

Messtechnik zur Qualitätssicherung und Betriebsoptimierung solarer Turmkraftwerke

Steffen Ulmer*, Marc Röger, Christoph Prah, Boris Belhomme, Markus Pfänder

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.,
Institut für Technische Thermodynamik, Solarforschung,
Plataforma Solar de Almería, Apartado 39, 04200 Tabernas, Spanien

Zusammenfassung

Im Projekt SAPHIR wurden optische Messsysteme zur Unterstützung bei der Heliostat-Prototypen-Entwicklung, bei der Facetten- und Heliostat-Montage und zur Endabnahme von Heliostatenfeldern für solare Turmkraftwerke entwickelt. Diese Systeme beruhen auf photogrammetrischen und deflektometrischen Methoden. Zudem wurden zur Überwachung einer optimierten Betriebsstrategie eine neue Methode zur Flussdichtemessung auf offenen volumetrischen Receivern entwickelt und Temperaturmessungen (Infrarot-Thermografie) an einem Testreceiver durchgeführt. Zusätzlich wurde ein System zum Monitoring der Heliostat-Ausrichtung entwickelt. Ein neues Raytracing-Programm zur Verarbeitung hochauflöser Heliostatdaten dient sowohl zur Bewertung der Ergebnisse der optischen Messsysteme als auch zur Ermittlung optimierter Betriebsstrategien unter Berücksichtigung realer Heliostatfelddaten.

1 Einführung und Ziele

Für eine erfolgreiche Markteinführung von solarer Turmkraftwerken ist sowohl eine Unterstützung bei der Heliostat-Entwicklung, bei den Methoden zur Facetten- und Heliostat-Montage (Canting) sowie bei Strategien für einen effektiven und sicheren Betrieb des Heliostatenfeldes notwendig. Das DLR hat daher innerhalb des Projekts SAPHIR Lösungen für diese Fragestellungen entwickelt. Für die Prototyp-Entwicklung, den Aufbau und die Endabnahme von Heliostatenfeldern kommen deflektometrische und photogrammetrische Methoden zum Einsatz (Abschnitt 2). Zur Steuerung und Optimierung des Betriebs eines Turmkraftwerks werden Systeme zur Messung der Flussdichte- und Temperaturverteilung auf dem Receiver entwickelt und verwendet (Abschnitt 3).

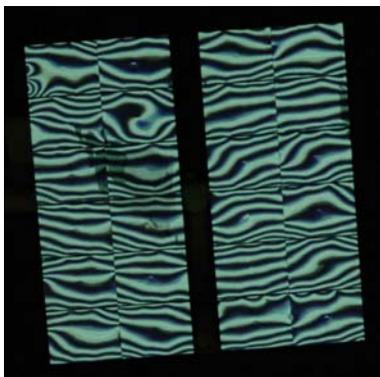


Bild 1: RRM-Beispiel eines im Heliostat gespiegelten Streifenmusters

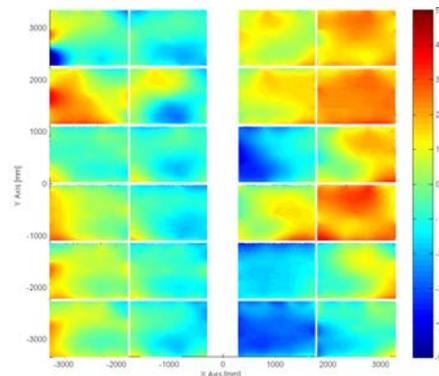


Bild 2: RRM-Messergebnis, dargestellt als Spiegelfehler in Elevationsrichtung in mrad

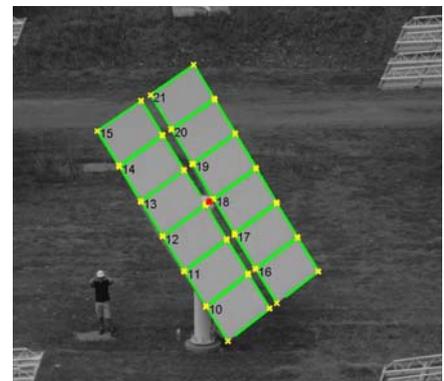


Bild 3: Heliostat mit detektierten Kanten (grün), Ecken (gelb) und Getriebe (rot)

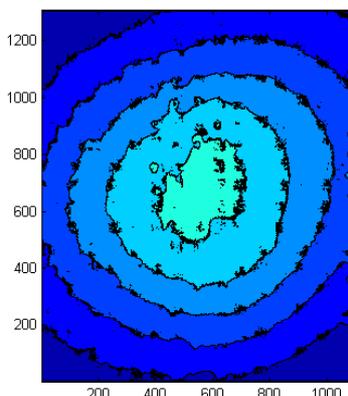


Bild 4: Flussdichteverteilung, gemessen auf der Oberfläche eines offenen, volumetrischen Receivern

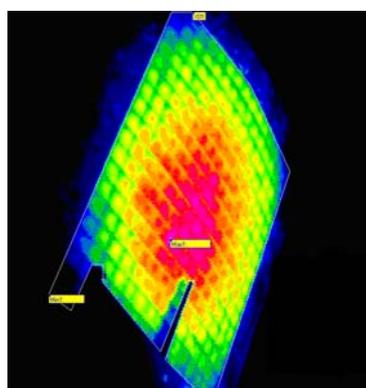


Bild 5: Beispiel einer Temperaturverteilung (Infrarot-Thermografie-Messung)

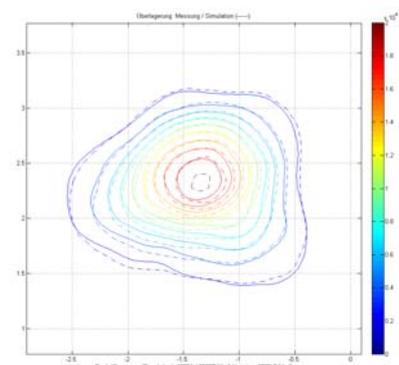


Bild 6: Überlagerte Darstellung von Messung und Simulation der Flussdichteverteilung eines Heliostaten

Zur Interpretation der Messergebnisse sowie zur Definition einer optimierten Betriebsstrategie mit realen Heliostatfelddaten wurde ein neues Raytracing-Programm, das die effiziente Verarbeitung hochaufgelöster Heliostat-Geometrien erlaubt, erstellt (Abschnitt 4).

2 Messmethoden für Entwicklung, Aufbau und Endabnahme

Raster-Reflexionsmethode. 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^[1]. 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 (Bild 1). Derzeit wird eine Auflösung von etwa 1000x1000 Messpunkten pro Heliostat mit einem Messfehler <0.1 mrad erreicht. Gegenüber bisherigen Verfahren (Laser-Scanner^[2], Photogrammetrie^[3]) bietet dieses Verfahren enorme Vorteile in Geschwindigkeit und Handhabung. Bild 2 zeigt als beispielhaftes Messergebnis die Spiegelfehler eines Heliostaten in Elevationsrichtung. Neben dieser hochaufgelösten Information der lokalen Steigungsfehler werden die individuellen Abweichungen der Facettenbrennweiten, der Facettenausrichtungen (Canting) und der Gesamtbrennweite im Programmablauf automatisch ermittelt und können dem Heliostat-Hersteller oder Feldbetreiber für entsprechende Korrekturmaßnahmen zur Verbesserung der optischen Qualität bereitgestellt werden. 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.

Photogrammetrische Facettenorientierung. Zur Vermessung der Facettenorientierung kann alternativ auch ein photogrammetrisches Verfahren mit automatischer Kantenerkennung verwendet werden^[4]. Bei dieser Entwicklung kann auf das aufwändige Bekleben des Heliostats mit Photogrammetrie-Zielmarken verzichtet werden. Stattdessen werden mittels automatischer Kantenerkennung die Facetteneckpunkte auf einem Foto detektiert und für die photogrammetrische Analyse verwendet (Bild 3). Im Gegensatz zur herkömmlichen Photogrammetrie, wo das Kamera um das Objekt bewegt wird, wird bei diesem Verfahren der Heliostat um den Azimut bewegt, und vom Turm aus Aufnahmen von den verschiedenen Heliostat-Ausrichtungen gemacht. Dies hat den Vorteil, dass kein Kran benötigt wird, und mit einem Messsystem auf dem Turm prinzipiell die Facettenorientierung aller Heliostate vermessen werden kann. Validierungsmessungen dieses System bestätigen, dass sich die Ausrichtung der Facetten auf durchschnittlich ± 1.6 mrad genau berechnen lassen. Diese automatisierte Messtechnik eignet sich insbesondere zur Vermessung von ganzen Heliostatfeldern, z. B. zur Kontrolle des Canting.

Konzentratorverformung. Zur Unterstützung bei der Prototypen-Entwicklung, Validierung von FEM-Modellen oder zur Messung der Konzentratorverformung unter Gravitation bei verschiedenen Elevationen werden hochgenaue Messungen an einem einzelnen Prototyp nachgefragt. Hierfür eignet sich die klassische Photogrammetrie mit aufgeklebten Zielmarken^[3]. Messungen an einem 40m²-Heliostat an der Solarturmanlage CESA-1 der PSA unter verschiedenen Elevationen ergaben gemittelte Messfehler (1-fache Standardabweichung) von 0,3 mm, und gemittelte maximale Messfehler von 0,6 mm. Es wurde festgestellt, dass sich die Heliostat-Eckpunkte bei Änderung der Elevation zwischen 10° und 90° (Zenit) um ca. 5 mm bewegen^[5].

3 Messmethoden zur Steuerung und Betriebsoptimierung

Zur Steuerung und Optimierung des Betriebs eines Turmkraftwerks ist die Kenntnis der solaren Flussdichte- und der Temperaturverteilung auf dem Receiver notwendig.

Flussdichtemesssystem. Im Rahmen des SAPHIR-Projekts wird ein neues Flussdichtemesssystem entwickelt, welches ohne Schwenkbalken auskommt. Dies ist vor allem für Receiver größerer Leistung von Bedeutung, wo eine Messung mit Hilfe großer beweglicher Teile zu aufwändig wäre. Das Testsystem misst die Helligkeitsverteilung direkt auf einem offenen volumetrischen Keramikreceiver (Bild 4). Hierzu wurde der winkelabhängige Reflexionsgrad des Receivermaterials untersucht, Kamera und spektrale Filter ausgewählt, und eine Methode zur orts aufgelösten Kalibration des erfassten Bildes entwickelt. Das Verfahren ist gerade in der Entwicklungsphase.

Thermografie-Messsystem. Infrarotthermografie wurde eingesetzt, um die Verteilung der Receiveroberflächentemperatur zu messen (Bild 5). Abschätzungen des Messfehlers durch reflektierte Solarstrahlung, Atmosphärenabsorption und Unsicherheiten im Absorber-Emissionsgrad wurden abgeschätzt. Er liegt für gängige langwellige IR-Kameras (8 – 12 μ m) zwischen 1,4 und 2,0% (400 – 1200°C). Messungen im Wellenlängenintervall $4,56 \pm 0,08$ μ m reduzieren den Fehler auf zwischen 0,7 und 1,2% (400 – 1200°C).

Messung der Heliostat-Orientierung. Zusätzlich ist eine Messmethode zur Überwachung des Heliostat-Trackings entwickelt worden. Hierfür werden aus Aufnahmen der Heliostate vom Turm mittels Kantenerkennung die Eckpunkte eines Heliostaten bestimmt (Bild 3) und daraus seine Orientierung berechnet. Die Fehleranalyse

eines für einen 88 m vom Turm entfernt stehenden Heliostaten ergab für die betrachteten Orientierungen (Elevation [0°; 80°]; Azimut [-60°; 60°]), dass 50% der Heliostat-Orientierungen mit einer Unsicherheit kleiner als 3 mrad und 80% mit einer Unsicherheit kleiner als 4 mrad gemessen werden. Auf diese Weise kann das Tracking überwacht und bei Inbetriebnahme die Tracking-Offsets ermittelt werden.

4 Simulationswerkzeug zur Interpretation von Messergebnissen und Definition einer optimierten Betriebsstrategie

Ein neu entwickeltes Raytracing-Programm namens STRAL (Solar Tower Raytracing Laboratory) erlaubt die effiziente Verarbeitung hochaufgelöster Datensätze von Heliostaten. Es ermöglicht eine wesentlich schnellere und genauere Simulation der tatsächlich auftretenden Flussdichteverteilungen (Bild 6) und wird sowohl zur Bewertung der Messergebnisse als auch zur Ermittlung optimierter Betriebsstrategien unter Verwendung dynamischer Zielpunkte eingesetzt^[6].

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des SAPHIR-Projekts wurden verschiedene, auf spezifische Fragestellungen angepasste, optische Messmethoden für solare Turmkraftwerke entwickelt. Die Messsysteme für das Solarfeld haben einen hohen Automatisierungsgrad, was die Vermessung einer großen Anzahl von Heliostaten innerhalb kurzer Zeit ermöglicht. Zudem wurden zur Steuerung und Betriebsoptimierung Systeme zur Messung von Flussdichte- und Temperaturverteilungen von kommerziellen Receivern entwickelt und angewendet. Durch den zentralen Einsatz der Hardwarekomponenten für die Messung des gesamten Felds beziehungsweise Receivern sind die spezifischen Kosten dieser Messsysteme gering. Ein Raytracing-Programm zur Verarbeitung der hochaufgelösten Geometriedaten wurde entwickelt und validiert.

Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Projekts SAPHIR (Förderkennzeichen UM060068) finanziell unterstützt.

Literatur

^[1] Petz, M., Tutsch, R.: Rasterreflexions-Photogrammetrie zur Messung spiegelnder Oberflächen. TM-Technisches Messen 71 (2004), Seite 7-8, Oldenbourg Verlag.

^[2] Jones, S.; Gruetzner, J.; Houser, R.; Edgar, R.; Wendelin, T.; VSHOT Measurement Uncertainty and Experimental Sensitivity Study, Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Volume 3, July 27 - August 1, 1997, Honolulu, pp. 1877-1882.

^[3] Pottler, K.; Lüpfert, E.; Johnston, G.; Shortis, M.; Photogrammetry: A Powerful Tool for Geometric Analysis of Solar Concentrators and Their Components. Journal of Solar Energy Engineering, Februar 2005, Volume 127, Issue 1, pp. 94-101.

^[4] Röger, M.; Prahl, C.; Ulmer, S.: Fast Determination of Heliostat Shape and Orientation by Edge Detection and Photogrammetry. Proc. 14th CSP SolarPACES Symposium 2008, March 4-7, Las Vegas, Nevada, 2008, CD-550-42709

^[5] Ulmer, S.; Röger, M.: Automatisierte hochaufgelöste Vermessung der Spiegelfehler von Heliostaten. In: 10. Kölner Sonnenkolloquium, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V., Köln, 21. Juni, 2007

^[6] Belhomme, B., Pitz-Paal, R., Schwarzbözl, P., Ulmer, S.: STRAL - A new fast ray tracing tool for high-precision simulation of heliostat fields. To be published in: Journal of Solar Energy Engineering.