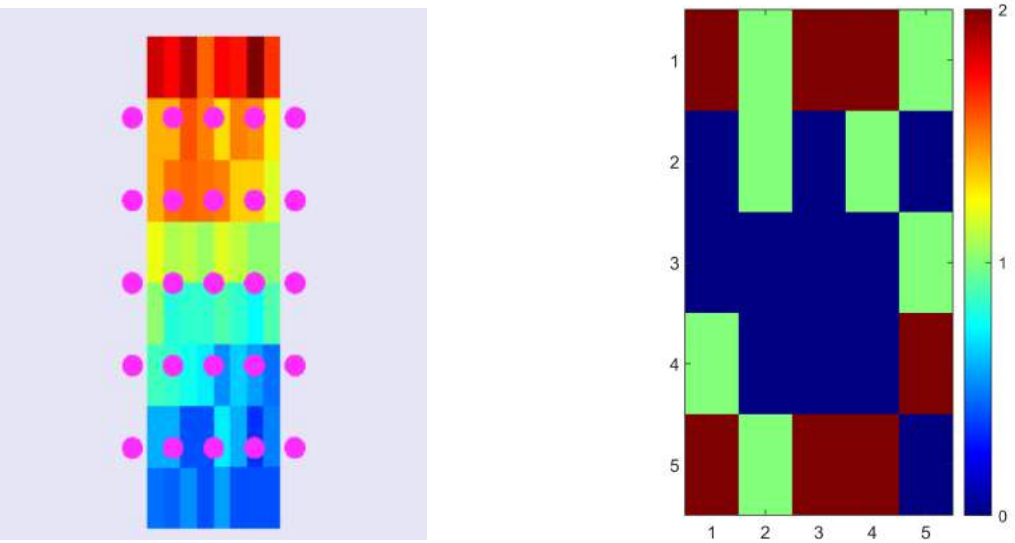

Abbildung 5.18: Zielpunktverteilung auf dem Receiver (links) und Verteilung der Heliostaten auf den Zielpunkten (rechts)

tion in STRAL durchgeführt. Dafür werden alle Zielpunkte der Heliostaten über ein MATLAB Skript an STRAL weitergegeben und für jede beteiligte Heliostatgruppe Simulationen ausgeführt. Die Ergebnisse werden gemittelt und miteinander verglichen, sodass für jeden Pixel des entzerrten Bestrahlungbildes der Anteil aus den jeweiligen Richtungen bestimmt ist.

Bei der betrachteten Aufnahme sind insgesamt 21 Heliostaten beteiligt. Abbildung 5.18 zeigt links die Anordnung der 25 Zielpunkte auf dem HPMS-II Receivers und rechts die Verteilung der Heliostaten zum betrachteten Zeitpunkt auf die Zielpunkte. Abbildung 5.17 zeigt zusätzlich die ausgewählten Heliostaten aus Gruppe 16, bei denen einige allerdings im Stand-By Modus verharren. Der rot markierte Heliostat hat den Zielpunkt 8 (Reihe 2, Spalte 4).

Die Richtungszusammensetzung wird dann in das Auswertungsprogramm geladen und zusammen mit den Scan-Ergebnissen auf das Rohbild angewendet. Die Auswertungsschritte sind in Abbildung 5.19 zu sehen.

Bei dieser Auswertung ist wie auch schon im Abschnitt 5.2.1 zu sehen, dass die entzerrte Bestrahlungsaufnahme nicht perfekt über der entzerrten Scanaufnahme liegt. Dadurch kommt es vor allem im rechten unteren Bildrand zu erhöhten Werten (siehe Abbildung 5.19 (d)).
Die Test haben gezeigt, dass die Nutzung der Simulationssoftware STRAL zur Bestimmung der Richtungszusammensetzung unkompliziert ist. Auch für Live Auswertungen kann ein leicht geändertes MATLAB-Skript genutzt werden um kontinuierlich die Richtungszusammensetzung zu bestimmen.

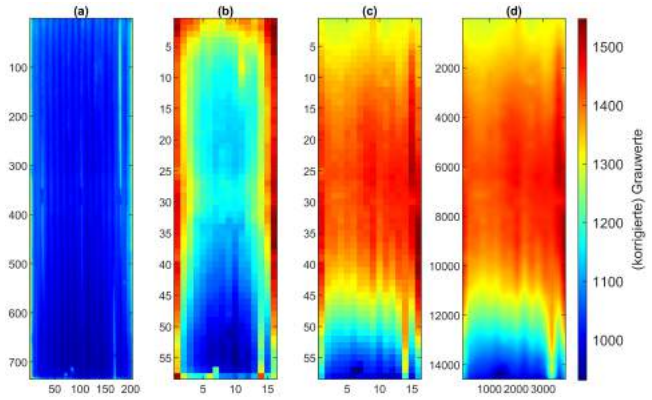

Abbildung 5.19: Auswertung der Aufnahme beim Vorwärmen; (a) entzerrtes Bild, (b) gemittelt und ausgesparte Randbereiche, (c) korrigiert mit Scan Ergebnis, (d) interpoliertes Ergebnis

5.2.3 Fokusverschiebung

Die Fokusverschiebung ist ein Verfahren, bei dem der Gesamtfokus der Heliostaten so verschoben wird, dass Strahlungsflussdichtewerte von Radiometern gemessen werden, die sich nicht auf der Receiveroberfläche befinden. Diese Strahlungsflussdichtewerte repräsentieren durch die Verschiebung Werte auf der Receiveroberfläche.
Bei einem Receiver, wie dem HPMS-II Receiver, bei dem sich Radiometer in der Nähe befinden, kann die Fokusverschiebung genutzt werden, um die qualitative Strahlungsflussdichteverteilung auf quantitative Strahlungsflussdichtewerte zu skalieren. Beim HPMS-II Receiver gibt es insgesamt acht Radiometer, die rechts und links vom Receiver angeordnet sind. Zur Skalierung muss der Fokus so weit verschoben sein, dass die projizierten Punkte auf der Receiveroberfläche liegen (siehe Abbildung 5.20 links). Vor oder nach der Fokusverschiebung sollte eine Bildaufnahme gemacht und diese ausgewertet werden. Bei der Konfiguration des HPMS-II Receivers mit vier Radiometern auf einer Seite können dann an vier Punkten ein Skalierungsfaktoren bestimmt werden. Aus diesen vier Skalierungsfaktoren kann dann der Mittelwert auf die Strahlungsflussdichteverteilung angewendet werden.

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit des optischen Verfahrens kann eine vollständige Strahlungsflussdichtemessung mithilfe der Fokusverschiebung durchgeführt werden. Diese Verteilung kann dann mit der optischen Messung verglichen werden und es können Rückschlüsse auf die Messfehler gezogen werden. Aus Wetter- und Betriebsgründen konnte in dieser Arbeit keine Fokusverschiebung durchgeführt werden. Ein Ablauf der Fokusverschiebung wurde allerdings erstellt, sodass damit zu gegebener Zeit die Messung durchgeführt werden kann. Dabei wird der Vorteil genutzt, dass zwei Reihen an Radiometern zur Verfügung stehen. Der Fokus wird insgesamt drei Mal verschoben, sodass drei Spalten mit jeweils vier diskreten Werten auf der Receiveroberfläche bestimmt werden können. Dazu werden die Werte der Radiometer ohne Fokusverschiebung gemessen, die außerhalb des Receivers liegen, aber auch

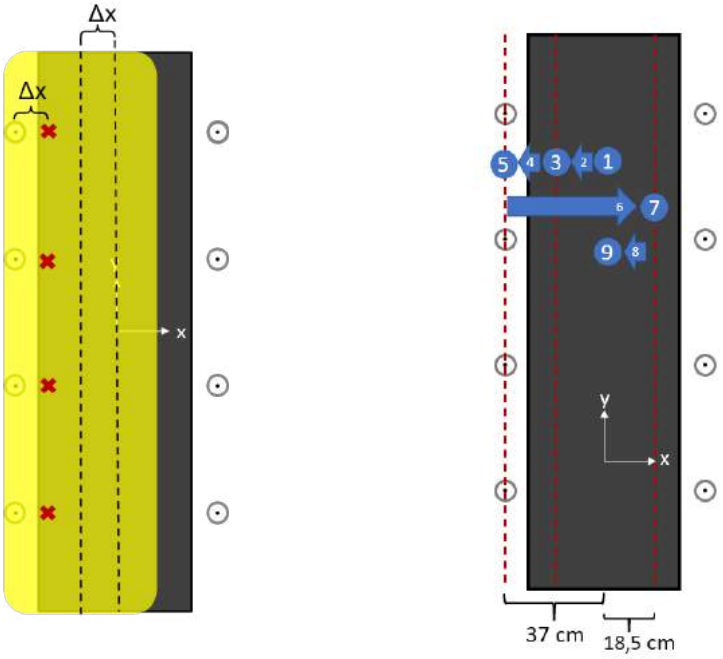

Abbildung 5.20: Ablauf der Fokusverschiebung am HPMS-II Receiver für die Skalierung (links) und die Vergleichsmessung (rechts)

zur Interpolation genutzt werden können. Das Schema der Fokusverschiebung ist in Abbildung 5.20 (rechts) visualisiert.
Dieses Schema wurde in Vorversuchen bereits mit der Movingbar-Methode an einem anderen Receiver qualitativ getestet und verglichen. Die Tests haben gezeigt, dass die Wahl der Fokusverschiebungen für den HPMS-II Receiver nur geringe Abweichungen zur Movingbar-Methode aufweist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Messverfahren zur Bestimmung der Strahlungsflussdichte an einem Flüssigsalzreceiver angepasst und erprobt. Das verwendete optische Verfahren berücksichtigt die richtungs- und oberflächenabhängigen Reflexionseigenschaften des Receivers.

Dazu wurden zunächst 16 Receiver-Scans aus verschiedenen Positionen des Heliostatenfeldes durchgeführt. Um die einzelnen Scans gegeneinander zu gewichten, wurde von jeder Position ein zusätzlicher Target-Scan durchgeführt. Zur Positionierung des Targets wurde eine Teleskop-Arbeitsbühne angemietet, mit der das Ziel auf die gewünschte Höhe gebracht wurde.

Aufgrund der ungewöhnlichen Positionierung des Ziels am unteren Bildrand wurden Abschattungsfehler bzw. Shadingfehler festgestellt. Um die Fehler zu korrigieren, wurden Versuche mit einer Ulbricht-Kugel durchgeführt, mit der ein homogen beleuchtetes Bild aufgenommen werden kann.
Im Anschluss an diese Versuche wurden die Scan-Aufnahmen ausgewertet, indem von jedem Scan ein Maximalbild erstellt und dieses dann entzerrt und abgewickelt wurde. Im Zuge der Abwicklung wurden verschiedene Arten der Mittelung bzw. Aussparung von Randbereichen getestet. Die Maximalbilder wurden dann unter Verwendung der Gewichtung durch die Target-Scans in eine Scan-Matrix überführt, die auf Bestrahlungsbilder angewandt werden kann. Die Scan-Matrix ermöglicht es, das Reflexionsverhalten des Receivers bei Bestrahlung aus verschiedenen Positionen des Feldes zu bestimmen, wodurch die Sinnhaftigkeit der Einteilung in die Heliostatfeldgruppen bestätigt wurde. Zur Überprüfung der erstellten Scans wurden aus verschiedenen Positionen des Heliostatfeldes Bestrahlungen durchgeführt, die einzeln ausgewertet wurden und Aufschluss über bestehende Probleme der Auswertung gegeben haben. Außerdem wurden im Rahmen von Vorwärmversuchen des Receivers Bestrahlungsaufnahmen bei Verwendung verschiedener Heliostatfeldgruppen gemacht. Hierbei konnte die Auswertungsschleife mit der Nutzung der Simulationssoftware STRAL erfolgreich getestet werden.

Bei der Auswertung der verschiedenen Versuche sind mehrere Probleme aufgetreten, die in Zukunft behoben werden sollten. Zum einen sind erhebliche Blooming Fehler aufgetreten, durch die die Anwendung der Scan-Ergebnisse auf die Bestrahlungsaufnahmen erschwert werden. Um diese Fehler in Zukunft zu vermeiden, wurde eine Kamera mit CMOS-Sensor angeschafft, mit der in den folgenden Arbeiten neue Maximalbilder aufgenommen werden und dabei weniger Blooming-Fehler auftreten

Abbildung 6.1: Langzeitaufnahme von einem Receiver-Scan

sollten. Sollte der Wechsel der Sensorbauweise nicht ausreichen, müssen andere Methoden zur Vermeidung des Fehlers evaluiert werden. Beispielsweise könnte durch die Aufnahme von zwei Bildern mit jeweils einer hohen und einer niedrigen Belichtungszeit eine Verbesserung erzielt werden. Dazu werden im Anschluss beide Bilder auf eine Belichtungszeit normiert und anschließend die überbelichteten Pixel des Bildes mit hoher Belichtungszeit mit denen des Bildes mit niedriger Belichtungszeit ausgetauscht.
Außerdem ist aufgefallen, dass bei Bestrahlung aus den äußeren Gruppen, wie auch schon bei den Versuchen im Projekt TubeMon [Zöl21], die Überlagerung von Scan-Matrix und Bestrahlungsaufnahme schlechter funktioniert, als bei den zentralen Gruppen. Es wird vermutet, dass dies auf die Entzerrung zurückzuführen ist. In Zukunft sollten daher genauere Test, die auf dieses Problem abzielen, durchgeführt werden und dementsprechend Verbesserungen an der Software vorgenommen werden.

Durch die Anpassungen der Skripte für die Strahlungssimulation kann in Zukunft auch der Einsatz einer Live-Auswertung des Messverfahrens angestrebt werden. Da bisher in der Live-Auswertung am Hauptreceiver des Solarturms nur eine Abschätzung der Richtungszusammensetzung genutzt wurde, wird durch die Simulation auch die Genauigkeit signifikant erhöht. Um die Live-Messung sinnvoll einsetzen zu können, muss eine geeignete Anbindung der HeliOS-Daten an die Matlab-Funktionen berücksichtigt werden.

Das Projekt HPMS-II läuft noch und im Zuge dessen kann die Entwicklung der Messmethode im Hinblick auf eine kommerzielle Nutzung weiter vorangetrieben werden.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Scan-Versuche zeigen, dass die Bestimmung der Reflexionseigenschaften von Reveivern zeiteffizient in ein bis zwei Nächten durchgeführt werden kann. Mit besser erprobten und eingespielten Verfahrensabläufen der beteiligten Personen kann die Versuchszeit in Zukunft weiter reduziert werden.

Literaturverzeichnis

[BPPSU09] Belhomme, B. ; Pitz-Paal, R. ; Schwarzbözl, P. ; Ulmer, S.: A New Fast Ray Tracing Tool for High-Precision Simulation of Heliostat Fields. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 131 (2009), Nr. 3. http://dx.doi.org/10.1115/1.3139139. – DOI 10.1115/1.3139139. – ISSN 0199–6231

[BS16] Baehr, Hans D. ; Stephan, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016. – ISBN 978–3–662–49676–3

[Deu] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: *Der Solarturm Jülich.* https://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/grossanlagen/juelich/Solarturm_Juelich.pdf

[Deu22] Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt: *Drei in eins - Neuer DLR-Solarturm ermöglicht drei Experimente gleichzeitig.* https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2019/03/20190816_drei-in-eins_neuer-dlr-solarturm-ermoeglicht-drei-experimente.html. Version: 25.09.2022

[DSAS11] Demant, Christian ; Streicher-Abel, Bernd ; Springhoff, Axel: *Industrielle Bildverarbeitung.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. – ISBN 978–3–642–13096–0

[Ebe19] Ebert, Miriam: *HPMS - II: High Performance Molten Salt Tower Receiver System.* 2019

[Gli21] Glinka, Matthias: Strahlungsflussdichtemessung mittels Reflexion an Solartürmen – Inbetriebnahme und Nutzung eines wassergekühlten Rohrreceivers. (2021)

[Gor17] Gorzalka, Philip: Messung der Reflexionseigenschaften von Absorbern für die Strahlungsflussdichtemessung an Solarturmreceivern. (2017)

[Kne20] Kneer, R.: *Wärme- und Stoffübertragung I/II.* 2020

[KSW13] Kaltschmitt, Martin ; Streicher, Wolfgang ; Wiese, Andreas: *Erneuerbare Energien.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 978–3–642–03248–6

[Mey21] Meyer, Daniel: Software Engineering für die Strahlungsflussdichtemessung an Rohrreceivern von Solarturmanlagen. (2021)

[MT12] Münzenberg, Markus ; Thomas, Andy: Heiße Elektronik. In: *Physik in unserer Zeit* 43 (2012), Nr. 6, S. 288–295. http://dx.doi.org/10.1002/piuz.201201314. – DOI 10.1002/piuz.201201314. – ISSN 00319252

[Nie18] Niemeier, Malte J.: Potenzialbewertung eines neuartigen Rohr-Receiver-Designs für Solarturmkraftwerke mit Flüssigsalzen. (2018)

[NRH+] Nicodemus, F. E. ; Richmond, J. C. ; Hsia, J. J. ; Ginsberg, I. W. ; Limperis, T.: *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*

[ORS18] Offergeld, Matthias ; Röger, Marc ; Stadler, Hannes: *Patentschrift.* 2018

[Rau20] Rauser, Nicolas: Software Engineering für die Strahlungsflussdichtemessung an Solarturmkraftwerken. (2020)

[RHU+14] Röger, Marc ; Herrmann, Patrik ; Ulmer, Steffen ; Ebert, Miriam ; Prahl, Christoph ; Göhring, Felix: Techniques to Measure Solar Flux Density Distribution on Large-Scale Receivers. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 136 (2014), Nr. 3. http://dx.doi.org/10.1115/1.4027261. – DOI 10.1115/1.4027261. – ISSN 0199–6231

[SH12] Stieglitz, Robert ; Heinzel, Volker: *Thermische Solarenergie.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. – ISBN 978–3–642–29474–7

[Sph] SphereOptics GmbH: *Zenith Lite Targets.* https://sphereoptics.de/wp-content/uploads/2014/03/Zenith-Lite-Targets-D-1.pdf

[Ulm03] Ulmer, Steffen: Messung der Strahlungsflussdichte-Verteilung von punktkonzentrierenden solarthermischen Kraftwerken. (2003)

[Umw22] *IPCC-Bericht: Klimawandel verläuft schneller und folgenschwerer.* https://www.umweltbundesamt.de/themen/ipcc-bericht-sofortige-globale-trendwende-noetig. Version: 2022

[Wei00] Weinrebe, Gerhard: Technische, ökologische und ökonomische Analyse von solarthermischen Turmkraftwerke. (2000)

[Wit14] Wittenberg, Benjamin: Entwicklung und Inbetriebnahme eines Messsystems zur Bestimmung der Flussdichteverteilung konzentrierter Solarstrahlung. (2014)

[Zöl21] Zöller, Judith: Strahlungsflussdichtemessung mittels Reflexion an Solarturm-Rohrreceivern: Bildaufnahme und softwarebasierte Bildverarbeitung. (2021)