



## Masterthesis

# *Untersuchung und Weiterentwicklung von Methoden zur Messung der Strahlungsflussdichteverteilung an solaren Turmkraftwerken*

vorgelegt von

**Patrik Herrmann**

dem

Fachbereich Maschinenbau  
der Technischen Universität Darmstadt

im Februar 2011.

Fachgebiet: Reaktive Strömungen und Messtechnik (RSM)

Prof. Dr. rer. nat. Andreas Dreizler

Betreuer:

Dr. Ing. Marc Röger

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)



## **Erklärung**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Masterthesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

(Ort, Datum)

(Unterschrift)



## Kurzfassung

Zur Überwachung des Betriebs und zur Charakterisierung der Strahlungsbelastung von Receivern kommerzieller solarthermischer Turmkraftwerke werden im Rahmen dieser Arbeit drei alternative Messsysteme zum derzeit verwendeten Schwenkbalkenverfahren untersucht und weiterentwickelt.

Dabei handelt es sich erstens um eine indirekte Methode, wobei der Fokus der Strahlung schrittweise über eine feststehende Messfläche gezogen wird. Untersuchungen auf Basis von Simulationen und vorläufige Tests liefern zufriedenstellende Ergebnisse. Die Messungenauigkeit der Methode wird hauptsächlich durch unzureichende Heliostat-Nachführung bestimmt und wird auf  $\pm 5-9\%$  geschätzt. Abweichungen der integrierten Flussdichteleistung (Eingangsleistung) bleiben dahingegen gering.

Eine zweite Alternative besteht in der Simulationen die Strahlungsflussdichteverteilung und deren Validierung bzw. Korrektur durch indirekte Referenzmessungen auf dem Strahlungsschutz. Korrekturen der Reflexionseigenschaften des Schutzmaterials führen zu konsistenten Ergebnissen, vergleicht man sie mit dem ProHERMES-System. Aus Unkenntnis über die angefahrenen Zielpunkte werden diese mit statistischen Methoden ermittelt. Die präsentierten Ergebnisse zeigen, dass die exakte Bestimmung der Flussdichteverteilung mit dieser Methode möglich ist. Die Ungenauigkeit der Methode hängt dabei von der Ermittlung der Stützstellen ab.

Direktmessungen der Flussdichte stellen die dritte Alternative da. Die Interpolation der stützpunktartigen Messpunkte erlaubt die Ermittlung einer Flussdichteverteilung. Sie können ebenfalls zur Überprüfung von Simulationen herangezogen werden. Die Genauigkeit und Auflösung des Verfahrens wird durch die Anzahl der verbauten Sensoren bestimmt.

### *Stichworte:*

Solarthermische Kraftwerke – Solarturm Kraftwerke – Messtechnik – Strahlungsflussdichte – Messung mit feststehendem Target – STRAL – Reflexionseigenschaften – Radiometer – Direktmessung

## Abstract

To monitor the operation and in order to characterize radiation loads, receivers of commercial solar thermal central receiver systems are exposed to, this work examines and develops three alternative measurement systems to the rotary moving bar method that is being used at present.

The first approach is an indirect method, in which the radiation focus is gradually moved over a fixed bar. Investigations based on simulations and preliminary tests show satisfying results. The measurement inaccuracy of the method is determined mainly by insufficient heliostat-tracking and is estimated to about  $\pm 5-9\%$ . Deviation of integrated power (input power) remains low.

A second alternative is to simulate the flux density distribution and its validation or correction by indirect reference measurements on the radiation shield. Corrections of the reflection properties of the shield material lead to consistent results, comparing them with the ProHERMES-system. Out of ignorance of uncertain aimpoints, these are determined by statistical methods. The presented results show that this method admits the accurate determination of the flux density distribution. The inaccuracy of the method depends on the determination of the reference points.

Direct measurements remain to be the third alternative. The interpolation of measured base-points is designed to establish a flux density distribution. These can also be used to verify simulations. Accuracy and resolution of the method are determined by the number of installed sensors.

### *Key words:*

Solar thermal power plants – Central receiver systems – Measuring – Flux density – Fixed-Bar-Scan – STRAL – Reflection properties – Radiation shield – Radiometers – Direct measurement



## Vorwort

Die vorliegende Masterthesis entstand auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) in Spanien, einer Außenstelle des Instituts für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die ersten Zeilen dieser Arbeit möchte ich nutzen, um einigen Menschen zu danken, die auf unterschiedliche Art und Weise bei ihrem Zustandekommen in der vorliegenden Form mitgewirkt haben.

An erster Stelle seien die Mitarbeiter des DLR in Stuttgart, Köln und der PSA genannt. Besonderer Dank gebührt meinem Betreuer Dr. Marc Röger für seine exzellente Betreuung und die zahlreichen fachlichen sowie persönlichen Gespräche während der Entstehung dieser Arbeit. Außerdem dankend hervorgehoben seien die Mitarbeiter Miriam Ebert, Tobias März und Christoph Prah, die mit mir Tage und Nächte Daten gesammelt haben, Stefan Wilbert und Wolfgang Reinhalter für ihre wertvollen Eingaben, Tamara Schapitz, die wichtige Vorarbeiten geleistet hat, sowie Lars Amsbeck und Boris Belhomme für ihre Unterstützung aus der Heimat. Nicht vergessen werden soll das Mitwirken des restlichen Teams in Almería. „Herzlichen Dank, ich hatte eine tolle Zeit bei euch!“

Ein „*Muchas Gracias*“ richte ich an die Mitarbeiter von CIEMAT für ihre tolle Zusammenarbeit, allen voran an Thorsten Denk, an die Administration in Person von Carmen Montesino und an die Mitarbeiter der CESA-1 Anlage. „*Muchisismas Gracias*“ auch an die *Becarios* auf der PSA, dafür dass sie mich so herzlich bei sich aufgenommen, mir Almería und Andalusien gezeigt, sowie ihre Kultur näher gebracht haben.

Bedanken muss ich mich auch beim DAAD für die Unterstützung in Form eines Stipendiums, sowie Prof. Dreizler vom Fachgebiet RSM für die Übernahme der Betreuung der Arbeit von Seiten der TU Darmstadt (TUD). Darüber hinaus gebührt Frau Bothen ein besonderes Lob für ihre Arbeit im MechCenter des Fachbereichs Maschinenbau, ohne die ich wahrscheinlich nie durch die administrativen Verwirrungen des Studiums gefunden hätte.

Ganz besonderer Dank gebührt natürlich meiner Familie: „Danke Mutter, für deinen Mut und deine Hingabe. Sie haben einiges bewirkt!“, „Danke Gyrel, du warst und bleibst mir in vielen Fragen des Lebens ein Vorbild und eine Inspiration!“, „Danke Familie, für Eure Unterstützung. Sie war mir nicht selten unersetzlich!“

Zu guter Letzt danke ich herzlichst meinen Freunden und meiner Lebenspartnerin für ihre Freundschaft, ihr Verständnis und ihre Unterstützung auf meinem Lebensweg.

Patrik Herrmann

Darmstadt, Februar 2011





## Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung und Motivation.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Solarthermische Stromerzeugung.....	3
2.1.1 Receiverkonzepte für Solarturmkraftwerke.....	4
2.1.2 Projektbeschreibung SolHyCo.....	4
2.1.3 Heliostatenfeld des CESA-1 Turmkraftwerks .....	5
2.2 Strahlung .....	6
2.2.1 Definition sphärischer Koordinaten.....	6
2.2.2 Art strahlungsphysikalischer Größen.....	7
2.2.3 Reflexionseigenschaften realer Oberflächen .....	8
2.2.4 Solarstrahlung .....	9
2.3 Stand der Strahlungsflussdichte-Messtechnik.....	11
2.4 Deflektometrische Spiegelvermessung .....	13
2.5 Strahlungsverfolgungs–Programme (Ray-Tracing) .....	14
<b>3 Konzeptübersicht.....</b>	<b>15</b>
3.1 Anforderungen an ein zukünftiges Messsystem.....	16
3.2 Beurteilung und Auswahl der betrachteten Messsysteme/ -verfahren .....	18
<b>4 Indirektes Messverfahren mit feststehender Messoberfläche (Fixed-Bar-Scan) .....</b>	<b>21</b>
4.1 Grundlagen des Messprinzips .....	21
4.1.1 Konzeption des Targets.....	22
4.1.2 Durchführung der Messung .....	23
4.2 Theoretische Voruntersuchungen.....	25
4.2.1 Fehlereinflüsse aufgrund örtlicher Fokusverschiebung.....	26
4.2.2 Veränderungsprozesse aufgrund zeitlicher Verzögerung der Messung.....	27
4.2.3 Auswertung örtlicher und zeitlicher Fehlereinflüsse .....	27
4.2.4 Auswertung örtlicher und zeitlicher Fehlereinflüsse für reale Bedingungen .....	28
4.3 Test des Messverfahrens mit einzelnen Heliostaten.....	29
4.3.1 Durchführung.....	29
4.3.2 Koordinaten und Versätze der Schwerpunkt und Aimpoints .....	29
4.3.3 Zusammensetzen der Streifenbilder.....	30
4.3.4 Ergebnisse des Zusammensetzens der Einzelbilder.....	33
4.4 Untersuchung der Nachführgenauigkeit beim Anfahren vorgegebener Zielpunkte .....	35
4.4.1 Simulationen zum Fehlereinfluss der Tracking-Ungenauigkeit .....	37
4.4.2 Fehlerabschätzung des Messverfahrens .....	40
4.5 Zusammenfassung und Bewertung der Durchführbarkeit der Methode .....	41

<b>5 Simulation gestützt durch indirekte Messungen auf dem Strahlungsschutz .....</b>	<b>43</b>
5.1 Flussdichtemessungen auf dem Strahlungsschutz .....	43
5.1.1 Korrekturen der Messbilder.....	45
5.1.2 Kalibration der Messoberfläche .....	48
5.2 Ergebnisse der Messungen auf dem Strahlungsschutz und Vergleich mit dem Referenzmesssystem.....	51
5.3 Simulation der Flussdichteverteilung mit STRAL .....	55
5.3.1 Eingangsdaten der Simulationen und deren Bereitstellung.....	55
5.3.2 Bestimmung der Aimpoints.....	61
5.4 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Flussdichtemessungen .....	62
5.4.1 Vergleich der örtlich verteilten Simulationsergebnisse mit Messungen auf dem Strahlungsschutz.....	63
5.4.2 Vergleich der aus Simulationen ermittelten Receiverintrittleistung mit Auswertungen aus Schwenkbalkenmessungen .....	65
5.4.3 Erweiterte Simulation.....	66
5.5 Zusammenfassung und Fazit .....	68
<b>6 Direkte Messung mit verteilten Flussdichtesensoren .....</b>	<b>71</b>
6.1 Radiometer.....	71
6.2 Untersuchung des Messprinzips .....	73
6.3 Zusammenfassung .....	75
<b>7 Vergleich und Bewertung von Verfahren zur Strahlungsflussdichtemessung .....</b>	<b>77</b>
<b>8 Zusammenfassung und Fazit .....</b>	<b>83</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>85</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>90</b>

## Formelzeichen

### Große lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
<i>A</i>	Fläche	m <sup>2</sup>
<i>AM</i>	Air mass	-
<i>AP</i>	Koordinaten des Zielpunktes	-
<i>C</i>	Zirkumsolarstrahlung	W
<i>CSR</i>	Circumsolar ratio	-
<i>C<sub>f</sub>(α)</i>	Korrekturfaktor für Winkelabhängigkeit	-
<i>C<sub>f</sub>(AM)</i>	Korrekturfaktor für spektrale Abhängigkeit	-
<i>D</i>	Durchmesser, Strahlungsflussdichte	m, W/m <sup>2</sup>
<i>E</i>	Bestrahlungsstärke	W/m <sup>2</sup>
<i>GW</i>	Grauwert	-
<i>I</i>	Strahlstärke	W/sr
<i>K</i>	Kalibrationsfaktor, Korrekturfaktor	W/m <sup>2</sup> /mV, -
<i>L</i>	Strahldichte	W/(m <sup>2</sup> sr)
<i>N</i>	Zufällige einer Normalverteilung entnommene Zahl	-
<i>No</i>	Anzahl	-
<i>P</i>	Leistung	W
<i>Q̇</i>	Wärmestrom	W/m <sup>2</sup>
<i>R</i>	Radius	m
<i>R̄</i>	Zufällige einer Rechteckverteilung entnommene Zahl	-
<i>S</i>	Strahlung der Sonnenscheibe, Dicke	W, m
<i>T</i>	Temperatur	K
<i>U</i>	Spannung	V

### Kleine lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
<i>b</i>	Breite	m
<i>c<sub>w</sub></i>	Strömungswiderstandskoeffizient bzw. Widerstandsbeiwert	-
<i>d</i>	Abstand	m
<i>e</i>	Prozentuale Standardmessunsicherheit	%
<i>h</i>	Höhe	m
<i>k</i>	Laufparameter statistisch unabhängiger Beobachtungen	-
<i>m</i>	Milli, Mittelwert	10 <sup>-3</sup> , -
<i>n</i>	Anzahl statistisch unabhängiger Beobachtungen, Heliostatnummer	-, -
<i>p</i>	Druck	N/m <sup>2</sup>
<i>r</i>	Radius	m
<i>r<sup>2</sup></i>	Korrelationskoeffizient	-
<i>s</i>	Standardabweichung	-
<i>s<sup>2</sup></i>	Empirische Varianz	-
<i>t</i>	Zeit	s
<i>u</i>	Standardmessunsicherheit	-
<i>v</i>	Windgeschwindigkeit	m/s
<i>x</i>	Abmessung	m

### Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$\Delta$	Abstand	m
$\Phi$	Strahlungsfluss	W
$\Omega$	Raumwinkel	sr
$\alpha$	Einstrahlung-, Akzeptanzwinkel, Halbwinkel der Sonne, Absorptionsgrad	rad, -
$\eta$	Richtungsangabe	-
$\varphi$	Azimutwinkel, Drehwinkel	rad, °
$\lambda$	Wellenlänge, Wärmeleitfähigkeit	m, W/(m·K)
$\mu$	micro	10 <sup>-6</sup>
$\theta$	Elevationswinkel	rad
$\rho$	Reflexionsgrad, Dichte	-, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Standardabweichung, Tracking-Ungenauigkeit	-, mm, rad
$\omega$	Rotations- oder Winkelgeschwindigkeit	rad/s
$\xi$	Richtungsangabe	-

### Indizes

Symbol	Bezeichnung
<i>Alumina</i>	Aluminiumoxid
<i>AP</i>	Aimpoint (Zielpunkt)
<i>Calib</i>	Kalibration
<i>Dist</i>	Verteilung
<i>Ellipse</i>	Elliptisch
<i>Erde</i>	Erde
<i>Fokus</i>	Fokussieren
<i>i, j</i>	Positionskordinaten eines Pixels in der Bildmatrix
<i>Im</i>	Bildaufnahme
<i>Luft</i>	Luft bei Normalbedingungen
<i>Mes</i>	Messung
<i>Overlap</i>	Überlappungsbereich
<i>S</i>	Sonne
<i>Sim</i>	Simulation
<i>Spec</i>	Gerichtet
<i>Start</i>	Beginn
<i>r</i>	einfallend
<i>Ref</i>	Referenz
<i>T</i>	Target (Messoberfläche)
<i>th</i>	Thermo
<i>Tracking</i>	Nachführung
<i>Tag</i>	Tagesverlauf
<i>Wind</i>	Windkraft
<i>x, y, z</i>	kartesische Koordinaten
‡	Vertikaler Abstand
	Paralleler Abstand
⊥	Senkrecht
0	Maximal- oder Startwert

### Hochgestellte Zeichen

<b>Symbol</b>	<b>Bezeichnung</b>
<sup>trans</sup>	Transformiert
–	Mittelwert
→	Vektor

### Abkürzungen

<b>Symbol</b>	<b>Bezeichnung</b>
CCD	Charge-coupled Device
CSP	Concentrating Solar Power
CSR	Circumsolar Ratio
D	Dimensional
DNI	Direct Normal Irradiance
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
engl.	Englisch
F&E	Forschung und Entwicklung
GUI	Graphical User Interface
Helios	Heliostaten
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PSA	Plataforma Solar de Almería
ProHERMES	Programmierbares Heliostaten und Receiver Messsystem
RRM	Raster-Reflexionsmethode
RSP	Rotating Shadowband Pyranometer
SolHyCo	Solar-Hybrid Power and Cogeneration Plants
STRAL	Solar Tower Ray-Tracing Laboratory



## 1 Einleitung und Motivation

Der weltweite Energiebedarf wächst stetig an. Trotz deutlicher Erfolge bei der Anstrengung konventionelle Energieträger effizienter zu nutzen, ist dieser Prozess auch auf absehbare Zeit nicht aufzuhalten. Gerade Entwicklungs- und Transformationsländer melden berechtigterweise einen steigenden Energiebedarf aufgrund wachsender Bevölkerung und Infrastruktur an. Diese und andere politische Entwicklungen führen nicht nur zu unkalkulierbaren Kostenschwankungen von Rohstoffen, wie Erdgas oder Rohöl, sondern auch zu Versorgungsunsicherheiten aufgrund von geopolitischen Problemen. Die Energieversorgung der Zukunft sollte daher auf einem Mix unterschiedlicher Energieträger basieren. Erneuerbare Energien können dabei einen wesentlichen Beitrag liefern. Sie sind nahezu unbegrenzt verfügbar und können den globalen Energieverbrauch auf eine nachhaltige Basis stellen.

In trocknen und heißen Zonen der Erde mit einem hohen Anteil an direkter Solarstrahlung (engl. direct normal irradiance, DNI) bieten sich solarthermische Kraftwerke als effiziente Technik der erneuerbaren Strom- und Wärmeerzeugung an. Sie arbeiten im Prinzip nicht anders als konventionelle thermische Kraftwerke, nur wird die für den thermodynamischen Kreisprozess benötigte Energie nicht von fossilen Energieträgern bereitgestellt, sondern durch konzentrierte Solarstrahlung (engl. concentrating solar power, CSP).

Für die Überwachung des Betriebs derartiger Anlagen, vor allem um das Einhalten zulässiger Bestrahlungsstärken auf dem Strahlungsempfänger zu gewährleisten, sind Informationen über die genaue Verteilung der eingestrahlt Leistung erforderlich. Darüber hinaus bildet die solare Eingangsleistung eine wesentliche Größe, um den Wirkungsgrad von solaren Komponenten messen bzw. verbessern zu können. Gleichfalls werden zur Überprüfung von Simulationsmodellen Messsysteme benötigt, die sowohl die integrierte Leistung der konzentrierten Solarstrahlung im Bereich des Receivers als auch die örtlich aufgelöste Strahlungsverteilung erfassen können.

Zu diesem Zweck wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) auf der Plataforma Solar der Almería (PSA) in den vergangenen Jahren bereits ein indirektes Messsystem zur Flussdichtemessung namens ProHERMES entwickelt und erfolgreich bei der Charakterisierung mehrerer Testreceiver eingesetzt. Dabei bewegt sich ein diffus reflektierendes Target durch den Strahlengang vor dem Eingang des Receivers, während eine CCD-Kamera gleichzeitig Aufnahmen der reflektierten Helligkeitsverteilung macht [Ulmer 2004].

Wirtschaftlich ausgelegte Solarkraftwerke, wie sie in den vergangenen Jahren in Betrieb genommen wurden, weisen, um weitere Kosteneinsparungspotentiale zu nutzen, einen klaren Trend hin zu größeren Dimensionen auf. Rotierend bewegte Messflächen, dessen Massenträgheit quadratisch mit dem Durchmesser der abzudeckenden Apertur steigt, sind in diesem Fall nur beschränkt einsetzbar oder mit hohem konstruktivem Aufwand verbunden. Da auch die Umfangsgeschwindigkeiten mit zunehmender Balkenlänge steigen, ist es zweifelhaft, ob das genannte Messverfahren die an sie gestellten Anforderungen in Sachen Messgenauigkeit und -geschwindigkeit weiter erfüllen können.

Gegenstand dieser Arbeit sind deshalb Untersuchungen zu Methoden der Strahlungsflussdichtemessung, die das Potential haben die oben genannten Messaufgaben zu übernehmen, auch bei Dimensionierung des Receivers auf entsprechend kommerzielle Größe. Dies sind zum einen ein indirektes Messverfahren, aufbauend auf dem bereits Existierenden, aber mit feststehendem Streifentarget, um auf bewegte Teile verzichten zu können. Zum anderen wur-

de durch das DLR eine neuartige Software entwickelt, die dazu im Stande ist, unter Einbeziehung gemessener Heliostatgeometriedaten mit Hilfe der Raster-Reflexionsmethode (RRM) eine hochgenaue Strahlungsflussdichteverteilung zu berechnen. In Kombination mit vereinfachten Referenzmessungen zur Validierung simulierter Flussdichteverteilungen ist diese Software in der Lage die Aufgaben der Betriebsüberwachung zu übernehmen und dabei fast gänzlich auf Messtechnik zu verzichten. Eine weitere Messmethode besteht in der gezielten Verteilung von Flussdichtesensoren innerhalb der zu messenden Aperturebene. Mit Hilfe der so gewonnenen Stützpunkte ist es möglich im Anschluss eine Verteilung der Strahlungsflussdichte zu interpolieren bzw. an eine erwartete Verteilung anzupassen. Demgegenüber steht die Konzeptanalyse des Änderungs- bzw. Anpassungsaufwandes der indirekten Messsysteme mit Schwenkbalken für den Einsatz in kommerziellen Kraftwerken.

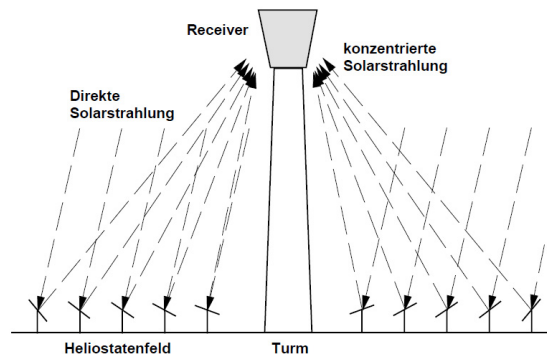


## 2 Grundlagen

### 2.1 Solarthermische Stromerzeugung

Allen Arten konzentrierender solarthermischer Kraftwerke gemein ist die Wandlung von Sonnenenergie in Wärme, welche über einen thermodynamischen Kreisprozess wiederum eine Kraftmaschine zur Elektrizitätserzeugung antreibt.

Unter den solarthermischen Kraftwerkstechnologien, nehmen Turmkraftwerke (engl. central receiver systems) eine besondere Stellung ein. Zweiachsig nachgeführte Spiegelsysteme, sogenannte Heliostate, konzentrieren die Sonnenstrahlung hundert- bis tausendfach auf einen Receiver, der sich auf einem Turm befindet (siehe Abbildung 2.1). Während diese Technologie in der Vergangenheit wegen höherer Komplexität und Investitionskosten eher in den Schatten von Parabolrinnenkraftwerken getreten ist, erfährt sie derzeit wieder enorme Aufmerksamkeit aufgrund ihres großen Kostenreduktionspotentials der Stromgestehungskosten. Wegen der möglichen hohen Betriebstemperaturen von bis zu 1000°C verspricht diese Technologie nicht nur Wirkungsgradvorteile, sondern auch eine höhere Flexibilität beim anschließenden Kreisprozess durch den möglichen Einsatz solarer Gasturbinenprozesse (Brayton cycle).



**Abbildung 2.1:** Prinzipieller Aufbau einer Solarturmanlage<sup>1</sup>

In den 80er und 90er Jahren wurden mehrere Versuchskraftwerke dieser Art gebaut und getestet. Die beiden ersten kommerziellen Solarturmkraftwerke, die 2007 bzw. 2009 in Spanien ans Netz gingen, erzeugen in Rohrrezeivern Sattdampf. Eines der fortschrittlichsten Solarturmkraftwerke startete 2009 in Jülich den Testbetrieb. In einem offen volumetrischen Receiver erhitzt sich Luft auf ca. 700°C und erzeugt in einem Wärmetauscher überhitzten Dampf zum Antrieb einer Turbine. Neueste Entwicklungen konzentrieren sich auf die Verwendung von geschmolzenem Salz als Arbeits- und Speichermedium des Receivers. Aufbauend auf den Erfolgen US-amerikanischer Solarturmprojekte, begann man in Spanien vor etwa vier Jahren mit dem 17-MW-Solarturmkraftwerk Solar Tres in Sevilla. Es ist das erste kommerzielle Kraftwerk, das mit geschmolzenem Salz arbeitet und wird voraussichtlich noch in diesem Jahr den Betrieb aufnehmen.

<sup>1</sup> Quelle: [www.drhl.de/tw/grafiken/solarthermie\\_11.gif](http://www.drhl.de/tw/grafiken/solarthermie_11.gif)

Neben der reinen Stromerzeugung können diese Kraftwerkstypen auch zur Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden. So kann ein solarthermisches Kraftwerk z.B. gleichzeitig Elektrizität, Prozessdampf, über eine Absorptionskältemaschine Kälte und über eine Meerwasserentsalzungsanlage auch Trinkwasser erzeugen. Darüber hinaus wird durch die Zusatzausstattung mit einem thermischen Speicher und/ oder einer Zufeuerung eine ständige Verfügbarkeit zur Lastdeckung ermöglicht.

### **2.1.1 Receiverkonzepte für Solarturmkraftwerke**

Der Receiver ist das Herzstück eines jeden Solarturmkraftwerks. Es lassen sich je nach Art des Wärmeträgermediums und Bauform des Absorbers verschiedene Receiver Typen unterscheiden. Die wesentlichsten Bauformen sind der Rohrbündelabsorber und der volumetrische Absorber. Hinsichtlich einer Kommerzialisierung viel versprechende Receiverkonzepte sind die offenen bzw. geschlossenen volumetrischen Luftreceiver, die Technologien mit geschmolzenem Salz, sowie die gesättigte-Dampf-Technologie [Romero, Buck et al. 2002].

Geschlossene druckbeaufschlagte volumetrische Receiver haben den Vorteil, dass die durch den Absorber geleitete Luft unter Ausschluss der Atmosphäre erhitzt wird. Durch den druckdichten Aufbau kann die Luft im Verdichter komprimiert werden, bevor sie im Receiver durch absorbierte Solarstrahlung erwärmt wird. Die Absorption solarer Strahlung ersetzt in diesem Fall vollständig (rein solare Systeme) oder nur teilweise (solar-hybride Systeme) die Brennkammer.

Ganz allgemein haben Gasturbinen- gegenüber Dampfturbinenprozessen den Vorteil ein höheres Temperaturpotenzial nutzen zu können, welches den Carnot'schen Wirkungsgrad verbessert. Zudem können durch die vergleichsweise hohe Temperatur der Abgase, diese durch die Einkopplung in einen zusätzlichen Dampfturbinenprozess und/oder Kraft-Wärme-Kopplung zur Leistungssteigerung verwendet werden [Buck, Lüpfer et al. 2000], [Schwarzbözl, Buck et al. 2006].

Parallel zur Entstehung dieser Arbeit wurden Tests eines neuen Receiver-Prototyps an der CESA-1 Turmanlage der Plataforma Solar de Almería durchgeführt. Der Receiver wurde innerhalb des laufenden F&E Projekts SolHyCo (Solar-Hybrid Power and Cogeneration Plants) entwickelt, dabei kam eine geschlossene druckbeaufschlagte Rohr-Receiver-Technologie zum Einsatz. Da sich im Zuge dieser Arbeit mehrfach auf den Aufbau dieses Receivers bezogen wird, ist er im Anschluss kurz vorgesehlt.

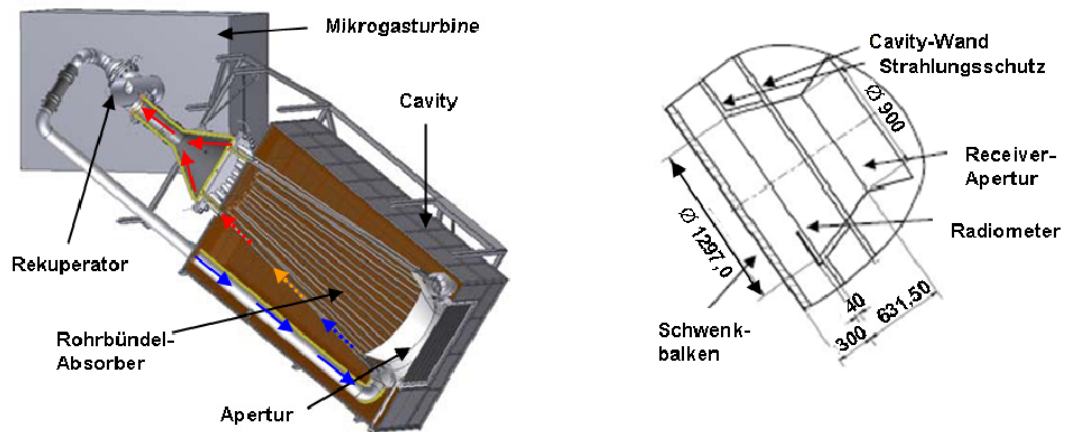
### **2.1.2 Projektbeschreibung SolHyCo**

Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten dieses Projekts lag auf der Komponente volumetrischer Rohrbündelabsorber für den Temperaturbereich bis ca. 800°C und einem Hohlraum-Receiver im Bereich bis 1000°C und höher. Weitere Entwicklungsziele lagen im Bereich der Brennkammer und deren Regelung. Weiterhin wurden verschiedene Systemkonfigurationen untersucht, deren Kosten ermittelt, und das Marktpotential für solar-hybride Gasturbinensysteme abgeschätzt. Die Einkopplung von Solarenergie, bei den für Gasturbinensysteme benötigten Temperaturen, an sich stellt aber schon ein anspruchsvolles Entwicklungsziel dar. Die Eintrittstemperatur in die Gasturbine kann je nach Typ zwischen 800°C und

1400°C betragen, wobei die Luft unter einem Druck von 4 – 16 bar durch den Solarreceiver strömt [Heller, Buck et al. 2008].

Ein Querschnitt des Mikrogasturbinensystems (100 kW<sub>el</sub>) für Kraft-Wärmekopplung ist in Abbildung 2.2 (links) abgebildet. Zu sehen ist der Rohrbündelabsorber und der Hohlraum (engl. cavity), in dem er untergebracht ist. Der Absorber besteht aus 40 Inconelrohren, auf deren Oberfläche die durch die Apertur einfallende Solarstrahlung absorbiert wird. Die dadurch frei werdende Wärme wird durch durchströmende Luft abgeführt. Anschließend wird diese direkt, oder nach Zusatzfeuerung mit Biodiesel, in eine Mikrogasturbine eingeleitet.

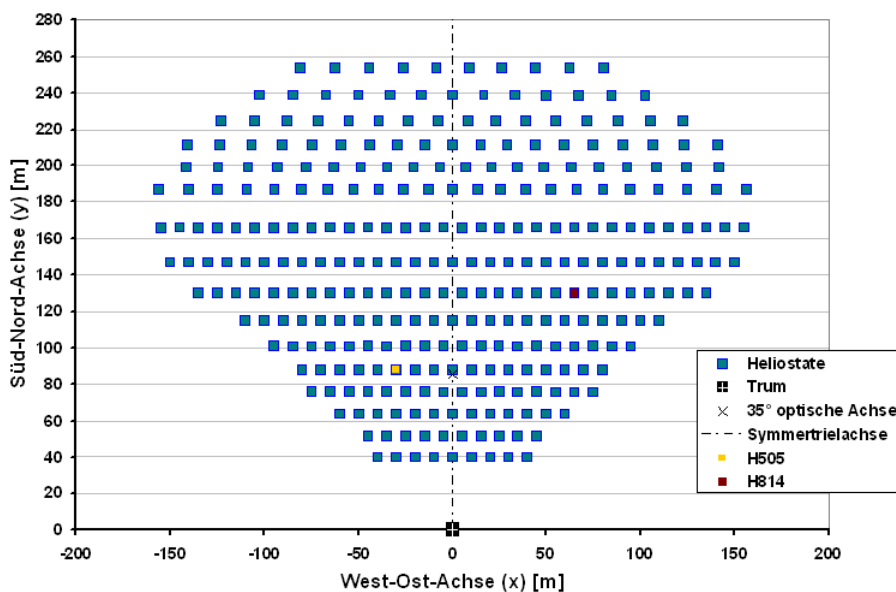
In weiteren Kapiteln dieser Arbeit sind neben dem Durchmesser der Apertur ( $\varnothing$  900mm) und der Receiver-Eingangsöffnung ( $\varnothing$  1297mm), vor allem die Versätze der Schwenkbalkenebene zur Strahlungsschutz- sowie zur Aperturebene von Bedeutung. Diese betragen 300mm bzw. 931,5mm. Sie können anhand der Querschnittszeichnung des Receiver-Eingangsbereichs in Abbildung 2.2 (rechts) nachvollzogen werden.



**Abbildung 2.2:** Schematische Darstellung des solaren Receivers und Anbindung an das solarhybride Mikrogasturbinensystem (links); Querschnitt durch den Receiver-Eingangsbereich (rechts); [Amsbeck, Denk et al. 2010]

### 2.1.3 Heliostatenfeld des CESA-1 Turmkraftwerks

Das Heliostatenfeld der CESA-1 Turmanlage besteht aus 300 Heliostaten. Sie sind in 16 Reihen symmetrisch zur Nord-Süd-Achse des Turms angeordnet (siehe Abbildung 2.3). Es handelt sich dabei um ein sogenanntes Nordfeld. Die Anzahl von Heliostaten pro Reihe beträgt von 9 in der ersten bis maximal 32 in der 10. Reihe. Die Benennung der Heliostate im Feld ist wie folgt. Die erste(n) Ziffer(n) der Benennung geben die Reihe des Heliostaten an, wohingegen die letzten zwei Ziffern für die Position des Heliostaten in einer Reihe stehen. Dabei werden sie nach Westen (negative x-Richtung) mit ungeraden Nummern gezählt und nach Osten (positive x-Richtung) mit Geraden. Die Heliostate, die sich direkt auf der Symmetrieachse befinden, erhalten die Endziffern 00. Dies ist allerdings nur in ungeraden Reihen der Fall. Als Beispiel sind die Heliostate H505 (5. Reihe, dritte Position in westlicher Richtung) und H814 (8. Reihe, 7. Position in östlicher Richtung) in Abbildung 2.3 farblich hervorgehoben.



**Abbildung 2.3:** Heliostatenfeld des CESA-1 Turmkraftwerks in der Forschungsanlage PSA

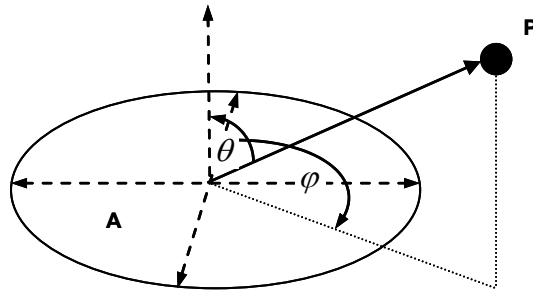
## 2.2 Strahlung

In diesem Abschnitt wird in die zum Verständnis der folgenden Kapitel notwendigen Grundlagen der Strahlungsphysik und Solarstrahlung eingeführt.

### 2.2.1 Definition sphärischer Koordinaten

Um die Richtung bei der Verwendung gerichteter Größen im Raum beschreiben zu können, benutzt man die sphärischen Koordinaten Elevationswinkel  $\theta$  und Azimutwinkel  $\varphi$ . Dabei beschreibt die Elevation den Neigungswinkel, während die horizontale Ausrichtung über den Azimutwinkel erfolgt. Wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist, wird mit dem Azimutwinkel  $\varphi$  die Drehung des in die horizontale Ebene projizierten Verbindungsvektors zum Punkt P angegeben, wobei die Lage  $\varphi = 0$  je nach Anwendung definiert werden kann. Die Abweichung des Vektors von der Flächennormalen der Fläche A wird mit dem Elevationswinkel  $\theta$  gemessen, er wird auch Erhebungswinkel genannt.

Eine weitere Größe, die zur Definition der verwendeten strahlungsphysikalischen Größen notwendig ist, ist der Raumwinkel  $\Omega$ . Anhand einer Kugel mit dem Radius  $r$ , deren Mittelpunkt im Ursprung des Koordinatensystems liegt, und eines Kegels, dessen Kegelspitze sich ebenfalls im Koordinatenursprung befindet und der in die durch  $\theta$  und  $\varphi$  vorgegebene Richtung zeigt, erhält man die Fläche  $A_k$ . Sie ist der Teil der Kugeloberfläche, der durch den Kegelmantel herausgeschnitten wird. Die Größe des Raumwinkels ist dann definiert als  $\Omega = A_k / r^2$  [ $\text{m}^2 / \text{m}^2$ ]. Die Einheit des Raumwinkels wird in Steradian (sr) angegeben und kann durch die Zahl 1 ersetzt werden [Baehr and Stephan 2008].



**Abbildung 2.4:** Definition sphärischer Koordinaten

### 2.2.2 Art strahlungsphysikalischer Größen

Zu den für das allgemeine Verständnis dieser Arbeit notwendigen Strahlungsgrößen gehören der Strahlungsfluss, die Strahlungsflussdichte, die Strahlstärke und die Strahldichte.

Die emittierte Strahlungsenergie  $Q$ , die in der Zeit  $dt$  in den Halbraum über einer Oberfläche eines strahlenden Körpers emittiert wird, heißt Strahlungsfluss:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

Bezieht man den Strahlungsfluss auf eine zur Strahlrichtung senkrechten Fläche, so erhält man die Strahlungsflussdichte  $D$ :

$$D = \frac{d\Phi}{dA_{\perp}} \quad (2.2)$$

Die Strahlstärke  $I$  [W/sr] bezeichnet denjenigen Anteil des Strahlungsflusses  $d\Phi$ , der von einer Strahlungsquelle in das Raumwinkelement  $d\Omega_1$  emittiert wird.  $d\Omega_1$  beschreibt dabei den Raumwinkel, unter dem sich die empfangende Fläche von der Strahlungsquelle aus betrachtet darstellt:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega_1} \quad (2.3)$$

Mit der Strahldichte  $L$  [W/m<sup>2</sup>sr] wird derjenige Anteil des Strahlungsflusses  $d\Phi$  beschrieben, der von einer Strahlungsquelle in das Raumwinkelement  $d\Omega_1$  pro projizierte Fläche  $dA_1 \cos\theta_1$  emittiert wird. Der Faktor  $\cos\theta_1$  besagt dabei, dass lediglich die Projektion der emittierenden Fläche senkrecht zur Strahlungsrichtung berücksichtigt wird:

$$L_1 = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 dA_1 \cos\theta_1} \quad (2.4)$$

Die beiden zuletzt eingeführten Größen, Strahlstärke und Strahldichte, können zur Erläuterung des Lambertischen Kosinusetzes herangezogen werden. Dabei wird das idealisierte Modell einer Lambertischen Oberfläche verwendet, deren Ausstrahlung gleichmäßig über den gesamten Halbraum verteilt ist.

In Richtung der Normalen ( $\theta = 0$ ) einer Lambertsch strahlenden Oberfläche beobachtet man die maximale Strahlstärke  $I_0$ . Weicht man von der Normalen ab und vergrößert somit den

Elevationswinkel  $\theta$ , so nimmt die Strahlstärke proportional zu  $\cos\theta$  ab. Diese Beziehung wird als Lambertsches Kosinusetz bezeichnet:

$$I = I_0 \cdot \cos\theta \quad (2.5)$$

Die Strahldichte eines ideal Lambertschen Strahlers, der auch als diffuser Strahler bezeichnet wird, ist hingegen unabhängig von der Beobachtungsrichtung, da im Nenner die projizierte Fläche  $dA_1 \cos\theta_1$  berücksichtigt wird.

Die bislang eingeführten strahlungsphysikalischen Größen, gelten für das gesamte Strahlungsspektrum. Unter Berücksichtigung der spektralen Zusammensetzung der Strahlung ist der Strahlungsfluss im Wellenlängenbereichs  $\lambda$  bis  $\lambda + d\lambda$  definiert durch  $\Phi_\lambda d\lambda$ . Dementsprechend gilt für den Strahlungsfluss und analog für andere spektrale Größen:

$$\Phi = \int_0^\infty \Phi_\lambda d\lambda \quad (2.6)$$

Strahlungsgrößen können in hemisphärische Gesamtgrößen, hemisphärische spektrale Größen, gerichtete Gesamtgrößen und gerichtete spektrale Größen unterschieden werden. Gerichtete spektrale Größen, mit denen man die Richtungs- und Wellenlängenverteilung von Strahlungsenergie beschreibt, sind experimentell und theoretisch schwierig zu bestimmen. Hemisphärisch spektrale Größen beinhalten die Strahlung aller Richtungen des Halbraums über einem Flächenelement und sind nur von der Wellenlänge abhängig. Gerichtete Gesamtgrößen hingegen fassen die Strahlungsenergie aller Wellenlängen zusammen und beschreiben nur die Abhängigkeit von den Richtungen des Halbraums. Hemisphärische Gesamtgrößen fassen die Strahlung aller Wellenlängen und Richtungen zusammen. Sie vermitteln damit keine Informationen über die spektrale Verteilung und die Richtungsabhängigkeit der Strahlung. [Baehr and Stephan 2008].

### 2.2.3 Reflexionseigenschaften realer Oberflächen

Zur Erläuterung des möglichen Reflexionsverhaltens einer beliebigen Oberfläche können im ersten Schritt die beiden idealisierten Grenzfälle, der spiegelnden Reflexion und der diffusen Reflexion, herangezogen werden (siehe Abbildung 2.5 (links)).

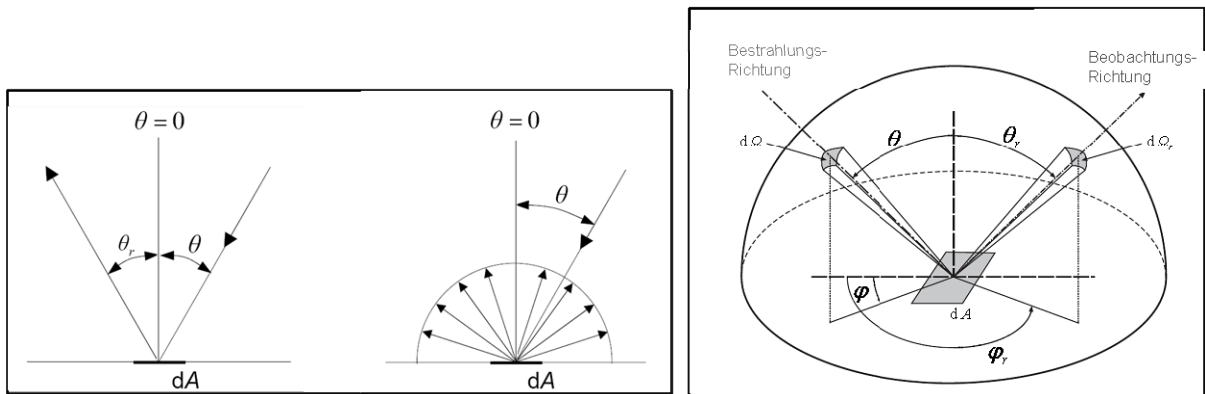
Bei spiegelnder Reflexion wird die aus der Richtung  $\theta, \varphi$  einfallende Strahlung unter einem gleich großen Elevationswinkel  $\theta_r = \theta$  und unter dem Azimutwinkel  $\varphi_r = \varphi + \pi$  reflektiert. Bei einer diffus reflektierenden Oberfläche erzeugt die aus der Richtung  $\theta, \varphi$  einfallende Strahlung eine reflektierte Strahlung, deren Strahldichte über alle Abstrahlungsrichtungen  $\theta_r, \varphi_r$  im gesamten Halbraum gleich groß ist.

Das tatsächliche Reflexionsverhalten realer Oberflächen stellt eine Kombination dieser beiden Grenzfällen dar. Während polierte, blanke Metallflächen nahezu spiegelnd reflektieren, zeigt sich an rauen und matten Oberflächen in guter Näherung eine diffuse Reflexion. Die Dimension der Rauheiten muss dabei in Relation zur Wellenlänge der Strahlung betrachtet werden. Während eine Oberfläche für kurzwellige Strahlung ein raues Verhalten und somit diffuse Reflexion aufweisen kann, verhält sie sich langwelliger Strahlung gegenüber als glatt, was zur spiegelnden Reflexion führt [Baehr and Stephan 2008].

Eine umfassende Beschreibung der Reflexionseigenschaften realer Oberflächen muss dementsprechend unter Berücksichtigung der Bestrahlungs- und Beobachtungsrichtung erfolgen. Dazu dient der gerichtet-gerichtete Gesamtreflexionsgrad  $\rho(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r)$ , der in Abhängigkeit von den beiden Winkelpaaren  $\theta, \varphi$  für die Bestrahlungsrichtung und  $\theta_r, \varphi_r$  für die Beobachtungsrichtung (bzw. die Richtung in welche die Strahlung reflektiert wird) angegeben wird.

$$\rho(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r)}{L(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega} \quad (2.7)$$

Der Nenner  $L(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega$  stellt die innerhalb des Raumwinkels  $d\Omega$  auftreffende Energie dar. Für Elevationswinkel  $\theta > 0$  trifft die einfallende Strahlungsenergie nicht mehr senkrecht auf die gesamte Fläche  $dA$ , sondern auf die um den Faktor  $\cos \theta$  verringerte Fläche auf. Der Zähler  $L_r(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r)$  beschreibt die reflektierte Strahldichte in die durch die Winkel  $\theta_r, \varphi_r$  gegebene Richtung (siehe Abbildung 2.5 (rechts)).



**Abbildung 2.5:** Spiegelnde und diffuse Reflexion (links), Definition des Gerichtet-gerichteten Gesamtreflexionsgrades (rechts); angepasst aus [Baehr and Stephan 2008]

Der gerichtet-gerichtete Gesamtreflexionsgrad ist somit ein Verhältnis, das den Beitrag ausdrückt, den  $L(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega$  zur reflektierten Strahldichte  $L_r(\theta, \varphi, \theta_r, \varphi_r)$  in der durch  $\theta_r, \varphi_r$  gegebenen Richtung liefert. Er ist für alle Wellenlängen gültig [Lindner and Puente León 2006].

### 2.2.4 Solarstrahlung

Quelle der Solarenergie sind in der Sonne stattfindende Kernfusionsprozesse. Die Sonne kann als eine nahezu kugelförmige Strahlungsquelle mit einem Durchmesser von  $1,932 \cdot 10^6$  km und einer Leistung von  $60 \text{ MW/m}^2$  betrachtet werden. Der mittlere Abstand zwischen Sonne und Erde beträgt  $149,6 \cdot 10^6$  km. Daher erreicht nur ein Bruchteil dieser Strahlungsleistung die Erde. Die Strahlung in Erdentfernung, aber außerhalb der Atmosphäre, wird extraterrestrische Solarstrahlung genannt. Die auf einer Fläche gerade außerhalb der Erdatmosphäre vorliegende Bestrahlungsstärke wird als Solarkonstante  $E_0$  bezeichnet. Sie schwankt in Abhängigkeit vom Abstand der Erde zur Sonne zwischen  $1325 \text{ W/m}^2$  im Sommer und  $1420 \text{ W/m}^2$  im Winter. Die mittlere Bestrahlungsstärke beträgt:

$$E_0 = 1367 \pm 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (2.8)$$

Beim Durchgang durch die Erdatmosphäre wird die extraterrestrische Solarstrahlung geschwächt, so dass die solare Bestrahlungsstärke auf der Erdoberfläche deutlich niedriger als der extraterrestrische Wert ist.

Ein Teil der Solarenergie wird an Luftmolekülen und Aerosolen gestreut, während ein weiterer Teil von den Luftbestandteilen absorbiert wird. Etwa die Hälfte der gestreuten Strahlung gelangt als diffuse Strahlung zur Erdoberfläche, während die andere Hälfte in den Weltraum zurückgestrahlt wird.

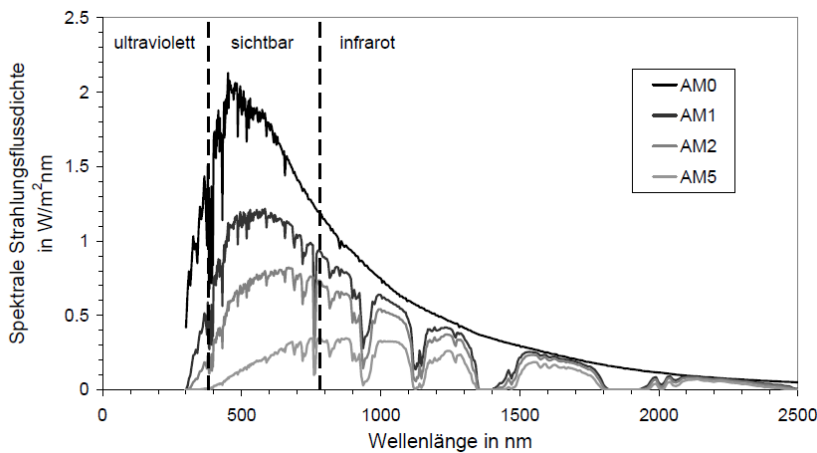
Der Grad der Abschwächung wird einerseits durch den Sonnenstand und die daraus resultierende Weglänge der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre und andererseits durch vorherrschende atmosphärische Bedingungen bestimmt.

Zur Quantifizierung der Weglänge der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre wird der Faktor AM (engl. air mass) verwendet. Für den Fall der extraterrestrischen Solarstrahlung, die außerhalb der Erdatmosphäre vorliegt, gilt AM0. Der senkrechte Sonnenstand (Zenit) entspricht dem kürzesten Weg durch die Atmosphäre und wird mit AM1 bezeichnet. Der aktuelle AM-Wert kann näherungsweise anhand des Elevationswinkels der Sonne  $\theta_s$  bestimmt werden. Der Elevationswinkel der Sonne  $\theta_s$  ist dabei definiert als der Winkel zwischen dem Sonnenmittelpunkt und dem Horizont, wobei der Beobachter den Scheitelpunkt markiert.

$$AM \approx \frac{1}{\sin \theta_s} \quad (2.9)$$

Dieser Beziehung liegt die Annahme einer flachen Erdatmosphäre und die Vernachlässigung der bei bestimmten Winkeln auftretenden Brechung an der Atmosphäre zugrunde. Eine genaue Berechnung ist in [Ulmer 2004] zu finden.

In Abbildung 2.6 ist die spektrale Strahlungsflussdichte in Abhängigkeit der vorliegenden Luftmasse aufgetragen. Dabei zeigen der Verlauf AM0 die spektrale Verteilung der Solarstrahlung außerhalb der Atmosphäre und die Verläufe AM1, AM2 und AM5 bei verschiedenen Sonnenständen.



**Abbildung 2.6:** Spektrale Direktstrahlungsverteilung in Abhängigkeit der Luftmasse; [Ulmer 2004]



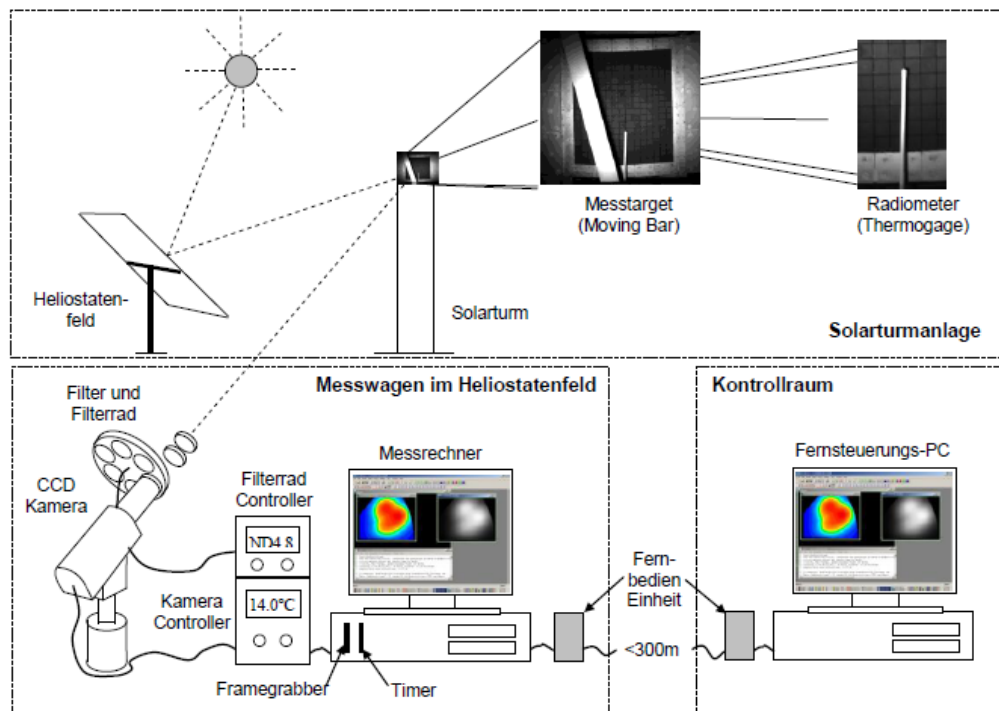
### 2.3 Stand der Strahlungsflussdichte-Messtechnik

Es gibt eine Vielzahl verschiedenster Prinzipien und Ausführungen zur Messung der Strahlungsflussdichteverteilung von Receivern solarthermischer Kraftwerke. Sie unterteilen sich hauptsächlich in direkte und indirekte Verfahren. Grundlage der direkten Verfahren ist ein Detektor, mit dessen Hilfe die über das gesamte Spektrum der Sonne emittierte Strahlung in  $\text{W/m}^2$  gemessen werden kann. Dazu dienen in erster Linie Radiometer, aber auch gekühlte Halbleitermaterialien sind prinzipiell dafür geeignet. Einen Überblick über mögliche Verfahren der Direktmessung geben [Pacheco, Houser et al. 1994], [Ballestrín and Monterreal 2004] und [Fernández-Reche, Sánchez et al. 2008]. In Kapitel 6 wird die Möglichkeit der Flussdichtemessungen mit Radiometern näher untersucht.

Indirekte Verfahren basieren auf dem Prinzip, die diffus reflektierte Strahlung (siehe diffuser Strahler, Kapitel 2.2.2) einer Messoberfläche, im Folgenden auch Target genannt, mit einer CCD-Kamera aufzunehmen. Diese Aufnahmen werden im Folgenden durch ein fest in dieser Ebene installiertes Radiometer kalibriert.

#### Referenzmesssystem ProHERMES

Dieses Prinzip wurde innerhalb der letzten Jahre erfolgreich in das inzwischen auf moderner Soft- und Hardware basierende Flussdichtemesssystem PROHERMES (Programmierbares Heliostaten und Receiver Messsystem) eingearbeitet und getestet [Ulmer 2004], [Ulmer, Lüpfer et al. 2004]. Abbildung 2.7 zeigt den prinzipiellen Messaufbau des PROHERMES-Systems an der CESA-1 Turmanlage.



**Abbildung 2.7:** Überblick über den Messaufbau des Flussdichtemesssystems PROHERMES; [Ulmer 2004]

Als Lambertsches Target wird ein drehbarer Schwenkbalken eingesetzt, der im Folgenden auch als Moving Bar bezeichnet wird. Die Moving Bar besteht aus Aluminiumplatten, die durch eine Beschichtung aus weißem Amercoat 741 ihre näherungsweise diffus reflektierenden Eigenschaften erhalten. Während einer Messung durchläuft die Moving Bar eine Ebene kurz vor dem Receiver. Gleichzeitig wird von einer CCD-Kamera eine Bilder-Sequenz der auf dem Target reflektierten Helligkeitsverteilung aufgenommen. Dabei misst ein Radiometer die einstrahlende Flussdichte an einem Referenzpunkt, womit ein Zusammenhang zwischen Flussdichte und dem entsprechenden Grauwert an dieser Position hergestellt werden kann. Anhand des auf diese Weise bestimmten Faktors wird die Kalibration des aufgenommenen Messbildes möglich [Ulmer 2004].

### **Messtechnik**

Auf die in Abbildung 2.7 dargestellte Messtechnik des Flussdichtemesssystems ProHERMES wurde bereits ausführlich in den zitierten Arbeiten von [Ulmer 2004] sowie [Ulmer, Lüpfer et al. 2004] eingegangen.

Aus diesem Grund werden hier nur in Kürze die Bestandteile des nötigen Equipments zusammenfasst. Es handelt sich dabei um die bereits erwähnte diffus reflektierende Platte, die an einem beweglichen Arm über die Fokalebene vor dem Receiver geschwenkt wird. Zur Aufnahme der Messbilder kommt eine CCD-Kamera des Herstellers Theta<sup>2</sup> mit Regler und entsprechendem Teleobjektiv sowie Filtern zum Einsatz. Die 14-Bit-Kamera wird fest am Boden in der Nähe der optischen Achse des Receiver (siehe Abbildung 2.3) installiert. Eine automatische Bilderkennungs-Software, die von ehemals Optimas mittlerweile auf Matlab umgestellt wurde, erkennt die Position des Schwenkbalkens in jedem Messbild. Nach dem Zurechtschneiden des Bildausschnitts werden die Teilbilder von der Auswertesoftware zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Zur späteren Kalibration wird ein wassergekühltes Gardon-Radiometer (Vatell, USA)<sup>3</sup> direkt hinter der Schwenkbalkenebene platziert. Dieses misst, wie bereits beschrieben, den Absolutwert der konzentrierten Strahlungsflussdichte mit einem vom Hersteller angegebenen Fehler von  $\pm 3\%$ . Unter der Annahme, dass die Messebene ein diffuser Strahler ist, also annähernd ideal Lambertsche Reflexionseigenschaften aufweist, und die Kamera ein lineares Ansprechverhalten aufweist, sind die detektierten Pixel-Grauwerte der Helligkeitsverteilung proportional zur Flußdichte an der jeweiligen Stelle. Die Kalibrierung zeigt in der Regel eine sehr gute Linearität und Reproduzierbarkeit.

Die Vorteile dieses Flussdichtemesssystems bestehen in der schnellen Verfügbarkeit der Messergebnisse mit hoher räumlicher Auflösung und einer guten Reproduzierbarkeit [Lüpfer, Heller et al. 2000]. Es gibt eine Vielzahl von Fehlereinflüssen, die die Messung beeinflussen. Diese wurden intensiv untersucht und wenn möglich korrigiert. Dies erlaubt die Annahme einer Gesamtmessunsicherheit von  $-4.7\% \dots +4.1\%$  [Ulmer 2004].

---

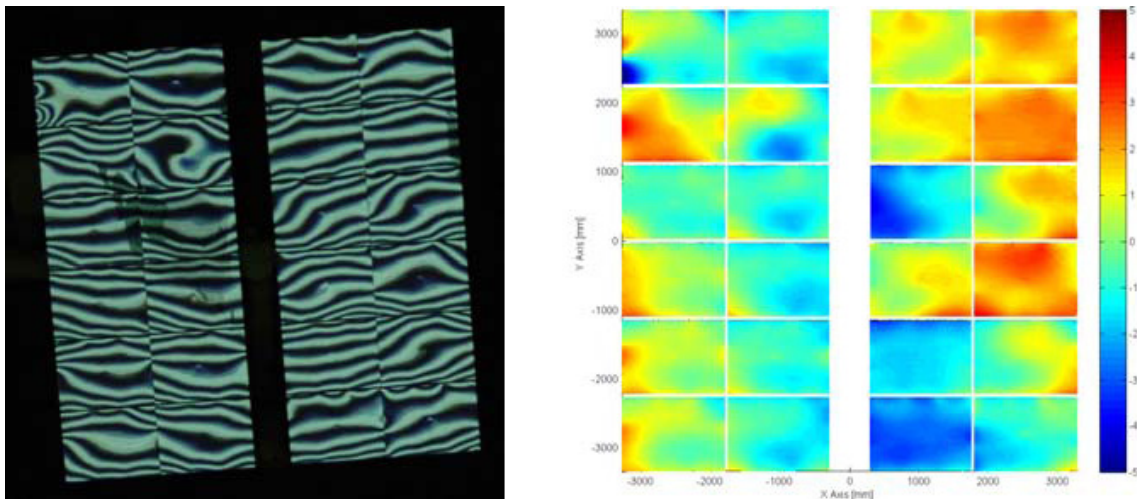
<sup>2</sup> THETA Scientific Imaging System, Modell p18, THETA SYSTEM Elektronik GmbH, Rathausstraße 13, D-82194 Gröbenzell, Webzugang: <http://www.theta-system.de/sis.html>

<sup>3</sup> Circular Foil Heat Flux Transducer, Modell TG2000-73, Vatell Corporation, Christiansburg Virginia, Webzugang: <http://www.vatell.com/thermogage.html>

## 2.4 Deflektometrische Spiegelvermessung

Mit Hilfe der Raster-Reflexionsmethode (RRM, Deflektometrie) werden Spiegelfehler von Heliostaten in hoher Auflösung gemessen. Das Messprinzip basiert auf der Bilderkennung von im Heliostat reflektierten definierten Linienmustern und deren Verzerrungen. Der Messaufbau besteht aus einem Projektor im Heliostatfeld, der bei Nacht eine Serie von kodierten Streifenmustern auf eine Fläche am Turm projiziert, und einer Kamera auf dem Turm, die Bilder von den gespiegelten Streifenmustern aufnimmt (siehe Abbildung 2.8 (links)). Derzeit wird eine Auflösung von etwa  $1000 \times 1000$  Messpunkten pro Heliostat mit einem Messfehler kleiner als 0,1 mrad erreicht.

Abbildung 2.8 (rechts) zeigt als beispielhaftes Messergebnis die Spiegelfehler eines Heliostaten in Elevationsrichtung. Neben dieser hochauflösenden Information der lokalen Steigungsfehler, werden die individuellen Abweichungen der Facettenbrennweiten, der Facettenausrichtungen (engl. canting) und der Gesamtbrennweite im Programmablauf automatisch ermittelt und können dem Heliostat-Hersteller oder Feldebtreiber für entsprechende Korrekturmaßnahmen zur Verbesserung der optischen Qualität oder als Eingangsdaten für Simulationen bereitgestellt werden.



**Abbildung 2.8:** RRM-Beispiel eines im Heliostat gespiegelten Streifenmusters (links); RRM-Messergebnis, dargestellt als Spiegelfehler in Elevationsrichtung in [mrad]; [Ulmer and Röger 2007]

Das Messsystem kann flexibel zur vollautomatischen Vermessung ganzer Heliostatfelder eingesetzt werden. Dazu werden ein vom PC ansteuerbarer Schwenk/Neige-Kopf und ein Motorzoom für die Kamera eingesetzt und für die Kommunikation zwischen den beteiligten Hauptkomponenten ein Standard- Funknetzwerk verwendet. Das Vermessen eines einzelnen Heliostats dauert etwa eine Minute. In einer Nacht können also vollautomatisch mehrere hundert Heliostate in höchster Auflösung vermessen werden [Ulmer, Röger et al. 2008].

## 2.5 Strahlungsverfolgungs–Programme (Ray-Tracing)

Solare Turmkraftwerke sind punktfokussierende Systeme, bei denen eine Vielzahl zweiachsig nachgeführter Spiegel die solare Direktstrahlung auf einen Brennfleck an der Spitze eines Turms konzentrieren. Aufgrund des komplexen optischen Aufbaus dieser Systeme ergibt sich eine sehr hohe Anzahl an Freiheitsgraden, im Vergleich zu Parabolrinnensystemen beispielsweise. Die momentane Leistung eines jeden einzelnen Heliostats hängt, neben dem aktuellen Sonnenstand und seiner Position relativ zum Turm, auch von der Position relativ zu den ihn umgebenden Heliostaten ab, da sich benachbarte Heliostate gegenseitig verschatten und blockieren können. Die Auslegung und Optimierung von solaren Turmsystemen ist daher ein komplexes Problem, das bevorzugt mit Hilfe computergestützter Simulation bearbeitet wird.

Die typischen Fragestellungen sind Felddauslegung und -optimierung, Receiverauslegung, Analyse des Betriebsverhaltens und Betriebsoptimierung. Im DLR wird eine Reihe von Simulationswerkzeugen verwendet, die auf unterschiedlichen Modellansätzen basieren. Zwei Beispiele dieser Strahlverfolgungsprogramme (engl. Ray-Tracing-Programms) zur Analyse und Optimierung von Konzentratorsystemen sind Spray oder STRAL.

Beim Ray-Tracing wird eine große Anzahl annähernd paralleler Strahlen erzeugt und auf dem gesamten Weg von der Sonne bis zum Auftreffen auf dem Receiver verfolgt. Die Strahlungsdichteverteilung der Sonne und die Winkelfehler der Spiegel werden über ein Monte-Carlo-Verfahren berücksichtigt. Die Verteilung der Strahlungsintensität auf der Receiveroberfläche kann durch Zählen der pro Flächeneinheit einfallenden Strahlen berechnet werden. Spray dient zur genauen Berechnung der Strahlungsflussdichteverteilung in der Receiverapertur und ist somit Ausgangspunkt für die Receiverauslegung [Schwarzbözl, Belhomme et al. 2008].

### STRAL

Bei STRAL (Solar Tower Raytracing Laboratory) handelt es sich um eine neuartige Software zur hochgenauen Simulation von Strahlungsflussdichteverteilung in Heliostatfeldern, die in den letzten Jahren beim DLR entwickelt wurde. Es basiert auf einem hocheffizienten Strahlverfolgungsmodell, das speziell für die Simulationsanforderungen konzentrierender Solarsysteme entwickelt wurde. Die Entwicklung folgte einem streng objektorientierten Ansatz.

Durch die Einbindung von Heliostatgeometriedatensätzen wird eine sehr hohe Genauigkeit bei der Simulation der Strahlungsflussdichte erreicht [Belhomme, Ahlbrink et al. 2009]. Neben einem genauen geometrischen Modell wird jeder Heliostat durch einen hochaufgelösten Geometriedatensatz, der die Kontur der Spiegeloberfläche beinhaltet, charakterisiert (siehe RRM, Kapitel 2.4).

Die Richtungsverteilung der solaren Direktstrahlung wird durch eine gemessene Sunshape berücksichtigt (zu Sunshape siehe [Winter, Sizmann et al. 1991]). Im Gegensatz zu Intercept-Berechnungen, erfordert die hochgenaue Strahlungsflussdichtesimulation eine vergleichsweise hohe Strahldichte auf der Spiegeloberfläche. Der daraus resultierende hohe Strahlendurchsatz, der zur Erzielung akzeptabler Rechenzeiten erforderlich ist, wird durch das effiziente Strahlverfolgungsmodell und laufzeitoptimierte Berechnungsroutinen, die parallelisiert ausgeführt werden können, sichergestellt [Belhomme, Pitz-Paal et al. 2009].

### 3 Konzeptübersicht

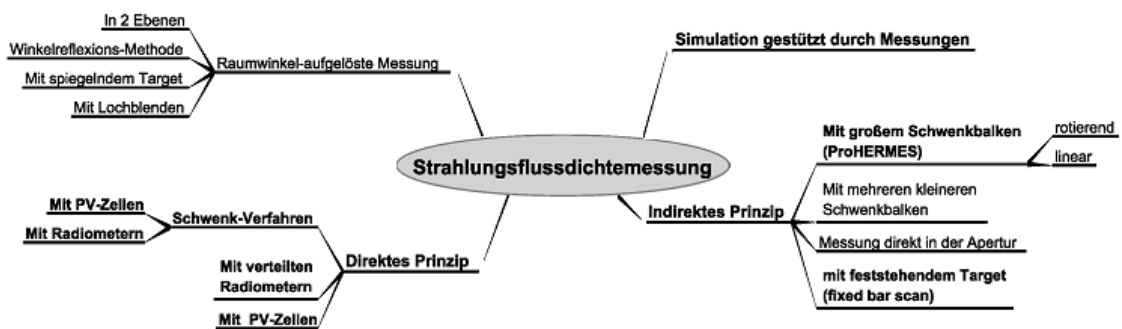
Wie bereits eingangs erwähnt, sind mit dem Dauereinsatz des ProHERMES-Messverfahrens in kommerziellen Kraftwerken in den nächsten Jahren einige konstruktive Probleme verbunden. Aufgrund der zu erwartenden Abmessungen zukünftiger Receiveroberflächen, ist der Einsatz eines Schwenkbalkens in den meisten Fällen sowohl technisch als auch finanziell aufwändiger als an kleinen Versuchsanlagen, für die es derzeit ausgelegt ist. Aus diesem Grund befasst sich dieses Kapitel mit alternativen Möglichkeiten der Strahlungsflussdichtemessung für solare Receiver.

Im Rahmen der Konzeptfindung stehen grundsätzlich das direkte und das indirekte Prinzip zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.3). Diese lassen sich in Form von verschiedenen Verfahren realisieren. So lassen sich zur Direktmessung z. B. verschiedene Detektoren verwenden. Diese können einfach in der Messebene verteilt oder aber wie beim ProHERMES-System vor der Receiveröffnung vorbei geschwenkt werden, was die Anzahl der Messpunkte erhöht. Durch Interpolation kann daraufhin auf eine Flussdichteverteilung geschlossen werden.

Für die Realisierung des indirekten Verfahrens mit Target und Kamera, gibt es ebenfalls eine Reihe von Möglichkeiten, wie sich das konstruktive Problem eines Schwenkbalkens mit zunehmenden Receiver-Abmaßen umgehen lässt. Diese können allesamt als Erweiterung des ProHERMES-Messsystems aufgefasst werden.

Hinzukommt die Möglichkeit die Verteilung der Flussdichte mit heute sehr weit entwickelten Simulationsprogrammen nachzurechnen. Diese hat nicht nur den Vorteil, dass Ergebnisse direkt in der Receiver-Ebene ermittelt werden können, sondern dass sich Simulationen in jeder beliebigen Ebene auswerten lassen. Darüber hinaus erhält man neben dem Betrag der Strahlungsflussdichte auch die Richtung der sich ausbreitenden Strahlung. Ergebnisse auf der Grundlage von reinen Simulationen bedürfen jedoch immer der Validierung durch stichpunktartige Messungen, was wiederum einer Messtechnik bedarf. Diese kann simpel sein und eine geringe Auflösung haben, sie sollte aber genau und möglichst schnell verfügbar sein.

Darüber hinaus gibt es Ansätze auch mit Hilfe von Messtechnik neben dem Betrag der Flussdichte auch Informationen über die Richtung der Strahlung zu erhalten. Diese Konzepte werden unter dem Begriff Raumwinkel-aufgelösten Messungen zusammengefasst. Einen Überblick über die möglichen Konzepte gibt Abbildung 3.1.



**Abbildung 3.1:** Überblick über verschiedene Konzepte zur Messung der Strahlungsflussdichte für große Receiverabmessungen

Einige der aufgeführten Konzepte erfüllen die an sie gestellte Messaufgabe besser als andere. Um sie miteinander vergleichen zu können, sind Kriterien notwendig, die eine Bewertung ihrer Eignung als zukünftiges Messsystem erlauben. Nachfolgend sind deshalb Anforderungen nach [Pahl and Beitz 2007] aufgelistet, die an eine neu zu entwickelnde Messmethode gestellt werden.

### 3.1 Anforderungen an ein zukünftiges Messsystem

- *Einfache Skalierbarkeit:*  
Damit ist gemeint, dass Leistungen sowie Belastungen durch die Erhöhung des Gewichts oder der Abmaße einzelner Bauteile nicht unverhältnismäßig ansteigen.
- *Geringer Neuentwicklungsaufwand / Entwicklungszeit:*  
Dies bezieht sich darauf, Erfahrungen aus bestehenden Systemen übernehmen zu können und die Kontrolle über den Entwicklungsaufwand und -zeitraum inklusive Design, Auslegung und Erprobung zu haben.
- *Kompakte Bauweise / Integrale Anordnung:*  
Die Platzverhältnisse in solaren Turmkraftwerken sind im Allgemeinen beschränkt. Um den Betrieb des Receivers nicht zu stören, sollte die Anordnung der für die Messung relevanten Teile so gewählt werden, dass sie nicht permanent hohen Belastungen, wie konzentrierter Strahlung oder konvektiven Strömungen, ausgesetzt sind bzw. keinen besonderen Schutz vor diesen benötigen.
- *Hohe Arbeitssicherheit:*  
Ist die Sicherheit der Beschäftigten bei der Arbeit, also die Abwesenheit von Gefahren für ihre Sicherheit und Gesundheit. Damit ist unter anderem das Herunterfallen von Teilen bzw. das Entzünden von Teilen des Messsystems gemeint.
- *Ergonomie (Mensch-Maschine-Beziehung):*  
Gemeint ist ein hohes Maß an Automatisierung und einfache Bedienbarkeit, sowie die Übersichtlichkeit der Kommunikation mit dem Messsystem.
- *Verwendung möglichst vieler Normteile*
- *Hohe Genauigkeit:*  
Bei der Strahlungsflussdichtemessung möchte man zum einen die Eintrittsleistung des Receiver-systems bestimmen und zum anderen Aufschluss über die Verteilung der Strahlungsflussdichte über der Aperturfläche erhalten. Abhängig von der vorgesehenen Messaufgabe ist bei der Neuentwicklung des Systems auch die erzielbare gesamte Messunsicherheit zu berücksichtigen.
- *Temperaturbeständigkeit:*  
Alle Komponenten müssen, entsprechend ihrer Anordnung im Messsystem, den auftretenden Temperaturen auch auf längere Sicht standhalten können.
- *Geringe Anfälligkeit gegen Umwelteinflüsse:*  
Umwelteinflüsse sind z.B. Luftfeuchtigkeit, Regen (korrosiv), Temperaturschwankungen und mit Dreckpartikel beladene Luft und starke Windkräfte.
- *Hohe Betriebssicherheit/ Verfügbarkeit:*  
Dies bezieht sich auf den möglichst störungsfreien und anwendungssicheren Betrieb des Systems. Es muss während der Betriebsdauer möglichst immer verfügbar sein und von ihm darf bei bestimmungsgemäßem Gebrauch keine Gefahr für den Anwender ausgehen.

- *Geringe Herstellungs- bzw. Investitionskosten:*  
Investitionen sind auf einen längeren Zeitraum ausgelegt. Bei der Nutzung der Investitionen (Wirtschaftsgüter) verlieren diese an Wert. Das heißt sie nutzen sich ab. Während der Nutzungsdauer wird durch Wertminderung die Gewinn- und Verlustrechnung belastet (abgeschrieben) und trägt somit zu den Stromgestehungskosten bei.
- *Hohe Lebensdauer:*  
Solare Turmkraftwerke werden für mindestens 20 bis 25 Jahre Betriebsdauer ausgelegt. Das zum Einsatz kommende Messsystem sollte daher ebenfalls eine hohe Lebensdauer haben, da ständige Wartungen oder Austauscharbeiten den Betrieb unterbrechen und somit finanzielle Ausfälle hervorrufen würden.
- *Geringe Betriebskosten*
- *Geringe Wartungskosten:*  
Dies ist zu berücksichtigen, da Wartungen, aufgrund der Höhe und Anordnung des Messsystems vor der Eintrittsöffnung des Receivers, nicht nur aufwendig sind, sondern auch den Betrieb des Kraftwerkes unterbrechen.

Nach dem Ausarbeiten der Anforderungen müssen diese nach ihrer Priorität gewichtet werden. Da eine Gewichtung einer einzelnen Anforderung bei der gleichzeitigen Betrachtung aller Anforderungen schwierig ist, werden in Abbildung 3.2 jeweils nur 2 Anforderungen einander gegenübergestellt. Aus der Summe der Punkte lassen sich wichtigere von unwichtigeren Anforderungen unterscheiden.

	Summe	Einfache Skalierbarkeit	Geringer Neuentwicklungsaufwand / -zeit	Kompakte Bauweise / Integrale Anordnung	Hohe Arbeitssicherheit	Ergonomie (Mensch-Maschine-Beziehung)	Verwendung möglichst vieler Normteile	Hohe Genauigkeit	Temperaturbeständigkeit	Geringe Anfälligkeit gegen Umwelteinflüsse	Hohe Lebensdauer	Hohe Betriebssicherheit/ Verfügbarkeit	Geringe Herstellungs- bzw. Investitionskosten	Geringe Betriebskosten	Geringe Wartungskosten
<b>2 = Zeilenanforderung wichtiger als Spaltenanforderung</b>															
<b>1 = Zeilenanforderung und Spaltenanforderung gleich wichtig</b>															
<b>0 = Spaltenanforderung wichtiger als Zeilenanforderung</b>															
Einfache Skalierbarkeit	21	2	2	1	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2
Geringer Neuentwicklungsaufwand / -zeit	7	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Kompakte Bauweise / Integrale Anordnung	7	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Hohe Arbeitssicherheit	20	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	1
Ergonomie (Mensch-Maschine-Beziehung)	3	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Verwendung möglichst vieler Normteile	4	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Hohe Genauigkeit	18	0	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1
Temperaturbeständigkeit	19	1	2	2	1	2	2	0	1	2	2	1	2	1	2
Geringe Anfälligkeit gegen Umwelteinflüsse	15	0	2	2	0	2	2	1	1	1	1	0	2	2	1
Hohe Lebensdauer	16	1	2	2	0	2	2	1	0	1	1	1	1	1	2
Hohe Betriebssicherheit/ Verfügbarkeit	17	1	1	2	1	2	2	1	0	1	1	1	1	2	2
Geringe Herstellungs- bzw. Investitionskosten	12	0	1	1	0	1	1	1	1	2	1	1	0	2	2
Geringe Betriebskosten	13	1	1	1	1	2	2	0	0	0	1	0	2	2	2
Geringe Wartungskosten	10	0	1	1	1	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0

Abbildung 3.2: Gegenüberstellung der Anforderungen an ein zukünftiges Messsystem

Aus der Bewertungsmatrix in Abbildung 3.2 lassen sich die an das Messsystem gestellten Anforderungen in die Kategorien Fest-, Ziel und Wunschforderungen einteilen. Dabei muss eine Festforderung erfüllt werden, eine Zielforderung sollte erfüllt werden und eine Wunschforderung kann erfüllt werden.

**Festforderungen:**

- Einfache Skalierbarkeit
- Hohe Arbeitssicherheit
- Temperaturbeständigkeit

**Zielforderungen:**

- Hohe Genauigkeit
- Hohe Betriebssicherheit / Verfügbarkeit
- Hohe Lebensdauer
- Geringe Anfälligkeit gegen Umwelteinflüsse
- Geringe Betriebskosten
- Geringe Herstellungs- bzw. Investitionskosten
- Geringe Wartungskosten

**Wunschforderungen:**

- Geringer Neuentwicklungsaufwand / Entwicklungszeit
- Kompakte Bauweise / Integrale Anordnung
- Verwendung möglichst vieler Normteile
- Ergonomie (Mensch-Maschine-Beziehung)

### 3.2 Beurteilung und Auswahl der betrachteten Messsysteme/ -verfahren

Im Weiteren werden von den in Abbildung 3.1 genannten Konzepten, unter Berücksichtigung der an sie gestellten Anforderungen, lediglich zielführende Ansätze weiter betrachtet. Diese sind:

- *Indirektes Messverfahren mit feststehendem Target (fixed bar scan):*  
Dieser Methode liegt das Prinzip des ProHERMES Messsystems zugrunde. Es kombiniert dabei dessen Vorteile in Sachen Entwicklungsstand, Genauigkeit und Automatisierungsgrad mit dem Verzicht auf bewegte Teile. Durch die Entkopplung des Orts der Messung vom eigentlichen Receiverbetrieb, ist es darüber hinaus möglich die Messung in die Ebene der Apertur zu legen, was sich positiv auf die zu erwartende Messunsicherheit auswirkt. Problematisch ist hingegen die örtliche und zeitliche Verschiebung des zu messenden Brennflecks während der Applikation. Voruntersuchungen, erste Tests und Ergebnisse finden sich in Kapitel 4.
- *Simulation der Flussdichteverteilung gestützt durch Messungen auf dem Strahlungsschutz:*  
Exakte Simulationen benötigen das Messen von vielen Eingangsparametern, wie den zeitlichen Verlauf der solaren Direkteinstrahlung, Reflektivitäten der Spiegelsysteme sowie deren exakte geometrische Form. Die dafür benötigte Hardware ist allerdings in der Regel in heutigen Solarkraftwerken vorhanden und muss nicht extra zugekauft werden.



Für die eigentliche Bestimmung der Flussdichteverteilung anhand von Simulationen benötigt man dahingegen nur wenig Messequipment bzw. nur das für die Referenzmessungen Benötigte. Zu diesem Zweck steht mit dem Verfahren der indirekten Messung auf dem Strahlungsschutz darüber hinaus eine weitestgehend entwickelte Messmethoden zur Verfügung. Es ist deshalb nicht nur die simpelste Methode der Kraftwerksregelung, sondern auch die billigste. Zusätzlich bietet sie den Vorteil fortwährend Informationen über die Verteilung der Flussdichte zu erhalten, ähnlich wie bei einem Online-Messsystem. Mit den gewonnenen Ergebnisse kann im Anschluss auch über die Aperturbene hinaus Strahlungsverfolgung zur Untersuchung von Einzelbauteilen durchgeführt werden. Detaillierte Ausarbeitungen zu diesem Thema finden sich in Kapitel 5.

- *Direkte Messung der Strahlungsflussdichte mit verteilten Sensoren:*

Auch diese Methode wurde bereits erfolgreich in kommerziellen Kraftwerken eingesetzt. Es handelt sich dabei um eine sehr komfortable und leicht zu realisierende Möglichkeit der Flussdichtemessung, aufgrund der Abwesenheit bewegter Teile. Sie bietet außerdem die Möglichkeit online Informationen über den Verlauf der Flussdichte an den ausgewählten Messstellen zu erhalten. Aufgrund ihrer geringen Auflösung müssen jedoch hochauflösende Flussdichtekarten interpoliert werden, wie sie zur Wirkungsgradbestimmung notwendig sind. Bei einer sehr geringen Anzahl installierter Sensoren und folglich wenigen Stützstellen, oder mangelnder Kenntnis über die zu erwartende Verteilung, können die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Leistungsverteilung sehr hoch werden.

Hinsichtlich der Detektierung der Flussdichte stehen verschiedene Sensoren zur Auswahl. Neben kommerziell erhältlichen Radiometern gibt es neuerdings auch noch die Möglichkeit PV-Zellen zu nutzen. Diese weisen zwar kürzere Zeitkonstanten als Radiometer auf, was einer Verkürzung der Messdauer dienlich ist, sie sind allerdings auch sehr viel teurer als Radiometer. Nachteilig ist auch, dass es bzgl. eines Langzeiteinsatzes keinerlei Betriebserfahrung mit PV-Zellen gibt. Beide Detektoren verbindet, dass sie in jedem Fall wassergekühlt werden müssen [Fernández-Reche, Sánchez et al. 2008]. Untersuchungen dazu sind in Kapitel 6 vorgestellt.

- *Indirekte Messung mit Schwenkbalken (rotierend, linear horizontale und vertikale Bewegungsrichtung):*

Die indirekte Messung mit Hilfe von Schwenkbalken ist, wie in Kapitel 2.3 gezeigt, bereits ausgereift, getestet und wurde erfolgreich bei Messungen einiger Receiverprototypen eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine sehr flexible und hochautomatisierte Methode. Unter den betrachteten Konzepten weist sie eine sehr geringe Messunsicherheit auf. Nur die Direktmessung mit Schwenkbalken erzielt ähnlich gute Ergebnisse (siehe unten).

Probleme bereitet nur die Konzeptionierung und Auslegung einer alternativen Bewegungsart. Während der Entstehung dieser Arbeit wurden verschiedene denkbare Lösungsansätze und Prinzipien zusammengetragen, mit denen sich eine mögliche Neuentwicklung des Antriebssystems realisieren ließe. Die Ausarbeitung, das Design und die Bewertung dieser Konzepte ist allerdings ein rein konstruktives Problem und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Im abschließenden Kapitel 7 wird daher lediglich versucht, die Eigenschaften dieser Möglichkeit der Flussdichtemessung zu bewerten und sie mit denen der restlichen Konzepte zu vergleichen.

- *Schwenkbalkenmessung mit direkter Methode:*

Das Konzept, die Messebene mit einem oder mehreren Radiometern abzutasten, wurde in der Vergangenheit bereits durchgeführt. Probleme bereitete dabei die lange Zeitkonstante kommerziell erhältlicher Radiometer. Dies führte zu einer extrem langen Messdauer, was wiederum eine komplexe Wasserkühlung erforderlich machte. Nach [Ballestrín and Monterreal 2004] konnte das genannte Konzept in den letzten Jahren die Limitierungen in Sachen Messgeschwindigkeit und Kühlung durch neuerdings erhältliche Radiometer mit Zeitkonstanten im  $\mu\text{s}$ -Bereich überwinden. Die extrem hohen Kosten solcher Spezialdetektoren und die Tatsache, dass es sich dabei um Labormessgeräte handelt, führen allerdings zu Konflikten mit einigen der genannten Zielforderungen. Das Selbe gilt für die Verwendung von PV-Zellen.

Leztlich besteht auch für dieses Konzept die Problematik, eine alternative Bewegungsart für den erwähnten Schwenkbalken konzeptionieren zu müssen. Deshalb wird auch in diesem Fall lediglich eine Bewertung und Vergleich der Eigenschaften dieser Methode im abschließenden Kapitel 7 durchgeführt.

Einige der zusammengetragenen Konzepte können von einer detaillierten Betrachtung ausgeschlossen werden, weil sie entweder grundlegend eine oder mehrere der genannten Festforderungen nicht erfüllen oder Zielforderungen widersprechen. Diese sind:

- *Messung mit mehreren kleineren Schwenkbalken:*

Das System würde voraussichtlich sehr komplex und einzelne Fehlereinflüsse würden unbeherrschbar werden. Kostengründe und unabschätzbar lange Entwicklungszeiten sind ebenfalls Gründe dafür, dass diese Methode zwar prinzipiell denkbar wäre, zum heutigen Zeitpunkt aber keine relevante Alternative darstellt.

- *Messung direkt in der Apertur:*

Die Apertur der meisten Receiver ist kleiner als deren Eintrittsöffnung, wenn auch nicht wesentlich. Probleme durch riesige Schwenkbalken könnten so womöglich verringert werden. Allerdings würde dies bedeuten direkt in das Design des Receivers einzugreifen und ihn unnötig komplizierter zu machen. Es handelt sich dementsprechend um eine nicht sehr praktische aber leider viel zu komplizierte Lösung.

- *Raumwinkel-aufgelöste Messungen:*

Es handelt sich dabei um teils sehr visionäre Konzepte, die auch in naher Zukunft noch nicht als Messsystem zur Verfügung stehen werden.

## 4 Indirektes Messverfahren mit feststehender Messoberfläche (Fixed-Bar-Scan)

Diese Verfahren basiert auf dem erfolgreich erprobten indirekten Messsystem namens ProHERMES, welches seit Jahren erfolgreich bei der Bestimmung von Flussdichteverteilungen am Eintritt solarer Receiver eingesetzt wird (vgl. Kapitel 2.3). Statt jedoch, wie bei der genannten Methode, einen Schwenkbalken (engl. moving bar) durch den feststehenden Fokus eines Receivers zu fahren, soll der Fokus schrittweise über eine feststehende Messfläche (engl. fixed bar) gezogen werden. Auf diese Weise kann auf bewegte Teile verzichtet und somit das Prinzip für kommerzielle Kraftwerke einsatzfähig gemacht werden.

### 4.1 Grundlagen des Messprinzips

Auf der fest installierten Messoberfläche kann, in gleicher Art und Weise wie beim ProHERMES-Verfahren, mittels einer sich im Feld befindenden CCD-Kamera ein Grauwertbild aufgenommen werden. Bei geeigneter Wahl der Targetbeschichtung und linearem Kameraverhalten ist dieses zu der darauf gerichteten reflektierten Strahlungsflussdichteverteilung proportional. Durch die Messung der tatsächlichen Flussdichte mit einem geeigneten Detektor an einem Punkt der Messfläche, kann anschließend eine Kalibration der Grauwerte an dieser Stelle erfolgen. Mit dem so gewonnenen Kalibrationsfaktor lässt sich im Folgenden eine Flussdichteverteilung aus dem aufgenommenen Messbild ermitteln. Erfahrungen im Bezug auf Radiometer, deren Kalibration und Korrektur, sowie im Bezug auf Kamerasysteme und geeignete Filter, können vorbehaltlos vom ProHERMES-System übernommen werden. Der prinzipielle Aufbau des Messsystems mit feststehender Messoberfläche (engl. fixed bar scan) ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

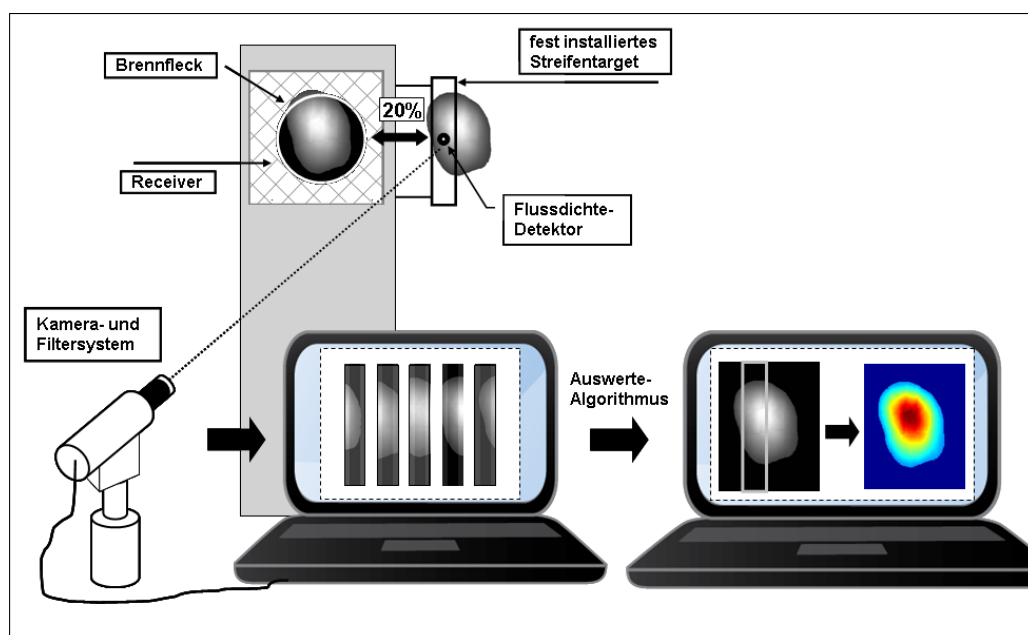


Abbildung 4.1: Übersicht über das Fixed-Bar-Scan-Messsystem

Für den Einsatz in kommerziellen Kraftwerken ist aus Kostengründen und einer angestrebten geringen Komplexität des Verfahrens vorerst ein ungekühltes Target vorgesehen. Daraus resultieren geringe zulässige Strahlungsbelastungen, will man ein Überhitzen des Targets vermeiden. Da man darüber hinaus den Betrieb des Receivers unter keinen Umständen unterbrechen möchte, ist es beabsichtigt den Gesamtfokus in Form von ca. 5 Heliostatgruppen, die jeweils etwa 20% der Gesamtstrahlungsleistung entsprechen, über das Target zu fahren. Auf diese Weise wird zwar die in den Receiver einfallende Strahlung verringert, die resultierende Abnahme der thermischen Leistung entspricht jedoch lediglich einem Niveau, wie es etwa durch Trübung des Himmels bei leicht bewölkter Bedeckung entsteht.

#### 4.1.1 Konzeption des Targets

Im Bezug auf die Dimensionen des Targets ist es denkbar die Fläche so groß zu wählen, dass die zu detektierende Strahlungsverteilung komplett auf ihm Platz fände. Die Kantenlänge eines solchen Targets würde im Fall des SolHyCo-Receivers, bei dessen Tests eine Strahlaufweitung von ungefähr 6m beobachtet wurde, mindestens 7m betragen. Bei einem quadratischen Aufbau des Targets entstünden so nicht nur enorm hohe Materialkosten, sondern auch ein riesiger Platzbedarf. Je nach Position des Targets und Receiver-Technologie kann dies zu gewissen Tageszeiten zum Verschatten des Receivers für einige Heliostatpositionen führen. Zudem muss das Target in ausreichender Entfernung der Receiveröffnung installiert werden, damit es während des Betriebs des Receivers nicht bestrahlt wird, denn sonst würde diese Bestrahlung fälschlicherweise auch bei der eigentlichen Messung mehrfach detektiert. Frei stehend an der Turmaußenseite ist es jedoch in vollem Umfang Umwelteinflüssen ausgesetzt. Dabei handelt es sich vor allem um starke Windbelastungen. Bei gemessenen Windgeschwindigkeiten von bis zu 30m/s in der Nähe des Receivers auf 60m Höhe der CESA-1 Turmanlage, sind diese nicht mehr zu vernachlässigen. Baute man das Target widerstandsfähig genug, um den auftretenden Kräften standzuhalten, würden das Eigengewicht, der Platzbedarf und die Kosten der Struktur ebenfalls signifikant ansteigen. Hinzukommen Belastungen durch Luftfeuchtigkeit, korrosiven Regen und mit Schmutzpartikeln beladene Luft, gegen die das Target geschützt werden sollte. Die Kosten dafür steigen ebenfalls mit zunehmender Fläche des Targets. Demzufolge wird vorgeschlagen auch für die Fixed-Bar-Scan-Methode ein Streifentarget, ähnlich dem des ProHERMES-Messsystems, zu wählen und den Fokus in Schritten über dieses zu fahren.

Zur Positionierung dieser Messfläche gibt es im Allgemeinen verschiedene Möglichkeiten. Denkbar ist, sie oberhalb des Receivers zu installieren, wie es von [Pacheco, Houser et al. 1994] vorgesehen wurde, oder seitlich entweder in Ost- oder Westausrichtung. Dabei gilt es in jedem Fall zu beachten, dass die gesamte Fläche des Turms, die beim Auslenken der Heliostaten vom Fokus überfahren wird, durch entsprechende Materialien geschützt werden muss. Die Heliostaten, die das einfallende Sonnenlicht auf den Receiver umlenken und konzentrieren, folgen durch ihre Nachföhrbewegung (engl. tracking) während des gesamten Tages der Bewegungsrichtung der Sonne. Sie vollziehen also eine permanente Drehung von Ost nach West im Uhrzeigersinn (positive Azimutrichtung). Berücksichtigt man, dass die Ansteuerung der Heliostate eine gewisse Unsicherheit durch Getriebeispiel aufweist, ist es sinnvoll das Streifentarget seitlich in westlicher Richtung des Receivers zu installieren. Somit vollzieht sich der für die Messung notwendigen Schwenkvorgang ebenfalls in positive Azimutrichtung

und Fehlereinflüsse durch Spiel im Getriebe werden verringert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde von einem seitlichen Aufbau des Targets in westlicher Richtung ausgegangen, wie in Abbildung 4.1 dargestellt.

Möchte man, um den zeitlichen Rahmen der Messung in Grenzen zu halten, nicht mehr als 15 Schritte zum Ablichten der reflektierten Flussdichteverteilung realisieren, berechnet sich die Schrittweite bei einem Fokusbereich von ca. 7m zu 0,5m. Die Schrittweite entspricht gleichzeitig auch der Mindestbreite des Streifentargets. Es wird jedoch jeweils ein Überlappungsbereich angestrebt, um überprüfen zu können, ob der Fokus richtig Verfahren wurde bzw. das Flussdichteprofil konsistent ist. Die Überlappung zur vorherigen und nachfolgenden Messung soll jeweils 0,25m betragen. Die vorgeschlagenen Dimensionen des Streifentargets für die CESA-1 Turmanlage ergeben sich demnach zu:  $Höhe \times Breite = 7 m \times 1 m$ .

### Anforderungen an die verwendete Messoberfläche

Die Aufgabe des Streifentargets ist es, die auftreffende konzentrierte Sonnenstrahlung richtungsunabhängig und im gesamten Wellenlängenbereich der Empfindlichkeit der verwendeten CCD-Kamera gleich stark zu reflektieren. Dabei muss es den mechanischen Belastungen und den hohen Bestrahlungsstärken ohne Überhitzung und mit gleichbleibenden Reflexionseigenschaften standhalten. Um die Erwärmung gering zu halten, werden weiße Schichten mit hohem Reflexionsgrad im gesamten Sonnenspektrum gewählt. Zusammenfassend kann man also folgende Anforderungsliste erstellen:

- hoher Reflexionsgrad für Sonnenlicht
- wellenlängenunabhängiger Reflexionsgrad im spektralen Teilintervall der Empfindlichkeit der CCD-Kamera (350 nm – 1100 nm)
- von der Einfallsrichtung der Strahlung unabhängiger Reflexionsgrad (diffuser Reflexionseigenschaften) bzw. räumliche Verteilung der Strahlung ist eine Kosinus-Verteilung (Lambertscher Strahler)
- Reflexionsgrad unabhängig von der Temperatur der Oberfläche
- Temperaturbeständigkeit
- mechanische Beständigkeit

Da alle diese Eigenschaften kaum in einem Material vereint vorzufinden sind, haben übliche Targets einen gut wärmeleitenden, nach Bedarf wassergekühlten, metallischen Grundkörper und werden mit einer dünnen, hitzebeständigen Schicht (meist Aluminiumoxid) überzogen, die den erforderlichen optischen Eigenschaften möglichst nahe kommt [Ulmer 2004].

#### 4.1.2 Durchführung der Messung

Man geht davon aus, dass für das Anfahren von 15 Zielpunkten ( $No_{AP}$ ), die für das einwandfreie Abtasten der in diesem Fall zu messenden Verteilung nötig sind, jeweils ca. 4-5 Sekunden ( $\Delta t_{fokus}$ ) benötigt werden. Anschließend müssen jeweils ca. 0,5 Sekunden ( $\Delta t_{im}$ ) gewartet werden bis die Aufnahme des Teilbildes abgeschlossen ist. Zusätzlich werden etwa 5 Sekunden zum Abschluss der Messung benötigt, um den Messvorgang abzuschließen, indem alle Heliostate zurück zu auf ihre Ausgangszielpunkte verfahren werden ( $\Delta t_{fokus, end}$ ). Somit berechnet sich die Gesamtzeit der Durchführung einer Messung zu:

$$t_{mes,20\%} \approx (\Delta t_{fokus} + \Delta t_{im}) \cdot No_{AP} + \Delta t_{fokus, end} \approx 80 s \approx 1,33 \text{ min} \quad (4.1)$$

Bei fünfmaligem Wiederholen der Prozedur, mit jeweils 20% der Heliostate, ergibt sich demnach eine Gesamtmesszeit  $t_{mes}$  von ca. 7 (6,67) Minuten. Während dieser Zeit werden annähernd stabile Bedingungen benötigt, was im Allgemeinen gewährleistet ist, aber nicht grundsätzlich vorausgesetzt werden kann. Darüber hinaus bewegt sich die Sonne bei einer mittleren Erdrotationsgeschwindigkeit von

$$\omega_{Erde} = \frac{\varphi_{Tag}}{t_{Tag}} \approx \frac{360^\circ}{24h} \approx \frac{2\pi}{86.400s} \approx 0,0727 \frac{mrad}{s} \quad (4.2)$$

während der Gesamtmesszeit um den Winkel

$$\Delta\varphi_{mes} = \omega_{Erde} \cdot t_{mes} \approx 0,0727 \frac{mrad}{s} \cdot 400s \approx 29,1mrad \quad (4.3)$$

in Azimutrichtung weiter. Dies führt vor allem zu nicht zu vernachlässigenden Änderungen der Kosinusverluste während der Messung. Außerdem kommt es durch zeitliche Verzögerung, wie mit Gleichung (4.3) gezeigt wurde, zu einer Heliostatnachführung von ca.  $\frac{\Delta\varphi_{mes}}{2}$ . Dies hat einen signifikanten Effekt auf die reflektierte Flussdichteverteilung durch Verzerrungen der Reflexionsmuster. Die Fokusverschiebung um bis zu 7m zur Durchführung der Messung hat aus dem gleichen Grund ebenso einen Effekt auf die Verteilung. Die beiden beschriebenen Fehlerquellen können sich tageszeitabhängig gegeneinander aufheben oder addieren. Um derartige Einflüsse bei der Messung gering zu halten oder gar korrigieren zu können, wurden ausgiebige Voruntersuchung auf Grundlage detaillierter Simulationen der Fokusveränderung während des Messvorgangs mit dem Ray-Tracing-Programm Spray durchgeführt. Deren Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden anschließend in Kapitel 4.2 vorgestellt.

Zieht man den Fokus in Schritten über die Messfläche, muss dabei eine präzise Ansteuerung der einzelnen Heliostaten, sowie eine geringe Unsicherheit beim Anfahren von vorgegebenen Zielpunkten vorausgesetzt werden. Ist dem nicht so, verschieben sich die einzelnen Profile jeweils ineinander und es werden falsche Verteilungen und damit ein verfälschtes Gesamtprofil gemessen. Aus diesem Grund sind in Kapitel 4.4 Untersuchungen zu diesen sogenannten Tracking-offsets und deren Einfluss auf die Messunsicherheit des Systems beschrieben.

Geht man davon aus, dass sich der Verschiebungsfehler der Zielpunktansteuerung, aufgrund von nicht exaktem Nachführen, zwar minimieren aber nicht vermeiden lässt, stellt sich die Frage wie die Teilbilder am besten zusammengesetzt werden können. Dies kann mit einem Algorithmus auf Basis von Kreuzkorrelationen der Einzelprofile geschehen (engl. assembler algorithm), oder aber plangemäß auf Basis von theoretisch errechneten Vorgaben. In Kapitel 4.3 werden die beiden Möglichkeiten der Bildzusammensetzung näher vorgestellt und erste Tests zur Durchführbarkeit der Methode präsentiert. Zusammen mit den in Kapitel 4.4 vorgestellten Ergebnissen sollen anschließend Fehlerbetrachtungen durchgeführt und Schlussfolgerungen für die Durchführbarkeit der Methode gezogen werden.

Als Grundlage weiterer Betrachtungen und Berechnungen sind in Tabelle 4.1 die Basisparameter der Messmethode zusammengefasst, die in den vorangegangenen Kapiteln ermittelt wurden. Dabei handelt es sich selbstverständlich um Angaben für den Spezialfall des SolHy-Co-Receiver im Testbetrieb auf der PSA.

**Tabelle 4.1:** Im ersten Ansatz festgelegt Größen des Fixed-Bar-Scan-Messverfahrens

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Abmessungen:			
Breite/ Höhe Messtarget	$b_T / h_T$	1 / 7	m
Absorptionsgrad der Targetbeschichtung	$\alpha_{alumina}$	0,25	-
Mindestabstand des Targetrandes zur Receivermitte	$\Delta x_{\perp}$	3,5	m
Schrittweite der Abtastung	$\Delta x_{\parallel}$	0,5	m
Überlappen der Einzelbilder (linker/ rechter Rand)	$\Delta x_{overlap}$	0,25 / 0,25	m
Anzahl der Zielpunkte	$No_{AP}$	15	-
Zeiten:			
Zum Anfahren eines Zielpunktes	$\Delta t_{fokus}$	4,5	s
Wartezeit für das Aufnehmen des Messbildes	$\Delta t_{im}$	0,5	s
Zeit zum Beenden der Messung	$\Delta t_{fokus, end}$	5	s
Gesamtzeit für einen Messvorgang	$t_{mes, 20\%}$	ca. 80	s
Gesamtzeit der Messung	$t_{mes}$	ca. 400	s

## 4.2 Theoretische Voruntersuchungen

Um Fehlereinflüsse bei der Durchführung des Fixed-Bar-Scan-Verfahrens abschätzen zu können, wurden die Abweichungen zwischen dem aus Streifen zusammengesetzten Messbild und dem Originalbild durch Veränderung der Flussdichteverteilung untersucht. Dabei spielen, wie bereits erwähnt, erstens die Verschiebung des Zielpunktes in westlicher Richtung eine Rolle und zweitens die Veränderungsprozesse aufgrund zeitlicher Verzögerung während der Messung ( $t_{mes}$ ).

Ergebnisse dieser Betrachtungen sind einem internen Bericht zur Voruntersuchung des Projekts SOLUGAS<sup>4</sup> entnommen [Schapitz and Röger 2010]. Diese wurden anhand von Simulationen mit dem Ray-Tracing-Programm Spray durchgeführt (siehe dazu Kapitel 2.5.).

Als Grundlage der Simulationen wurde auf Daten eines vorherigen Projekts namens Saphir zurückgegriffen (siehe Saphir-Projekt<sup>5</sup>). Dabei handelt es sich um einen Teil des Heliostatfeldes des CESA-1 Turmkraftwerks innerhalb der Testanlage PSA im spanischen Almería. Es umfasst 125 Heliostate, deren Fokallänge mit der Funktion „focap“ angepasst wurde. Diese berechnet automatisch die optimale Fokallänge der Heliostate, ausgehend von deren Abstand zum Receiver.

Um zu vereinfachen und zu verallgemeinern, wurden Heliostate desselben Typs angenommen und jeweils nur ein Zielpunkt pro Anfahrposition für alle Heliostate gewählt. Deren

<sup>4</sup> Solugas - Solar Up-scale Gas Turbine System, Webzugang: <http://www.solugas.com>

<sup>5</sup> Saphir: Qualitätssicherung und Betriebsoptimierung für solare Turmkraftwerke, Webzugang: <http://www.solar-thermie.org/forschungsprojekte/documents/saphir.pdf>

Koordinaten sind näher in Tabelle 4.2 beschrieben. Als Simulationszeitpunkt wurde zunächst der 21. März, 2010 gewählt. Um ein möglichst geringes Rauschen zu erhalten, wurden für die Rechnungen 80.000.000 Strahlen verwendet. Um den gesamten Tagesverlauf zu untersuchen wurden beispielhaft Simulation zu den Zeitpunkten 8:00 Uhr, 12:00 Uhr und 16:00 Uhr (Solarzeit) durchgeführt.

#### 4.2.1 Fehlereinflüsse aufgrund örtlicher Fokusverschiebung

Zur Validierung, ob und wie sehr die detektierte Flussdichteverteilung auf der angenommenen feststehenden Messfläche von der im Receivermittelpunkt abweicht, wurde zunächst die örtliche Verschiebung des Aimpoints um 7m betrachtet.

Je nach Tageszeit muss jeder Heliostat, um ausgehend vom Zielpunkt AP0k0 die Position AP7k0 anzufahren (siehe Tabelle 4.2), abhängig von dessen Position im Feld, eine individuelle Schwenkbewegung in positiver Azimutrichtung durchführen. Dabei ändert sich durch das Nachführen, wie [Weinrebe 2000] erklärt, die reflektierte Leistung jedes Heliostats, durch minimal unterschiedliche Kosinusverluste. Diese Änderung ist abhängig von der Feldposition des Heliostaten und fällt bedeutend größer aus, je zeitlich gesehen weiter entfernt man sich vom solaren Mittag befindet. Darüber hinaus kommt es zu räumlich verteilten Veränderungen der projizierten Flussdichteverteilung durch optische Abberation (siehe [Hecht 2005]). Diese Abbildungsfehler sind, aufgrund der parabolisch gekrümmten Heliostatoberfläche, schwer mathematisch zu beschreiben. Durch die unregelmäßig verteilten Steigungsfehler über der Oberfläche der einzelnen Spiegelfacetten, wird dies gänzlich unmöglich.

**Tabelle 4.2:** Übersicht über die verwendeten Zielpunkte (APs)

Name	<sup>†</sup> AP-Koordinaten	Bezeichnung
	x / y / z [m]	
AP0k0	0 / 0 / 60	Ursprung
AP7k0	-7,0 / 0 / 60	7,0 m westlich

<sup>†</sup> im Turmkoordinatensystem mit Turmwand als Ursprung

Zur Auswertung wurde ein Ausschnitt aus der simulierten Verteilung betrachtet, bei dem die Flussdichten über 200kW/m<sup>2</sup> betragen. Dazu wurde ein Kernstück von 2.20 m x 2.20m ausgewählt und durch Subtrahieren ein Differenzbild der Ursprungsverteilung zu der westlich Verschobenen gebildet (Verteilung bei AP0k0 – Verteilung bei AP7k0). Anhand des Differenzbildes wurden jeweils der Mittelwert aller Pixel der betrachteten Fläche, dessen Standardabweichung und die Extrema der Abweichung berechnet.

Als Ergebnis erhält man für den solaren Mittag um ca. 12:00 Uhr<sup>6</sup> eine Gesamtabweichung der integrierten Flussdichte im Kernbereich von ca. 0,5%. Die Standardabweichung (STD) des prozentualen Fehlers liegt dabei für die Fläche des Kernbereichs bei ca. 3% in einem akzeptablen Bereich. Für die Zeitpunkte 8:00 Uhr und 16.00 Uhr sind die Ergebnisse mit -3% bzw. 2% für die Gesamtabweichung erwartungsgemäß etwas schlechter, aber sie sind noch akzeptabel. Auch die STD ist mit 5,1% respektive 3,7% für die Extremfälle für morgens und nachmittags noch im Rahmen.

<sup>6</sup> Solarzeit, Standort Almería, 21. März 2010



### 4.2.2 Veränderungsprozesse aufgrund zeitlicher Verzögerung der Messung

Das Herausfahren der Heliostate aus dem Fokus und das *Abscannen* der Verteilung, womit das Verschieben des Aimpoints und Ablichten der einzelnen Teilprofile auf der streifenförmigen Messoberfläche gemeint ist, benötigt Zeit. Durch unterschiedliche Abstände der Heliostate zum Target, kommt es, bei gleicher Winkelgeschwindigkeit der Heliostatbewegung, zu Variationen der Verfahrensgeschwindigkeiten der Brennflecke auf dem Target. Das bedeutete, dass man allen Heliostaten einen neuen Zielpunkt vorgibt, aber zunächst warten muss, bis alle diesen erreicht haben. Erst dann kann ein Bild aufgenommen werden. Je nach Breite des Streifentargets muss dies mehrmals wiederholt werden. Der Zielpunkt muss dabei immer um die halbe Breite des Targets verschoben werden um einen Überlappungsbereich der Einzelbilder zu garantieren. Aufgrund einer konservativen Betrachtungsweise der Untersuchungen, wurden für diese Prozedur eine Gesamtmesszeit von 12 statt 6,7 Minuten angenommen.

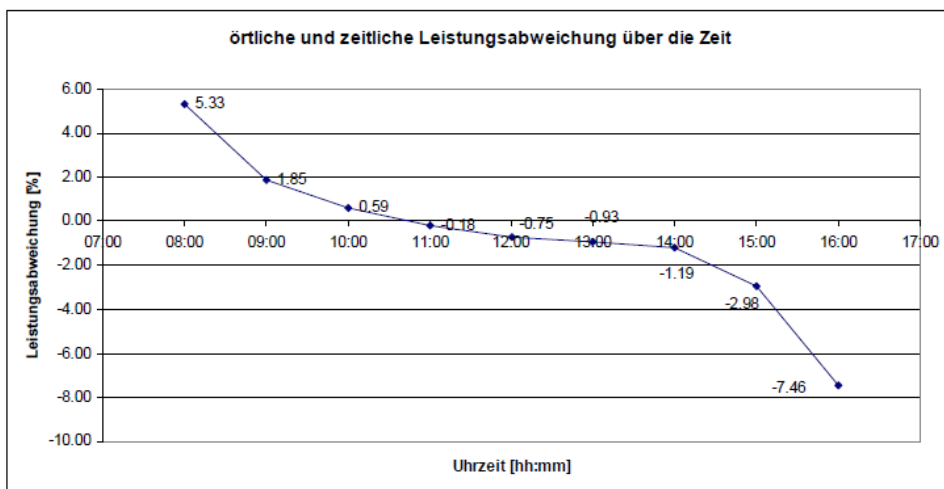
Wie im vorherigen Fall, kommt es auch hier zu Schwenkbewegungen der Heliostate, da sich die Erde, wie mit Hilfe der Erdrotationsgeschwindigkeit aus Gleichung (4.2) berechnet wurde, im Zeitraum von 12 min um ca. 52 mrad weiterbewegt. Aus diesem Grund beobachtet man auch in diesem Fall Veränderungsprozesse der detektierbaren Flussdichteprofile, wobei erneut vor allem die Effekte Kosinusverlust und Abberation eine Rolle spielen. Darüber hinaus verändert sich mit der Uhrzeit die solare Einstrahlung auf der Erde, je zeitlich entfernter vom solaren Mittag, desto stärker. Außerdem unterliegt die Einstrahlung auch ohne auftreten von Wolken gewissen Schwankungen durch atmosphärische Streuungs- und Absorptionsprozesse. Misst man die verwertbare Direktnormalstrahlung mit, kann man die Messbilder entsprechend der Schwankungen korrigieren. Bei enormer Beeinflussung des Sonnenprofils (engl. sunshape) oder gar bei Abschattung einzelner oder mehrerer Heliostaten durch Wolken, kann allerdings eine Verzerrung des Brennflecks hervorgerufen werden. Dies führt zu einer sich ändernden Verteilung der Strahlungsintensität auf der Receiveroberfläche und damit auch auf dem Target.

Für den solaren Mittag, bei rein zeitlicher Verzögerung, ohne den Fokus auf AP7k0 zu verschieben, simuliert man, wie zu erwarten war, sehr geringe Abweichungen. Sie betragen für die Gesamtleistung, aber auch für den mittleren Fehler im Kernbereich, nahezu null. Auch die Standardabweichung von 2,1% ist zu vernachlässigen. Anders sieht es für die extremen Sonnenstände am Morgen und Nachmittag aus. Für 8:00 Uhr simuliert man 8,2% Abweichung der Leistung und eine Standardabweichung von knapp 13%. Die Ergebnisse für den Zeitpunkt 16:00 Uhr liegen mit -9,6% Leistungsunterschied und einer Standardabweichung von 14% in gleicher Größenordnung. Dabei spielt allerdings die DNI- Zunahmen für den Vormittag bzw. Abnahme für den Nachmittag von ca. 100kW/m<sup>2</sup> pro 10min eine erhebliche Rolle. Außerdem ist zu beobachten, dass die Vorzeichen der prozentualen Leistungsunterschiede denen der örtlichen Verschiebung entgegengesetzt sind. Das lässt vermuten, dass sich die Profiländerungen durch die beiden Fehlereinflüsse gegenseitig zumindest zum Teil aufheben.

### 4.2.3 Auswertung örtlicher und zeitlicher Fehlereinflüsse

Die Vermutung Fehler, aufgrund örtlicher und zeitliche Verschiebung während der Messung, könnten sich gegenseitig aufheben, wurde durch Simulationen, wie in Abbildung 4.2. zu se-

hen ist, bestätigt. Darin ist zu sehen, dass sich die Leistungsabweichungen zu betragsmäßig geringeren Werten addieren, als bei separater Betrachtung der Fehlereinflüsse.



**Abbildung 4.2:** Leistungsabweichung in der Receiveröffnung aufgrund örtlicher Verschiebung des Fokus und zeitlicher Verzögerung der Messung [Schapitz and Röger 2010]

Setzt man die Grenze der zulässigen Abweichung auf 5%, wären, bei einer konservativen Betrachtung, ausschließlich Messungen im Zeitraum von 9:00 und 15:00 Uhr vertretbar.

#### 4.2.4 Auswertung örtlicher und zeitlicher Fehlereinflüsse für reale Bedingungen

Real treten allerdings Verschiebungen um beispielsweise 7m nur im Randbereich, bei der Aufnahme des letzten Messbildes, auf. Für die übrigen Bilder sind sie deutlich geringer. Das Gleiche gilt für die zeitlichen Verzögerungen. Diese betragen z.B. für die ersten Bilder nur einige Sekunden. Deshalb wurden im Folgenden einzelne Bilder auf einem fiktiven Streifen-target simuliert. Dabei wurde der Fokus jeweils um die Schrittweite von 0,5m verschoben und eine zeitliche Verzögerung von 20 Sekunden zwischen den Einzelbildern angenommen. Die Position und Abmessungen des Targets wurden Tabelle 4.1 entnommen. Die erzeugten Streifenbilder wurden anschließend zu einem Gesamtmessbild zusammengesetzt und mit dem Originaltarget im Ursprung und der Anfangszeit der Untersuchung verglichen. Koordinaten der Aimpoints und Zeitpunkte der einzelnen Simulationen können der Tabelle A.2 in Anhang entnommen werden.

Vergleichende Ergebnisse sind hier ausschließlich für den Vormittag präsentiert. Für die Untersuchung mit Streifen-target ist die tatsächliche Abweichung für die Fläche der Receiverapertur bzw. des ungefähr flächengleichen Targetkerns sowohl durch örtliche Verschiebung als auch zeitliche Verzögerung, bei dem zuvor als kritisch erachteten Zeitpunkt 8:00 Uhr, unter 0,5% der Gesamtleistung. Im Vergleich dazu, betragen die Abweichung für den gleichen Zeitpunkt in der vorherigen Untersuchung 5,3%. Gleichfalls verhält es sich mit der Standardabweichung. Sie beträgt für diese Untersuchung lediglich 1,2% im Vergleich zu 8,9% im vorherigen Fall. Dies zeigt, dass die Durchführbarkeit der Methode zwar gewissen Fehlereinflüssen unterworfen ist, diese aber bei genauerer Betrachtung auf ein akzeptables Niveau einzuschränken sind.

### 4.3 Test des Messverfahrens mit einzelnen Heliostaten

Um das Verfahren zu testen, wurde der Messvorgang mit einzelnen Heliostaten auf einer ausreichend großen Messfläche nachempfunden. Mit diesen Tests sollte einerseits die grundsätzliche Eignung des Verfahrens überprüft werden. Andererseits konnten die erzeugten Messdaten dazu genutzt werden, die benötigte Software, vor allem für die Bildzusammensetzung aber auch für die Korrekturen der Messbilder, zu entwickeln.

#### 4.3.1 Durchführung

Auf einem  $12\text{ m} \times 12\text{ m}$  großen Target des CESA-1 Turms, das normalerweise zur Charakterisierung von Brennflecken genutzt wird, wurde jeweils ein Heliostat fokussiert und dessen Zielpunkt in 0,5 m-Schritten in westlicher Richtung verfahren. Diesbezüglich sei erwähnt, dass die Beschichtung des genannten Targets lediglich die Fokussierung eines einzelnen Heliostaten zulässt. Mit einer eigens für Flussdichtemessungen bereitgestellten CCD-Kamera wurden Aufnahmen der beobachteten Helligkeitsverteilungen gemacht, wenn der Brennfleck am jeweiligen Zielpunkt zur Ruhe kam. Die generierten Messbilder wurden zur weiteren Bearbeitung in gleicher Weise wie beim ProHERMES-Verfahren korrigiert. Zu den durchgeführten Bildkorrekturen siehe [Ulmer 2004].

Da es nicht möglich war ein Radiometer in die benutzte Messoberfläche einzubringen, stehen für die Auswertung keine Direktmessungen der Strahlungsflussdichte zur Verfügung. Eine Kalibration der Messbilder war somit nicht möglich, weshalb sich die gezeigten Ergebnisse lediglich auf Grauwertverteilungen stützten.

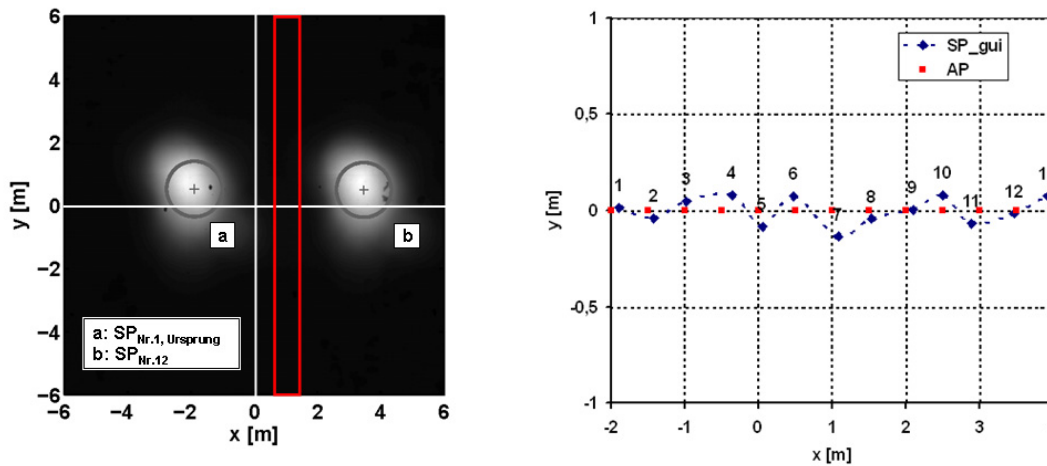
#### 4.3.2 Koordinaten und Versätze der Schwerpunkt und Aimpoints

Anhand der Messbilder konnten die Koordinaten des jeweiligen Brennflecks über ein intensitätsgewichtetes Schwerpunktverfahren mit einer graphische Benutzeroberfläche (engl. graphical user interface, GUI) ermittelt werden. Diese werden im Folgenden Schwerpunkte (SP\_gui) genannt. Sie sind in Abbildung 4.3 (links) mit einem Kreis markiert. Der Radius der Kreismarkierung stellt einen statistisch ermittelten Parameter dar, der die Aufweitung des gemessenen Brennflecks repräsentiert. Er ist für alle Messbilder weitestgehend konstant.

Um Bezug nehmen zu können, sind die Aimpoints (APs) bzw. Schwerpunkte der Reihe nach durchnummeriert. Dabei steht die Nr.1 gleichzeitig auch für die fiktive Receiverposition bzw. den Ort der zu ermittelnden Flussdichte, mit der die detektierte Verteilung auf dem angenommenen Streifentarget verglichen werden soll. Die Position wird im Folgenden kurz Ursprung genannt.

Der örtliche Verlauf der ermittelten Schwerpunkt- sowie Zielpunktkoordinaten ist in Abbildung 4.3 (rechts) dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass sie im Koordinatensystem mit Ursprung im Targetmittelpunkt angegeben sind. Ein Einzelnachweis der Schwer- bzw. Zielpunktkoordinaten ist im Anhang unter Tabelle A.3 zu finden. Anhand der ermittelten Schwerpunkte können im Folgenden auch die sich real ergebende Schrittweite (SW\_gui) jeder Verteilung zur Nächsten und eine entsprechende Abweichung, zur vorgegebenen Schrittweite von 0,5 m, berechnet werden ( $\Delta_{\text{gui}}$ ). Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind ebenfalls in Tabelle A.3 angegeben.

Wie in Abbildung 4.3 (rechts) zu sehen ist, gibt es eine gewisse Diskrepanz zwischen den Aimpoint- und Schwerpunkt-Koordinaten (SP\_gui). Dies ist mit verschiedenen Fehlereinflüssen bei der Heliostat-Nachführung zu erklären. Auf die Gründe dafür und dessen Folgen wird in den anschließenden Kapiteln noch näher eingegangen.



**Abbildung 4.3:** Schaubild Fixed-Bar-Scan-Messung mit exemplarischer Darstellung zweier Brennflecke auf dem Target und Angabe der Streifentargetposition (links); Verlauf der ermittelten Schwerpunktkoordinaten der einzelnen Brennflecke im Vergleich zu den vorgegebenen Zielpunktkoordinaten (rechts)

Um nicht weiter darauf eingehen zu müssen, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass alle weiteren vorgestellten Ergebnisse dieses Kapitels sich auf einen Test vom 27. April 2010, 11:02:36 Uhr Ortszeit beziehen, soweit nicht anders angegeben.

### 4.3.3 Zusammensetzen der Streifenbilder

#### Position des Streifentargets: $\text{Pos}_{\text{ST}}$

Der Durchmesser der einzelnen Brennflecke wurde konservativ betrachtet auf ca. 4 m geschätzt. Ausgehend vom Zielpunkt  $\text{AP}_{\text{Ursprung}} = [x = -2; y = 0]$  m, wurde das fiktive Streifentarget deshalb um den Radius eines Brennflecks (2 m) mit einem Sicherheitsabstand von 0,5 m in x-Richtung versetzt. Aus der Breite des Streifentargets von 1 m ergibt sich demnach dessen Position in x-Richtung zu  $\text{Pos}_{\text{ST}, x} = [0,5; 1,5]$  m und in y-Richtung zu  $\text{Pos}_{\text{ST}, y} = [-6; 6]$  m. Das Zentrum des Targets liegt demnach bei  $\text{TA} = [1; 0]$  m. Seine Kontouren sind in Abbildung 4.3 (links) rot markiert. Durch die Verwendung von 13 Zielpunkten kann in diesem Fall garantiert werden, dass mit dem letzten Bild bei  $\text{AP}_{\text{Nr.13}} = [4; 0]$  m die Ursprungsverteilung vollends auf dem angenommenen Streifentarget abgelichtet wurde. Tatsächlich ist in Abbildung 4.3 (links) mit  $\text{SP}_{\text{Nr.12}}$  die Brennfleckposition zu sehen, die als erstes keinen Beitrag mehr zum zusammengesetzten Gesamtmessbild liefert.

#### Schwankung der Einstrahlung und dessen Korrektur

Zu beobachten ist, dass die Messbilder gewissen Intensitätsschwankungen unterliegen, die auf eine sich variierende Einstrahlung während der Messung zurückzuführen sind. Da die Tests außerhalb jeglicher Messkampagnen durchgeführt wurden, konnte keine Messungen

der DNI bereitgestellt werden. Deshalb wurde zur Korrektur der Schwankungen jeweils die Grauwertsumme der korrigierten Einzelbilder ins Verhältnis gesetzt. Sie ist ein Maß für die integrierte Gesamtleistung der Messungen. Der Verlauf der prozentualen Abweichung der Einzelbilder von der Grauwertsumme des Ursprungsbildes ist in Abbildung 4.5 (links) dargestellt. Der Korrekturfaktor, mit dem die Streifenbilder jeweils multipliziert wurden, um die Einstrahlungsschwankungen auszugleichen, errechnet sich wie folgt:

$$K_{DNI,n} = \frac{\sum_i \sum_j I_{Ursprung}(i,j)}{\sum_i \sum_j I_n(i,j)} \quad (4.4)$$

$$I_{n,korr} = K_{DNI,n} \cdot I_n \quad (4.5)$$

Mit:  $K_{DNI}$ : Korrekturfaktor der Einstrahlung

$n$ : Nummer des Streifenbildes

$I$ : Intensitätsverteilung der Messbilder

$I_{korr}$ : korrigierte Intensitätsverteilung

$i,j$ : Positionskordinaten eines Pixels in der Bildmatrix

### Variante 1: Zusammensetzen anhand der Annahme äquidistanter Fokusverschiebung

Das Zusammensetzen der Bildausschnitte kann grundlegend anhand der sich aus dem jeweiligen Zielpunkt ergebenden theoretischen Position des Streifenbildes im Gesamtbild durchgeführt werden. Für z.B. Streifenbild Nr. 7 mit dem Zielpunkt  $AP_{Nr.7} = [1; 0]$  m ergeben sich die Koordinaten wie folgt:

Vom Streifentarget mit den fiktiven Abmessungen  $Höhe \times Breite = 12 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  wird, wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist, nur der Kernbereich in x-Richtung von 0,25 bis 0,75 m zur Detektion der Flussdichteverteilung verwendet. Der restliche Teil des Targets ist der in Kapitel 4.1 beschriebene Überlappungsbereich ( $\Delta x_{overlap}$ ). Auf diesen wird im Folgenden noch eingegangen. Geht man vom Zentrum des Targets bei  $TA = [x = 1; y = 0]$  m aus, erstreckt sich der Kernbereich des Streifentargets über den Bereich  $Pos_{ST}^K = [x = 0,75:1,25; y = -6:6]$  m. Um die Koordinaten zu erhalten, an deren Stelle die auf Streifenbild Nr.7 detektierte Verteilung in der sich ergebenden Gesamtverteilung eingesetzt werden soll, muss man die Koordinaten  $AP_{Nr.7} = [1; 0]$  m von denen des Streifentargets  $Pos_{ST}^K$  abziehen:

$$\begin{aligned} Pos_{Nr.7} &= Pos_{ST}^K - AP_{Nr.7} \\ &= [0,75:1,25; -6:6] \text{ m} - [1; 0] \text{ m} \\ &= [-0,25:0,25; -6:6] \text{ m} \end{aligned}$$

Die Absolutposition in den Koordinaten der  $12 \text{ m} \times 12 \text{ m}$  Gesamtbildmatrix ergibt sich dann durch Addition der Ursprungs koordinaten  $AP_{Ursprung}$  zu der ermittelten Position:

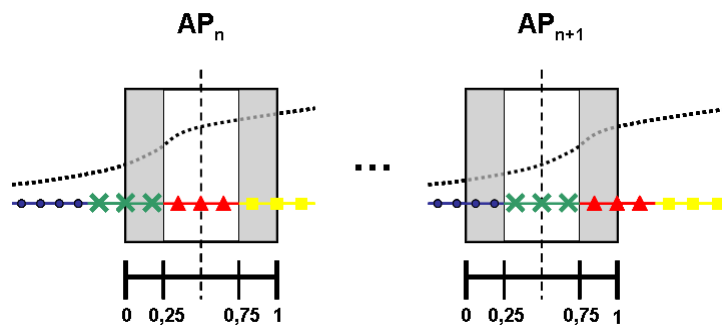
$$\begin{aligned} AbPos_{Nr.7} &= Pos_{Nr.7} + AP_{Ursprung} \\ &= [-0,25:0,25; -6:6] \text{ m} + [-2; 0] \text{ m} \\ &= [-2,25:-1,75; -6:6] \text{ m} \end{aligned}$$

Analog ergeben sich Koordinaten für das Streifenbild Nr. 8 ( $AP_{Nr.8} = [1,5; 0]$  m):

$$\begin{aligned} Pos_{Nr.8} &= Pos_{ST}^K - AP_{Nr.8} \\ &= [-0,75; -0,25; -6; 6] \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} AbPos_{Nr.8} &= Pos_{Nr.8} + AP_{Ursprung} \\ &= [-2,75; -2,25; -6; 6] \text{ m} \end{aligned}$$

Nimmt man an, dass es sich bei Streifenbild Nr.7 um den in Abbildung 4.4 mit roten Dreiecken ( $\blacktriangle$ ) gekennzeichneten Bildausschnitt handelt, der mit Hilfe von Zielpunkt  $AP_{Nr.7}$  ( $n = 7$ ) ermittelt wurde, dann bestimmt man mit dem nächst folgenden Zielpunkt  $AP_{Nr.8}$  ( $n+1 = 8$ ) den sich links anschließenden Bildausschnitt. Er ist in Abbildung 4.4 mit grünen Kreuzen ( $\otimes$ ) gekennzeichnet. Dieser Sachverhalt ist mit Berechnung von  $Pos_{Nr.8}$ , die sich im negativen Bereich, also weiter links im Bild, an  $Pos_{Nr.7}$  anschließt, nachzuvollziehen. Auf diese Weise können die einzelnen Streifenbilder durch einfache Berechnungen sukzessiv zu einer Gesamtverteilung zusammengesetzt werden. Ergebnisse dieses Vorgehens werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert.



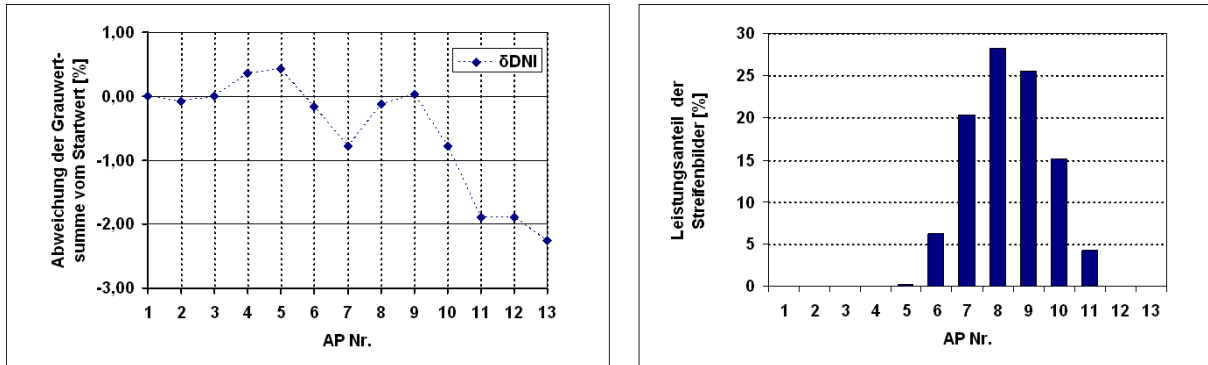
**Abbildung 4.4:** Graphischer Erläuterung zum Zusammensetzen der Streifenbilder

### Variante 2: Zusammensetzen anhand sich real ergebender Fokusverschiebungen

Die erwähnten Diskrepanzen, zwischen Zielpunkten und den ermittelten Schwerpunkten bzw. die Versätze zur angenommenen Schrittweite von 0,5 m, führen zu Fehlern beim Zusammensetzen der Bilder, geht man von errechneten Theoriewerten der Bildposition aus. Eine zweite Möglichkeit des Zusammensetzens geht deshalb auf die realen Verschiebungen zwischen den einzelnen Bildausschnitten ein. Das Verfahren basiert auf einem eigens entwickelten Algorithmus, aufbauend auf dem MatPIV-code (siehe [Sveen 2004]). Er vergleicht die räumlichen Muster im Überlappungsbereich der Streifenbilder. Auf diese Weise ist es möglich, ähnlich wie bei der Panorama-Funktion der meisten kommerziell erhältlichen Digitalkameras, die sich jeweils anschließende Position zum vorhergehenden Bildausschnitt zu ermitteln.

Allerdings ist dies nur für die Streifenbilder möglich, auf denen gewisse räumliche Informationen durch Intensitätsverteilungen vorhanden sind. In Abbildung 4.5 (rechts) ist die prozentuale Grauwertsumme (Leistungsanteil) der Streifenbilder an der Gesamtsumme dargestellt. Wie zu erkennen ist, enthalten nur die Streifen 5 bis 11 eine ausreichende Intensitätsverteilungen. Liegt kein Intensitätsmuster auf einem Streifenbild vor, gibt es keinerlei Informationen über dessen Position im Gesamtbild. Das Zusammensetzen für diese Streifenbilder, anhand des im Anschluss vorgestellten Algorithmus, ist unmöglich.

Zur Erläuterung des Algorithmus kann beispielsweise in Abbildung 4.4 der linke Bildausschnitt zwischen 0 m und 0,5 m in x-Richtung des zu  $AP_n$  gehörigen Streifenbildes, im Bildausschnitt zwischen 0,5 m und 1 m des zu  $AP_{n+1}$  gehörigen Streifenbildes wiedergefunden werden. In diesem Fall ergäbe sich demnach entsprechend der theoretischen Schrittweite eine Verschiebung von genau 0,5 m. Wie die Ergebnisse dieser Berechnung zeigen, ist dies in der Realität nicht der Fall. Die Ergebnisse stimmen bis auf geringe Abweichungen im Bereich von mehreren Millimetern mit denen des Schwerpunktverfahrens überein. Zu finden sind sie unter  $\Delta_{\text{autoD}}$  ebenfalls in Tabelle A.3.



**Abbildung 4.5:** Abweichung der Grauwertsumme der korrigierten Messbilder vom Ursprungswert, repräsentativ für Einstrahlungsschwankungen während der Messung (links); Prozentuale Grauwertsumme (Leistungsanteil) der Streifenbilder an der Gesamtgrauwertsumme (rechts)

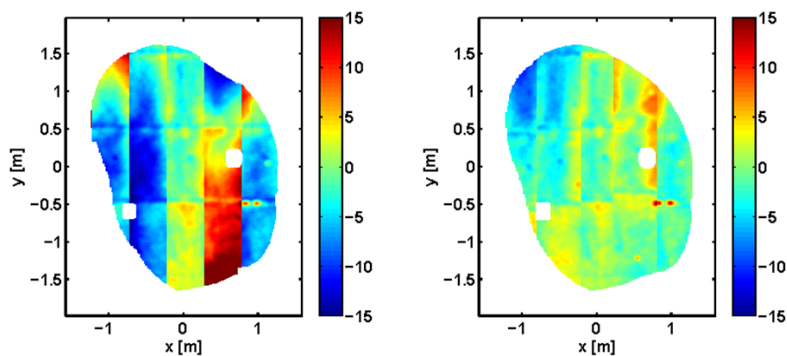
Im Normalfall kann die redundante Bestimmung der Schwerpunkt-Koordinaten nicht genutzt werden, weil eine Intensitätsgewichtung, aufgrund der Größe des Targets, nicht möglich ist. Aus den vorgestellten Ergebnissen der Fokusverschiebung, lässt sich jedoch ableiten, dass im Normalfall die Verschiebung der Streifenbilder auch anhand Variante 2 richtig ermittelt werden können. Für diese Methode ist eine wenigstens minimale Überschneidung der Einzelbilder notwendig, was mit einem Überlappen der Einzelbilder von  $\Delta x_{\text{overlap}} = 0,25$  m sichergestellt werden soll. Ein Vergleich beider Methoden wird anhand der im folgenden Kapitel präsentierten Ergebnisse diskutiert.

### 4.3.4 Ergebnisse des Zusammensetzens der Einzelbilder

In Abbildung 4.6 (links) ist die prozentuale Abweichung der zusammengesetzten Grauwertverteilung vom Ausgangsbild ( $SP_{Nr.1}$ ) unter Verwendung der jeweils theoretischen Position des Streifenbildes (Variante 1) zu sehen. Analog dazu ist in Abbildung 4.6 (rechts) die prozentuale Abweichung der Verteilungen für das Zusammensetzen mit realen Verschiebungen dargestellt, die mit Hilfe des erläuterten Algorithmus (Variante 2) ermittelt wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Abweichungen für das Zusammensetzen nach Variante 2 deutlich geringer sind. Statistische Größen, die diese Beobachtung belegen sind in Tabelle 4.3 für zwei verschiedene Messzeitpunkte zusammengefasst.

Jedoch ist der Fehler für beide Auswertungen, im Vergleich zu den theoretisch untersuchten Fehlermechanismen aus Kapitel 4.2, sehr hoch. Dies ist allerdings hauptsächlich auf das

verwendete Target zurückzuführen. Leider handelt es sich nämlich bei dem beschriebenen  $12\text{ m} \times 12\text{ m}$  Target weder um eine homogen noch diffus reflektierende Messoberfläche. Des Weiteren konnten zahlreiche Degradationserscheinungen sowie Verschmutzungen darauf entdeckt werden, die zu einem erheblich höheren Fehler der ausgewerteten Messungen führen, als erwartet. Zu sehen ist dies an den weißen Aussparungen in Abbildung 4.6, die von Verschmutzungen an dieser Stelle im Ausgangsbild herrühren. Diese sind z.B. auch in Abbildung 4.3 ( $SP_{Nr.1}$ ) klar zu erkennen. Da die vorgestellten Tests allerdings nur für die Untersuchung der prinzipiellen Durchführbarkeit des Verfahrens dienen sollen, wurde über die mangelnde Eignung des Targets hinweggesehen. Daraus resultiert, dass die sich ergebenden hohen prozentualen Fehler allein wenig aussagekräftig sind.



**Abbildung 4.6:** Prozentuale Abweichung der zusammengesetzten Verteilung zur Ursprungsverteilung anhand Variante 1 (links) und Variante 2 (rechts)

**Tabelle 4.3:** Ergebnisse des Vergleichs von zusammengesetzten Verteilungen mit der Ausgangsverteilung im Ursprung

Datum, Uhrzeit der Messung	Methode des Zusammensetzens	$^1 \bar{m}$	$^2 s$	min.	max.	$^3 P$
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
27. April 2010, 11:02:36 <sup>4</sup> (siehe Abbildung 4.6)	Var. 1 (thoer. Versch.)	-1,5	7,2	-17,0	32,4	-1,5
	Var. 2 (reale Versch.)	-0,7	3,1	-12,2	21,7	-0,6
27. April 2010, 10:53:18 <sup>4</sup>	Var. 1 (thoer. Versch.)	-3,8	10,6	-40,6	39,5	-4,2
	Var. 2 (reale Versch.)	0,5	4,7	-21,5	26,7	-0,6

<sup>1</sup> Mittelwert; <sup>2</sup> Standardabweichung; <sup>3</sup> integrierte Leistung; <sup>4</sup> Ortszeit

Des Weiteren ist aus den Ergebnissen nicht abzulesen, welches der beiden vorgestellten Verfahren zur Bildzusammensetzung grundsätzlich besser geeignet ist. Misst man die Verteilung vieler Heliostate gemeinsam, so kommt es aufgrund der unterschiedlichen Nachführgenauigkeit der Heliostate zum Ineinanderschieben der Flussdichteprofile beim Schwenkvorgang. Mit dem vorgestellten Algorithmus können die realen Verschiebungen der Gesamtverteilung (Variante 2) nicht mehr eindeutig identifiziert werden. In diesem Fall kann es besser sein theoretisch berechnete Werte nach Variante 1 für die Verschiebungen zu benutzen, als fehlerhaft Ermittelte.



Das Ineinanderschieben der einzelnen Flussdichteprofile würde bei Messungen auf dem Streifentarget als Aufweitung des Gesamtprofils wahrgenommen werden. Beim Fokussieren aller Heliostate auf den Receiver, also am Ort der Messung, vollziehen diese allerdings auch ungewollte Schwenkbewegungen durch Ungenauigkeiten beim Nachführen der Heliostate. Daraus lässt sich ableiten, dass auch an dieser Position eine Aufweitung zum theoretisch zu erwartenden Flussdichtebild zu beobachten sein müsste. Deshalb kann man bei einer hohen Anzahl von Heliostaten davon ausgehen, dass die mit dem Fixed-Bar-Scan-Verfahren gemessene Verteilung bis auf gewisse Fehler mit der zu Ermittelnden übereinstimmen wird. Dabei handelt es sich z.B. um Fehler aufgrund der in Kapitel 4.2 vorgestellten örtlichen und zeitlichen Verzerrung des Flussdichteprofiles. Diese lassen sich leider nicht vollends korrigieren. Auch kommt es, wie anhand der Ergebnisse dieses Kapitels zu sehen ist, zu zusätzlichen Fehlern durch Ungenauigkeiten bei der Zielpunktansteuerung.

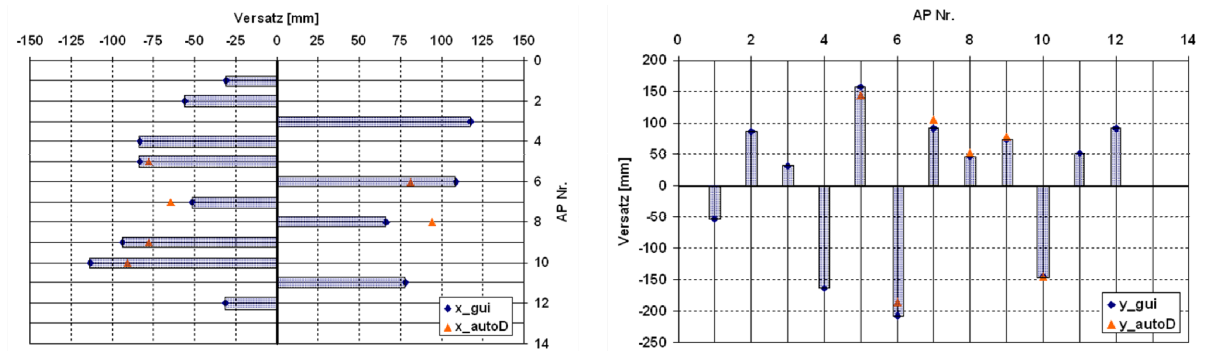
Zur Charakterisierung der Gesamtheit des zu erwartenden Fehlers müssten Tests mit einer realistisch hohen Anzahl an Heliostaten durchgeführt werden. Außerdem müssten die dem Verfahren zuzuordnenden Fehlereinflüsse von denen der Messoberfläche getrennt werden, indem man ein Target mit den in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Eigenschaften verwendet. Da im Zeitraum der Entstehung dieser Arbeit kein geeignetes Target zu Verfügung stand, wurde versucht den zu erwartenden Gesamtfehler anhand von weiteren Simulationen unter Einbeziehung der Nachführgenauigkeit zu charakterisieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

#### 4.4 Untersuchung der Nachführgenauigkeit beim Anfahren vorgegebener Zielpunkte

Das CESA-1 Feld verfügt über eine automatische Ansteuerung aller Heliostate. Gibt man einen Zielpunkt in kartesischen Koordinaten für einen Brennfleck vor, fahren sie automatisch in die entsprechende Position, um das Sonnenlicht auf eben diese Koordinaten zu reflektieren. Dazu muss die exakte Position der Sonne bekannt sein. Diese wird mit einem sogenannten Sonnenalgorithmus errechnet. Die Ungenauigkeit solcher Algorithmen liegt bei ca.  $5\mu\text{rad}$  [Reda and Andreas 2004]. Theoretische Abweichungen des Brennflecks von seinen Zielkoordinaten lägen demnach im Bereich von  $\mu\text{m}$  bis wenigen mm, berücksichtigt man, dass die hier untersuchten Heliostate einen Abstand von 100 bis 300m vom Zielpunkt haben.

Die in der Realität beobachteten Abweichungen sind allerdings um einiges höher, wie aus der Diskrepanz von Schwerpunkt- und Aimpoint-Koordinaten im vorangegangenen Kapitel abzulesen ist. Der Schwerpunkt eines Brennflecks (SP\_gui) kann jedoch nicht mit seinen eigentlichen Koordinaten gleich gesetzt werden, weil beim Justieren der Brennfleckausrichtung (engl. canting, siehe [Buck and Teufel 2009]) nur auf einen homogenen Brennfleck geachtet wird. Der intensitätsgewichtete Schwerpunkt bleibt dabei unberücksichtigt. Aus diesem Grund sollen hier nur die errechneten Abweichungen der Schwerpunktverschiebung ( $\Delta_{\text{gui}}$ ,  $\Delta_{\text{autoD}}$ ) von der vorgegebenen Schrittweite von 0,5 m in x-Richtung bzw. 0 m in y-Richtung untersucht werden. Diese sind zur besseren Übersicht in Abbildung 4.7 für den Schritt eines Streifenbildes zum Nächsten dargestellt. Einzelwerte können, wie bereits erwähnt, Tabelle A.3 entnommen werden. Bezüglich der Ergebnisse  $\Delta_{\text{autoD}}$  sei allerdings nochmals darauf hingewiesen, dass aus den im vorherigen Kapitel genannten Gründen mit Hilfe von Variante 2 nur die Verschiebungs-Offsets der Streifenbilder 5 bis 11 möglich ist.

In Abbildung 4.7 ist zu sehen, dass die mit Hilfe des Algorithmus detektierten Abweichungen, hier mit  $x\_autoD$  bzw.  $y\_autoD$  gekennzeichnet, bis auf wenige Millimeter Unterschied mit denen der Schwerpunktberechnung ( $x\_gui/ y\_gui$ ) übereinstimmen. Für die in Abbildung 4.7 (links) dargestellten Abweichungen in x-Richtung lassen sich betragsmäßige Werte zwischen 25 und 125 mm ablesen. Für die Abweichung in y-Richtung in Abbildung 4.7 (rechts) sind es sogar 30 bis 200 mm.



**Abbildung 4.7:** Testzeitpunkt: 27. April 2010, 11:02:36 Uhr : Reale Verschiebungs-Offsets nach Variante 1 ( $x\_ / y\_gui$ ) und nach Variante 2 ( $x\_ / y\_autoD$ ) für Heliostat H500 in x-Richtung (links) und in y-Richtung (rechts)

Aus diesen Ergebnissen lässt sich für das Anfahren des vorgegebenen Zielpunktes in x- sowie y-Richtung jeweils eine Standardabweichung bzw. Anfahrungsauignigkeit errechnen. Diese Werte sind ebenfalls Tabelle A.3 zu entnehmen. Sie betragen in x-Richtung  $\sigma_x = 84/ (86)$  mm und in y-Richtung  $\sigma_y = 118 (139)$  mm, jeweils für die Ergebnisse mit  $x\_ / y\_gui$  ( $x\_ / y\_autoD$ ). Sie beziehen sich allerdings ausschließlich auf den untersuchten Zielpunkt. Aus der Distanz der Drehachse eines Heliostaten zum Targetmittelpunkt, kann im Folgenden aber auch eine Anfahrungsauignigkeit des Heliostaten in der normalerweise üblichen Einheit mrad angegeben werden. Somit ist es möglich die Ergebnisse auf jeden theoretischen Zielpunkt zu übertragen. Die Entfernung des geometrischen Mittelpunkts des Heliostaten H500 zum Zentrum des  $12\text{ m} \times 12\text{ m}$  Targets beträgt ca. 92,9 m. Die sich daraus ergebenden Anfahrungsauignigkeit ergibt sich demnach zu  $\sigma_x \approx 0,9 (0,9)$  mrad in x- sowie  $\sigma_y \approx 1,3 (1,5)$  mrad in y-Richtung. Auf ähnliche Art und Weise, allerdings ohne Verwendung des Algorithmus, wurde die Anfahr- bzw. Tracking-Ungenauigkeit weiterer Heliostate bestimmt. Sie sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Die sich ergebenden Abweichungen sind, nach Angaben des Betreibers des Heliostatfeldes CIEMAT, vor allem auf das hohe Getriebespiel von 1,2 – 1,5 mrad zurückzuführen. Darüber hinaus führen Windlasten zu Verformungen der Spiegeloberflächen. Sie sind eine weitere Quelle für Anfahrungsauignigkeiten unbekannter Größe. Ihr Wert wird für die folgenden Untersuchungen auf 0 bis 0,2 mrad geschätzt. Des Weiteren kommt es durch Nachführintervalle von  $\Delta t_{\text{tracking}} = 4$  Sekunden, wie bereits erwähnt, zu unvermeidbaren Abweichungen der Brennfleckposition zum Zielpunkt. Nach Gleichung (4.3) errechnet sich die maximale entstehende Winkelabweichung eines Heliostaten zu:

$$\Delta\varphi_{\text{tracking}} = \omega_{\text{Erde}} \cdot \Delta t_{\text{tracking}} \approx 0,0727 \frac{\text{mrad}}{\text{s}} \cdot 4\text{ s} \approx 0,3\text{ mrad} \quad (4.6)$$

Zusammenfassend liegt die theoretisch zu erwartenden Tracking-Ungenauigkeit demnach bei 1,2 bis 2,0 mrad. Wie zu sehen ist, konnte dies durch die Tests vom 27.09.2010 bestätigt werden (siehe Tabelle 4.4). Als Ausgang weiterer Betrachtungen wird von dem sich ergebenden Mittelwert von 1,6 mrad für die Nachführungenauigkeit in x- und y-Richtung aller Heliostaten ausgegangen.

**Tabelle 4.4:** Ergebnisse der Anfahrungenauigkeiten des Tracking-Tests vom 27.09.2010

Uhrzeit der Messung <sup>4</sup>	Heliostat Bezeichnung	<sup>1</sup> $\sigma_x$	<sup>2</sup> $\sigma_y$
		[mrad]	[mrad]
12:19 Uhr	H202	1,9	1,3
12:25 Uhr	H203	1,6	1,6
12:42 Uhr	H402	1,8	1,9
12:30 Uhr	H408	1,3	1,9
12:37 Uhr	H411	1,4	1,5
12:48 Uhr	H802	1,2	-
13:12 Uhr	H811	1,8	1,6
12:56 Uhr	H814	1,9	1,4
13:01 Uhr	H1008	-	1,6
13:06 Uhr	H1009	1,3	1,5
<b>Mittelwert:</b>		1,6	1,6

Tracking-Ungenauigkeit in: <sup>1</sup> x-Richtung, <sup>2</sup> y-Richtung; <sup>4</sup> Ortszeit

Ziel dieser Versuche war es, die zu erwartenden Abweichungen der Brennfleckkoordinaten von ihrer vorgegebenen Position zu ermitteln, um anschließend mit Hilfe von Simulationen die Auswirkung auf die zu erwartenden Messunsicherheit weiter zu untersuchen.

#### 4.4.1 Simulationen zum Fehlereinfluss der Tracking-Ungenauigkeit

Wie in Kapitel 4.2 wurde auch bei dieser Untersuchung auf die Daten des Projekts Saphir zurückgegriffen. Demnach handelt es sich beim verwendeten Heliostatfeld ebenfalls um das des CESA-1 Turmkraftwerks der Testanlage PSA. Als Simulations-Programm kam in diesem Fall STRAL (siehe Kapitel 2.5) zum Einsatz. Die Fokallängen der Spiegelfacetten aller Heliostate wurden in diesem Fall nicht mit der Funktion „focap“ angepasst, sondern entsprachen denen, der real verbauten Spiegelfacetten. Für die zum Einsatz kommenden Heliostate wurde aber erneut vereinfachend angenommen, dass sie vom gleichen Typ, und zwar Casa-Heliostate mit 1,5mrad Steigungsfehler und einer Spiegelfläche von ca. 40m<sup>2</sup>, sind.

Als Simulationszeitpunkt wurde der 21. März 2010, 13 Uhr Ortszeit gewählt. Störende Effekt durch numerisches Rauschen wurden untersucht. Sie konnten allerdings aufgrund sehr hoher Strahlzahlen auf einen Wert im Promille-Bereich eingegrenzt und folglich vernachlässigt werden. Weitere Eingabeparameter der durchgeführten Simulationen waren:

- DNI: 750 W/m<sup>2</sup>
- Typ Sunshape: CSR 5% mit 49 Stützpunkten (siehe Kapitel 5.3.1.2)
- Generierte Sonnevektoren: 1.203.840
- Generierte Strahlen: 323.832.960

Wie auch schon zuvor, wurde die Vergleichsverteilung auf einem Target der Größe von  $7\text{ m} \times 7\text{ m}$  simuliert. Die streifenförmige Messfläche wurde, wie bereits in Tabelle 4.1 beschrieben, bei Position  $x = -3,5\text{ m}$  beginnend, einer Breite von  $1\text{ m}$  und einer dem Target entsprechenden Höhe von  $7\text{ m}$  angenommen. Der Zeitpunkt der Simulation wurde jeweils um  $20$  Sekunden variiert. Das Zusammensetzen der simulierten streifenförmigen Flussdichteverteilungen erfolgte anhand der sich aus dem jeweiligen Zielpunkt ergebenden theoretischen Position des Streifens, wie in Kapitel 4.3 unter Variante 1 erläutert.

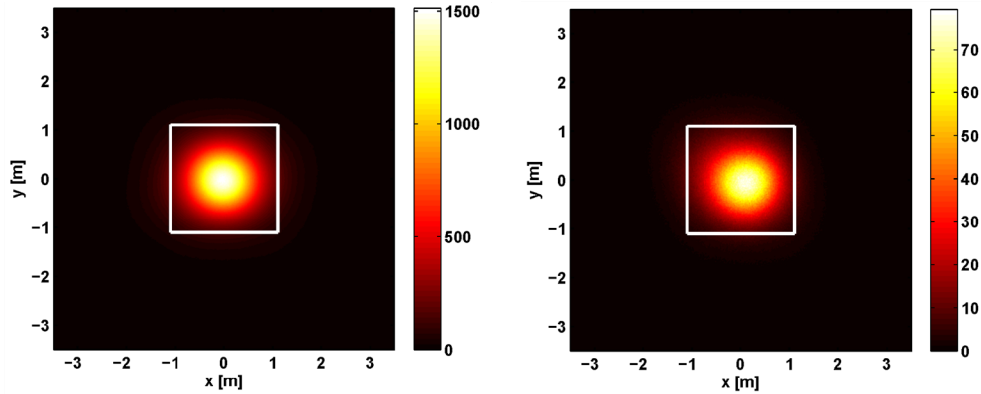
Des Weiteren wurden drei Fälle untersucht, in denen sich durch die Angabe einer Tracking- Ungenauigkeit für jeden Heliostat über eine Normalverteilung eine individuelle Zielpunktabweichung in mrad errechnet. Ausgehend vom Zielpunkt  $AP_{\text{Ursprung}} = [0; 0; 60]\text{ m}$ , im Turmkoordinatensystem mit der Turmwand als Ursprung und der Distanz jedes Heliostaten zum Receiver, ergaben sich durch statistisch verteilte Winkelabweichungen für alle Heliostate unterschiedliche Zielpunkte. Auf diese Weise sollte der Fehler abgeschätzt werden, der durch sich unterschiedlich auswirkende Nachführungenauigkeiten bei der Messung der Strahlungsflussdichte mit dem vorgestellten Verfahren auftreten kann. Darin enthalten sind dann automatisch auch die Fehlereinflüsse durch örtliche und zeitliche Veränderung während der Messung, wie in Kapitel 4.2 bereits erläutert.

- Fall 1: Beispiel einer geringen Anzahl von  $6$  Heliostate mit der im vorangegangenen Kapitel ermittelten mittleren Tracking- Ungenauigkeit von  $\sigma_x = \sigma_y = 1,6\text{ mrad}$
- Fall 2: Beispiel einer hohen Anzahl von  $120$  Heliostaten mit ebenfalls einer Tracking- Ungenauigkeit von  $\sigma_x = \sigma_y = 1,6\text{ mrad}$
- Fall 3: Beispiel einer hohen Anzahl von  $120$  Heliostaten aber einer für moderne Turmkraftwerke realistischen Tracking- Ungenauigkeit von  $\sigma_x = \sigma_y = 0,65\text{ mrad}$ <sup>7</sup>

Anschließend wurden jeweils die Kernbereiche an der Position  $Pos_{\text{Kern}} = [x = -1,1:1,1; y = -1,1:1,1]\text{ m}$  aus der Ausgang- bzw. streifenförmig zusammengesetzten  $7\text{ m} \times 7\text{ m}$  Verteilung herausgeschnitten und miteinander verglichen. Die Abmaße des Kernbereichs garantieren, dass Bereiche mit Flussdichten, die näherungsweise null sind, beim Vergleich nicht berücksichtigt werden, da sie zu prozentual hohen Fehlern und damit zu einer Fehlinterpretation der Ergebnisse führen können. Der Kernbereiche für jeweils die Simulation der Ausgangsverteilung von Fall 1 und Fall 2 sind in Abbildung 4.8 zu sehen. Für Fall 3 ergeben sich ähnlich Flussdichtekonzentrationen wie in Fall 2, weshalb auf die Darstellung dieser Auswertung verzichtet wird. Die kreisförmige Apertur des Receivers wurde mit einem Radius von  $0,45\text{ m}$  in die Mitte des Targets gelegt (siehe SolHyCo-Receiver, Kapitel 2.1.2). Ergebnisse dieser Untersuchung finden sich in Tabelle 4.5.

---

<sup>7</sup> Dieser Wert ist einem internen Bericht entnommen



**Abbildung 4.8:** Simulationsergebnis der Ausgangsverteilung: Fall 2 mit Angabe des Kernbereichs (links), Fall 1 mit Angabe des Kernbereichs (rechts)

**Tabelle 4.5:** Ergebnisse für Simulation mit statistischen Methoden zur Auswirkung der Nachführgenauigkeit auf den zu erwartenden Messfehler

**Fall 1: 6 Heliostate mit  $\sigma_x, \sigma_y = 1,6$  mrad**

	Einheit	<sup>1</sup> $\bar{m}$	<sup>2</sup> $s$	min.	max.	<sup>3</sup> $P$
Abweichung der Flusssichte	[kW/m <sup>2</sup> ]	-0,1	6,9	-16,5	19,6	-0,9 [kW]
	[%] <sup>*</sup>	-0,5	27,3	65,2	77,3	-1,9 [%] <sup>**</sup>

<sup>\*</sup> berechnet mit mittlerer Flusssichte im Kernbereich von 25,3 kW/m<sup>2</sup>

<sup>\*\*</sup> berechnet mit integrierter Flusssichteleistung in der Apertur von 46,3 kW

**Fall 2: 120 Heliostate mit  $\sigma_x, \sigma_y = 1,6$  mrad**

	Einheit	<sup>1</sup> $\bar{m}$	<sup>2</sup> $s$	min.	max.	<sup>3</sup> $P$
Abweichung der Flusssichte	[kW/m <sup>2</sup> ]	-6,1	39,9	-217,2	118,9	-7,9 [kW]
	[%] <sup>*</sup>	-1,2	7,9	-43,0	23,6	-0,9 [%] <sup>**</sup>

<sup>\*</sup> berechnet mit mittlerer Flusssichte im Kernbereich von 503,8 kW/m<sup>2</sup>

<sup>\*\*</sup> berechnet mit integrierter Flusssichteleistung in der Apertur von 925,9 kW

**Fall3: 120 Heliostate mit  $\sigma_x, \sigma_y = 0,65$  mrad**

	Einheit	<sup>1</sup> $\bar{m}$	<sup>2</sup> $s$	min.	max.	<sup>3</sup> $P$
Abweichung der Flusssichte	[kW/m <sup>2</sup> ]	-1,9	20,2	-115,2	100,4	-5,0 [kW]
	[%] <sup>*</sup>	-0,4	4,0	-22,9	19,9	-0,5 [%] <sup>**</sup>

<sup>\*</sup> berechnet mit mittlerer Flusssichte im Kernbereich von 503,9 kW/m<sup>2</sup>

<sup>\*\*</sup> berechnet mit integrierter Flusssichteleistung in der Apertur von 925,9 kW

<sup>1</sup> Mittelwert; <sup>2</sup> Standardabweichung; <sup>3</sup> integrierte Leistung in der Apertur

#### 4.4.2 Fehlerabschätzung des Messverfahrens

Die Messmethode zur indirekten Messung der solaren Strahlungsflussdichte mit feststehendem Target hat eine Vielzahl von möglichen Fehlereinflüssen und einige systematische Fehler. Ein Teil dieser Fehler ist identisch dem ProHERMES-Messsystem oder zumindest in ähnlicher Größenordnung. Sie umfassen z.B. Fehler im Bezug auf die spektrale Gewichtung der CCD-Kamera, die Winkelabhängigkeit der Targetreflexion und die Hersteller-Kalibration der verwendeten Radiometer. Sie sind von [Ulmer 2004] umfassend untersucht und zum Teil korrigierbar, worauf in dieser Arbeit bereits in Kapitel 4.3 zurückgegriffen wurde.

1.: Überträgt man die relevanten Fehler des ProHERMES-Messsystems auf die hier vorgestellte Methode mit feststehendem Target, ergeben sich folgende Fehlerquellen:

- Messtarget: Beschaffenheit des Targets, dessen Degradation und winkelabhängige Reflexion auf dessen Oberfläche, der sich daraus ergebende Kalibrationsfehler (ohne Versatz der Mess- zur Aperturbene, wie bei ProHERMES);  $u = -0,9\% \dots +0,7\%$
- Kamera- und Filtersystem: Verbleibender Dunkelstrom-, Shading- und Linearitätsabweichung nach deren Korrektur, Auslese- und Photonenrauschen, Spektraler Fehler mit KG3- und mit ND-Filter);  $u = -2,7\% \dots +1,1\%$
- Bildauswertung: Positionier- und Größenfehler (Positionierfehler viel geringer als bei ProHERMES) );  $u = -0,7\% \dots +1,2\%$
- Radiometer: Kalibrationsfehler des Herstellers, Wind- und Temperatureinfluss, Spektrale Fehler beim Messen, Signalauslesung (Degradation in Kalibrationsfehler enthalten);  $u = \pm 3,0\%$

Der wahrscheinlich zu erwartende Gesamtfehler der verwendeten Messtechnik für die indirekte Fixed-Bar-Scan-Messmethode ergibt sich demnach zu  $-4,2\% \dots +3,5\%$ .

2.: Nach Kapitel 4.2.4 kann der Fehler durch örtliche Verschiebung und zeitliche Verzögerungen während der Messung für Zeitpunkte, die vom solaren Mittag abweichen auf  $u \leq \pm 1,5\%$  eingegrenzt werden;  $u \approx \pm 1,5\%$

Nimmt man 3. die Fehler hinzu, die sich aus Tracking-Ungenauigkeiten der verwendeten Heliostate ergeben (Tabelle 4.5), so errechnet sich mit Hilfe der ermittelten Standardabweichung der zu erwartende Gesamtfehler für die drei in Kapitel 4.4.1 untersuchten Fälle zu:

- Fall1:  $u = -27,6\% \dots +27,5\%$
- Fall2:  $u = -9,1\% \dots +8,8\%$
- Fall3:  $u = -6,0\% \dots +5,5\%$

Eine Heliostatzahl von 120, wie in Fall 2 und 3 betrachtet, ist für kommerzielle Turmkraftwerke ab 1-2 MW thermischer Leistung durchaus plausibel. Aus den Ergebnissen lässt sich ablesen, dass in diesem Fall eine akzeptable Messungenauigkeit von  $\pm 5-6\%$  für das vorgestellte Verfahren erzielt werden kann, legt man eine geringe Tracking-Ungenauigkeit von 0,65 mrad zugrunde.

Heliostat-Hersteller halten sich mit der Veröffentlichung real vermessener Daten zur Nachführgenauigkeit ihrer Produkte zurück. [Jones, Edgar et al. 1994] geben im Jahre 1994 für Lugo Heliostaten der größten amerikanischen Anlage „Solar Two“ in Kalifornien Tra-

cking-Ungenauigkeiten von 0,5 bis 0,8 mrad in x- und 0,8 bis 1 mrad in y-Richtung an. Es ist deshalb anzunehmen, dass diese aufgrund des wesentlich geringeren Getriebspiels für zukünftige Anlagen deutlich unter 1 mrad liegen. Daraus kann geschlossen werden, dass die zu erwartende Messungenauigkeit des Verfahrens zwischen  $\pm 5$  und  $\pm 9\%$  liegen wird.

Für alle drei Untersuchungen zeigt sich darüber hinaus, dass Abweichungen der integrierten Flussdichteleistung in der korrespondierenden Aperturfläche kleiner als  $\pm 2\%$  bleiben. Die sehr gute Übereinstimmung ist dabei auf die Tatsache zurück zu führen, dass sich die in Kapitel 4.2 und 4.4 vorgestellten Fehlereinflüsse teilweise gegenseitig herausmitteln. Die Messung der Receiver-Eintrittsleistung ist demnach mit einer wahrscheinlich zu erwartenden Messungenauigkeit von  $-4,7\% \dots +4,0\%$  möglich.

In wie weit die verschiedenen Einflussfaktoren der errechneten Messungenauigkeit durch weitere Entwicklungen des Messsystems minimiert oder korrigiert werden können, bleibt abzuwarten.

#### 4.5 Zusammenfassung und Bewertung der Durchführbarkeit der Methode

Das hier vorgestellte indirekte Messverfahren mit ortsfestem Streifentarget basiert auf dem in Kapitel 2.3 vorgestellten ProHERMES-Messsystem. Es nutzt ein diffus reflektierendes Target, auf dem die reflektierte Helligkeitsverteilung fokussierender Heliostate mit einer CCD-Kamera aufgenommen wird. Anschließend erfolgt die Kalibration der Messbilder durch Abgleich der Grauwerte mittels einem direktmessenden Radiometer. Statt jedoch einen Schwenkbalken durch den Fokus eines Receivers zu fahren, führt man in diesem Fall den Fokus über ein ortsfestes Target. Es handelt sich demnach um ein sehr einfaches und solides Messsystem, weil es auf bewegte Teile verzichtet und ein hohes Maß an Automatisierung erzielt werden kann.

Die beschriebenen Simulationen erlauben die zu erwartende Messungenauigkeit für örtlich aufgelöste Ergebnisse der Strahlungsflussdichte bei einer hohen Anzahl von Heliostaten auf ca.  $\pm 8-9\%$  zu begrenzen. Den mit Abstand höchsten Beitrag zur Messungenauigkeit stellt dabei der Fehler durch unzureichende Nachführung der Heliostaten dar. Für kommerzielle Anlagen wird mit bedeutend geringerem Getriebspiel gerechnet. Bei optimalem Tracking ist es deshalb möglich, die Messungenauigkeit sogar bis auf  $\pm 5-6\%$  zu reduzieren. Demnach ist in diesem Fall die Messung der Strahlungsflussdichteverteilung mit dem Fixed-Bar-Scan-Messverfahren gut möglich. Für die Messung der Receiver-Eintrittsleistung beträgt die wahrscheinlich zu erwartenden Messungenauigkeit sogar nur  $-4,3\% \dots +3,6\%$ .

Zur Realisierung des Messverfahrens benötigt man lediglich eine CCD-Kamera mit entsprechenden Filtern und ein Streifentarget plus Radiometer. Diese befinden sich allerdings örtlich getrennt vom eigentlichen Receiver. Damit verbunden sind keinerlei Beeinflussungen des Receiver-Designs und äußerst geringe Störungen des Receiverbetriebs bei eventuellen anfallenden Wartungen. Diese Tatsache macht es sehr einfach nachrüstbar für bereits bestehende Turmkraftwerke und Projekte, die sich eventuell schon in der Bauphase befinden.

Es ist allerdings zu beachten, dass der Messvorgang bis zu knapp 7 Minuten andauern kann. Währenddessen benötigt man für eine erfolgreiche Messung nicht nur relativ stabile Bedingungen, wie sie in sonnenreichen Gegenden der Erde normalerweise zu finden sind. Sondern während des gesamten Zeitraums ist die thermische Leistung des Receivers auch um 20% gemindert. Dies bedeutet zum einen, dass der Turm sowie alle weiteren Bauteile, die

sich während des *Ab-scannens* von 20% der fokussierten Gesamtleistung im Strahlengang befinden, gesondert geschützt werden müssen. Zum anderen führt es bei häufigem Messen zu einer erheblichen Reduzierung der potentiellen Stromproduktion und damit zu Einnahmeausfällen.

Für die abschließende Bewertung des Messverfahrens steht die experimentelle Erprobung unter realistischen Bedingungen noch aus. Vorteilhaft ist, dass sich Betriebserfahrungen, die bereits mit dem ProHERMES-Messsystem gewonnen wurden, teilweise übertragen lassen. Zukünftig ist allerdings darüber nachzudenken, ob mit einer Kühlung des Targets und damit verbundenen höheren zulässigen Strahlungsbelastungen, Vorteile vor allem bezüglich der Messdauer zu erzielen sind.



## 5 Simulation gestützt durch indirekte Messungen auf dem Strahlungsschutz

Bei Kenntnis der Position der Sonne, der Heliostate und des Receivers, sowie deren Ausrichtung und geometrische Form, ist es grundsätzlich möglich den Gang von der Sonne ausgehender Strahlen über deren Reflexion auf den Spiegelflächen der Heliostate hinaus, bis hin zur Receiveroberfläche zu verfolgen. Kennt man zusätzlich die Leistungsverteilung der auf die Erde treffenden Strahlung und den Reflexionsgrad der einzelnen Spiegel, ist es unter Zuhilfenahme linearer Algebra möglich, die Verteilung der auf den Receiver fokussierten Strahlungsflussdichte zu bestimmen. Schon lange existieren dafür Strahlungsverfolgungsprogramme, sogenannte Ray-Tracing-Software. Einen Überblick gibt [Schwarzbözl, Belhomme et al. 2008]. Für die Bestimmung der korrekten Ausrichtung der Strahlungsvektoren nach deren Reflexion auf der Oberfläche der nicht idealen Spiegelfacetten, sind die exakte Formvermessung der Heliostate und deren Verformung unter Gravitationseinfluss jedoch weitere wichtige Größen, die gemessen und verarbeitet werden können müssen. Ein neues Ray-Tracing-Programm namens STRAL ist mittlerweile dazu in der Lage (siehe Kapitel 2.5).

Somit sind komplexe, vollständige Simulationen der Verteilung der sonst aufwändig zu messenden Strahlungsflussdichte erstmals möglich. Sie können ferner zur Kontrolle und Überwachung, sowie zur Bestimmung der Eingangsleistung von Receivern solarthermischer Kraftwerke, genutzt werden.

Allerdings ist aus Gründen der Betriebssicherheit, die einen störungsfreien und anwendungssicheren Betrieb des Receivers und damit des Kraftwerks vorschreibt, eine reine Simulation, ohne diese durch Messdaten zu verifizieren, nicht denkbar. Für die Vermeidung von Konzentrationsmaxima (engl. hot spots), aber auch für das Einhalten von Betriebsstrategien, ist es deshalb notwendig, parallel zu Simulationen die Strahlungsflussdichte an Referenzpunkten zu messen und die errechneten Simulationsdaten mit diesen zu überprüfen. Sofern das nötig ist, können auf diese Weise Simulationen an reale Verhältnisse angepasst werden, indem gewisse schwer zu ermittelnde Eingangsgrößen korrigiert werden. Dies steigert die Realitätstreue, wie aus den im Folgenden präsentierten Ergebnissen abzulesen ist.

Zur Bestimmung dieser sogenannten Stützstellen wurde im Rahmen der Untersuchung und Weiterentwicklung dieser Methode das aus dem ProHERMES-Messsystem bekannte Prinzip der indirekten Messung auf dem Strahlungsschutz angewandt. Das keramische Strahlungsschutzmaterial dient in diesem Fall als Target. Es weist jedoch weder eine perfekt homogene Oberfläche noch perfekt diffuse Reflexionseigenschaften auf. Die Erfassung und Korrektur dieser unvoreilhaftigen Eigenschaften ist aus diesem Grund eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung und Umsetzung des Messsystems.

### 5.1 Flussdichtemessungen auf dem Strahlungsschutz

Die weder vollkommen homogene noch ideal diffus reflektierende Oberfläche des Strahlungsschutzes stellt für die Durchführung der indirekten Messmethode mit Target und CCD-Kamera ein Problem für die Genauigkeit der Ergebnisse dar. Die sich daraus ergebenden Fehlereinflüsse sollten messtechnisch erfasst und korrigiert werden.

Für Testzwecke wurden unterschiedliche keramische Materialien verbaut. Teilweise wurden sie mit einem Mörtel überstrichen und mit aus der Ebene herausragenden Befestigungs-

hülsen (engl. ceramic cups) versehen. Der Aufbau des Strahlungsschutzes ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Außerdem sind starke Verschmutzungen des Materials in den Abbildungen zu erkennen. Sie führen zusätzlich zu einer sehr inhomogenen Verteilung des Reflexionsgrades.



**Abbildung 5.1:** Aufbau des inhomogenen Strahlungsschutzes des SolHyCo-Testaufbaus

Ohne die Inhomogenitäten der Messoberfläche zu korrigieren, würde man bei der Kalibration der Messbilder durch ein Radiometer an allen Stellen, die nicht denselben Reflexionsgrad wie das Material in der direkten Umgebung der Kalibrationsmessstelle aufweisen, einen dem Verhältnis des Reflexionsgrades entsprechenden Fehler machen. Daher ist ein Ausgleich der unterschiedlich stark reflektierenden Materialien vor der Kalibration notwendig. Dies soll, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben ist, durch eine Reflexions-Korrekturmatrix geschehen. Diese wird anhand der Verteilung des Reflexionsgrades auf der Strahlungsschutzoberfläche erstellt.

Weist ein Material zusätzlich nicht diffuse Strahlungseigenschaften auf, hat die Richtung der einfallenden Strahlung Einfluss auf die Verteilung der reflektierten Strahlungsleistung. Im vorliegenden Anwendungsfall kommt die Strahlung aus einem begrenzt variierenden Einfallswinkelgebiet, dem Heliostatenfeld. Die Reflexion wird von einem feststehenden Beobachtungswinkel aus gemessen, denn die Kameraposition im Feld verändert sich nicht. Umgekehrt wird häufig zur Messung des gerichteten Reflexionsgrades die Richtung der Einfallstrahlung konstant gehalten und der Beobachtungswinkel verändert. Da bei der Bestimmung des Reflexionsgrades im Allgemeinen das Kommutativgesetz gilt, ist es also prinzipiell möglich, die Winkelabhängigkeit der Reflexion der verbauten Materialien unter Verwendung von z.B. einem Gonioreflektometer zu untersuchen (vgl. [Nettlau, Pfänder et al. 2008]). Eine orts aufgelöste Vermessung ist allerdings nicht möglich und eine stichpunktartige Messung direkt am Strahlungsschutz technisch nur schwer zu realisieren.

Die Abweichungen der Reflexionseigenschaften des Materials vom idealen Lambertschen Verhalten im begrenzten Winkelbereich der Einstrahlung können allerdings aufgrund mehrerer Annahmen vernachlässigt werden:

- Das keramische Material ist unstrukturiert und weißt deshalb keine ausgeprägte Vorzugsrichtung des Reflexionsgrades auf. Es ist eher diffus reflektierend als gerichtet.
- Der Einfallswinkel der Bestrahlung ist nicht nur stark begrenzt, sondern immer auch sehr ähnlich.
- Der Kalibrationsfaktor der Messfläche wird mit einem Korrekturfaktor für Winkelabhängigkeit versehen, der für das ProHERMES Messsystem entwickelt wurde. Für extreme Einstrahlwinkel ist somit eine geeignete Korrektur vorhanden. [Ulmer 2004]

Die Gültigkeit dieser Annahmen wurde in den folgenden Auswertungen untersucht und nachgewiesen.

### 5.1.1 Korrekturen der Messbilder

Verschiedene Korrekturen der Messbilder müssen vorgenommen werden. Dazu zählen einige standardmäßige Korrekturen, wie sie praktisch bei jeder optischen Messmethode durchgeführt werden. Zu den durchgeführten Bildkorrekturen siehe [Ulmer 2004]. Zu Dunkelstrom bzw. Hot-Pixel-Korrekturen, sowie Shading- oder Flatfield-Korrekturen siehe auch [Moritz 2003]. Zusätzlich müssen hier aber noch die unvoreilhaftesten Eigenschaften der Messoberfläche erfasst und entsprechend korrigiert werden.

#### Inhomogenitäten der Messoberfläche und deren Korrekturen

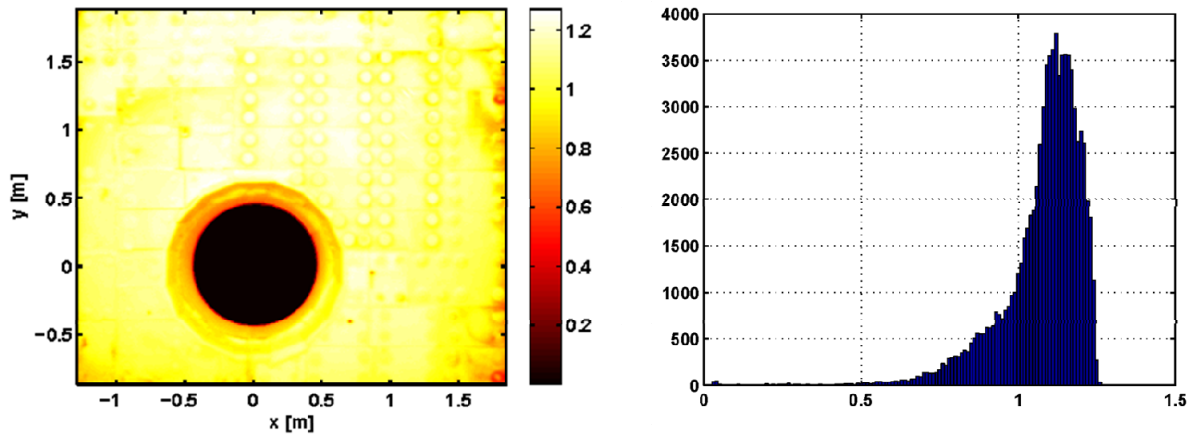
An mehreren Tagen, bei sich stark unterscheidenden Wetterlagen, wurden zahlreiche Bilder des Strahlungsschutzes aufgenommen, wenn dieser nicht von der Sonne bestrahlt wurde und ohne dabei Strahlung auf diesen zu konzentrieren. Bei der Ausleuchtung der Fläche handelte es sich demnach jeweils um eine näherungsweise indirekte bzw. diffuse Bestrahlung. Wäre die Verteilung des Reflexionsgrades des verbauten keramischen Materials homogen, müssten in diesem Fall die Belichtungsintensitäten, nach entsprechender Korrektur der Rohbilder (siehe oben), über der gesamten Messoberfläche identisch sein. Wie in Abbildung 5.1 zu erkennen ist, entspricht dies nicht der Realität.

Zur Korrektur der Inhomogenität der Messoberfläche wird aus den erwähnten Einzelbildern jeweils der den Strahlungsschutz abbildende Bereich herausgeschnitten und auf Eins normiert. Anschließend erstellt man aus allen normierten Bildern ein Mittelwertbild, die sogenannte Hintergrund-Korrekturmatrix. Diese wird zur Korrektur der Messbilder verwendet, indem man die Bildmatrix pixelweise durch die Korrekturmatrix dividiert. Auf welchen Wert die Messbilder nach deren Korrektur normiert sind, ist allerdings völlig unbedeutend. Ein beliebiger Faktor wird in der anschließenden Kalibration der Messoberfläche wieder herausgerechnet.

Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmte Korrekturmatrix ist in Abbildung 5.2 (links) dargestellt. Sie weist eine konsistente Verteilung gegenüber den Beobachtungen aus Abbildung 5.1 auf. Der arithmetische Mittelwert der Korrekturmatrix ist logischerweise Eins

( $\bar{m} = 1$ ), da zur Erzeugung des Mittelwertbildes normierte Bilder verwendet wurden. Am rechten Rand der Matrix, sowie in der Umgebung der konusförmigen Eintrittsöffnung, sind jedoch vergleichsweise niedrige Werte zu beobachten. Dies ist hauptsächlich der Grund dafür, dass es sich in der in Abbildung 5.2 (rechts) dargestellten Häufigkeitsverteilung der Korrekturwerte entsprechend der Pixelzahl um eine linksschiefe Verteilung handelt.

Die Ursache für das dunkle Erscheinen des Konus liegt darin, dass in diesem Fall ein strukturiertes Material mit nicht annähernd diffusen Reflexionseigenschaften verwendet wurde. Durch seine fluchtende Ausrichtung reflektiert dieser Bereich deshalb nur gering in Richtung der Kameraposition. Am Rechten Rand des Bildes konnte eine sehr intensive Verschmutzung des Strahlungsschutzmaterials nach dessen Installation beobachtet werden. Der Grad der Verschmutzung veränderte sich darüber hinaus mit der Zeit, wodurch sich auch die Reflexionseigenschaften änderten. Aufgrund dieser Tatsache und wegen der ungünstigen Reflexionseigenschaften des Konus, werden die Messergebnisse beider Bereiche als nicht vertrauenswürdig ausgeschlossen.



**Abbildung 5.2:** Reflexions-Korrekturmatrix [-] (links); Histogramm der Verteilung der Korrekturwerte (rechts)

Ob die tages- und uhrzeitabhängigen Klimabedingungen die genutzte indirekte Bestrahlung derart beeinflussen, dass für jede Messung jeweils zeitgleich eine Korrekturmatrix ermittelt werden muss, oder ob statt dessen eine gemittelte Matrix für alle Messungen verwendet werden darf, soll anhand der prozentualen Standardmessunsicherheit jedes Pixels der Einzelbilder geklärt werden. Sie errechnet sich für jedes Pixel mit den Koordinaten  $i,j$  nach [Sachs 2004], wie folgt:

Es wurden  $n$  statistisch unabhängige Beobachtungen ( $n > 1$ ) für jedes Pixel mit der Position  $i,j$  im Bild durchgeführt. Der Schätzwert  $\overline{GW}$  des wiederholt gemessenen Grauwertes ist demnach der arithmetische Mittelwert der einzelnen beobachteten Werte  $GW$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ).

$$\overline{GW}_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n GW_{i,j}(k) \quad (5.1)$$

Die Varianz der zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung wird durch die empirische Varianz  $s^2(GW)$  der Werte  $GW$  geschätzt, die gegeben ist durch:

$$s_{i,j}^2(GW_{i,j}) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (GW_{i,j}(k) - \overline{GW}_{i,j})^2 \quad (5.2)$$

Die dem Schätzwert beizuordnende Standardmessunsicherheit  $u(\overline{GW})$  ist die empirische Standardabweichung des Mittelwertes:

$$s_{i,j}^2(\overline{GW}_{i,j}) = \frac{s_{i,j}^2(GW_{i,j})}{n} \quad (5.3)$$

$$u_{i,j}(\overline{GW}_{i,j}) = s_{i,j}(\overline{GW}_{i,j}) \quad (5.4)$$

Die prozentuale Standardmessunsicherheit  $e$  ergibt sich damit weiter zu:

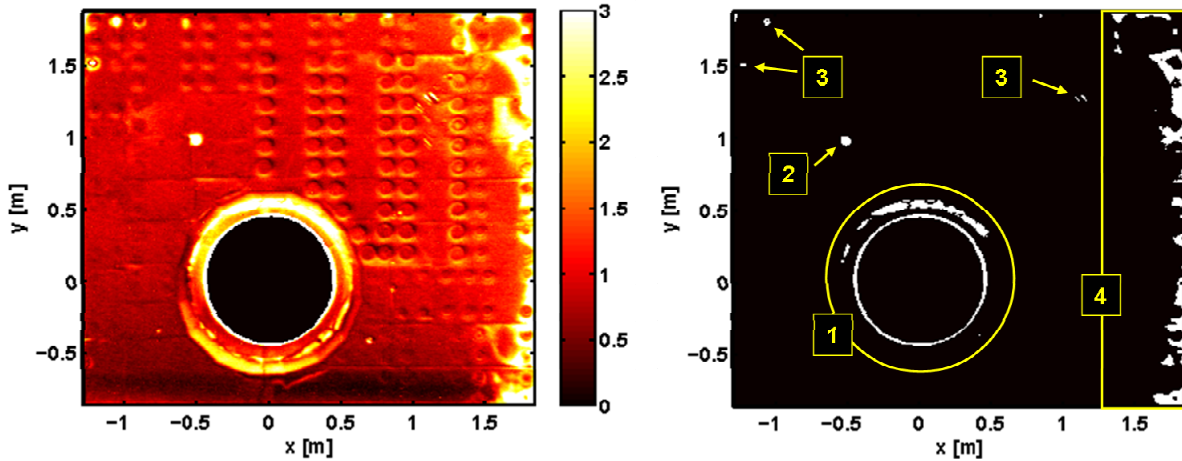
$$e_{i,j}(\bar{q}) = \frac{u_{i,j}(\overline{GW}_{i,j})}{\overline{GW}_{i,j}} \cdot 100 \quad (5.5)$$

Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung 5.3 (links) zu sehen. Zur Interpretation kann die in Abbildung 5.3 (rechts) abgebildete logische Matrix dienen. Ihre Werte betragen 1 (weiß), wenn die prozentuale Standardmessunsicherheit des Korrekturwertes an der entsprechenden Positionen  $i, j$  größer als 2% ist. Sonst beträgt ihr Wert 0 (schwarz). Es ist ersichtlich, dass es nur wenige Stellen sind, an denen die Abbildung weiß gefärbt ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Messunsicherheit für den Großteil der Korrekturmatrix kleiner als 2% ist. Des Weiteren entsprechen die weiß markierten Stellen in Abbildung 5.3 (rechts) einzelnen Bildbereichen, die aufgrund von bekannten Fehlereinflüssen bei der Aufnahme der Einzelbilder und Veränderungsprozessen des Strahlungsschutzes eine erwartungsgemäß hohe Standardabweichung aufweisen. Dabei handelt es sich um:

- (1): die konusförmige Eintrittsöffnung des Receivers
- (2): das Kendall-Radiometer, das erst im Laufe der Untersuchung installiert wurde
- (3): Verschmutzungen auf dem Objektiv oder auf dem CCD-Chip der Kamera
- (4): die stark verschmutzte Randbereiche des Strahlungsschutzes

Bei Ausschluss bzw. Interpolation der detektierten Fehlstellen kann demnach mit der gemittelten Matrix aus Abbildung 5.2 (links) für alle Messungen gearbeitet werden, anstatt für jeden Messtag gesondert eine Korrekturmatrix erstellen zu müssen. Man korrigiert dabei den Grauwert durchschnittlich mit einem Fehler, der zu 68% unter 1,5% und zu 95% unter 2% liegt.

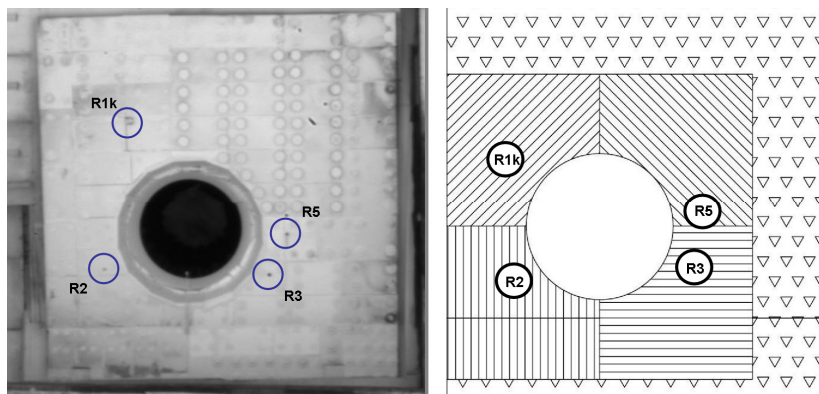
Es sei abschließend noch darauf hingewiesen, dass sich mit der Zeit das keramische Material durch verschiedene Alterungsprozesse verändert, wodurch sich auch Änderungen der Inhomogenitäten bzw. deren Verteilung ergeben. Aus diesem Grund sollte die Erstellung der Hintergrund-Korrekturmatrix sowie die Kalibration der Messebenen regelmäßig wiederholt werden [Ulmer, Lüpfer et al. 2004].



**Abbildung 5.3:** Prozentuale Standardmessunsicherheit der Einzelbilder zur Erzeugung der Hintergrund-Korrekturmatrix (links); Logische Matrix, ihre Werte betragen 1 (weiß), wenn die prozentuale Standardabweichung an der entsprechenden Positionen der Korrekturmatrix größer als 2% ist. Sonst beträgt ihr Wert 0 (schwarz).

### 5.1.2 Kalibration der Meso­berfläche

Kalibration bedeutet in diesem Fall eine Relation zwischen den aufgenommenen Grauwertbildern und realer Flus­sdichte für einen mehrtägigen Gültigkeitsbereich herzustellen. Dazu müssen Radiometer in die Oberfläche des Strahlungsschutzes eingebracht werden. Aufgrund der stark divergierenden Reflexionseigenschaften wurden vier Radiometer verbaut (siehe Abbildung 5.4 (links)). Die sich daraus ergebenden Kalibrationskurven erlauben eine gewisse Kontrolle über die Konsistenz der vier verschiedenen Bildbereiche, die in Abbildung 5.4 (rechts) schematisch dargestellt sind. Nähere Beschreibungen und Spezifikationen zu den einzelnen Radiometern finden sich in Tabelle 5.1.



**Abbildung 5.4:** Position der Radiometer auf dem Strahlungsschutz (links); Aufteilung der Meso­berfläche in vier sich unterscheidende Bildbereiche (rechts)

**Tabelle 5.1:** Übersicht über die in Abbildung 5.4 aufgeführten Radiometer.

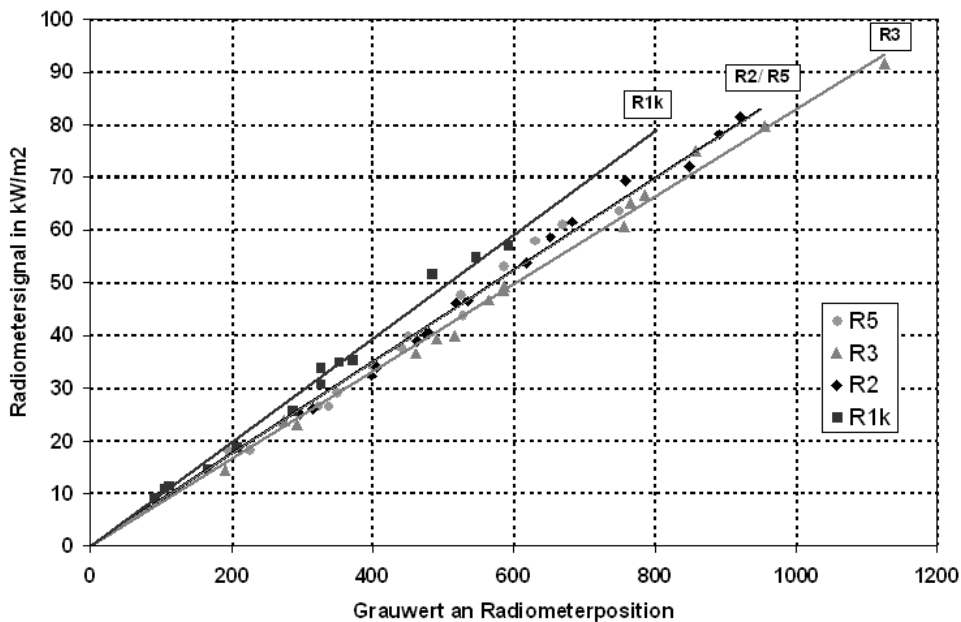
Name	Beschreibung	Typ	Dimension	Kalibrationsfaktor [kW/m <sup>2</sup> /mV]	<sup>4</sup> Position	
					x [mm]	y [mm]
R1k	<sup>1</sup> Kendall- (MK VIII)	88701A	A: 0,2 cm <sup>2</sup> .	<sup>3</sup> K <sub>calib</sub>	-520	943
R2	<sup>2</sup> Gardon-Radiom. Nr. 1	8103	D: 1/4"	124,50	-766	-362
R3	<sup>2</sup> Gardon-Radiom. Nr. 2	7183	D: 1/4"	84,23	709	-401
R5	<sup>2</sup> Gardon-Radiom. Nr. 3	6646	D: 5/8"	153,96	867	-46

<sup>1</sup> zu Kendall Absolute Cavity-Radiometer siehe [Ulmer 2004]; <sup>2</sup> zu Gardon-Radiometer siehe: <http://www.vatell.com>; <sup>3</sup> siehe Kalibration Kendall-Radiometer (Anhang D); <sup>4</sup> Mit Koordinatenursprung in der Aperturmitte

Das Verfahren der Kalibration der Messoberfläche wird an einem gesonderten Kalibrationsstag durchgeführt. Nacheinander werden die Heliostate der CESA-1-Turmanlage auf den Receiver fokussiert und jeweils Messungen durchgeführt. Die etwa 20 Aufnahmen bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken werden, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, korrigiert. Im Anschluss werden die Grauwerte an der jeweiligen Radiometerposition durch die umliegenden Pixel interpoliert und schließlich als Mittelwert einer 3×3-Matrix an dieser Position ausgelesen. Die korrespondierenden Radiometerwerte können aus der Messdatenerfassung sekundenweise ausgelesen werden. Der ins Verhältnis gesetzte Radiometerwert wird aus den drei Werten vor, während und nach dem Zeitpunkt der Messung, angelehnt an die Simpson-Regel bestimmt.

Das Auftragen dieser Wertepaare in einem Graph ergibt die Kalibrationskurve. Sie hat, wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist, für jedes Radiometer einen leicht unterschiedlichen Verlauf. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Werte jeweils gut durch eine Regressionsgerade durch den Nullpunkt approximiert werden können. Die Steigung dieser Geraden ergibt den gesuchten Kalibrationsfaktor. Er ist in Tabelle 5.2 für jedes Radiometer aufgeführt. Die Werte liegen zwischen 0,0830 kW/m<sup>2</sup>/GW für Radiometer Nr.3 und 0,0987 kW/m<sup>2</sup>/GW für das Kendall-Radiometer (R1k).

Gründe für die teils starken Abweichungen beruhen auf sich unterschiedlich auswirkenden Fehlermechanismen. Diese sind z.B. die sich leicht unterscheidenden Bildbereiche in Abbildung 5.4 (rechts) und Instabilitäten der Form und Position des Brennflecks, die durch diskontinuierliche Nachführung der Heliostaten im 4-Sekunden-Takt und sich ändernde Windlasten hervorgerufen werden. In der Steigung der Geraden sind außerdem die Positioniergenauigkeit der Radiometerposition von ± 1 Pixel im Bild, die eine Unsicherheit von etwa ± 1% des Flussdichtewertes verursacht, sowie die Unsicherheiten des Radiometerwertes durch den Rauschanteil des Signals und manuelles Auslesen enthalten [Ulmer 2004].



**Abbildung 5.5:** Kalibrationsgeraden des indirekten Messverfahrens angewandt auf dem Strahlungsschutz (Gerade zu Daten von R5 wird durch die von R2 verdeckt)

Des Weiteren ist zu beobachten, dass Radiometer, die näher an der Apertur sitzen, geringere Abweichungen zur linearen Regression aufweisen. Diese besitzen folglich eine geringere Messunsicherheit. Dies zeigt sich vor allem beim Kendall-Radiometer. Eigentlich ist das Kendall-Radiometer der exakteste Detektor für Strahlungsflussdichte. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei dessen Installation, Kalibrierung und Auslesung zahlreiche Unsicherheiten aufgetreten sind, die zu einer wesentlich höheren Messunsicherheit als ursprünglich angenommen geführt haben. Des Weiteren ist es, wie in Abbildung 5.4 zu sehen, an der ungünstigsten Stelle weit außen im Bereich niedriger Flussdichte installiert worden. Daraus resultiert eine hohe beobachtete Messunsicherheit für das Kendall-Radiometer. Aus diesem Grund wird es von weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

**Tabelle 5.2:** Daten zu den in Abbildung 5.5 gezeigten Kalibrationskurven

Name	Geradensteigung (Kalibrationsfaktor) [kW/m <sup>2</sup> /GW]	Regressionsfaktor r <sup>2</sup>
R1k	0,0987 ± 0,0013	0,9840
R2	0,0874 ± 0,0007	0,9931
R3	0,0830 ± 0,0007	0,9922
R5	0,0875 ± 0,0011	0,9902
Kalibrationsfaktor:	0,0860 ± 0,0012	-



Der resultierende Kalibrationsfaktor wird letztlich aus dem arithmetischen Mittel der drei verbleibenden unabhängigen Steigungsfaktoren ermittelt. Er kann bei allen darauf folgenden Messungen verwendet werden, bis sich eine Änderung der Kameraeinstellungen oder eine merkliche Veränderung des Strahlungsschutzmaterials ergibt. Um den Einfluss der Degradation des Materials zu beschränken, ist die Kalibration der Messoberfläche jedoch regelmäßig zu wiederholen.

Der Vorteil dieser Offline-Kalibrationsmethode liegt in der deutlich reduzierten Unsicherheit bei der Bestimmung des Kalibrationsfaktors gegenüber einer Online-Kalibration, bei der für jede Messung das Bild mit dem zugehörigen Radiometerwert kalibriert wird. Außerdem kann mit der Kalibrationskurve die Linearität des Messsystems über den gesamten Messbereich überprüft werden. Der Nachteil der Online-Kalibration liegt in den beschriebenen Effekten der Winkelabhängigkeit des Materials und der spektralen Abhängigkeit des Kamerasignals. Beide Effekte haben einen Einfluss auf den Kalibrationsfaktor und müssen deshalb für Messungen mit Offline-Kalibration nach [Ulmer 2004] folgendermaßen korrigiert werden:

$$E = K \cdot C_f(\alpha) \cdot C_f(AM) \cdot GW \quad (5.6)$$

Mit:  $E$ : Bestrahlungsstärke

$K$ : Kalibrationsfaktor

$C_f(\alpha)$ : Korrekturfaktor für Winkelabhängigkeit vom Einstrahlungswinkel  $\alpha$

$C_f(AM)$ : Korrekturfaktor für spektrale Abhängigkeit von der Air mass ( $AM$ )

$GW$ : Ausgelesener Grauwert aus korrigierter Aufnahme

## 5.2 Ergebnisse der Messungen auf dem Strahlungsschutz und Vergleich mit dem Referenzmesssystem

Im Rahmen der Entwicklung des Messsystems wurden zahlreiche Datensätze ausgewertet. Unter anderem 20 Messungen des Kalibrationstages am 30.06.2010. Um eine Vergleichbarkeit mit dem Referenzmesssystem herstellen zu können, werden hier zwei Messzeitpunkte betrachtet, die Teil der SolHyCo-Messkampagne waren, und aus diesem Grund explizit ausgewertet und untersucht wurden. Daten zu diesen Messungen finden sich in Tabelle 5.3.

**Tabelle 5.3:** Daten zu den ausgewerteten Messungen

Datum, Uhrzeit der Messung	<sup>1</sup> $\varphi_s$ / <sup>2</sup> $\theta_s$	DNI	<sup>3</sup> Anz. Helios
	[°]	[W/m <sup>2</sup> ]	[-]
19.05.2010, 12:50 Uhr	131,2 / 48,8	939,8	46
23.06.2010, 12:48 Uhr	121,7 / 58,3	923,1	38

<sup>1</sup> Azimutwinkel der Sonne; <sup>2</sup> Elevationswinkel der Sonne; <sup>3</sup> Anzahl der Heliostate im Fokus

Erste Auswertungen auf dem Strahlungsschutz mit den im vorangegangenen Kapitel erläuterten Korrekturen liefern gute Ergebnisse. In Abbildung 5.6 (a) sind keine signifikanten Ungleichmäßigkeiten in den verschiedenen Bildbereichen zu erkennen. Der Verlauf der Höhenlinien der Strahlungsflussdichte ist relativ gleichmäßig und konform. Daraus ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen des Referenzsystems in Abbildung 5.6 (b), berücksichtigt man, dass sie in unterschiedlichen Ebenen gemessen wurden.

Es ist jedoch zu beobachten, dass die Keramikhülsen zur Befestigung des Schutzmaterials in Abbildung 5.6 (a) noch zu sehen sind. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Korrektur der Inhomogenität der Messoberfläche nicht einwandfrei funktioniert. Es lassen sich allerdings nur minimale Abweichungen der Werte an diesen Stellen von den sie umgebenden Bildbereichen beobachten. Die verbleibenden Abweichungen aufgrund der Inhomogenitäten des Strahlungsschutzes betragen unter  $\pm 1.5\%$ . Sie sind daher für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wegen der wesentlich höheren Messunsicherheit nicht von Bedeutung.

### **Versatz der Ebenen und dessen Korrektur**

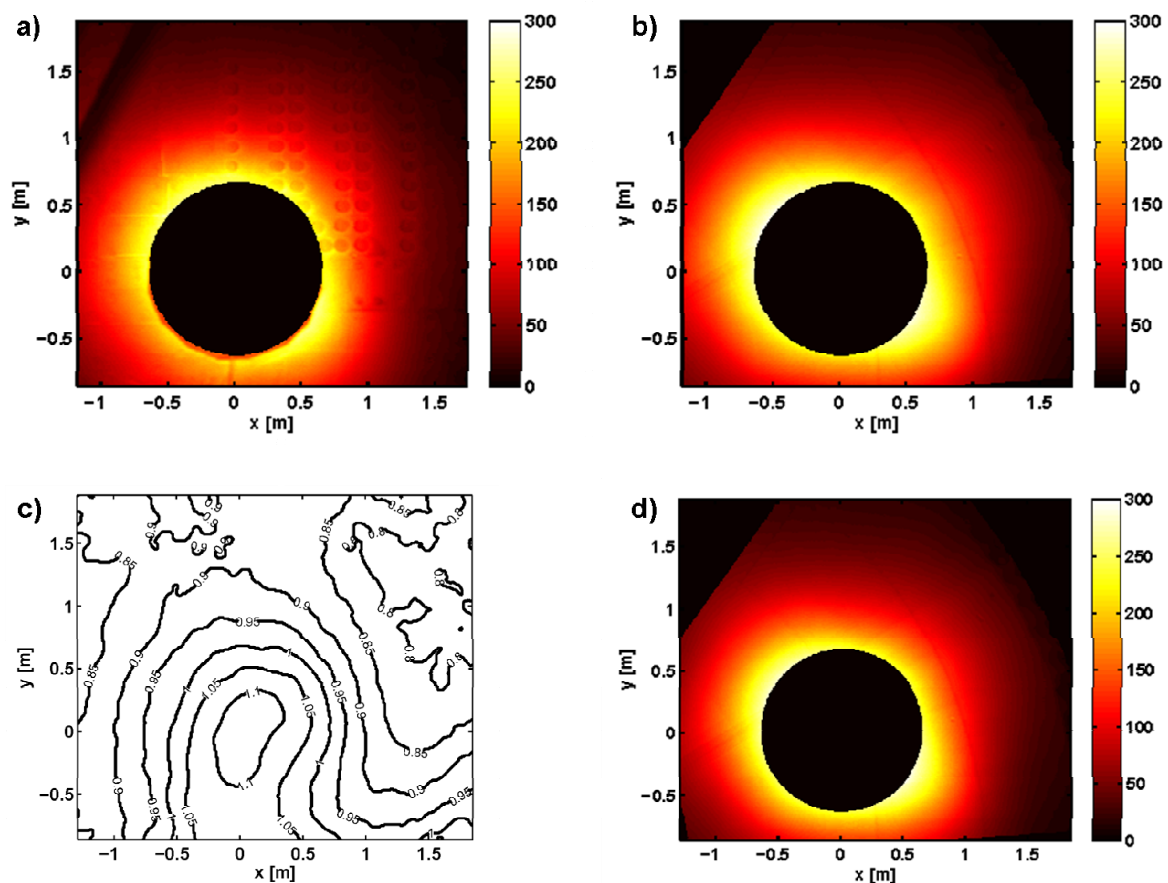
Um eine absolute Vergleichbarkeit der Ergebnisse herstellen zu können, muss der Versatz der Schwenkbalken- zur Strahlungsschutzebene von 300 mm ausgeglichen werden. Der Versatz kann anhand Abbildung 2.2 (rechts) in Kapitel 2.1.2 nachvollzogen werden. Dazu wurden Simulationen verwendet, die ausgiebig in Kapitel 5.3 erläutert sind. Diese wurden einerseits auf dem Strahlungsschutz und andererseits in der Schwenkbalkenebene ausgewertet. Aus den sich aus dem Versatz ergebenden Unterschieden der beiden Auswertungen wurde anschließend eine Verschiebungs-Korrekturmatrix erzeugt, indem das Verhältnis der Strahlungsschutz- zur Schwenkbalkenauswertung gebildet wurde. Durch pixelweise Multiplikation dieser Matrix mit Auswertungen des ProHERMES-Verfahrens werden diese quasi in die Strahlungsschutzebene gezogen (siehe Abbildung 5.6 (d)). Einzelne Ausreißer und unkonforme Bereiche der Verschiebungs-Korrekturmatrix, die sich dabei aus geringen Flussdichtekonzentrationen in den Randbereichen ergeben, wurden durch Gauß- und Median-Filter (Filtergröße:  $9 \times 9$  Pixel) geglättet. Die resultierende Korrekturmatrix für die Messung am 19.05.2010 um 12:50 Uhr ist in Abbildung 5.6 (c) zu sehen.

Da der Fokuspunkt der Strahlung auf einer Ebene hinter dem Receiver liegt, weil die Spiegelfacetten Fokallängen haben, die eigentlich für einen Receiver des CESA-1 Turms in ca. 80m Höhe ausgelegt sind, ist davon auszugehen, dass die Konzentration der Strahlung auf tiefer liegenden Ebenen zunimmt. Daraus ergibt sich, dass signifikant höhere Flussdichtewerte zur Mitte der Receiveröffnung hin zu erwarten sind, je weiter hinten sich die betrachtete Ebene befindet. Diese Überhöhung ist anhand der Höhenlinie der Verschiebungs-Korrekturmatrix, die in Abbildung 5.6 (c) dargestellt sind, deutlich zu erkennen. In Übereinstimmung mit den vorherigen Überlegungen, befinden sich die höchsten Korrekturwerte im Bildbereich, der das Zentrum der Receiveröffnung darstellt. Sie betragen dort bis ca. 1,2 und nehmen zum Rand hin ab. In den äußersten Randbereichen, die für spätere Auswertungen noch von Bedeutung sind, liegen die Werte bei ca. 0,85.

### Diskussion der Messunsicherheit

Da der Bereich der Apertur durch Messungen auf dem Strahlungsschutz nicht mit erfasst wird, liegen die Werte der Korrekturmatrix in dem für den Vergleich mit dem Referenzsystem relevanten Bildbereichen bei 0,85 bis 1,1 bzw. -15% bis 10%. Geht man davon aus, dass die Verschiebungsmatrix durch Fehlereinflüsse der Simulationen eine generelle Unsicherheit von 10% aufweist, werden die Ergebnisse der Schenkbalckenmessung mit einer zusätzlichen Messunsicherheit von -1,5%...1% belegt.

Nimmt man die Unsicherheit von  $\pm 1.5\%$  hinzu, die sich durch die verbleibenden Abweichungen aufgrund der Inhomogenitäten des Strahlungsschutzes ergeben, steigert sich demnach die von [Amsbeck, Denk et al. 2010] ermittelte Messunsicherheit von -5.9%...+ 5.4% auf -6,3%...+5,7%.



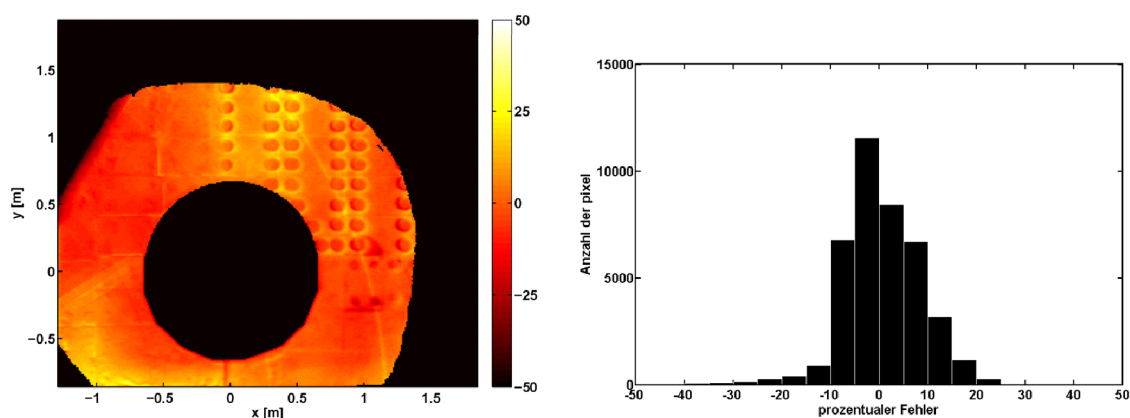
**Abbildung 5.6:** Messung 19.05.2010, 12:50 Uhr: Ergebnis in  $\text{kW/m}^2$  für indirekte Messung auf dem Strahlungsschutz (a); Messergebnis in  $\text{kW/m}^2$  der Schwenkbalkenmethode (b); Verschiebungs-Korrekturmatrix dargestellt in Höhenlinien [-] (c); versatz-korrigiertes Messergebnis in  $\text{kW/m}^2$  der Schwenkbalkenmethode

## Ergebnisse und Vergleich der Messungen

Mit einer entsprechenden Korrektur des Ebenenversatzes wird eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse möglich. In Abbildung 5.7 (links) ist die prozentuale Abweichung der Messergebnisse auf dem Strahlungsschutz zu den versatz-korrigierten Messungen des Referenzsystems ProHERMES für den 19.05.2010 dargestellt. Das in Abbildung 5.7 (rechts) zu sehende Histogramm gibt Aufschluss über die Verteilung der Häufigkeit der Abweichungen entsprechend der Pixelzahl. Es ist zu erkennen, dass die Verteilung annähernd normalverteilt ist. Entsprechend erlaubt sich die Angabe der Messabweichung durch Mittelwert und Standardabweichung. Dieselbe Beobachtung ist auch für die zweite Auswertung zu machen (siehe Abbildung B.1). In Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse für die beiden genannten Messungen zusammengefasst. Sie liegen für die Messung vom 19.05.2010 zu 86% unter  $\pm 8\%$  und für den 23.06.2010 unter 6.1%.

In Abbildung 5.7 (links) ist außerdem zu sehen, dass die Bereiche, die betragsmäßig höhere Werte als 10% aufweisen, in Umgebung der Befestigungshülsen und am linken äußeren Bildrand zu finden sind. Letztlich weichen die für das Messsystem interessanten Bereiche in der Nähe der Receiveröffnung nicht sehr stark von den Referenzmessungen ab. Sie gehören größtenteils zu den für den 19.05.2010 ermittelten 54,9% der Messwerte die innerhalb der Messunsicherheit des ProHERMES-Messsystems liegen (siehe Rating A, Tabelle 5.4). Dieser Anteil erhöht sich auf 75,7% (Rating B), legt man die oben errechnete gesteigerte Messunsicherheit zugrunde

Dies zeigt, dass mit den durchgeführten Korrekturen bis zu einem gewissen Grad, auch ohne Korrektur der Winkelabhängigkeit des nicht ideal diffus reflektierenden keramischen Materials, Messungen mit der indirekten Methode auf dem Strahlungsschutz möglich sind. Die geringe mittlere Abweichung der Messergebnisse (siehe  $\bar{m}$ , Tabelle 5.4) weist außerdem darauf hin, dass die Ermittlung des Kalibrationsfaktors aus dem arithmetischen Mittel der sich leicht unterscheidenden Steigungsfaktoren der Radiometer 2, 3 und 5 zulässig ist.



**Abbildung 5.7:** Messung 19.05.2010, 12:50 Uhr: Prozentuale Abweichung der Messergebnisse auf dem Strahlungsschutz von versatz-korrigierter Schwenkbalken-Messung (links); Verteilung der Häufigkeit des Messfehlers (rechts)

**Tabelle 5.4:** Fehlerbetrachtung des Vergleichs der Messergebnisse durch indirekte Messung auf dem Strahlungsschutz und Referenzmessungen mit der Schwenkbalkenmethode

Datum, Uhrzeit der Messung	<sup>1</sup> $\bar{m}$	<sup>2</sup> $s$	min.	max.	<sup>3</sup> Rating A	<sup>4</sup> Rating B
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
19.05.2010, 12:50 Uhr (siehe Abbildung 5.7)	0,6	8,0	-41,7	33,6	54,9	75,7
23.06.2010, 12:48 Uhr (siehe Abbildung B.1)	-1,8	6,1	-24,6	27,6	69,0	82,7

<sup>1</sup> Mittelwert; <sup>2</sup> Standardabweichung; <sup>3</sup> Anteil der Messwerte, die innerhalb der Messunsicherheit der Schwenkbalkenmessung liegen (-5,9%...+5,4%); <sup>4</sup> Anteil der Messwerte, die innerhalb der gesteigerten Messunsicherheit liegen (-6,3%...+5,7%)

### 5.3 Simulation der Flussdichteverteilung mit STRAL

Solare Turmkraftwerke sind komplexe optische Systeme mit einer hohen Anzahl an Freiheitsgraden. Zur Analyse des Betriebsverhaltens und aus Gründen der Betriebsoptimierung werden daher computergestützte Simulationsmodelle verwendet. Das DLR nutzt eine Reihe von Simulationsprogrammen, die auf unterschiedlichen Modellansätzen basieren. Das Programm STRAL ist eine junge DLR-Entwicklung zur hochgenauen Flussdichteberechnung basierend auf gemessenen Oberflächengeometrien von Heliostaten (siehe Kapitel 2.5).

#### 5.3.1 Eingangsdaten der Simulationen und deren Bereitstellung

Um die auftretenden Effekte bei der Verfolgung der Strahlen auf dem gesamten Weg von der Sonne bis zum Auftreffen auf dem Receiver möglichst realistisch beschreiben zu können, müssen eine Vielzahl physikalischer Daten gemessen und bereitgestellt werden. Die meisten dieser Daten werden während des Betriebs heutiger Solaranlagen ohnehin aufgezeichnet, wie etwa die solare Einstrahlung. Andere müssen für eine erfolgreiche Simulation vorab gemessen werden. Dabei handelt es sich z.B. um die exakte Spiegelform der zum Einsatz kommenden Heliostate oder den gerichteten Reflexionsgrad der Spiegelfacetten.

##### 5.3.1.1 DNI-Messungen

Die Messung der durch atmosphärische Verluste abgeschwächten Sonneneinstrahlung am Standort solarthermischer Kraftwerke ist üblich, um die Effizienz aller zum Einsatz kommenden Teilsysteme bewerten und den ordnungsgemäßen Betrieb überwachen zu können.

Als Eingangsparameter zur Simulation von Strahlungsflussdichteverteilungen spielt die Genauigkeit der DNI-Messung eine wichtige Rolle, weil sie sich direkt proportional auf die Höhe der berechneten Verteilung auswirkt. Aus diesem Grund beeinflusst sie auch direkt proportional das Ergebnis der zu bestimmenden Eingangsleistung des Receivers. Die im Zuge dieser Arbeit bereitgestellten Messwerte wurden mit Hilfe von Rotating Shadowband Pyranometer (RSP) aufgezeichnet. Am Standort befand sich außerdem eine hoch präzise Meteorstation, die eine Korrektur der RSP-Daten erlaubte. Nach [Geuder, Janotte et al. 2009] erreichen die Daten damit eine durchschnittliche Messunsicherheit von  $\pm 3\%$ .

### 5.3.1.2 Angabe der Sunshape

Die räumliche Verteilung der von der Sonne kommenden Strahlung über dem Raumwinkel wird als Sunshape bezeichnet. Sie ist natürlich rotationssymmetrisch und ihre Strahldichte nimmt zum Rand ab. Dieser Effekt wird als Randverdunklung (engl. limb darkening) bezeichnet [Winter, Sizmann et al. 1991]. Der durchschnittliche Halbwinkel der Sonnenscheibe beträgt  $\alpha = 4,65$  mrad. Des Weiteren führen Streuung und Absorption der Solarstrahlung in der Atmosphäre dazu, dass sich die Sunshape aufweitet. Deshalb hat man an manchen Tagen den Eindruck, von der Erde aus eine größere Sonne zu sehen als an Anderen. Folglich kommt ein nicht unbedeutender Anteil der gemessenen Direktstrahlung von außerhalb der eigentlichen Sonnenscheibe mit dem oben genannten Halbwinkel. Diese sogenannte Zirkumsolarstrahlung hängt stark von den jeweiligen atmosphärischen Verhältnissen ab und ist somit für jeden Tag unterschiedlich. Da es sich bei solarthermischen Kraftwerken um parabolisch gekrümmte Spiegelsysteme handelt, kann aber nur die parallel in Richtung der Parabelachse einfallende Strahlung, plusminus einem gewissen Akzeptanzwinkel, auf den Brennpunkt reflektiert werden, an dem sich der Absorber befindet. Der zulässige Akzeptanzwinkel hängt dabei vom Abstand zwischen Absorber und Reflektor und der Größe der Absorberstruktur ab.

Der Anteil der Zirkumsolarstrahlung an der gesamten Direktstrahlung wird als CSR-Wert (engl. circumsolar ratio) bezeichnet und ist folgendermaßen definiert [Lemperle 1982]:

$$CSR = \frac{C}{C + S} \quad (5.7)$$

Mit:  $C$ : Zirkumsolarstrahlung  
 $S$ : Strahlung der Sonnenscheibe

Den hier vorgestellten Ergebnisse liegt jeweils eine Sunshape einer standardisierten CSR5-Verteilung ( $CSR = 5\%$ ) zugrunde. Diese ist bei einer durchschnittlichen Einstrahlung von über  $800\text{W/m}^2$  die am wahrscheinlichsten zu erwartende Verteilung, wie [Neumann, Witzke et al. 2002] gezeigt haben.

### 5.3.1.3 Bestimmung des Sonnenstandes

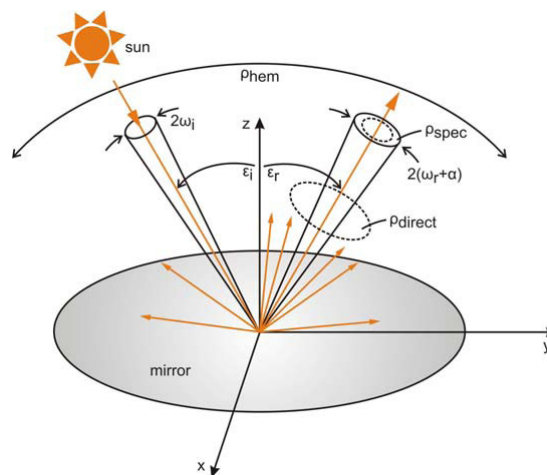
Ein Algorithmus des National Renewable Energy Laboratory (NREL) ermöglicht die Berechnung des Elevations- sowie Azimutwinkels der Sonne im Zeitraum der Jahre -2000 bis 6000 mit einer Unsicherheit von  $\pm 0.0003^\circ$  ( $\pm 5,2$   $\mu\text{rad}$ ) [Reda and Andreas 2004].

### 5.3.1.4 Reflexionsgrad der Spigelfacetten.

Entscheidend für die Qualität eines Kollektorspiegels ist der Anteil der Solareinstrahlung, der auf den Receiver reflektiert werden kann. Dieser wird als direkter Reflexionsgrad  $\rho_{\text{direkt}}$  bezeichnet. Er setzt sich zusammen aus dem gerichteten Reflexionsgrad  $\rho_{\text{spec}}$  und der gerichteten Streuung innerhalb eines Akzeptanzwinkels  $\alpha$  (siehe Abbildung 5.8). Ein Akzeptanzwinkel von 25 mrad wird für CSP-Anwendungen vorgeschlagen [Meyen, Lüpfer et al. 2009].

Die Messung des direkten Reflexionsgrades im Feld kann mit dem tragbaren Devices & Services R15 Reflektometer<sup>8</sup> durchgeführt werden. Seine Apertur erlaubt Messungen bei 46, 25 und 15 mrad Akzeptanzwinkel. Die Auflösung beträgt 0,1% bei einer vom Hersteller angegebenen Wiederholgenauigkeit von 0,2% [Meyen, Fernandez et al. 2010].

Die Heliostate des CESA-1-Feldes besitzen eine durchschnittliche Reflektorfläche von ca. 40 m<sup>2</sup> in Form von mehreren silberbeschichteten zweiachsig gekrümmten Parabolspiegeln. Im Neuzustand besitzen sie einen direkten Reflektionsgrad in der Größenordnung von 94%. Aufgrund jahrelanger Einwirkung von Umwelteinflüssen degradiert die Beschichtung und es kommt zur Abnahme des Reflexionsvermögens. Der im Feld gemessene Spitzenwert lag direkt nach dem Waschen der Spiegelfacetten bei ca. 92%. Verschmutzungen auf der Konzentratoroberfläche absorbieren einen Teil der Strahlung und mindern darüber hinaus den Anteil der direkt reflektierten Strahlung. Einige Heliostate in sehr verschmutztem Zustand wiesen direkte Reflexionsgrade von lediglich 84% auf.



**Abbildung 5.8:** Definition der Reflexionsparameter [Meyen, Lüpfer et al. 2009]

Zur Messung des gesamten Heliostatfeldes wurden an vier verschiedenen Tagen jeweils zehn Punkte auf der Oberfläche der untersten Spiegelfacetten von 20 repräsentativen Heliostaten gemessen. Aus den Messwerten wurde über Mittelwertbildung der direkte Reflexionsgrad jedes Heliostaten ermittelt. Die dabei beobachtete geringe Standardabweichung lässt den Schluss zu, dass dieses Vorgehen legitim war. Die Messergebnisse sind in Tabelle C.3 zusammengefasst.

Die Ergebnisse des ersten Messtages lassen darauf schließen, dass sich im Feld weiter hinten befindende Heliostate höhere Reflexionsgrade aufwiesen. Diese waren auch zuletzt gereinigt worden. Dieser Trend kann bei den darauf folgenden Messungen nicht weiter beobachtet werden. Da weiterhin relativ geringe Streuungen der Heliostatwerte auftreten, wird im Weiteren nur mit einem einzigen Feldreflexionsgrad gearbeitet, was auch zu einer grundlegenden Vereinfachung beim Einlesen und Verarbeiten der Daten führt.

Im Zuge der Bestimmung des Feldreflexionsgrades wurde eine sehr geringe Messunsicherheit beobachtet. Sie liegt, außer für den Fall von sehr verschmutzten Heliostaten am

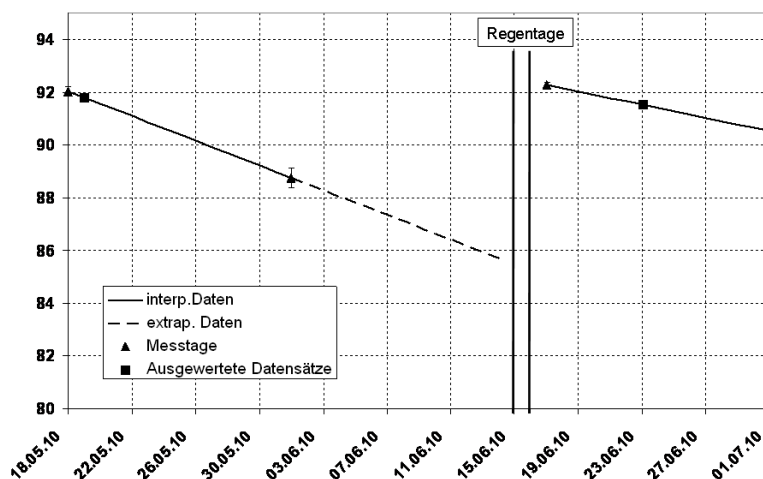
<sup>8</sup> Für Devices & Services R15 Reflektometer siehe: Devices and Services Company  
Webzugang: <http://www.devicesandservices.com>

01.06.2010, innerhalb der des Reflektometers, wie aus Tabelle 5.5 hervorgeht. Der Verlauf des Reflexionsgrades im Zeitraum der Messkampagne ist in Abbildung 5.9 gegeben.

**Tabelle 5.5:** Direkter Feldreflexionsgrad  $\rho_{\text{direkt}}$

<b>Messung:</b>	<b>18.05.2010</b>	<b>01.06.2010</b>	<b>17.06.2010</b>	<b>01.07.2010</b>
Mittelwert: $\bar{m}$ [%]	$92,1 \pm 0,2$	$88,8 \pm 0,4$	$92,3 \pm 0,1$	$90,5 \pm 0,1$

Start der Messkampagne war der 18.05.2010, nachdem am Vortag das Waschen aller Heliostatoberflächen abgeschlossen werden konnte. Die stetig zunehmende Verschmutzung der Heliostate durch Staubbelaugung wird, wie in Abbildung 5.9 zu sehen ist, durch eine lineare Interpolation der Daten bis zum nächsten Messtag am 01.06. approximiert. Die Verschmutzung lag für den genannten Zeitraum bei einer durchschnittlichen Abnahme des Reflexionsgrades von 0,23 Prozentpunkten pro Tag. Für den Zeitraum vom 17.06. bis 01.07. lag sie mit durchschnittlich 0,13 Prozentpunkten pro Tag deutlich geringer. Zu sehen ist außerdem, dass für den Zeitraum vom 02. bis 14.06. keine vertrauenswürdigen Daten vorliegen, weil Regentage, die ebenfalls zum Waschen der Heliostaten genutzt werden, den Zeitraum zum Ende hin begrenzen. Dies führt dazu, dass der direkte Reflexionsgrad der Spiegelfacetten sprunghaft steigt. Aus diesem Grund wurden die Daten bis zum 14.06. mit entsprechender Unsicherheit extrapoliert. Im Rahmen der nachfolgenden Auswertungen wurde jedoch nicht auf sie zurückgegriffen. Für die beiden ausgewerteten Datensätzen vom 19.05. und 23.06.2010 ergaben sich schließlich Reflexionsgrade von 91,8% bzw. 91,5% (siehe Tabelle 5.6).



**Abbildung 5.9:** Verlauf des direkten Reflexionsgrades in [%] im Zeitraum der Messkampagne

Weil keine flächendeckende Messung des Reflexionsgrades möglich ist, kann im Allgemeinen der gemessene Feldreflexionsgrad nur mit einer gewissen Genauigkeit ermittelt werden. Des Weiteren ist, wie bereits erwähnt, die Messung der DNI nur mit  $\pm 3\%$  möglich. Daraus ergeben sich weitere Unsicherheiten für die Leistungsverteilung der Solarstrahlung vor und nach der Reflexion auf der Oberfläche der Spiegelfacetten. Hinzukommen Unsicherheiten durch Absorption der reflektierten Strahlung in der Atmosphäre zwischen den Konzentratoren (Heliostate) und dem Receiver, die innerhalb der verwendeten Codes nur teilweise abge-



bildet ist. Daher ist es legitim, den Feldreflexionsgrad leicht anzupassen, um Abweichungen in der Magnitude zwischen simulierter und gemessener Strahlungsflussdichte auszugleichen. Die Reflexionsgrade der hier präsentierten Simulationsergebnisse wurde in Übereinstimmung zu diesen Überlegungen ebenfalls um ca. 3% auf jeweils 89% korrigiert (siehe Tabelle 5.6).

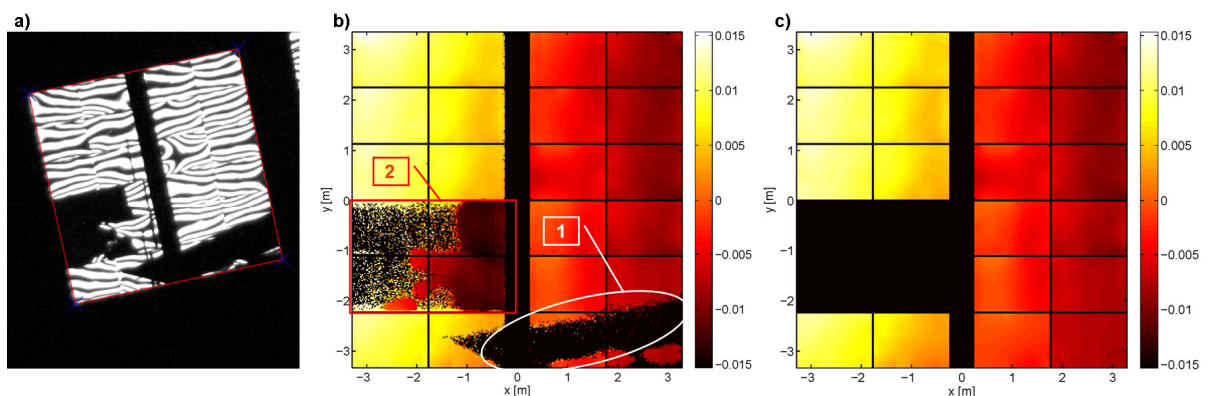
**Tabelle 5.6:** Ermittelter Feldreflexionsgrad und Korrekturwerte

Datum, Uhrzeit der Messung	$\rho_{\text{direkt}}$	<sup>1</sup> $\rho_{\text{direkt\_korr}}$
	[%]	[%]
19.05.2010, 12:50 Uhr	91,8 ± 0,6	89,0
23.06.2010, 12:48 Uhr	91,5 ± 0,6	89,0

<sup>1</sup> korrigierte Feldreflexionsgrad

### 5.3.1.5 Exakte Vermessung von Heliostatgeometrien

Mit Hilfe der in Kapitel 2.4 erläuterten Raster-Reflexionsmethode wurden die Spiegelfehler von 73 Heliostaten auf einer Gesamtfläche von 2.868m<sup>2</sup> in hoher Auflösung erfolgreich gemessen. Beim Messen kam es vereinzelt zu Abschattungen der Messfläche durch davorstehende Heliostaten, wie im mit (1) gekennzeichnet Bereich in Abbildung 5.10 (b) und in Abbildung 5.10 (a) zu erkennen ist. Dies kann normalerweise durch Anfahren einer geeigneten Position der vorderen Heliostatreihen verhindert werden. Diese waren jedoch aufgrund von Wartungsarbeiten während der gesamten Messkampagne nicht bewegbar. Die fehlenden Bereiche wurden weitestgehend interpoliert, wie anhand von Abbildung 5.10 (c) nachvollzogen werden kann. Insgesamt konnten auf diese Weise 4,5% der gesamten Messfläche für die Simulation brauchbar gemacht werden.



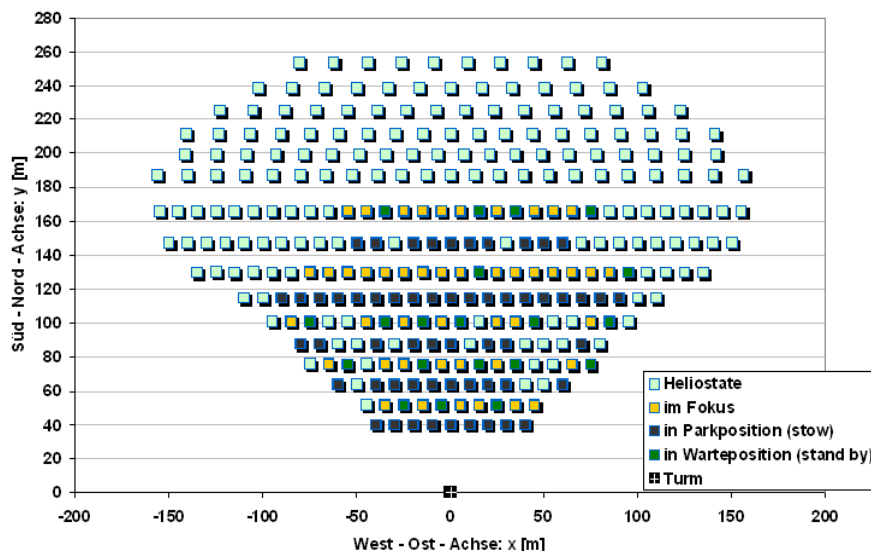
**Abbildung 5.10:** Heliostat H614: Im Heliostat gespiegeltes Streifenmuster (a); RRM- Messergebnis, dargestellt als Spiegelfehler in Azimutrichtung in mrad (b); Interpoliertes RRM-Messergebnis, dargestellt als Spiegelfehler in Azimutrichtung in mrad (c)

Des Weiteren ist in Abbildung 5.10 (b) zu sehen, dass Fehlstellen zwar korrigiert werden können, handelt es sich jedoch um ganze Facetten wie in Bereich (2), die anscheinend falsch gekantet wurden, defekt oder degradiert sind, werden diese Konzentratorflächen aus den Messergebnissen entfernt. Sie stehen demnach im Weiteren nicht als Reflexionsfläche für die Simulation zur Verfügung. Da die von diesen Bereichen reflektierte Strahlung jedoch ohnehin nicht auf den Receiver konzentriert wird, ist eine derartige Behandlung der Fehlerstellen angestrebt. Allerdings ist dies nur für eine sehr geringe Zahl von Heliostaten der Fall. Zusammen machen diese Bereiche lediglich 0,9% der ausgewerteten Gesamtfläche aus. Eine Übersicht der Messergebnisse aller 73 Heliostate gibt Tabelle C.4.

### 5.3.1.6 Heliostatenfeld

Die momentane Leistung jedes einzelnen Heliostaten hängt neben dem aktuellen Sonnenstand und seiner Position relativ zum Turm auch von der Position relativ zu den ihn umgebenden Heliostaten ab, da sich benachbarte Heliostate gegenseitig verschatten und blockieren können [Belhomme, Pitz-Paal et al. 2009].

Zusätzlich zu den Heliostaten, die während des Messvorgangs auf den Receiver gerichtet waren, ist es demnach notwendig alle weiteren Heliostate, die zum Blockieren oder Abschatten geführt haben können, in die Simulation miteinzubinden. Eine Übersicht für die Messung vom 19.05.2010, 12:50 Uhr gibt Abbildung 5.11. Bezüglich der Wahl der Heliostate ist zu beachten, dass die Messung vor dem solaren Mittag (ca. 14 Uhr, Ortszeit) gemacht wurde. Die Sonne steht zu diesem Zeitpunkt also noch östlich der Turmanlage. Aus diesem Grund sind etwa die Heliostate in Warteposition nur in östlicher Position zu den sie umgebenden Heliostaten in die Simulation eingebunden.



**Abbildung 5.11:** Messung: 19.05.2010, 12:50 Uhr, Konfiguration des Heliostatfeldes (STRAL)

### 5.3.2 Bestimmung der Aimpoints

Aus Messungen der exakten Aimpoints mehrerer Heliostate im Tracking-Modus, ließ sich feststellen, dass sie von ihren theoretischen Positionen, die mit Hilfe ausgelesener Winkel aus der Ansteuerungselektronik der Heliostate errechnet wurden, stark abwichen. Die Ursache für die hohen Abweichungen der Brennfleckkoordinaten von ihrem Zielpunkt konnte, auch mit Hilfe der Überlegungen aus Kapitel 4.4 nicht genau geklärt werden. Aus diesem Grund ist jedoch die Zielpunktverteilung der betrachteten Datensätze nicht bekannt. Als Eingangsgrößen der Simulation müssen die Zielpunkte folglich anhand statistischer Methoden nach den folgenden Schritten ermittelt werden:

1. Bestimmung des mittleren Zielpunktes  $AP_{\bar{m}}$  :

In erster Näherung wird, entsprechend der Zielpunktstrategie bei allen SolHyCo-Messungen, allen Heliostaten der gleiche Aimpoint zugewiesen. Dabei handelt es sich in der Simulation um die Schwerpunktkoordinaten der gemessenen Flusssdichteverteilung in der Schwenkbalkenebene. Er wird jedoch in die Apertur ebene gelegt, die, wie in der Querschnittszeichnung des Eingangsbereichs des SolHyCo-Receiver in Abbildung 2.2 zu erkennen ist, um 931,5mm in negativer Normalen-Richtung versetzt ist. Im Anschluss wird der Aimpoint solange in dieser Ebene variiert, bis die Schwerpunkte der gemessenen und simulierten Verteilungen in der Schwenkbalkenebene übereinstimmen.

Gemessene Schwerpunktkoordinaten sind im normaler Weise nicht bekannt. Es wird jedoch erwartet, dass normalerweise die Aimpoints aus der Ansteuerungselektronik des Kraftwerkes auslesbar sind.

2. Auswirkung des Tracking-Fehlers:

Für jeden Heliostaten wird eine Winkelabweichung vom vorher bestimmten mittleren Zielpunkt (Nachführungsfehler) über eine statistische Verteilung angenommen. Die Standardabweichungen der Verteilung  $\sigma_{Tracking,x}$  und  $\sigma_{Tracking,y}$  werden dabei so lange variiert bis die Aufweitung der gemessenen Verteilung bestmöglich mit der Simulierten übereinstimmt. Als Startwert des Nachführungsfehlers in beide Richtungen wird der Wert 1,6 mrad benutzt. Er ermittelt sich aus theoretischen Überlegungen und konnte messtechnisch nachgewiesen werden (siehe Kapitel 4.4). Die Koordinaten des durch die Nachführungenauigkeit beeinflussten Aimpoints errechnen sich individuell für jeden Heliostaten über eine Winkelabweichung, die über zwei Zufallszahlen jeweils einer Rechteckverteilung größer gleich -1 und kleiner gleich 1 entnommen wird, multipliziert mit dessen Abstand zum Target.

$$\vec{AP}_n = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}_1(-1,1) \cdot \sigma_{Tracking,x} \\ \mathfrak{R}_2(-1,1) \cdot \sigma_{Tracking,y} \end{bmatrix} \cdot \left| \vec{d} \right|_n \quad (5.8)$$

Mit:  $AP$  : Koordinaten des Zielpunktes

$n$  : Heliostatnummer

$\mathfrak{R}(-1,1)$  : Zufällig einer Rechteckverteilung ( $-1 \leq \mathfrak{R} \leq 1$ ) entnommene Zahl

$\sigma_{Tracking,x/y}$  : Standardabweichung des Nachführfehlers (in x- bzw. y-Richtung)

$\left| \vec{d} \right|_n$  : Abstand der Heliostatdrehachse zum Mittelpunkt der Apertur ebene

## 3. Variationsläufe:

Eine ausreichende Anzahl von Ray-Tracing-Läufen mit verschiedenen Eingabesätzen, jeweils bestehend aus statistisch verteilten Zielpunkten (Permutationen der Zufallszahl) aus Schritt 2, wird durchgeführt. Anschließend wird die am besten übereinstimmende Variation ausgewählt. Dies geschieht anhand der sich ergebenden Standardabweichung aus der Differenz der gemessenen Flussdichteverteilungen auf dem Strahlungsschutz zur simulierten Verteilung.

## 4. Bleibende Abweichungen des Mittelwertes:

Unterschiede in der Höhe der simulierten und gemessenen Flussdichteverteilung können mit Hilfe der Reflektivität der Spiegelfacetten angepasst werden (siehe Kapitel 5.3.1.4.).

Dieses Vorgehen stimmt mit den von [Amsbeck, Denk et al. 2010] vorgestellten Überlegungen überein und beruht auf der Annahme, dass mit großer Heliostatzahl sich fehlerhaft berechnete Flussdichten, aufgrund nicht richtig zuordnungsbarer Aimpoints zu Heliostaten, gegenseitig herausmitteln. Wie bereits erwähnt, wurde dieses Vorgehen nur deshalb gewählt, weil die Aimpoints der Ansteuerungssoftware der Heliostate nicht verwertbar waren. Ergebnisse für den mittleren Zielpunkt, sowie der angenommene Tracking-Fehler für die weiter unten vorgestellten Auswertungen, finden sich in Tabelle 5.7.

**Tabelle 5.7:** Zwischenergebnisse des Vorgehens zur Ermittlung der Zielpunktverteilung

<b>Datum, Uhrzeit der Messung</b>	<sup>1</sup> $AP_{\bar{m},x}$	<sup>1</sup> $AP_{\bar{m},y}$	<sup>1</sup> $AP_{\bar{m},z}$	<sup>2</sup> $\sigma_{Tracking,x/y}$
	[m]	[m]	[m]	[mrad]
19.05.2010,12:50 Uhr	-0,27	-0,20	61,54	1,5
23.06.2010,12:48 Uhr	-0,09	-0,35	61,18	1,5

<sup>1</sup> im Turmkoordinatensystem mit  $y=0$  an der Turmvorderkante; <sup>2</sup> Nachfühfehler in x- bzw. y-Richtung

## 5.4 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Flussdichtemessungen

Wie eingangs beschrieben, ist es das Prinzip des Messsystems, simulierte Strahlungsflussdichteverteilungen an Referenzpunkten mit realen Messungen abzugleichen und auf diese Weise schwer zu ermittelnde Eingangsgrößen zu korrigieren bzw. Simulationsergebnisse an reale Verhältnisse anzupassen. Im Weiteren kann man mit dem eingesetzten Ray-Tracing-Tool Flussdichteverteilungen in beliebigen Ebenen auswerten, um z.B. die Inputleistung oder die Strahlungsbelastung einzelner Bauteile im Inneren des Receivers zu bestimmen.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde ausführlich auf die Eingangsgrößen des Simulationswerkzeugs STRAL eingegangen. Im Folgenden sollen zunächst die örtliche Verteilung der Strahlungsintensitäten mit den in Kapitel 5.2 erläuterten Messungen auf dem Strahlungsschutz verglichen werden. Zum Vergleich werden dabei die im vorherigen Kapitel unter Schritt 3 erklärten besten Simulationsergebnisse der Variationsrechnungen herangezogen.

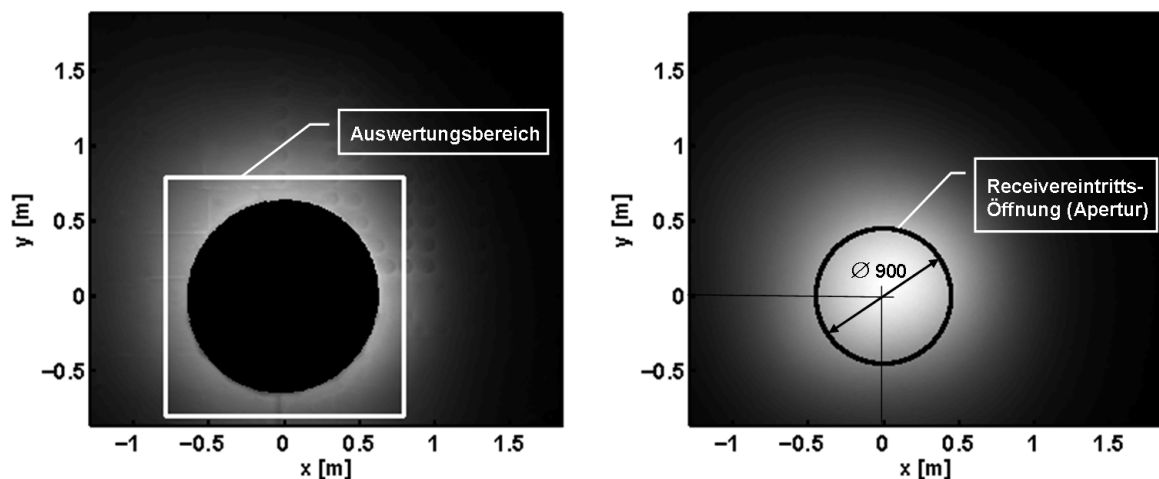
Im Weiteren steht mit der Eintrittsleistung (Inputleistung) des Receivers eine Messgröße zu Verfügung, die unter detaillierten Betrachtungen auch aus den parallel durchgeführten

Messungen mit dem ProHERMES-System ermittelt wurde. Es bietet sich demnach an, die Güte der Simulationsergebnisse, die prinzipiell als Ersatz für Schwenkbalkenmessungen dienen sollen, auch anhand dieser Größe zu betrachten. Sie gibt Aufschluss darüber, ob aus den annähernd übereinstimmenden Ergebnissen auf dem Strahlungsschutz auf eine richtige Verteilung der Strahlungsintensität im Inneren der Receiveröffnung geschlossen werden kann.

Die Inputleistung dient weiterhin zur Berechnung des Wirkungsgrades von Receivern solarer Turmkraftwerke. Dieser ist, wie [Carasso and Becker 1990] erläutern, definiert als Verhältnis der thermischen Austrittsleistung zur Strahlungseintrittsleistung.

#### 5.4.1 Vergleich der örtlich verteilten Simulationsergebnisse mit Messungen auf dem Strahlungsschutz

Im Fall von kommerziellen Turmkraftwerken ist die auswertbare Fläche des keramischen Strahlungsschutzmaterials im Verhältnis zur Apertur sehr viel geringer als im Vorliegenden. Aus diesem Grund beschränken sich die Evaluationen der Simulationsergebnisse auf einen örtlich begrenzten Auswertungsbereich von  $[-800 \text{ mm}; 800 \text{ mm}]$  jeweils in x- und in y-Richtung um die Receiveröffnung. Dieser Bereich ist in Abbildung 5.12 (links) weiß umrandet.



**Abbildung 5.12:** Messungen auf dem Strahlungsschutz: Definition des Auswertungsbereichs zum Vergleich mit örtlich aufgelösten Simulationsergebnissen (links); Auswertung der Simulation in der Aperturebene: Definition der Receiverapertur zur Bestimmung der Inputleistung (rechts)

Wie in Kapitel 5.2 können auch hier Fehlergrößen durch den Vergleich einzelner Pixel der beiden Auswertungen ermittelt werden, die eine Beurteilung der Simulation erlauben. Diese sind in Tabelle 5.8 für die hier untersuchten Messzeitpunkte zusammengetragen. Einerseits sind vereinzelt hohe absolute Abweichungen von bis zu 91% für den 19.05.2010 und 31% für den 23.06.2010 und eine gegenüber den Flussdichtemessungen gesteigerte Standardabweichung von bis zu 16% zu beobachten. Diese machen deutlich, dass die Simulationsergebnisse nicht dieselbe Genauigkeit in der Verteilung bieten, wie dies bei bekannter Zielpunktverteilung wahrscheinlich möglich wäre. Auf der anderen Seite sind Tabelle 5.8 geringe Abweichungen des mittleren Fehlers zu entnehmen. Darüber hinaus treten prozentual hohe Abwei-

chungen in Bereichen vernachlässigbar niedriger Flussdichte auf. Dies lässt den Schluss zu, dass auf Grundlage der in Kapitel 5.3.2 erläuterten Vorgehensweise zur Bestimmung der Aimpoints eine befriedigende Simulation der Flussdichteverteilung auf der Oberfläche des Strahlungsschutzes möglich ist.

Für den 23.06. kann aus den angegebenen Fehlergrößen auf eine weitestgehende Übereinstimmung der Ergebnisse im Bezug auf Fokusaufweitung und Verteilung der Strahlungsintensitäten geschlossen werden. Dies zeigt die relativ geringe Standardabweichung. Sie ist in ihrer Höhe ähnlich derjenigen der Abweichungen von Messergebnissen auf dem Strahlungsschutz und Schwenkbalkenmessungen aus Kapitel 5.2.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass im Vergleich zu den Auswertungen auf dem Strahlungsschutz die Schwenkbalkenmessungen eher mit den Simulationen übereinstimmen. Aufgrund der homogeneren Messoberfläche des Schwenkbalkens, ist deshalb anzunehmen, dass es sich bei den hohen prozentualen Fehlern der Auswertungen auf dem Strahlungsschutz um einzelne Ausreißer handelt, deren Hintergrund-Korrektur (siehe Kapitel 5.1.1) unzureichend ist. Dies ist allerdings nicht der Grund für die hohe Standardabweichung der Auswertung vom 19.05.2010. Es zeigt sich, dass die hohe Standardabweichung wohl eher der Tatsache geschuldet ist, dass die Aufweitung der Verteilungen nicht übereinstimmt. Die Messergebnisse zeigen eine eher ellipsenförmige Flussdichteverteilung, die durch die Auswirkung des sich variierenden Tracking-Fehlers und durch optische Verzerrung aufgrund räumlicher Abbildungsfehler (Abberation) entsteht. Dahingegen geht die statistische Ermittlung der Zielpunktverteilung eher von einer kreisförmigen Verteilung aus. Sie führt dazu, dass auch die simulierten Strahlungsintensitäten kreisförmig und breiter verteilt sind, als dies anhand der Messergebnisse beobachtet werden kann. Als Schlussfolgerung daraus wurde versucht dieses Phänomen durch Erweiterungen bei der Bestimmung der Aimpoints in den Simulationen abzubilden. Auf die erweiterten Methoden und deren Ergebnisse wird in Kapitel 5.4.3 näher eingegangen.

**Tabelle 5.8:** Fehlerbetrachtung des Vergleichs der Simulationsergebnisse und Ergebnissen indirekter Messverfahren

Datum, Uhrzeit der Messung	Vergleichsebene	<sup>1</sup> $\bar{m}$	<sup>2</sup> $s$	min.	max.
		[%]	[%]	[%]	[%]
19.05.2010, 12:50 Uhr	Schwenkbalken	-2,2	12,7	-39,0	18,6
	Strahlungsschutz	-3,1	16,4	-37,0	90,6
23.06.2010, 12:48 Uhr	Schwenkbalken	-1,8	7,9	-26,0	24,4
	Strahlungsschutz	4,2	8,3	-13,8	31,0

<sup>1</sup> Mittelwert; <sup>2</sup> Standardabweichung

### 5.4.2 Vergleich der aus Simulationen ermittelten Receiverintrittsleistung mit Auswertungen aus Schwenkbalkenmessungen

Stimmen die korrigierten Simulationen, den Anforderungen entsprechend, in ihrer örtlichen Verteilung mit den indirekten Messungen überein, können sie im Anschluss ganz einfach in der eigentlich interessierenden Aperturebene des Receivers ausgewertet werden. Damit übergeht man den aufwendigen Schritt, ausgewertete Ergebnisse von einer vor dem Receiver liegenden Ebene in die Messebene ziehen zu müssen, wie das bei den durchgeführten Schwenkbalkenmessungen der Fall ist (siehe [Amsbeck, Denk et al. 2010]).

Mit Hilfe der Simulationsergebnisse in der Aperturebene ist die Eintrittsleistung in den Receiver demnach durch simple Integration der Strahlungsintensitäten der interessierenden Fläche zu bestimmen. Die Eintrittsfläche für den SolHyCo-Receiver ist in Abbildung 5.12 (rechts) angegeben.

Vergleichende Ergebnisse der solaren Eintrittsleistung finden sich in Tabelle 5.9. Die Abweichung sind geringer, als dies die Auswertungen der orts aufgelösten Verteilung vermuten lassen würden. Dies überrascht insofern nicht, als dass, wie oben erwähnt, eine einmal aufgesetzte Simulation zur Bestimmung der Inputleistung einfach in der Aperturebene des Receivers ausgewertet werden kann, ohne weitere Fehler beim Übertragen der Ergebnisse aus einer anderen Ebene zu machen.

Im Allgemeinen sind die Resultate auch hinsichtlich der Nettoleistungsbetrachtung schlüssig. Fehlt bei der ersten Messung im Mittel 3,1% der Leistung auf dem Strahlungsschutz (siehe Tabelle 5.8) und vermutlich weitere auf dem konusförmigen Eingangsbereich, detektiert man im inneren der Receiveröffnung in Summe 11,1% zu viel, wie Tabelle 5.9 zu entnehmen ist. Dies stimmt auch mit den Beobachtungen überein, dass die simulierte Verteilung tendenziell konzentrierter, also nicht so aufgeweitet ist, wie die Gemessene. Für die Messung vom 23.06.2010 verhält es sich dementsprechend genau anders herum. Auf dem Strahlungsschutz werden im Durchschnitt 4,2% zu hohe Strahlungsintensitäten beobachtet, während bei der Eingangsleistung im Vergleich 2% fehlt.

**Tabelle 5.9:** Ergebnisse und Fehlerbetrachtung: Bestimmung der solaren Eintrittsleistung

<b>Datum, Uhrzeit der Messung</b>	<sup>1</sup> $P_{ref}$	<sup>2</sup> $P_{sim}$	Absoluter Fehler	Prozentualer Fehler
	[kW]	[kW]	[kW]	[%]
19.05.2010, 12:50 Uhr	272,8	303,1	30,3	11,1
23.06.2010, 12:48 Uhr	291,5	285,7	-5,8	-2,0

<sup>1</sup> Integrierte Leistung in der Receiverapertur des Referenzmesssystems [Amsbeck, Denk et al. 2010]; <sup>2</sup> Simulierte integrierte Leistung in der Receiverapertur

In Übereinstimmung zu den Ergebnissen aus Tabelle 5.8 sind die absoluten sowie prozentualen Fehler für die Messung am 19.05.2010 höher. Die hohe Standardabweichung für diese Messung ließ dies schon im Vorhinein vermuten. Sie kann dementsprechend als Indikator für eine erfolgreiche Simulation dienen, wie im Folgenden Kapitel gezeigt wird.

### 5.4.3 Erweiterte Simulation

Um eine bessere Approximation der gemessenen Flussdichte zu erzeugen, können deren Form und Verteilung analysiert werden, um darüber wertvolle Informationen für die statistische Zielpunktbestimmung zu entnehmen. Auf diesem Weg kann die fehlende Kenntnis der einzelnen Aimpoints realitätstreuer ausgeglichen werden, als wenn man von einer simplen statistisch kreisförmigen Verteilung ausgeht.

Im vorliegenden Fall der Messung vom 19.05.2010 ist dies ein Ellipsenprofil, das um  $\phi_{Dist} = 150^\circ$  ( $-30^\circ$ ) zur Hauptachse verkippt ist, wie anhand der Höhenlinien der Auswertung in Abbildung 5.13 (links) zu sehen ist. In der gleichen Abbildung ist auch ein Fit der elliptischen Verteilung abgebildet, über den der erwähnte Kippwinkel und das Verhältnis der Halbachsen von ca. 1,1 bestimmt werden kann. Diese Werte sind für verschiedene Tageszeiten unterschiedlich und werden durch individuelles Wandern der Aimpoints erzeugt. Gründe dafür sind die nicht exakte Nachführung der Heliostaten abhängig von ihrer Position im Feld und teils sehr unterschiedliches mechanisches Spiel der Getriebe.

Als Schlussfolgerung daraus ist die Verteilung der Aimpoints also auch ellipsenförmig anzuordnen. Entsprechend diesen Beobachtungen wird empirisch für eine Richtung eine Tracking-Ungenauigkeit von  $\sigma_{Tracking, \xi} = 1,5$  mrad angenommen (siehe Tabelle 5.7) und in eine zweite Richtung eine dem Verhältnis der Achsen (1,1) entsprechend geringere von  $\sigma_{Tracking, \eta} = 1,4$  mrad. Das auf diese Weise erzeugte elliptische Profil wird anschließend entsprechend den Beobachtungen um den Winkel  $\phi_{Dist} = 150^\circ$  gedreht. In Übereinstimmung zum Vorgehen in Kapitel 5.3.2 unter Schritt 2, sind in Tabelle 5.10 (a) die an die Auswertung angepassten Werte für eine elliptische Zielpunktverteilung angegeben. Als weitere Verbesserung der statistischen Ermittlung, errechnen sich die Koordinaten der Zielpunkte jedes einzelnen Heliostaten im Folgenden anhand von Zufallszahlen, die einer Normalverteilung mit  $\sigma = 1$  entnommen werden, anstatt sie mit einer Gleichverteilung anzunähern:

$$\vec{AP}_{n, \text{Ellipse}} = \begin{bmatrix} \aleph_1(1) \cdot \sigma_{Tracking, \xi} \\ \aleph_2(1) \cdot \sigma_{Tracking, \eta} \end{bmatrix} \cdot \left| \vec{d} \right|_n \quad (5.9)$$

$$\vec{AP}_{n, \text{Ellipse}}^{trans}(x, y) = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\phi}_{Dist}) & -\sin(\hat{\phi}_{Dist}) \\ \sin(\hat{\phi}_{Dist}) & \cos(\hat{\phi}_{Dist}) \end{bmatrix} \cdot \vec{AP}_{n, \text{Ellipse}} \quad (5.10)$$

Mit:  $AP$ : Koordinaten des Zielpunktes

$n$ : Heliostatnummer

$\aleph(1)$ : Zufällig einer Normalverteilung ( $\sigma = 1$ ) entnommene Zahl

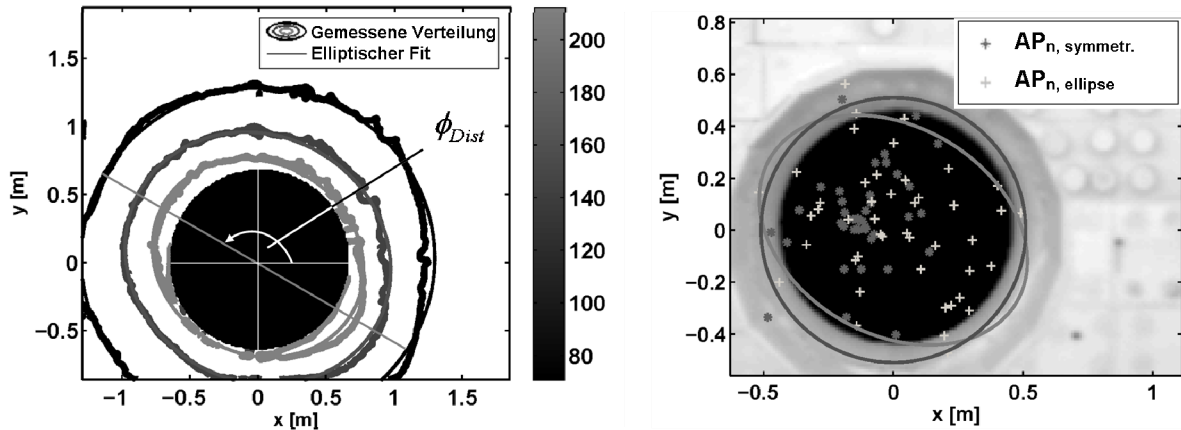
$\sigma_{Tracking, \xi/\eta}$ : Standardabweichung des Nachführfehlers

$\left| \vec{d} \right|_n$ : Abstand der Heliostatdrehachse zum Mittelpunkt der Aperturbene

$\phi_{Dist}$ : Verkipfung des Ellipsenprofils gegenüber der Hauptachse

Wie sich die Verteilung der Zielpunkte gegenüber der Vorgehensweise mit zweiachsig gleichförmiger Verteilung ändert, ist in Abbildung 5.13 (rechts) zu sehen. Ergebnisse der Fehlerbetrachtung des Vergleichs der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen durch indirekte Messungen finden sich in Tabelle 5.10 (b).





**Abbildung 5.13:** Messergebnis in  $[\text{kW}/\text{m}^2]$  für indirekte Messung auf dem Strahlungsschutz mit elliptischem Fit der Verteilung (links); Vergleich der Zielpunktverteilung mit symmetrischer statistischer und ellipsenförmig approximierter Verteilung (rechts)

Als Resultat erhält man eine simulierte Flussdichteverteilung, die in ihrer Form und Aufweitung annähernd mit der real gemessenen übereinstimmt. Dies wird vor allem durch eine sehr stark gesunkene Standardabweichung gegenüber den Ergebnisse in Tabelle 5.8, sowohl für die Messung auf dem Strahlungsschutz mit 9,2% als auch für die Referenzmessung mit Schwenkbalken mit 7,5%, ersichtlich. Damit liegen sie im Bereich der Abweichungen der beiden indirekten Messverfahren. Als Schlussfolgerung daraus kann, wie schon in Kapitel 5.4.2 erwähnt, die Standardabweichung als Indikator für eine erfolgreiche Simulation genutzt werden. Ist sie niedrig, wie im vorliegenden Fall, ist dementsprechend eine genaue Bestimmung der Receivereintrittsleistung möglich. Dies zeigen die Ergebnisse der Inputleistung in Tabelle 5.10 (c). Mit einer Abweichung von 3,3% zum Referenzsystem liegt der Fehler innerhalb der Messunsicherheit des ProHERMES Messsystems. Das gleiche gilt für den Fehler von -2% bei der Bestimmung der Inputleistung für den 23.06.2010 (siehe Tabelle 5.9). Diese Ergebnisse sind angesichts einer gesteigerten Messunsicherheit des ProHERMES Messsystems von -5,88%...+5,4% (siehe [Amsbeck, Denk et al. 2010]) als exakt zu bezeichnen. Darüber hinaus gilt bei dieser Auswertung wieder, dass es eine Plausibilität der Resultate hinsichtlich der Nettoleistungsbetrachtung gibt.

**Tabelle 5.10:** Ergebnisse für Simulation mit erweiterten statistischen Methoden zur Zielpunktbestimmung

a) Zwischenergebnisse des Vorgehens zur Ermittlung der Zielpunktverteilung

Datum, Uhrzeit der Messung	${}^1 AP_{\bar{m},x}$	${}^1 AP_{\bar{m},y}$	${}^1 AP_{\bar{m},z}$	$\sigma_{Tracking,\xi}$	$\sigma_{Tracking,\eta}$	$\phi_{Dist}$
	[m]	[m]	[m]	[mrad]	[mrad]	[°]
19.05.2010,12:50 Uhr	-0,27	-0,20	61,54	1,6	1,25	-30

<sup>1</sup> Turmkoordinatensystem mit y=0 an Turmvorderkante

b) Fehlerbetrachtung: Vergleich der Simulationsergebnisse und Ergebnisse durch indirekten Messungen

Datum, Uhrzeit der Messung	Vergleichsebene	${}^1 \bar{m}$	${}^2 s$	min.	max.
		[%]	[%]	[%]	[%]
19.05.2010,12:50 Uhr	Schenkbalken	1,1	7,5	-15,2	31,3
	Strahlungsschutz	-3,8	9,2	-24,6	29,9

<sup>1</sup> Mittelwert; <sup>2</sup> Standardabweichung

c) Ergebnisse und Fehlerbetrachtung: Bestimmung der solaren Eintrittsleistung

Datum, Uhrzeit der Messung	${}^1 P_{ref}$	${}^2 P_{sim}$	Absoluter Fehler	Prozentualer Fehler
	[kW]	[kW]	[kW]	[%]
19.05.2010,12:50 Uhr	272,8	281,7,1	8,9	3,3

<sup>1</sup> Integrierte Leistung in der Receiverapertur des Referenzmesssystems [Amsbeck, Denk et al. 2010]; <sup>2</sup> Simulierte integrierte Leistung in der Receiverapertur

## 5.5 Zusammenfassung und Fazit

Mit den in Kapitel 5.1.1 angesprochenen Korrekturen ist es möglich, innerhalb eines gewissen Toleranzniveaus auf dem weder vollkommen homogenen noch ideal diffus reflektierenden Strahlungsschutz indirekte Flussdichtemessungen nach dem Prinzip des ProHERMES-Messsystems durchzuführen. Zusätzliche Fehlereinflüsse führen jedoch zu einer gesteigerten Messunsicherheit von -6,3%...+5,7% (siehe Diskussion der Messunsicherheit, Kapitel 2.3). Referenzmessungen mit Schwenkbalken zeigen, überführt man die Ergebnisse in die gleiche Auswerteebene, eine gute Übereinstimmung. Abweichungen zum Referenzsystem sind annähernd normalverteilt mit Standardunsicherheiten von 8,0% für den 19.05.2010 bzw. 6,1% für Messungen am 23.06.2010. Berücksichtigt man, dass die Referenzmessungen ebenfalls mit ähnlich hohen Messunsicherheiten (-4,7%...+4,3%, [Ulmer 2004]) behaftet sind, lässt sich abschließend sagen, dass die Ergebnisse beider Messsysteme konsistent zueinander sind.

Für die Entwicklung dieser Messmethode war es vorteilhaft, dass Betriebserfahrungen sowie Kalibrationsmethoden des ProHERMES-Messsystems zu großen Teilen übertragbar waren. Darüber hinaus benötigt man für diese Art der Messung, bis auf die Installation von Radiometern im keramischen Schutzmaterial des Receivers und einem geeigneten Kamera- und Filtersystem, kein zusätzliches Equipment. Auf bewegte Teile kann sogar ganz verzichtet werden. Für den weiteren Einsatz als Messsystem zur Bestimmung der Flussdichteverteilung rund um die Receiverintrittsöffnung sollte allerdings eine weitestgehende Automatisierung

von Kalibration und Auswertung entwickelt werden. Messungen auf dem Strahlungsschutz liefern zwar keinerlei Aufschluss über die in den Receiver einfallende Strahlungsleistung, die ermittelten Messergebnisse können jedoch im Weiteren für eine Überprüfung und Korrektur der durch Simulationen gewonnenen Datensätze herangezogen werden.

Bei Receivern mit einer sehr viel größeren Apertur, können Informationen auf dem Strahlungsschutz keine Hinweise auf Bewegungen von Heliostaten innerhalb des Receivers liefern. Separate Systeme zur Heliostatüberwachung oder Direktmessungen im Inneren des Receivers könnten dieses Problem allerdings lösen. Auf die Möglichkeit der Überprüfung der Messung durch Direktmessung wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Simulationen mit dem eigens durch das DLR entwickelte Ray-Tracing-Programm STRAL durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein sehr ausgereiftes Simulationsprogramm, das unter Einbindung von realen Heliostatgeometriedaten theoretisch die exakte Nachrechnung von reflektierten Strahlen erlaubt. Dazu ist vor allem eine detaillierte Kenntnis über den Zustand des Feldes, vor allem von Steigungsfehlern der Spiegelfacetten aller zum Einsatz kommender Heliostate, erforderlich. In Kapitel 5.3.1 sind alle zusätzlich erforderlichen Messdaten aufgeführt, unter denen einzig die Messung des gerichteten Reflektionsgrades spiegelnder Oberflächen problematisch ist. Diese Größe kann jedoch durch Vergleiche der simulierten und gemessenen Flussdichteverteilungen anhand von Stützstellen dynamisch angepasst werden. Die Ungenauigkeit der Reflektivitätsmessung ist somit ausgleichbar, was nicht zuletzt für quantitativ gute Ergebnisse sorgt.

Eine der Voraussetzungen für die exakte Simulation der Strahlungsflussdichte in der Aperturbene des Receivers ist die genaue Kenntnis über die Verteilung der Zielpunkte aller Heliostate. Im Spezialfall der etwas veralteten Heliostatansteuerung der CESA-1-Anlage sind diese Zielpunkte jedoch nicht bekannt. Aus der Unkenntnis der realen Zielpunkte bei den vorgestellten Messungen resultiert, dass die exakte Verteilung der Strahlungsflussdichteverteilung, wie von [Belhomme, Pitz-Paal et al. 2009] beschrieben, nicht darstellbar ist. Mit statistischen Methoden können die Zielpunkte jedoch annähernd ermittelt werden. Bei einer hohen Anzahl an Heliostaten kann man davon ausgehen, dass auf diesem Weg einzelne Heliostate zwar nicht realen Aimpoints zugeordnet werden, sich aber die fehlerbehafteten Beiträge aller Heliostate auf der Zielebene so miteinander superponieren, dass eine gute Approximation der Wirklichkeit möglich ist.

Vergleiche der Simulationen mit Messergebnissen zeigen, dass durch statistische Bestimmung der Zielpunktverteilung eine relativ gute Übereinstimmung der Aufweitung sowie örtlich verteilter Strahlungsintensitäten erreicht werden kann. Fehlerbetrachtung zeigen, dass teilweise hohe Diskrepanzen aufgrund von sich unterscheidenden Verteilungsmustern auftreten. Mit einer grafischen Analyse der Messdaten und deren Abgleich mit den Eingabeparametern sowie erweiterten statistischen Methoden kann im Folgenden jedoch eine bessere Approximation der gemessenen Flussdichte erzeugt werden. Unter Annahme z.B. eines Ellipsenprofils für die Messung vom 19.05.2010 kann die fehlende Kenntnis einzelner Aimpoints realitätsnäher ausgeglichen werden, als wenn man von einer simplen kreisförmigen Verteilung ausgeht. Auf diesem Weg ist die Übereinstimmung der Ergebnisse noch steigerbar und die Annahme, Fehler würden sich bei hoher Anzahl von Einflussfaktoren herausmitteln, konnte so bestätigt werden. Die Abweichungen liegen in 86% der Fälle bei  $-3,8 \pm 9,2\%$  für die Messung vom 19.05. und bei  $4,2 \pm 8,3\%$  für den 23.06.2010. Die Auflösung der simulierten

Flussdichteverteilungen ist abhängig vom gewünschten Rechenaufwand und dementsprechend theoretisch unbegrenzt hoch.

Die Abweichung zeigen aber, dass die exakte Verteilung der gemessenen Flussdichteverteilung aufgrund fehlender Informationen über die genauen Koordinaten der Zielpunkte, für den Sonderfall des CESA-1-Heliostatenfeldes nicht simulierbar ist. Bei einer hohen Anzahl von Stützpunkten in der Nähe des interessierenden Bereichs kann auf diesem Weg aber eine gute Annäherung durch Simulationen erreicht werden. Dahingegen zeigen die präsentierten Ergebnisse, dass die Bestimmung der solaren Eingangsleistung durch Simulation mit sehr hoher Genauigkeit möglich ist. Die Ungenauigkeit hängt dabei von der Ermittlung der Stützstellen ab. Die Unsicherheit beträgt für die präsentierten Ergebnisse zwischen 2 und 3%, wie Tabelle 5.9 und Tabelle 5.10 (c) zu entnehmen ist.

Die gute Bestimmbarkeit vor allem der solaren Eingangsleistung macht das hier vorgestellte Messsystem gut geeignet zur Charakterisierung von neuen Receiver-Prototypen. Der Vorteil gegenüber anderen Systemen ist, dass es sich hierbei um ein sehr einfaches Messsystem handelt, das fast keine zusätzlichen Bauteile erfordert und auf bewegte Teile völlig verzichtet. Damit ist es für jede beliebige Receiveranordnungen sehr einfach nachrüstbar.

Für die Überwachung des Betriebs solarer Turmkraftwerke, z.B. durch die Identifikation von lokalen Konzentrationsmaxima, ist es prinzipiell auch gut geeignet. Dazu sollten die Koordinaten der vorgegebenen Zielpunkte jedoch bekannt sein, was bei kommerziellen Anlagen durch kontrollierbare Nachführgenauigkeiten der Heliostate gewährleistet sein sollte. Diese Informationen sind ebenfalls unabdingbar, will man die exakte Verteilung der Strahlungsflussdichte messen bzw. simulieren, um Strahlungsverfolgung über die Aperturebene hinaus auf einzelne Bauteile durchführen zu können.

## 6 Direkte Messung mit verteilten Flussdichtesensoren

Zur direkten Flussdichtemessung werden in der Regel mehrere Detektoren innerhalb der zu messenden Ebene positioniert oder über diese geschwenkt, um die Verteilung der Strahlungsflussdichte stichpunktartig zu quantifizieren. Bezüglich der Umsetzung des Schwenkverfahrens sei auf eine ähnliche Problematik hingewiesen, wie bei der Durchführung des ProHERMES-Verfahrens an Receivern mit großer Ausdehnung für den Einsatz in kommerziellen Anlagen. Diese wurde bereits in Kapitel 3.2 erläutert. Aus diesem Grund bezieht sich dieses Kapitel lediglich auf die Untersuchung von Systemen mit verteilten Sensoren innerhalb der Messfläche.

Die Messung der Flussdichteverteilung ist auf die beschriebene Art und Weise allerdings nur in begrenzter Auflösung möglich. Diese kann zufriedenstellend sein, ist man lediglich an der Identifizierung von Konzentrationsmaxima oder dem Einhalten zulässiger Bestrahlungsstärken des Receivers interessiert. Wie bereits in Kapitel 5.5 erwähnt wurde, ist es des Weiteren möglich, derart gemessene Stützpunkte zur Kontrolle und Anpassung von Simulationen einzusetzen. Zur Charakterisierung der Heliostatfeld-Güte, sowie zur Wirkungsgradbestimmung von Receivern, ist jedoch die Kenntnis einer detaillierten Flussdichteverteilung eine wesentliche Voraussetzung. Im zuletzt genannten Fall ist es deshalb stets notwendig, aus den gemessenen Stützpunkten Flussdichteverteilung in ausreichend hoher Auflösung zu interpolieren.

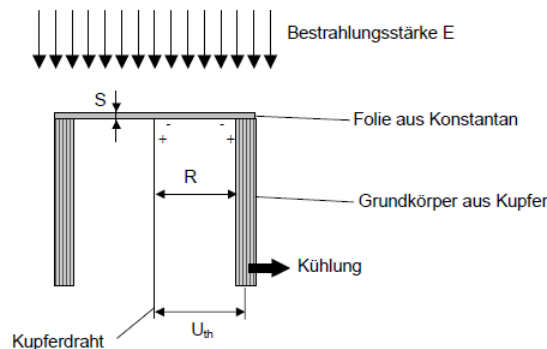
Zur direkten Messung der Strahlungsflussdichte stehen prinzipiell verschiedene Detektoren zur Auswahl. Denkbar ist der Einsatz von Gardon-Radiometern, aber auch andere Radiometerbauformen oder PV-Zellen können theoretisch genutzt werden. Allen Detektoren gemein ist, dass sie aufgrund auftretender hohen Strahlungsflussdichten in jedem Fall wassergekühlt werden müssen.

Da diese Messgeräte meist in der Nähe oder unmittelbar an der heißesten Stelle des Receivers verbaut werden, wo Temperaturen zwischen 400° und 1100°C herrschen können, sind nicht nur sie, sondern auch alle Zu- und Ableitungen speziell vor Temperatureinfluss zu schützen oder erfordern den Einsatz geeigneter Materialien.

Als Alternative zu den aus den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Konzepten wurde im Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeit der direkten Messung der örtlich aufgelösten Flussdichteverteilung mit kommerziell erhältlichen Gardon-Radiometern betrachtet. Dabei handelt es sich um eine sehr komfortable und leicht zu beherrschende Form der Flussdichtemessung. Sie bietet außerdem die Möglichkeit online Informationen über den zeitlichen Verlauf der Flussdichte zu erhalten.

### 6.1 Radiometer

Gardon-Radiometer besitzen, wie in Abbildung 6.1 dargestellt, einen gekühlten Kupferkörper mit einer zylindrischen Bohrung, auf den eine Folie aus Konstantan aufgeschweißt ist. Diese Verbindung bildet ein äußeres Thermoelement. Ein im Zentrum der Folie angeschweißter Kupferdraht bildet mit ihr ein zweites inneres Thermoelement. Liegt im Zentrum der Folie und dessen Außenrand die gleiche Temperatur vor, sind die beiden Thermospannungen gleich groß und entgegengesetzt. Die gemessene Spannung zwischen Kupferdraht und Kupferkörper ist demzufolge Null.



**Abbildung 6.1:** Prinzipskizze eines Gardon-Radiometers [Ulmer 2004]

Wird die Folie mit Radius  $R$  mit der Bestrahlungsstärke  $E$  bestrahlt, absorbiert sie einen Teil dieser Strahlung und erwärmt sich. Zur Erhöhung des Absorptionsgrades der Folie ist sie mit schwarzem Zynolyte beschichtet ( $\alpha = 0.94$ ). Aufgrund der geringen Dicke  $S$  der Folie ist der Temperaturunterschied zwischen Vorder- und Rückseite vernachlässigbar klein. Des Weiteren sind aufgrund der geringen maximalen Temperatur der Folie von ca.  $300^\circ\text{C}$  die Wärmeströme durch Abstrahlung und Konvektion gegenüber der Wärmeleitung zu vernachlässigen. Demnach wird die aufgenommene Wärme  $\dot{Q} = \alpha E$  hauptsächlich radial nach außen an den gekühlten Grundkörper ( $T_0$ ) abgeleitet. Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich die Temperatur der Folie am Radius  $r$  zu:


$$T(r) = \frac{\dot{Q}}{4S\lambda}(R^2 - r^2) + T_0 \quad (6.1)$$

Dies entspricht einer parabolischen Temperaturverteilung, die von innen ( $r = 0$ ) nach außen ( $r = R$ ) abnimmt. Bei konstanter Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Konstantanfolie ist die Temperaturdifferenz zwischen Zentrum und Außenrand unabhängig von der Temperatur des Grundkörpers und verhält sich linear zum Wärmestrom und damit zur Bestrahlungsstärke. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  sowie die Thermospannung der Kupfer/Konstantan-Thermoelementpaarung sind jedoch temperaturabhängig. Allerdings sind diese beiden Effekte gegenläufig und heben sich im Temperaturbereich von  $-45^\circ\text{C}$  bis  $+235^\circ\text{C}$  des Grundkörpers für diese Materialpaarung auf. Die Thermospannung  $U_{th}$  steigt in diesem Temperaturbereich also linear mit der Bestrahlungsstärke an:

$$E = K \cdot U_{th} \quad (6.2)$$

Der Kalibrationsfaktor  $K$  wird vom Hersteller Vatell durch Vergleich mit einem baugleichen Sekundärstandard bestimmt und mitgeliefert [Ulmer, Lüpfer et al. 2004]. Ein großer Vorteil der Direktmessung ist demnach, dass eine Kalibration der Sensoren vor Ort nicht notwendig ist. Informationen zu dem von Vatell vertriebenen Gardon-Radiometer der Produktfamilie Thermogage sind Tabelle 6.1 zu entnehmen.

**Tabelle 6.1:** Thermogage, 1000 Serie, wassergekühlt <sup>1</sup>

	Durchmesser:	7,9 – 25,4mm (0,321-1")
	Ansprechbereich:	0 – 1.000 kW/m <sup>2</sup>
	Ansprechzeit:	bis 1,5 ms
	Messunsicherheit:	± 3%
	Wiederholgenauigkeit:	1%
	Auflösung:	bis 0,2 mV/(kW/m <sup>2</sup> )

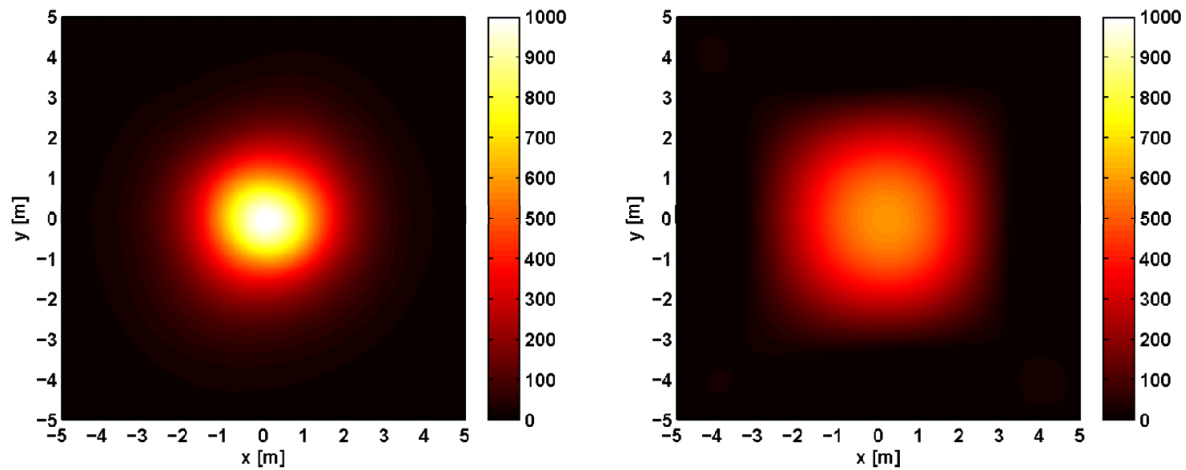
<sup>1</sup> Circular Foil Heat Flux Transducer, Vatel Corporation, Christiansburg Virginia,  
Webzugang: <http://www.vatell.com/thermogage.html>

## 6.2 Untersuchung des Messprinzips

Aus einer sehr geringen Anzahl installierter Radiometer bzw. wenigen Stützstellen folgt eine mangelnde Kenntnis über die gemessene Flussdichteverteilung, woraus Unsicherheiten bei der Bestimmung der hoch aufgelösten Leistungsverteilung durch Interpolation resultieren. Die Installation von sehr vielen Radiometern steigert unerwünschterweise den ohnehin hohen finanziellen und technischen Aufwand des Verfahrens. Demnach wird angestrebt die Anzahl und Verteilung der zum Einsatz kommenden Radiometer bestmöglich zu optimieren.

Zu diesem Zweck wurden Untersuchungen zu einer fiktiven Messoberfläche von 10 m x 10 m durchgeführt. Bei einer gleichförmigen Verteilung der Sensoren, wie in Abbildung 6.3 (links) zu sehen, sollte in Abhängigkeit des Abstandes der Messpunkte bzw. Radiometerpositionen geklärt werden, wie sich die Unsicherheit der durch Interpolation bestimmten Verteilung verhält. Dazu wurden Stützstellen einer bekannten Flussdichteverteilung im Abstand von  $\Delta x$  (siehe Abbildung 6.3 (links)) entnommen und diese durch Interpolation der Stützstellen wieder mit der gleichen Auflösung rekonstruiert (siehe Abbildung 6.2 (rechts)). Bei der untersuchten Verteilung handelt es sich um das rauschkorrigierte Simulationsergebnis auf dem Strahlungsschutz für den 19.05.2010, dass mit erweiterten statistischen Methoden aus Kapitel 5.4.3 erzeugt und auf für diese Untersuchung auf einer 10 m x 10 m Fläche ausgewertet wurde. Die bekannte Verteilung hat demnach die Auflösung [Pixel/cm<sup>2</sup>], wie alle präsentierten Verteilungen in Kapitel 5 (siehe Abbildung 6.2 (links)).

Aus der Differenz der Original- und rekonstruierten Verteilungen ergeben sich die in Tabelle 6.2 aufgeführten statistischen Abweichungen. Zu sehen ist, dass sich ab einem Abstand von etwa 100 cm erhebliche Unsicherheiten bei der Bestimmung der Flussdichteverteilung ergeben. Dies äußert sich nicht nur in einer sehr hohen Standardabweichung, sondern auch in einem Mittelwert, der jenseits von 100% liegt. Dahingegen sind die statistischen Abweichung für einen Abstand von  $\Delta x = 50$  cm noch zu akzeptieren. Darüber hinaus ist Tabelle 6.2 zu entnehmen, dass zwar die Verteilung der Werte gewissen Abweichung unterliegen, die integrierte Gesamtleistung der Verteilung jedoch vernachlässigbar gering bleibt.



**Abbildung 6.2:** Bekannte Verteilung: rauschkorrigiertes Simulationsergebnis auf dem Strahlungsschutz für den 19.05.2010 (Kapitel 5.4.3), ausgewertet auf einer 10 m x 10 m Fläche (links); durch Interpolation von Stützstellen ( $\Delta x = 100$  cm) rekonstruierte Verteilung (rechts)

**Tabelle 6.2:** Abweichung der durch Interpolation rekonstruierten Verteilung zur Originalverteilung in Abhängigkeit des Abstandes der Radiometer für die untersuchte 10 m x 10 m Messfläche und die sich ergebende Anzahl an Radiometern

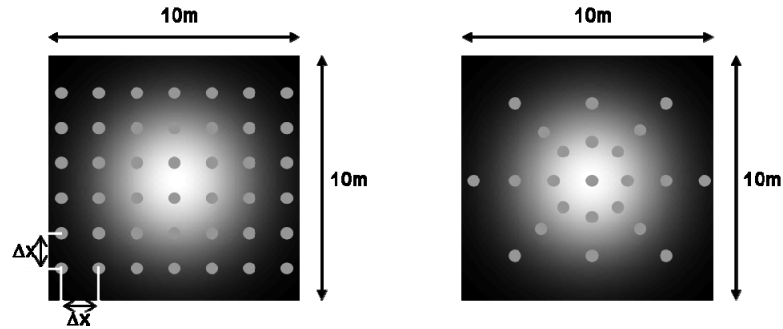
<sup>1</sup> $\Delta x$	<sup>2</sup> $\bar{m}$	<sup>3</sup> $s$	min.	max.	<sup>4</sup> $\Delta P$	Anz. an Radiometern	<sup>5</sup> Opt. Anz. an Radiometern
[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]
5	-0,2	5,1	-56,4	71,8	-0,07 E-3	40.000	15.000
10	-0,5	6,5	-59,4	67,0	-0,2 E-3	10.000	4.000
20	-1,4	8,0	-68,2	83,8	-0,3 E-3	2.500	1.000
50	-2,3	11,2	-83,1	99,2	-0,4 E-3	400	150
100	-131,1	455,8	-1802,2	3589,4	-0,5 E-3	100	40

<sup>1</sup> Abstandes der Messpunkte bei gleichförmiger Verteilung; <sup>2</sup> Mittelwert; <sup>3</sup> Standardabweichung;

<sup>4</sup> Abweichung der integrierten Gesamtleistung über 10 m x 10 m Messfläche; <sup>5</sup> Ungefähre optimale Anzahl an Radiometern für eine systematisch sinnvolle Verteilung

Geht man dementsprechend davon aus, dass alle  $\Delta x = 50$  cm ein Radiometer installiert werden sollte, um eine relativ genau örtlich aufgelöste Messungen zu gewährleisten, ergibt sich eine benötigte Anzahl von ca. 400 Radiometern für die erwähnte Messoberfläche. Es ist allerdings anzunehmen, dass bei einer systematisch sinnvolleren Verteilung der Radiometer, wie in Abbildung 6.3 (rechts) beispielhaft dargestellt, sich deren Anzahl weiter minimieren lässt. Weiterhin bietet sich die Möglichkeit Stützstellen im Randbereich, auf den nur ein zu vernachlässigender Anteil der reflektierten Solarstrahlung fallen würde, zu begrenzen. Zusammenfassend kann man davon ausgehen, dass lediglich eine um 50% bis 70% geringere Anzahl an Radiometern als die zuvor Berechnete notwendig ist, um in dem besonders interessierenden Kernbereichen eine Verteilung in ähnlicher Genauigkeit zu bestimmen. Diese Anzahl ist Tabelle 6.2 unter ungefähre optimale Anzahl an Radiometern für eine systematisch sinnvollere Verteilung zu entnehmen. Im Fall von  $\Delta x = 50$  cm ergäbe sich demnach eine Anzahl von etwa 150 Radiometern.





**Abbildung 6.3:** Beispielhafte gleichförmige Verteilung der Sensoren über der Messfläche (links); Beispielhafte systematisch sinnvolle Verteilung der Sensoren über der Messfläche (rechts)

Um den finanziellen Aufwand des Verfahrens näherungsweise beschreiben zu können, sollen im Folgenden die Kosten der Messtechnik grob abgeschätzt werden. Der Preis pro Radiometer ergibt sich zunächst aus dessen Stückpreis, zusätzlich nicht zu vernachlässigender Installations- und Materialkosten zu deren Montage und Isolierung. Diese sind mit der Radiometerzahl gekoppelt. Die Kosten für das benötigte Kühlswassersystem ändern sich dahingegen kaum mit der Radiometerzahl, sie sind im Verhältnis zu den übrigen Kosten allerdings eher zu vernachlässigen. Die Gesamtkosten der Radiometer belaufen sich auf schätzungsweise 300-500€ pro Stück. Demnach ergäben sich für die untersuchte Fläche Gesamtkosten zwischen 45.000€ und 75.000€, legt man die oben betrachtete Anzahl an Radiometern von 150 zugrunde. Hinzukommen schwer abzuschätzende Kosten für Wartung und Instandhaltung. Des Weiteren nehmen die Sensoren plus ihrer dazugehörigen Kühlkörper einen Anteil von 0,1% – 0,3% der Gesamtfläche ein ( $D_{\text{Radiometer}} = 25,4 \text{ mm}$ ; Anzahl: 40 – 150). Dies führt zu einer leichten Reduktion des Stromproduktionspotentials des Kraftwerks und kann vor allem auf lange Sicht zu einem Kostenfaktor werden.

### 6.3 Zusammenfassung

Das vorgestellte Verfahren verfügt, aufgrund der permanenten Messung der fokussierten Strahlungsflussdichte an ausgewählten Stützpunkten und des direkten Messprinzips, über sehr gute Eigenschaften zur Regelung solarer Turmkraftwerke, sowie zur Überwachung des Einhaltens zulässiger Bestrahlungsstärken des Receivers. Durch Interpolation der Stützstellen kann darüber hinaus auch eine detaillierte Flussdichteverteilung ermittelt werden. Die Genauigkeit des Verfahrens wird dabei jedoch durch die Anzahl der verbauten Radiometer und die angestrebte Auflösung der resultierenden Verteilung bestimmt.

Bezüglich der Anzahl der Radiometer gibt es über die daraus entstehenden Kosten hinaus Limitierungen aufgrund des technischen Aufwandes und des Platzbedarfs, denn Kühl- und Signalleitungen der Radiometer müssen in der heißen Zone des Receivers verbaut werden. Zum einen erhöht sich dadurch die Komplexität des Messverfahrens, zum anderen sind Wartungsarbeiten wegen der schlechten Zugänglichkeit der Sensoren nicht nur technisch schwierig, sondern auch zeitaufwendig, was wiederum zusätzliche Ausfallzeiten des Kraftwerks für Wartungs- und Inspektionsarbeiten nach sich zieht. Regelmäßige Wartungen des Messsystems sind allerdings aufgrund der hohen Bestrahlungsstärken solarer Receiver und dem un-

vermeidlichen Einwirken von Umwelteinflüssen über der Lebensdauer eines derartigen Receiversystems unverzichtbar. Darüber hinaus ist die Unterbringung von Radiometern und einem geeigneten Kühlsystem bei gewissen Receiver-technologien, wie etwa Cavity-Receivern, die keine direkt bestrahlte Fläche aufweisen, schwierig zu lösen.

Aus den genannten Gründen ist die Realisierung des Verfahrens mit einigen Problemen verbunden, dennoch wurde die Methode bereits erfolgreich in einem kommerziellen Kraftwerk eingesetzt. Wie bereits mehrfach in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt wurde, bietet sich zusätzlich die Möglichkeit, anhand derart messtechnisch erfasster Stützstellen die durch Simulationen ermittelte Verteilung des in Kapitel 5 vorgestellten Messverfahrens anzupassen und deren Eingabedaten zu korrigieren. Dies ist vor allem in Bezug auf die Möglichkeit bezogen, Messpunkte auf der Aperturfläche des Receivers zu verteilen, ein Vorteil gegenüber der Messung von Stützstellen auf dem Strahlungsschutz.

## 7 Vergleich und Bewertung von Verfahren zur Strahlungsflussdichtemessung

Die in diesem Kapitel herangezogenen Vergleichskriterien für Verfahren zur Strahlungsflussdichtemessung basieren auf den in Kapitel 3.1 eingeführten Anforderungen an ein zukünftiges Messsystem. Der Vergleich der betrachteten Verfahren hinsichtlich aller aufgeführten 14 Anforderungen erwies als ungeeignet. Aus diesem Grund und zur besseren Übersicht werden in diesem Kapitel die erwähnten Anforderungen zu 5 Vergleichskriterien zusammengefasst (siehe Abbildung 7.1).

Dabei gilt es zu beachten, dass im Zuge dieser Arbeit ohnehin nur Verfahren betrachtet wurden, die jeweils alle drei in Kapitel 3 aufgeführten Festforderungen erfüllen. Diese bestehen in den Anforderungen das Messsystems möglichst auf beliebige Größen skalieren zu können, eine hohe Arbeitssicherheit für die Beschäftigten bzw. die Abwesenheit von Gefahren für ihre Sicherheit und Gesundheit zu gewährleisten und einer generellen Temperaturbeständigkeit aller Komponenten entsprechend ihrer zu erwartenden Belastung.

Darüber hinaus wäre es für alle Messverfahren wünschenswert, dass sie universell für jeden Reivertyp einsetzbar wären, unabhängig von dessen Technologie, dessen Bauform und des zum Einsatz kommenden Arbeitsmediums. Dem ist allein aufgrund der sich stark unterscheidenden Architektur der Receiver, des sich anschließenden thermodynamischen Kreislaufs, sowie der sich daraus ergebenden Betriebsparameter, im Allgemeinen aber nicht so. Dementsprechend ist im Rahmen dieser Arbeit, durch die Entwicklung und Erprobung des jeweiligen Messsystems anhand des speziellen Aufbaus des in Kapitel 2.1.2 vorgestellten SolHyCo-Receiver, in vielerlei Hinsicht nur ein subjektiver Vergleich möglich. Die durchgeführten Bewertungen anhand der nachfolgenden Tabelle 7.2 stellen deshalb keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Auch wenn bei der Analyse und dem Vergleich der Verfahren anhand von Tabelle 7.1 auf eine größtmögliche Objektivität geachtet wurde, muss diese, wie auch die Bewertung, bei der Auslegung eines Flussdichtemesssystems für ein spezifisches Turmkraftwerk mit einer bestimmten Receiver-Technologie gegebenenfalls individuell angepasst werden.

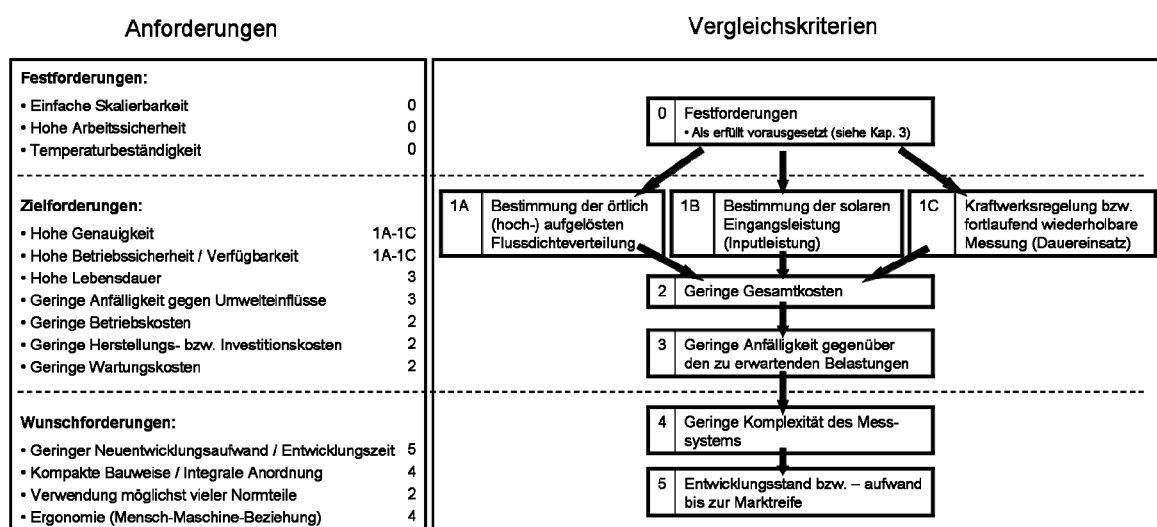


Abbildung 7.1: Übersicht: Zusammenfassung der Anforderungsliste aus Kapitel 3 in 5 Vergleichskriterien

Im Folgenden ist die Zusammenfassung der genannten Ziel- und Wunschforderungen aus Kapitel 3 in 5 Vergleichskriterien genauer erklärt, die zur Beurteilung und Analyse der untersuchten Messverfahren herangezogen werden.

### **Zielforderungen:**

---

Zunächst wird die Genauigkeit bzw. Eignung des Verfahrens hinsichtlich der drei sich unterscheidenden Messaufgaben differenziert:

#### **1A. Bestimmung der örtlich (hoch-) aufgelösten Flussdichteverteilung**

#### **1B. Bestimmung der solaren Eingangsleistung (Inputleistung)**

Eine wesentliche Größe, um den Wirkungsgrad von solaren Komponenten messen bzw. verbessern zu können.

#### **1C. Kraftwerksregelung bzw. fortlaufend wiederholbare Messungen (Dauereinsatz)**

Unter Regelung solarer Turmkraftwerke ist in diesem Fall die Überwachung der angestrebten Betriebsstrategien (Zielpunktverteilung), sowie das Einhalten zulässiger Bestrahlungsstärken des Receivers bzw. die Vermeidung von Konzentrationsmaxima durch eventuell auftretende Fehler bei der Heliostatnachführung, zu verstehen. Zu diesem Zweck ist eine regelmäßige, wenn nicht fortlaufende Messung der Strahlungsflussdichte, obgleich in geringer Auflösung, notwendig. Dabei ist es selbstverständlich, dass das in Betracht gezogene Messsystem eine möglichst hohe Betriebssicherheit bzw. Verfügbarkeit aufweist, auch wenn dies nicht das primäre Entwicklungsziel darstellt.

Bei der Entscheidung ein Messsystem einzusetzen oder nicht, spielen des Weiteren die zu erwartenden Gesamtkosten des Messsystems eine wichtige Rolle:

#### **2. Geringe Gesamtkosten**

Diese unterscheiden sich im Wesentlichen in Herstellungs- bzw. Investitionskosten, Betriebskosten sowie Wartungskosten. Das aufgeführte Kriterium enthält darüber hinaus die ursprüngliche Forderung möglichst viele Normteile zu verwenden, sowie eine Abschätzung der restlichen Entwicklungskosten des Messsystems.

Die weiteren an das Messsystem gestellten Ziel- und Wunschforderungen werden zu drei übergeordnete Anforderungen zusammengefasst, die jeweils mehrere der genannten Anforderungen repräsentieren:

#### **3. Geringe Anfälligkeit gegenüber den zu erwartenden Belastungen**

Darunter zu verstehen sind vor allem durch konvektive Verluste des Receivers hervorgerufenen Betriebstemperaturen von bis zu 400°C Umgebungsluft und Strahlungsbelastungen, sowie Umwelteinflüsse wie starker Wind, korrosiver Regen und Verschmutzung durch mit Staub beladene Luft. Desweiteren beinhaltet dieses Kriterium die Zielanforderungen nach einer hohen Lebensdauer aller Bauteile. Zusätzlich trägt es der Forderungen nach einer hohen Stabilität einer möglichen Struktur Rechnung.

**Wunschforderungen:**

---

**4. Geringe Komplexität des Messsystems**

Kompakte Bauweise/ Integrale Anordnung; Ergonomie (Mensch-Maschine-Beziehung); Zusätzlich: Einfache Anschlussenergie; Geringe Anzahl von Eingangs- und Ausgangssignalen; Möglichst geringe Anzahl von Betriebs- und Überwachungsgeräten; Einfache Montage/ Demontage

**5. Entwicklungsstand bzw. -aufwand bis zur Marktreife**

Geringer Neuentwicklungsaufwand/ Geringe Entwicklungszeit; Zusätzlich: Vorhandene Betriebserfahrung; Geringer Änderungsaufwand des Receivers

**Tabelle 7.1:** Vergleich von Technologien zur Strahlungsflussdichtemessung von Receivern großer, kommerzieller, Solarturmkraftwerke

	Schwenkbalken-Technologien		Technologien ohne bewegte Teile			
Messprinzip:	Indirekt	Direkt	Direkt	Indirekt	Simulation...	
Verfahren:	Schwenkbalken als weißes Target	Schwenkbalken besetzt mit Flussdichtesensoren	Verteilung fest installierter Sensoren	Mit feststehendem Target (fixed bar scan)	gestützt durch indirekte Messung auf dem Strahlungsschutz	gestützt durch Direktmessung
<b>Messaufgabe:</b>						
<b>1A:</b> Bestimmung der örtlich (hoch) aufgelösten Flussdichteverteilung	Auflösung hängt nur von Kamera und Objektiv ab; Kalibration mit einem Radiometer; Messgenauigkeit ca. $\pm 4-5\%$	Auflösung hängt von Anzahl der Stützstellen ab, diese wird durch Durchfahrge- schwindigkeit, Zeitkonstante der Radiometer, sowie Geschwindigkeit der Messdatenerfassung limitiert; Flussdichtekarte muss interpoliert werden; Messgenauigkeit mit ca. $\pm 5-6\%$ abgeschätzt	Messungenauigkeit hängt stark von der Anzahl der Sensoren und der angestrebten Auflösung ab; Bei Kenntnis der zu erwartenden Verteilung, kann diese sehr gut gefittet werden, falls nicht bekannt, treten durch Interpolation ggf. große Abweichungen auf	Auflösung hängt nur von Kamera und Objektiv ab; Kalibration mit einem Radiometer; Gesteigerte Messungenauigkeit durch Verschiebung des Fokus und Tracking-Offsets der Heliostate; Bei hoher Anzahl von Heliostaten ca. $\pm 8-9\%$ , bei optimalem Tracking auf $\pm 5-7\%$ senkbar	Auflösung theoretisch unbegrenzt genau; Verteilung kann bei vielen Stützpunkten in der Nähe der 'region of interest' gut angenähert werden; Exakte Verteilung auf Grund fehlender Informationen über Zielpunkte nicht simulierbar; Strahlverfolgung über die Aperturebene hinaus möglich	Auflösung theoretisch unbegrenzt genau; Verteilung kann bei vielen Stützpunkten in der Nähe der 'region of interest' gut angenähert werden; Exakte Verteilung auf Grund fehlender Informationen über Zielpunkte nicht simulierbar; Strahlverfolgung über die Aperturebene hinaus möglich
<b>1B:</b> Bestimmung von solarer Eingangleistung	Durch Integration der Messwerte über der Aperturfläche; Versatz von Mess- und Aperturebene problematisch; Gesteigerte Messgenauigkeit ca. $\pm 5\%$	Durch Integration der interpolierten Messwerte über der Aperturfläche; Versatz von Mess- und Aperturebene problematisch; Messgenauigkeit größer $\pm 5\%$	Durch Integration der interpolierten Verteilungen über der Aperturfläche; Keine Abweichungen beobachtet; Abweichungen der exakten Verteilung mitteln sich ggf. raus	Durch Integration der Verteilungen über der korrespondierenden Aperturfläche; Fehler- einflüsse mitteln sich raus; Messung in der Aperturebene möglich; Messungenauigkeit ca. $\pm 5-7\%$	Anpassung der ermittelten Verteilung anhand von Stützstellen sorgen für quantitativ gute Ergebnisse; Ungenauigkeit der Reflektivitätsmessung ausgleichbar; ; Ungenauigkeit hängt von Anzahl der Stützstellen ab	Anpassung der ermittelten Verteilung anhand von Stützstellen sorgen für quantitativ gute Ergebnisse; Ungenauigkeit der Reflektivitätsmessung ausgleichbar; Ungenauigkeit hängt von Anzahl der Stützstellen ab
<b>1C:</b> Kraftwerksregelung bzw. fortlaufend wiederholbare Messungen (Dauereinsatz)	Konzentrationsmaxima detektierbar; Zuordnung zu fehlerhaften Heliostaten nicht möglich; Wiederholrate ca. 5-10min; Relativ aufwendig für reine Betriebsüberwachung	Lokale Konzentrationsmaxima detektierbar; Zuordnung zu fehlerhaften Heliostaten nicht möglich; Wiederholrate abhängig von Durchfahrge- schwindigkeit, aber ca. im Bereich von indirektem Schwenkbalkenverfahren	Permanente (online) Messung und direktes Messprinzip; Auf Unregelmäßigkeiten bei der Heliostat-Orientierung kann schnell reagiert werden	Nur sehr bedingt möglich; Messung dauert 7-10min; Stabile Bedingungen erforderlich; Messungen beeinflussen Receiverbetrieb; Häufige Messungen reduzieren Stromproduktionspotential	Bei großer Apertur, können Informationen auf dem Strahlungsschutz keine Hinweise auf Bewegungen von Heliostaten innerhalb des Receivers liefern; Separate Systeme zur Heliostatüberwachung könnte dieses Problem lösen	Sehr gute Eigenschaften durch permanente Messung und direktes Messprinzip; Auf Unregelmäßigkeiten bei der Heliostat-Orientierung kann schnell reagiert werden

<b>2: Geringe Gesamtkosten:</b>	siehe ggf. Kostentabschätzungen ggf. in den entsprechenden Kapiteln		siehe ggf. Kostentabschätzungen ggf. in den entsprechenden Kapiteln			
<b>Anforderungen:</b> 3: Geringe Anfälligkeit des Systems gegenüber den zu erwartenden Belastungen	Indirektes Messsystem zeigt geringen Verschleiß; lange Betriebserfahrung; Schwenkverfahren muss ordnungsgemäß ausgelegt werden; Bauteile die konvektiven Verlusten des Receivers ausgesetzt sind gesondert schützen	Indirektes Messsystem zeigt geringen Verschleiß; sensible Messtechnik; Schwenkverfahren muss ordnungsgemäß ausgelegt werden; Bauteile die konvektiven Verlusten des Receivers ausgesetzt sind gesondert zu schützen	Zusätzlich zu Wärmeeinträgen keine zusätzlichen Belastungen erwartet; hoher Wartungsaufwand ist mit Laufzeitausfall verbunden	Trennung von Ort der Messung und der Applikation führt zu geringen überschaubaren Belastungen; Windlasten problematisch; gesonderter Schutz der Fläche mit Lambertschen Eigenschaften notwendig	Keine degradierbaren Teile; erfordert detaillierte Kenntnis über den Zustand des Feldes und jede Menge Messdaten; Reflektivitätsmessung problembehaftet	Zusätzlich zu Wärmeeinträgen keine zusätzlichen Belastungen für Radiometer erwartet; hoher Wartungsaufwand ist mit Laufzeitausfall verbunden; sonst keine degradierbaren Teile; erfordert detaillierte Kenntnis über den Zustand des Feldes und jede Menge Messdaten; Reflektivitätsmessung problembehaftet
4: Geringe Komplexität des Messsystems	Hochgradig automatisiert; Bewegte Teile erschweren den Einsatz mit steigender Receivergröße	Durch Direktmessung keine Korrekturen erforderlich; Automatisierte Messung möglich; Zuordnung von Messwerten und -Ort erfordert zusätzliche Überwachungsgeräte; Bewegte Teile erschweren den Einsatz mit steigender Receivergröße	Durch direkte Messung sehr einfach und solide; Keine Korrekturen durch Direktmessung; Kühlleitungen der Radiometer in der heißen Zone des Receivers erhöhen den Aufwand	Sehr einfaches und solides Messsystem; Keine bewegten Teile; Messung kann automatisiert werden; Turm und sonstige Vorrichtung zwischen Receiver und externem Target müssen gesondert geschützt werden; Sehr einfach nachrüstbar	Erfordert fast keine zusätzlichen Teile; einfaches Messsystem ohne komplizierte Messtechnik oder Antriebe; Trennung des Orts der Messung von Receiver; ohne bewegte Teile; einfach nachrüstbar	Kühlleitungen der Radiometer in der heißen Zone des Receivers erhöhen den Aufwand.; sonst einfaches Messsystem ohne komplizierte Messtechnik oder Antriebe; Ohne bewegte Teile; Simulationsergebnisse sind zu kontrollieren
5: Entwicklungsstand bzw. - Aufwand bis zur Marktreife	Je nach Auslegung der Konstruktion gute bzw. schlechte Betriebserfahrungen; Sachgemäße Auslegung erfordert weiteren konstruktiven Aufwand (Temperaturbelastung, Wärmedehnung)	Messsystem wurde erfolgreich experimentell getestet; Vorhandene Betriebserfahrung; Je nach Konstruktion gute bzw. schlechte Erfahrungen; Sachgemäße Auslegung erfordert weiteren konstruktiven Aufwand (Temperaturbelastung, Wärmedehnung)	Bereits in kommerziellem Receiver getestet; Radiometer im Handel verfügbar; Unterbringung von Radiometern und Kühlsystem bei gewissen Receivertechnologien schwierig	Experimentelle Erprobung steht noch aus; Betriebserfahrung von ProHERMES teilweise übertragbar; Grenzen des Messsystems müssen noch untersucht werden; Kühlung des Targets notwendig, ist noch nicht geklärt	Messsystem zeigt gute Übereinstimmung bei ersten Tests; Betriebserfahrung von ProHERMES teilweise übertragbar; Keine zusätzlichen Teile bedeutet so gut wie kein Entwicklungsaufwand; Automatisierung sollte vorgesehen werden	Unterbringung von Radiometern und Kühlsystem bei gewissen Receivertechnologien schwierig; Betriebserfahrung teilweise übertragbar; Simulation zeigt gute Übereinstimmung bei ersten Tests; geringer Entwicklungsaufwand; Automatisierung sollte vorgesehen werden

**Tabelle 7.2:** Bewertung von Technologien zur Strahlungsflussdichtemessung von Receivern großer, kommerzieller, Solarturmkraftwerke

	Schwenkbalken-Techn.		Technologien ohne bewegte Teile			
	Indirekt	Direkt	Direkt	Indirekt	Simulation...	
Messprinzip:						
Verfahren:	Schwenkbalken als weißes Target	Schwenkbalken mit Flussdichtesensoren	Verteilung fest installierter Sensoren	Mit feststehendem Target (fixed bar scan)	gestützt durch Messung auf dem Strahlungsschutz	gestützt durch Direktmessung
<b>Messaufgabe:</b>						
1A: Bestimmung Flussdichteverteilung	(++)	(+)	(-/0) *	(+)	(0/+) **	(0/+) **
1B: Bestimmung solar. Eingangsleistung	(++)	(++)	(0/+) *	(+)	(0/+) **	(+/+) **
1C: Kraftwerksregelung	(+)	(+)	(0/+) *	(-)	(0/+) **	(+/++) **
<b>2: Geringe Gesamtkosten:</b>	(0)	(0)	(+/0) *	(+)	(++/+) **	(+/0) **
<b>Anforderungen:</b>						
3: Geringe Anfälligkeit des Systems gegenüber Belastungen	(0)	(0)	(+)	(+)	(+)	(+)
4: Geringe Komplexität des Messsystems	(+)	(+)	(+/0) *	(++)	(++)	(+)
5: Entwicklungsstand bzw. -Aufwand:	(+)	(+)	(+/+) *	(0)	(+)	(+)
<b>Punkte***:</b>	( 12 )	( 10 )	( 4 / 7 )*	( 8 )	( 9 / 13 )**	( 10 / 12 )**

\* Einsatz weniger/ vieler Radiometer

\*\* Bei fehlender / ausreichender Information über Zielpunkte, aber vielen / wenigen Stützpunkten

\*\*\* 
$$Punkte = \sum g_{Vergleichskriterium} \cdot Punkte_{Vergleichskriterium}$$

Mit  $g_{Vergleichskriterium}$ : Gewichtungsfaktor des Vergleichskriteriums

- $g_{\text{Festforderungen (Vergleichskriterium 1-3)}}$ : 2
- $g_{\text{Wunschforderungen (Vergleichskriterium 4-5)}}$ : 1



## 8 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden alternative Messsysteme zum derzeit verwendeten Schwenkbalkenverfahren zur Überwachung des Betriebs und Charakterisierung der Strahlungsbelastung von Receivern kommerzieller solarthermischer Turmkraftwerke untersucht und weiterentwickelt. Wie Tabelle 7.2 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die untersuchten Messverfahren stark hinsichtlich der Eignung für die sie gestellten Messaufgaben.

Zur Bestimmung örtlich (hoch-) aufgelöster Flussdichteverteilungen (Messaufgabe 1A) eignet sich z.B. lediglich die indirekte Messmethode mit Schwenkbalken sehr gut. Das auf dieser Methode beruhende Flussdichtemesssystems ProHERMES wurde darüber hinaus bereits erfolgreich bei der Charakterisierung mehrerer Testreceiver auf der PSA eingesetzt. Der Einsatz in kommerziellen Anlagen erfordert allerdings noch die sachgemäße Auslegung der Konstruktion für die zu erwartenden Abmessung zukünftiger Receivesysteme und damit weiteren konstruktiven Aufwand. Dahingegen ungeeignet für diese Aufgabe zeigt sich die Direktmessung mit wenigen verteilten Sensoren, aufgrund der gegebenenfalls zu erwartenden hohen Abweichungen durch die nötige Interpolation einer geringen Anzahl an Stützstellen. Die weiteren genannten Methoden eignen sich allesamt befriedigend bis gut für die Bestimmung örtlich (hoch-) aufgelöster Flussdichteverteilung.

Zur Bestimmung der solaren Eingangsleistung bzw. Inputleistung eines Receivers (Messaufgabe 1B) zeigen sich besonders die Schwenkbalkenmethoden als besonders zweckdienlich. Die Messung der genannten Größe erreicht man dabei einfach durch Integration der Messwerte über der Aperturfläche, wobei ihnen die hohe Auflösung der gemessenen Flussdichteverteilung eine Messunsicherheit von größer gleich 5% garantiert. Von den restlichen Verfahren zeigt sich Keines weder als besonders dienlich noch unbrauchbar für diese Messaufgabe. Je nach Anzahl der bekannten Stützstellen, und damit abhängig vom Aufwand bzw. den vorherrschenden Bedingungen, ist die Messung der Inputleistung auch mit diesen Systemen befriedigend bis gut möglich.

Ähnliches kann man auch für die Kraftwerksregelung bzw. fortlaufend wiederholbare Messungen festhalten. Außer der indirekten Methode mit feststehendem Target (Fixed-Bar-Scan), deren Messung ca. 7 min dauert und dabei stabile Bedingungen erfordert, erweisen sich alle weiteren Messmethoden für einen Dauereinsatz als gut verwendbar. Besonders hervorstechend sind dabei die Methoden mit verteilten Radiometern mit oder ohne Simulation. Bei Einsatz ausreichend vieler Sensoren zeigen diese besonders gute bis sehr gute Eigenschaften zur Kraftwerksregelung aufgrund der möglichen permanenten (Online-) Messung der Strahlungsflussdichte und des direkten Messprinzips.

Betrachtet man die Verfahren individuell, lässt sich festhalten, dass die Simulation der Flussdichteverteilung gestützt durch direkte oder indirekte Messungen für alle Messaufgaben gute bis sehr gute Eignung besitzt. Vorausgesetzt man geht von einer ausreichenden Anzahl von Sensoren bzw. Stützstellen zur Durchführung der Messprinzipien aus. Darüber hinaus fällt das Verfahren durch seine geringen zu erwartenden Gesamtkosten, seine geringe Komplexität und die Erfüllung der genannten Wunschforderungen auf.

Das Fixed-Bar-Scan-Verfahren sowie die direkte Messung über verteilte Sensoren werden hinsichtlich der Messgenauigkeit als nicht in allen Fällen überzeugend bewertet, weshalb sie die schlechtesten Gesamtbenotungen aufweisen (siehe Punkte, Tabelle 7.2). Dahingegen erfüllen sie die restlichen Anforderungen im Allgemeinen gut. Aufgrund der örtlichen Tren-

nung der Messung von der Apertur des Receivers, erfüllt das Fixed-Bar-Scan-Verfahrens vor allem das Kriterium einer geringen Komplexität des Messsystems, auch wenn der Turm und sonstige Vorrichtung zwischen Receiver und externem Target gesondert geschützt werden müssen. Bezüglich der Direktmessung sei außerdem darauf hinzuweisen, dass diese Methode bereits über wertvolle Betriebserfahrung verfügt, da dieses Messsystem bereits einen Einsatz in kommerziellen Turmkraftwerken erhalten hat.

Über die Schwenkbalken-Verfahren ist zu sagen, dass sie besonders durch ihre gute bis sehr gute Genauigkeit hinsichtlich Messaufgaben 1A und 1B hervorstechen. Für die reine Betriebsüberwachung erweisen sie sich ebenfalls als geeignet aber relativ aufwendig, weshalb sie dafür nur eine mittelmäßige Benotung erhalten. Des Weiteren werden für deren Umsetzung ggf. höhere Kosten und eine höhere Anfälligkeit hinsichtlich der zu erwartenden Belastungen erwartet.

Wie bereits in Kapitel 7 erwähnt wurde, stellen die durchgeführten Bewertungen keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Aus diesem Grund muss die Analyse und die Bewertung der Messverfahren, bei der Auslegung eines Flussdichtemesssystems für ein spezifisches Turmkraftwerk mit einer bestimmten Receiver-Technologie, gegebenenfalls individuell angepasst werden.

## Anhang

### A Zusatzmaterial zur Untersuchung der Fixed-Bar-Scan-Methode

#### A.1 Simulationen zur Auswertung örtlicher und zeitlicher Fehlereinflüsse während der Messung

**Tabelle A.2:** Übersicht über die Koordinaten der verwendeten Zielpunkte und Zeitschritte der durchgeführten Simulationen

Name	AP-Koordinaten <sup>1</sup>		Zeitpunkt	Name	AP-Koordinaten <sup>1</sup>		Zeitpunkt
	x / y / z [m]				x / y / z [m]		
AP0k0	0 / 0 / 60		8:00:00	AP4k0	-4,0 / 0 / 60		8:02:40
AP0k5	-0,5 / 0 / 60		8:00:20	AP4k5	-4,5 / 0 / 60		8:03:00
AP1k0	-1,0 / 0 / 60		8:00:40	AP5k0	-5,0 / 0 / 60		8:03:20
AP1k5	-1,5 / 0 / 60		8:01:00	AP5k5	-5,5 / 0 / 60		8:03:40
AP2k0	-2,0 / 0 / 60		8:01:20	AP6k0	-6,0 / 0 / 60		8:04:00
AP2k5	-2,5 / 0 / 60		8:01:40	AP6k5	-6,5 / 0 / 60		8:04:20
AP3k0	-3,0 / 0 / 60		8:02:00	AP7k0	-7,0 / 0 / 60		8:04:40
AP3k5	-3,5 / 0 / 60		8:02:20	AP7k5	-7,5 / 0 / 60		8:05:00

<sup>1</sup> im Turmkoordinatensystem mit Turmwand als Ursprung; <sup>2</sup> Solarzeit

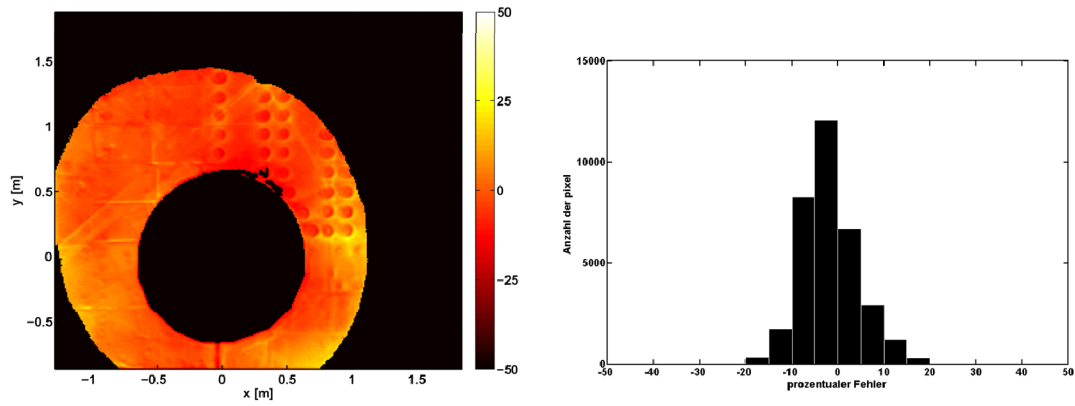
#### A.2 Koordinaten und Versätze der Schwerpunkte und Aimpoints bei den Tests zur Durchführung des Messverfahrens mit einzelnen Heliostaten

**Tabelle A.3:** Ergebnisse zum Verlaufs der Ziel- und Schwerpunkte beim Test des fixed bar-Verfahrens mit Heliostat H500 am 27. April 2010, 11:02:36 – 11:04:16

AP Nr.	AP		SP_gui		SW_gui ( $\Delta x_{  \_gui}$ )		Versatz_gui ( $\Delta\_gui$ )		Versatz_autoD ( $\Delta\_autoD$ )	
	X [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [mm]	y [mm]	x [mm]	y [mm]
1	-2,0	0,0	-1,920	0,015	0,469	-0,054	-31	-54	-	-
2	-1,5	0,0	-1,451	-0,039	0,444	0,087	-56	87	-	-
3	-1,0	0,0	-1,007	0,048	0,618	0,032	118	32	-	-
4	-0,5	0,0	-0,389	0,080	0,417	-0,163	-83	-163	-	-
5	0,0	0,0	0,027	-0,083	0,417	0,158	-83	158	-78	145
6	0,5	0,0	0,444	0,074	0,609	-0,208	109	-208	81	-185
7	1,0	0,0	1,052	-0,134	0,448	0,092	-52	92	-64	106
8	1,5	0,0	1,501	-0,042	0,566	0,047	66	47	94	53
9	2,0	0,0	2,067	0,005	0,406	0,074	-94	74	-78	79
10	2,5	0,0	2,473	0,079	0,386	-0,145	-114	-145	-91	-145
11	3,0	0,0	2,859	-0,067	0,578	0,052	78	52	-	-
12	3,5	0,0	3,438	-0,014	0,469	0,091	-31	91	-	-
13	4,0	0,0	3,906	0,077	-	-	-	-	-	-
<b>Mittelwert [mm] :</b>							-28	3	-23	9
<b><math>\sigma_{x,y}</math> [mm] :</b>							84	118	86	139
<b><math>\sigma_{x,y}</math> [mrad] :</b>							0,9	1,3	0,9	1,5

## B Zusätzliche Ergebnisse der Messungen auf dem Strahlungsschutz

### B.1 Ergebnisse und Vergleich der Messungen auf dem Strahlungsschutz mit dem Referenzsystem für den 23.06.2010



**Abbildung B.1:** Messung 23.06.2010, 12:48 Uhr: Prozentuale Abweichung der Ergebnisse der Messung auf dem Strahlungsschutz vom Referenzmesssystem (links); Verteilung der Häufigkeit des Messfehlers (rechts)

## C Eingangsdaten der Simulationen

### C.1 Gerichteter Reflexionsgrad

**Tabelle C.3:** Gerichteter Reflexionsgrad einzelner Heliostate

Messung:	18.05.2010		01.06.2010		17.06.2010		17.06.2010	
Heliostat Nr.	$\bar{m}$	s	$\bar{m}$	s	$\bar{m}$	s	$\bar{m}$	s
202	90,8	0,4	-	-	91,8	0,2	89,7	0,6
206	92,2	0,1	-	-	92,5	0,2	90,2	0,5
207	91,4	0,3	-	-	92,4	0,3	90,4	0,4
209	91,3	0,4	85,8	0,9	92,2	0,3	91,8	0,3
402	91,7	0,5	-	-	92,2	0,4	89,9	0,6
406	92,3	0,3	-	-	92,5	0,3	90,3	0,2
407	91,8	0,4	87,6	0,8	92,3	0,4	90,0	0,9
413	91,5	0,3	86,9	1,3	92,1	0,3	90,6	0,3
606	92,2	0,2	87,8	1,0	92,5	0,3	90,6	0,4
607	91,0	0,4	88,6	1,1	92,6	0,2	90,5	0,4
610	92,9	0,1	88,3	0,8	92,7	0,2	90,8	0,5
611	91,3	0,4	87,5	1,0	92,5	0,3	90,6	0,3
807	93,0	0,3	90,4	0,8	92,4	0,1	91,0	0,2
810	93,6	0,2	89,3	0,6	92,7	0,2	91,1	0,4
813	91,4	0,5	88,2	1,0	92,2	0,3	90,6	0,5
814	92,9	0,2	89,4	0,6	92,5	0,2	91,1	0,6
1005	93,3	0,4	90,2	0,7	92,8	0,4	90,8	0,5
1010	93,7	0,2	90,5	0,4	92,0	0,4	91,4	0,2
1013	91,7	1,3	90,5	0,7	90,7	1,2	88,9	1,0
1018	92,4	0,7	90,1	0,7	92,0	0,4	90,2	0,7



## D Kalibration des Kendall-Radiometers

Der Kalibrationsfaktor des Kendall-Radiometers ergibt sich als eine exponentielle Regression der Korrelation zwischen ausgelesenem Wert für das Thermopile des Kendall-Radiometers und der korrespondierenden Strahlungsflussdichte:

$$K_{calib} = c_1 + c_2 \cdot e \left( \kappa \cdot \frac{TP}{[mV]} \right) \quad (D.1)$$

Mit:  $K_{calib}$ : Kalibrationsfaktor [kW/m<sup>2</sup>]

$c_1$ : 60,5107 [kW/m<sup>2</sup>]

$c_2$ : -1,3553 [kW/m<sup>2</sup>]

$\kappa$ : -16,0082

$TP$ : Aus der Messdatenerfassung ausgelesener Wert des Thermopile [mV]

Für weitere Informationen sind die Dokumente *KendallManual.pdf* und *Calibration\_Kendall\_20100603.xls* den Ergebnissen dieser Arbeit beigelegt. Kontakt: Marc Röger, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Plataforma Solar de Almería, Apartado 39, 04200 Tabernas, Spanien

## Literaturverzeichnis

- AMSBECK, L., DENK, T., EBERT, M., GERTIG, CH., HELLER, P., HERRMANN, P., JEDAMSKI, J., JOHN, J., PITZ-PAAL, R., PROSINEČKI, T., REHN, J., REINALTER, W. and UHLIG, R.: *Test of a Solar-Hybrid Microturbine System and Evaluation of Storage Deployment*. 16<sup>th</sup> SolarPACES, Perpignan, France, Sept. 21. -24., 2010
- BAEHR, H. D. and STEPHAN, K.: *Wärme-und Stoffübertragung*. Springer-Lehrbuch, Deutsch, 6. neu bearb. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, 2008
- BALLESTRÍN, J. and MONTERREAL, R.: *Hybrid Heat Flux Measurement System for Solar Central Receiver Evaluation*. Energy, Vol. 29, Issues 5-6, Pages 915-924, 2004
- BELHOMME, B., AHLBRINK, N., PITZ-PAAL, R., SCHWARZBÖZL, P. and ULMER, S.: *STRAL–Hochgenaue Strahlungsflussdichte-Simulation von Heliostatfeldern*. Sonnenkolloquium 2009, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Köln, Deutschland, 2009
- BELHOMME, B., PITZ-PAAL, R., SCHWARZBÖZL, P. and ULMER, S.: *A New Fast Ray Tracing Tool for High-Precision Simulation of Heliostat Fields*. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 131, Issue 3, (8 Pages), 2009
- BUCK, R., LÜPFERT, E. and TÉLLEZ, F.: *Receiver for Solar-Hybrid Gas Turbine and CC Systems (REFOS)*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Pfaffenwaldring 38-40, D-70569 Stuttgart, Deutschland, 2000
- BUCK, R. and TEUFEL, E.: *Comparison and Optimization of Heliostat Canting Methods*. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 131, Issue 1, (8 Pages), 2009
- CARASSO, M. and BECKER, M.: *Performance Evaluation Standards for Solar Central Receivers*. Englisch, Aufl. 3, Springer-Verlag, Berlin, 1990
- FERNÁNDEZ-RECHE, J., SÁNCHEZ, M., ALONSO, M., CAÑADAS, I., CHENLO, F., RODRÍGUEZ, J. and BALLESTRÍN, J.: *Concentrating PV: An Alternative to Calorimeters for Measuring High Solar Flux Densities*. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 130, Issue 4, (3 Pages), 2008
- GEUDER, N., JANOTTE, N. and WILBERT, S.: *Precise Measurements of Solar Beam Irradiance Through Improved Sensor Calibration*. 15<sup>th</sup> SolarPACES, Berlin, Germany, Sept. 15.- 18., 2009
- HECHT, E.: *Optik*. Deutsch, 4. überarb. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, Wien, 2005
- HELLER, P., BUCK, R., UHLIG, R. and JEDAMSKI, J.: *Stand der Entwicklung von Solar-Hybriden Gasturbinensystemen für Kraft-Wärmekopplung und Kombiprozesse*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Plataforma Solar de Almería, Apartado 39, 04200 Tabernas, Spanien, 2008
- JONES, S. A., EDGAR, R. M. and HOUSER, R. M.: *Recent Results on the Optical Performance of Solar Two Heliostats*. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), 1994
- LEMPERLE, G.: *Effect of Sunshape on Flux Distribution and Intercept Factor of the Solar Tower Power Plant at Almería*. SSPS technical report No. 3/82, Deutsche Forschungs-und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln, Deutschland, 1982
- LINDNER, C. and PUENTE LEÓN, F.: *Segmentierung Strukturierter Oberflächen mittels Variabler Beleuchtung (Segmentation of Structured Surfaces by Using Variable Illumination)*. tm-Technisches Messen, Vol. 73, Issue 4, Pages 200-207, 2006



- LÜPFERT, E., HELLER, P., ULMER, S., MONTERREAL, R. and FERNÁNDEZ, J.: *Concentrated Solar Radiation Measurement with Video Image Processing and Online Fluxgauge Calibration*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Plataforma Solar de Almería, Apartado 39, 04200 Tabernas, Spanien, 2000
- MEYEN, S., FERNANDEZ, A., KENNEDY, C. and LÜPFERT, E.: *Standardization of Solar Mirror Reflectance Measurements–Round Robin Test*. 16<sup>th</sup> SolarPACES, Perpignan, France, Sept. 21.- 24., 2010
- MEYEN, S., LÜPFERT, E., PERNPEINTNER, J., FEND, T. and SCHIRICKE, B.: *Optical Characterization of Reflector Material for Concentrating Solar Power Technology*. 15<sup>th</sup> SolarPACES, Berlin, Germany, Sept. 15.- 18., 2009
- MORITZ, H.: *Lexikon der Bildverarbeitung*. Deutsch, Hüthig, Heidelberg, 2003
- NETTLAU, J., PFÄNDER, M. and RÖGER, M.: *Entwicklung und Erprobung eines Messsystems zur Kontinuierlichen Strahlungsmessung an Strahlungsempfänger Solarer Turmkraftwerke*. Diplomarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V., Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Plataforma Solar de Almería, Apartado 39, 04200 Tabernas, Spanien, 2008
- NEUMANN, A., WITZKE, A., JONES, S. A. and SCHMITT, G.: *Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles*. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 124, Pages 198 - 204, 2002
- PACHECO, J., HOUSER, R. and NEUMANN, A.: *Concepts to Measure Flux and Temperature for External Central Receivers*. Joint Solar Engineering Conference, ASME, 1994
- PAHL, G. and BEITZ, W.: *Konstruktionslehre: Grundlagen*. Deutsch, Springer-Lehrbuch, 7. Aufl., Springer, Berlin (u.a.), 2007
- REDA, I. and ANDREAS, A.: *Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications*. Solar Energy, Vol. 76, Issue 5, Pages 577-589, 2004
- ROMERO, M., BUCK, R. and PACHECO, J. E.: *An Update on Solar Central Receiver Systems, Projects, and Technologies*. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 124, Issue 2, Pages 98, 2002
- SACHS, L.: *Angewandte Statistik : Anwendung Statistischer Methoden*. Deutsch, Springer-Lehrbuch, 11. überarb. u. aktual. Aufl., Springer, Berlin, 2004
- SCHAPITZ, T. and RÖGER, M.: *Voruntersuchung SOLUGAS*. Interner Bericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Plataforma Solar de Almería, Apartado 39, 04200 Tabernas, Spanien, 2010
- SCHWARZBÖZL, P., BELHOMME, B., BUCK, R., UHLIG, R., AMSBECK, L. and SCHMITZ, M.: *Simulation Solarer Turmsysteme*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland, 2008
- SCHWARZBÖZL, P., BUCK, R., SUGARMEN, C., RING, A., MARCOS CRESPO, M. J., ALTWEGG, P. and ENRILE, J.: *Solar Gas Turbine Systems: Design, Cost and Perspectives*. Solar Energy, Vol. 80, Issue 10, Pages 1231-1240, 2006
- SVEEN, J. K.: *An Introduction to MatPIV v. 1.6. I*. Departement of Math. Mechanics and applied Mathematics, University of Oslo, Norway, 2004
- ULMER, S. and RÖGER, M.: *Automatisierte hochaufgelöste Vermessung der Spiegelfehler von Heliostaten*. 2007
- ULMER, S.: *Messung der Strahlungsflussdichte-Verteilung von Punktkonzentrierenden Solarthermischen Kraftwerken*. Fortschr.-Ber. VDI, Nr. 510, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004
- ULMER, S., LÜPFERT, E., PFÄNDER, M. and BUCK, R.: *Calibration Corrections of Solar Tower Flux Density Measurements*. Energy, Vol. 29, Issues 5-6, Pages 925-933, 2004

- ULMER, S., RÖGER, M., PRAHL, C., BELHOMME, B. and PFÄNDER, M.: *Messtechnik zur Qualitätssicherung und Betriebsoptimierung Solarer Turmkraftwerke*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung, Plataforma Solar de Almería, Apartado 39, 04200 Tabernas, Spanien, 2008
- WEINREBE, G.: *Technische, Ökologische und Ökonomische Analyse von Solarthermischen Turmkraftwerken*. Univ., Diss. Stuttgart, IER Inst. f. Energiewirtschaftl. u. Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2000
- WINTER, C. J., SIZMANN, R. L. and VANT-HULL, L. L.: *Solar Power Plants: Fundamentals, Technology, Systems, Economics*. Englisch, Springer-Verlag, Berlin, 1991